

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

**“Diseño y construcción de una termoformadora con sistema de control de temperatura para replicar moldes de prótesis para la empresa APM ELECTRONICS”**

**AUTOR: Caluguillín Guamán Bryan Andrés**

**DIRECTOR: Ing. Byron Hernán Cortez Pazmiño**

**2023**



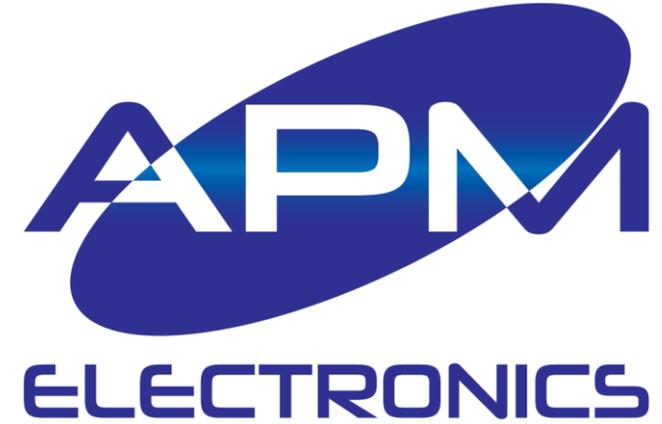


# CONTENIDO

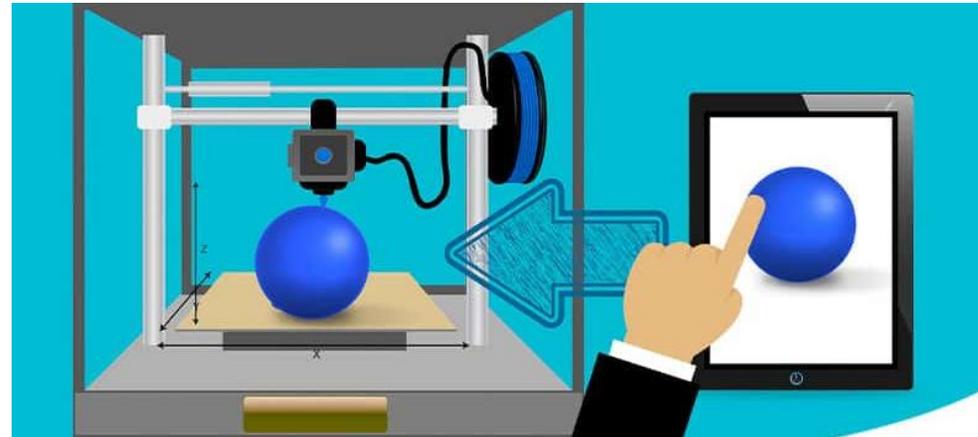
- Introducción
- Objetivos
- Desarrollo
- Pruebas y resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Trabajos Futuros



# Introducción



- APM ELECTRONICS
- Moldes de prótesis de hombros
- Manufactura 3D



Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Objetivos

Introducción

**Objetivos**

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

- **Objetivo general**
- Diseñar y construir una máquina termoformadora, con control de temperatura que permita deformar planchas de acrílico de 2, 3 y 4 mm de espesor para replicar moldes de prótesis de hombro.
- **Objetivos específicos**
- Obtener los requisitos funcionales del diseño de la máquina a partir necesidades del cliente mediante el uso de la matriz QFD.
- Realizar el diseño mecánico de la máquina termoformadora, mediante el uso de software CAD para obtener el concepto previo a construir.
- Diseñar un sistema de lazo cerrado para controlar la temperatura interna de la máquina termoformadora.
- Dimensionar y seleccionar los sensores y actuadores del sistema.
- Implementar el sistema de control de temperatura en la estructura mecánica del sistema, mediante la construcción de un tablero de control que permita visualizar las variables en tiempo real.



# Desarrollo

Número	Requerimiento	Importancia
1	Tamaño aproximado de la máquina 1.50 m x 0.80 m x 0.80 m.	5
2	Temperatura máxima de 200 °C para calentamiento de láminas.	5
3	La máquina alcanza la temperatura deseada en un tiempo menor a 10 minutos.	3
4	Capacidad para láminas de acrílico de 2, 3 y 4 mm de espesor.	4
5	Las láminas a termoformar pueden variar entre 0.35 m y 0.40 m de lado y deben ser de forma cuadrada.	4
6	Accionamiento automático de bomba de vacío.	1
7	Posicionamiento manual de la placa precalentada	4
8	Economizar al máximo el presupuesto	5

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

Número	Número de requerimiento	Actividad o parámetro	Importancia	Unidad
1	1, 2, 5, 7, 8	Dimensiones	5	cm
2	1	Masa total	2	Kg
3	4, 5	Espesor máximo de lámina de acrílico	4	mm
4	3, 4, 5	Tamaño y forma de láminas de acrílico	4	cm
5	2, 3	Máxima temperatura interna	4	°C
6	1, 2, 3	Tiempo de estabilización de temperatura	4	min
7	6, 8	Extracción de aire de la bomba de vacío	3	l/min



# Desarrollo

## Matriz QFD

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

		Importancia según cliente	Dimensiones	Masa total	Espesor máximo de material acrílico	Tamaño y forma de placas de acrílico	Máxima temperatura interna	Tiempo de establecimiento de temperatura	Extracción de aire con bomba de vacío
Requerimientos del cliente	Tamaño máximo de 1.50 x 0.8 x 0.8 m	5	◎	◎				○	
	Alcanzar 200°C para el calentamiento de láminas	5	△				◎	◎	
	Alcanzar la temperatura en un 10 minutos o menos	3				○	○	◎	
	Capacidad de trabajar con láminas de 2, 3 y 4 mm	4			◎	○			
	Trabajar con láminas cuadradas de 35 a 40 cm	4	◎		○	◎			
	Accionamiento automático de bomba de vacío	1							◎
	Posicionamiento manual de la placa pre calentada	4	△						
	Economizar el precio final	5	◎						△
Importancia técnica absoluta			135	45	48	57	54	87	14
Importancia técnica relativa			29	9	12	15	12	21	10
Prioridad			1	6	5	3	4	2	7



# Desarrollo

## *Características iniciales de la máquina*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Alto de la máquina	150	cm
Ancho de la máquina	70	cm
Profundidad de la máquina	70	cm
Temperatura mínima interna	25	°C
Temperatura máxima interna	200	°C
Espesor de placa de material base	2 – 3 – 4	mm
Voltaje de funcionamiento	110	V[AC]
Accionamiento del sistema de vacío	Por pedal	

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

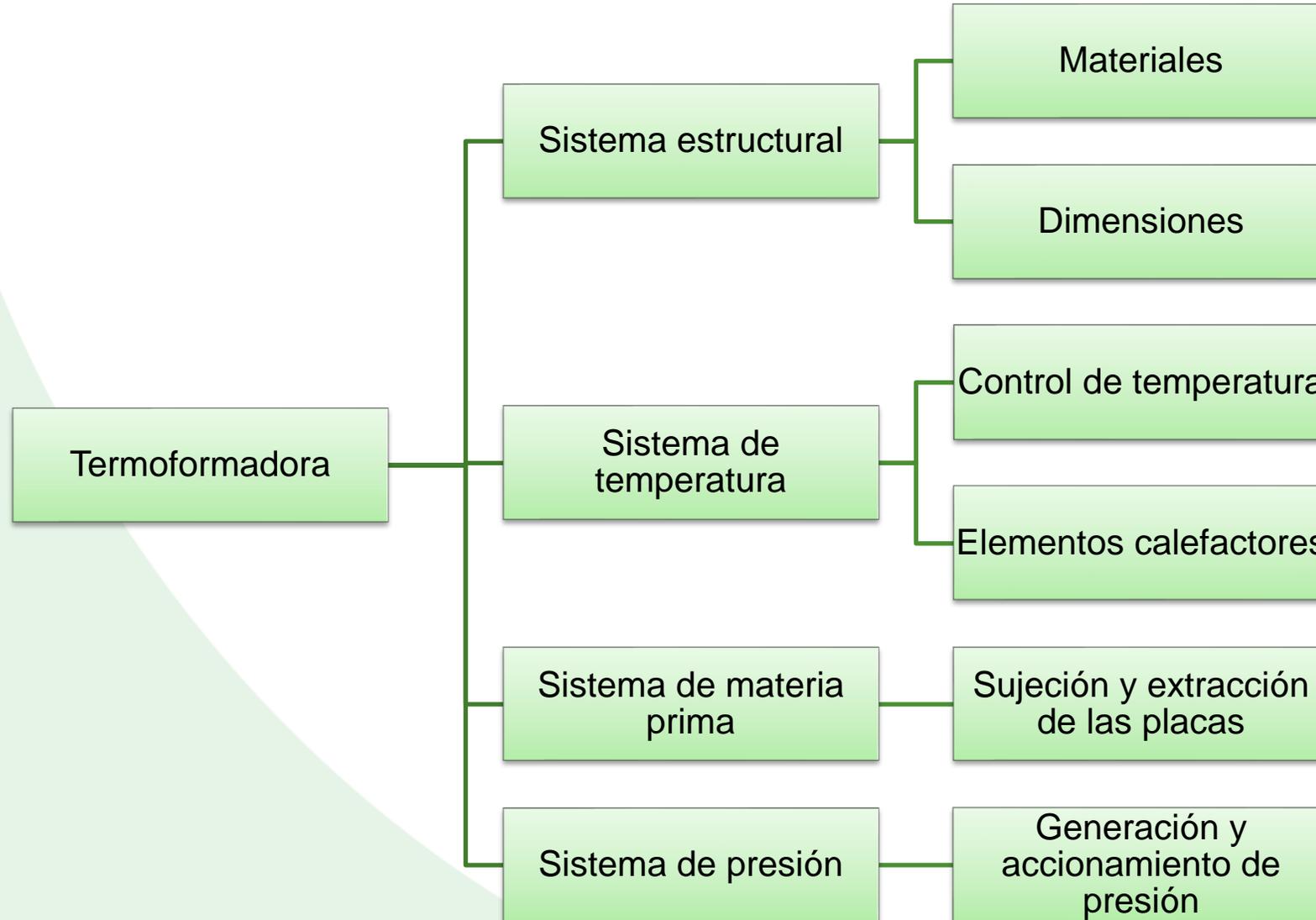
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Desarrollo

## *Características técnicas de las bombas de vacío*

<b>Característica</b>	<b>Quality QVP6002V</b>	<b>Everwell 1LVP-5MP</b>
Voltaje de funcionamiento (V)	110 – 220	115 – 220
Frecuencia (Hz)	50 – 60	50 – 60
Desplazamiento de aire (CFM <sup>3</sup> )	4.8 – 5.5	5
Velocidad de trabajo (RPM)	2800 – 3400	3440
Vacío máximo generado (Pa)	2	2
Precio (USD)	200	210
Tamaño (mm)	348x138x245	456x182x278

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

*Importancia de parámetros de la bomba de vacío*

	Precio	Desplazamiento de aire	Capacidad máxima de vacío	Tamaño	Voltaje de trabajo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Precio	-	2,5	2,5	5	5	16	<b>29%</b>
Desplazamiento de aire	2,5	-	2,5	5	5	16	<b>29%</b>
Capacidad máxima de vacío	2,5	2,5	-	5	2,5	13,5	<b>25%</b>
Tamaño	0	0	0	-	5	6	<b>11%</b>
Voltaje de trabajo	0	0	2,5	0	-	3,5	<b>6%</b>
					TOTAL	55	100%



# Desarrollo

*Matriz de selección de la bomba de vacío*

Parámetro de selección	Porcentaje	Quality QVP600 2V		Everwell 1LVP-5MP	
		Valor	Total	Valor	Total
Precio	29%	3	0,87	3	0,87
Desplazamiento de aire	29%	5	1,45	1	0,29
Capacidad máxima de vacío	25%	3	0,74	3	0,74
Tamaño	11%	5	0,55	1	0,11
Voltaje de trabajo	6%	3	0,19	3	0,19
		<b>Total</b>	<b>3,8</b>	<b>Total</b>	<b>2,2</b>

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

## *Características del diseño conceptual de la termoformadora*

<b>Característica</b>	<b>Valor o tipo</b>
Tamaño	150x70x70 cm
Material	Acero estructural
Elementos calefactores	Niquelinas
Sensor de temperatura	PT100 y MAX31865
Controlador	ATMEGA 328P
Sujeción de placas de acrílico	Pernos y tuercas mariposa
Bomba de vacío	Quality QVP600 2V
Accionamiento de bomba de vacío	Interruptor tipo pedal

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

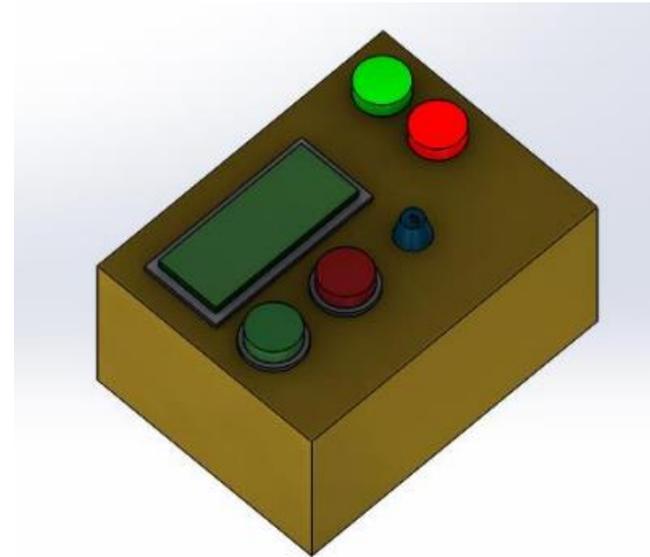
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Desarrollo

Introducción

Objetivos

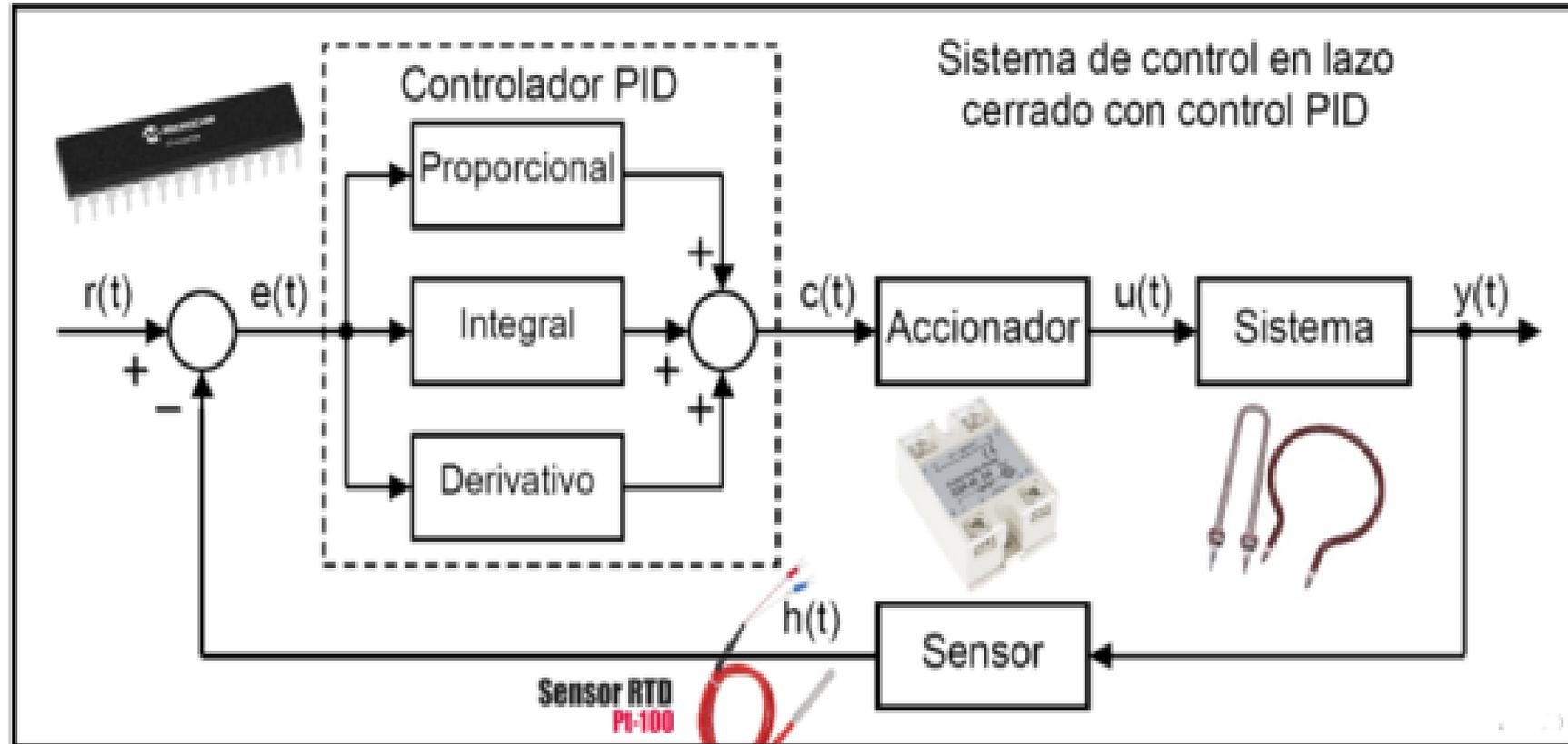
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

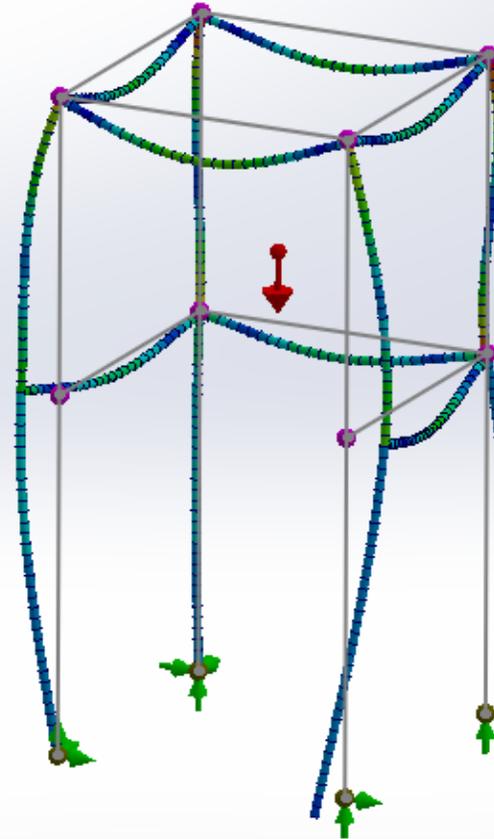
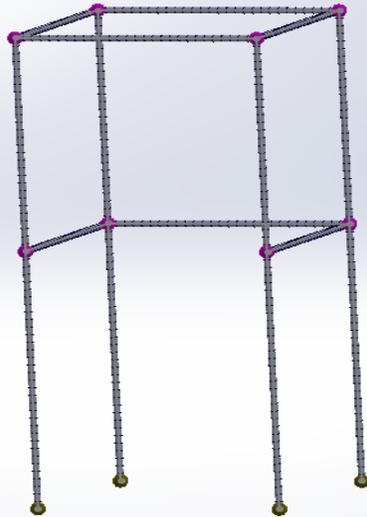
Pruebas y resultados

Conclusiones

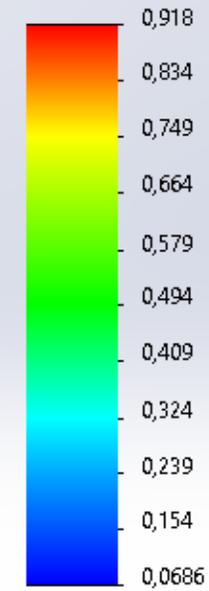
Recomendaciones

Trabajos Futuros

# Desarrollo



Tensión axial y de flexión en el límite superior (N/mm<sup>2</sup> (MPa))



→ Límite elástico: 250



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

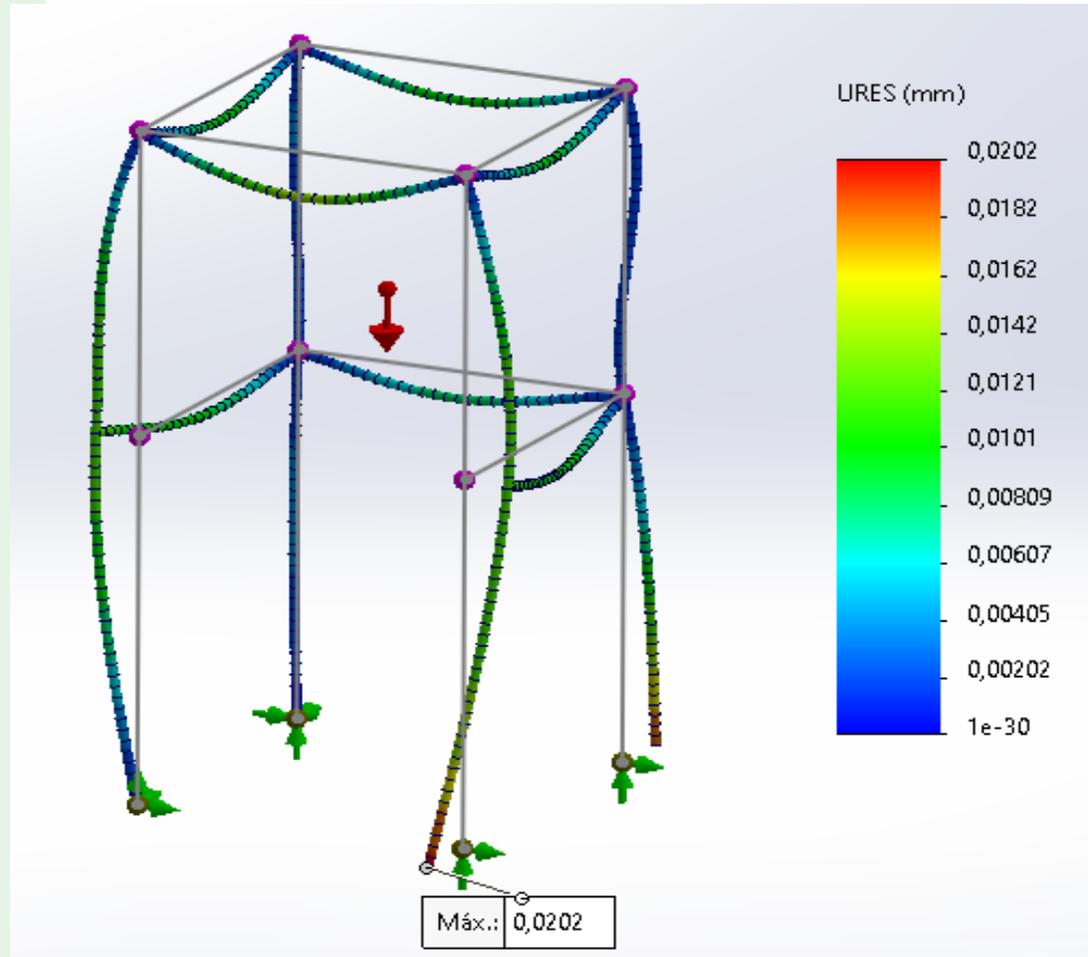
Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

*Resultados de análisis estático*



	Mínimo	Máximo
<b>Tensión (MPa)</b>	0.068	0.918
<b>Desplazamiento (mm)</b>	0	0.02



Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

# Desarrollo

$$R = 0.72 \text{ m} * 5.28 \frac{\Omega}{\text{m}}$$
$$R = 3.80 \Omega$$

$$R_f = R_o * [1 + \alpha(t_f - t_o)]$$

$$R_f = 3.80 \Omega * [1 + 0.0002 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} * (200^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})]$$
$$R_f = 3.93 \Omega$$



$$V = I * R$$

$$I = \frac{110 \text{ [V]}}{3.93 \text{ [\Omega]}}$$

$$I_{min} = 27.98 \text{ [A]}$$

$$I = \frac{110 \text{ [V]}}{3.80 \text{ [\Omega]}}$$

$$I_{max} = 28.95 \text{ [A]}$$



# Desarrollo

$$P = V * I$$

Donde:

P: Potencia en Watts

V: Voltaje en Voltios

I: Corriente en Amperios

Al reemplazar la corriente calculada y el voltaje máximo de trabajo, se obtiene:

$$P = 110 [V] * 28.95[A]$$

$$P = 3184.5 [W]$$



Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

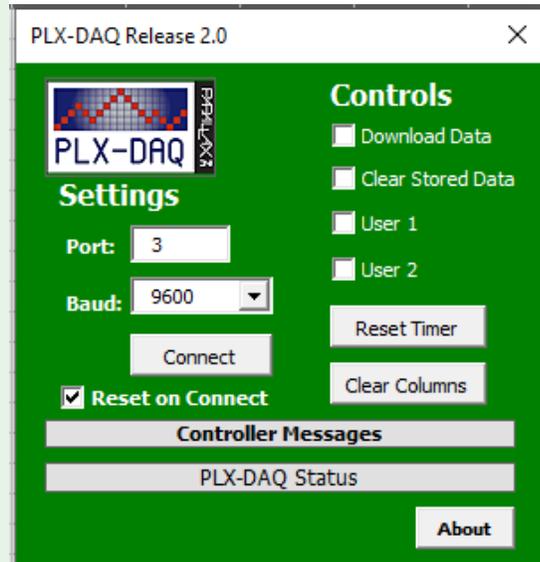
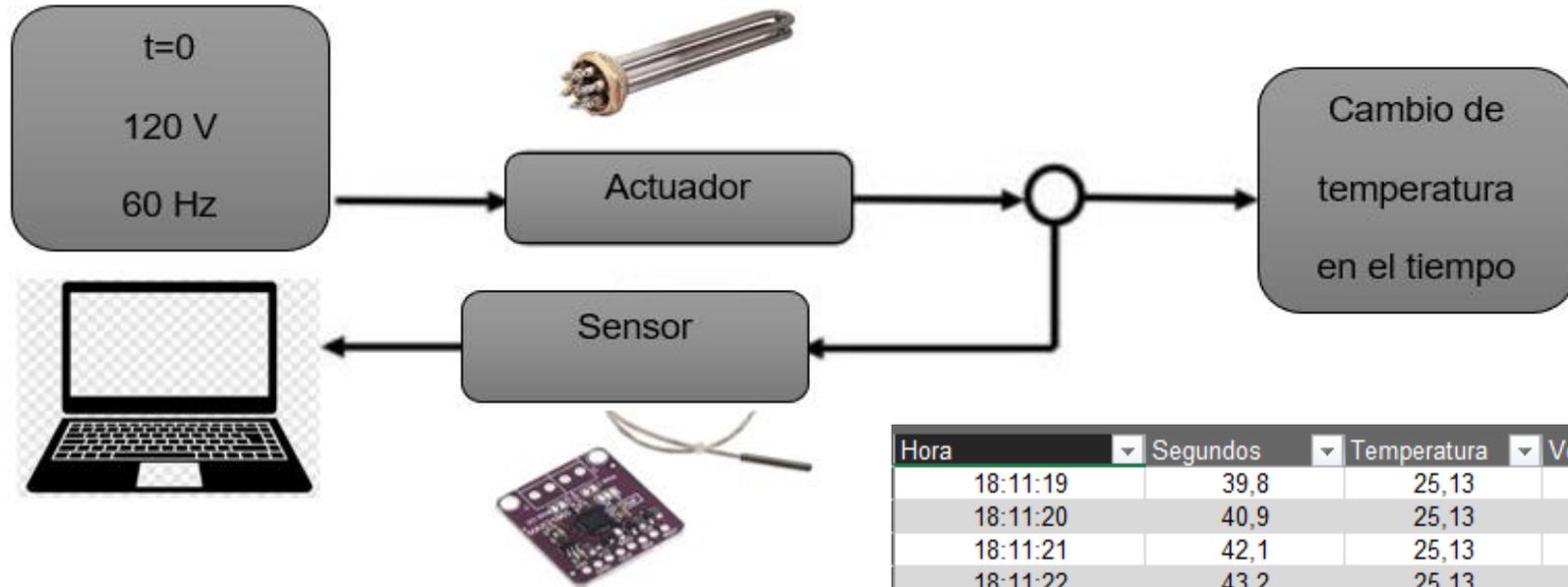
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



Hora	Segundos	Temperatura	Voltaje
18:11:19	39,8	25,13	0
18:11:20	40,9	25,13	0
18:11:21	42,1	25,13	0
18:11:22	43,2	25,13	0
18:11:23	44,4	25,16	0
18:11:24	45,5	25,13	0
18:11:25	46,7	25,16	0
18:11:27	47,9	25,19	107,5
18:11:28	49,0	25,19	107,5
18:11:29	50,2	25,16	107,5
18:11:30	51,3	25,16	107,5
18:11:31	52,5	25,19	107,5
18:11:32	53,6	25,19	107,5
18:11:34	54,8	25,23	107,5
18:11:35	55,9	25,23	107,5
18:11:36	57,1	25,26	107,5
18:11:37	58,3	25,26	107,5
18:11:38	59,4	25,26	107,5
18:11:39	60,6	25,29	107,5
18:11:40	61,7	25,33	107,5
18:11:40	62,0	25,33	107,5



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

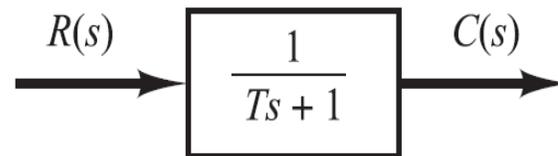
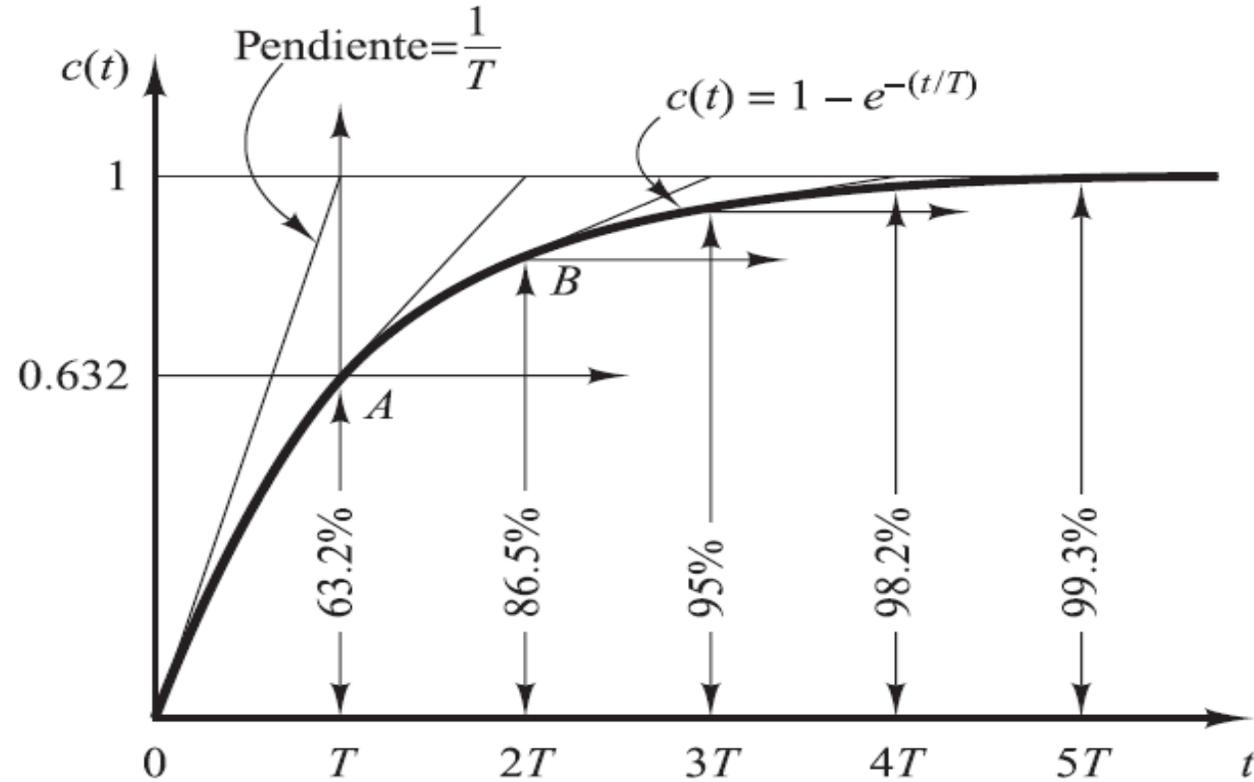
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

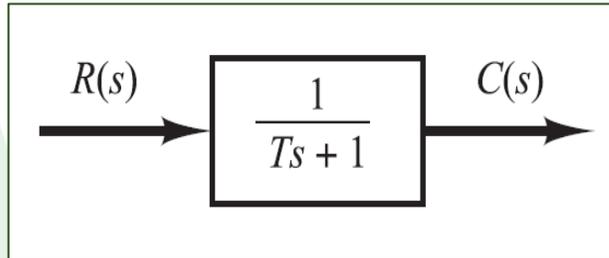
Trabajos Futuros





# Desarrollo

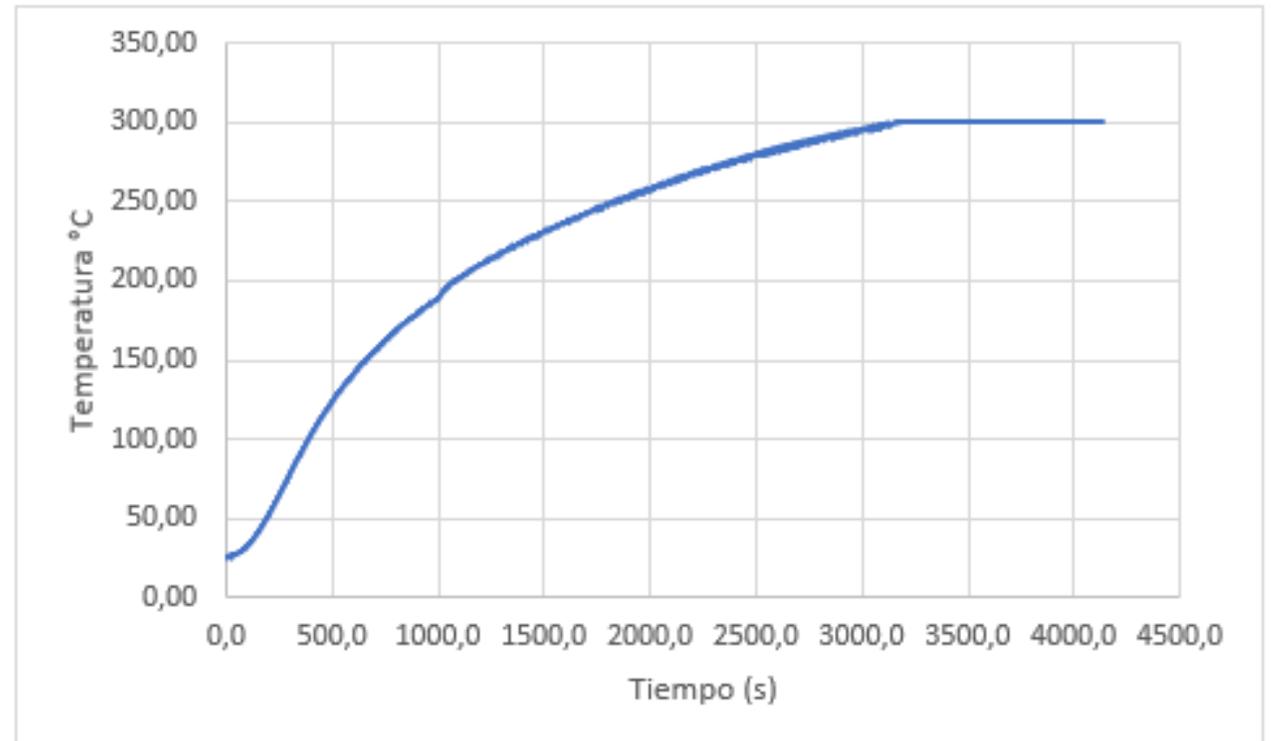
*Temperatura vs tiempo en lazo abierto*



$$c(t) = K(1 - e^{-t/T})$$

$$K = 300.4 - 25.19$$

$$K = 275.21$$



Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

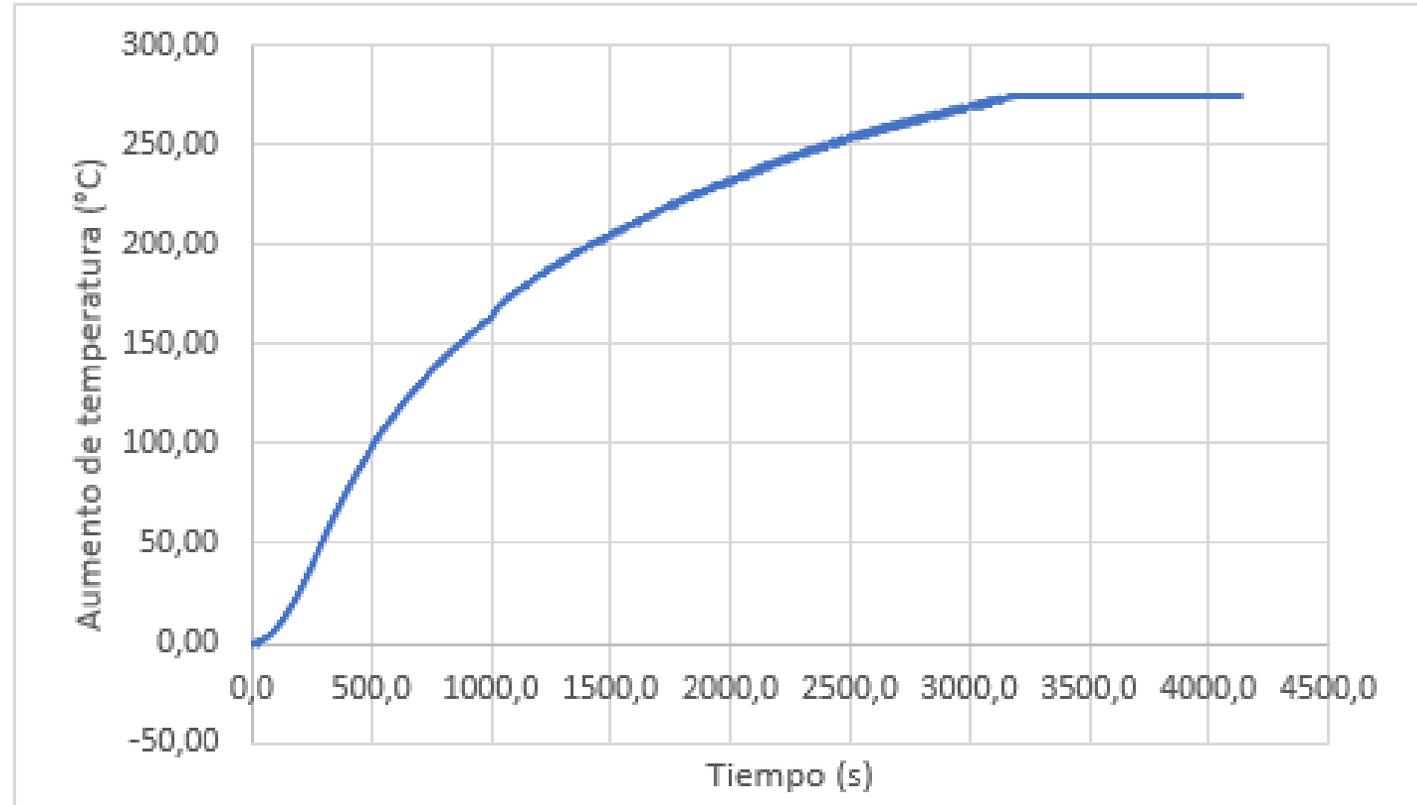
Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

*Curva real de Aumento de temperatura vs tiempo*



Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Cuando el tiempo  $t$  es igual a  $T$ , la salida alcanza un 63.2% del valor total de la respuesta ante el escalón. Por lo cual, se calcula el 63.2% de la ganancia:

$$0.632 * 275.21 = 173.93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El valor  $T$ , es el valor de tiempo en el cual el sistema alcanza una temperatura de  $173.93^\circ\text{C}$  por encima del valor inicial.

$$173.93 + 25.19 = 199.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1075,0	198,61	173,42
1076,1	198,71	173,52
1077,3	198,86	173,67
1078,4	198,96	173,77
1079,6	199,07	173,88
1080,8	199,25	174,06
1081,9	199,32	174,13
1083,1	199,39	174,20
1084,2	199,50	174,31
1085,4	199,64	174,45

$$c(t) = K \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

$$c(t) = 275.21 \left( 1 - e^{-\frac{t}{1079.93}} \right)$$

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

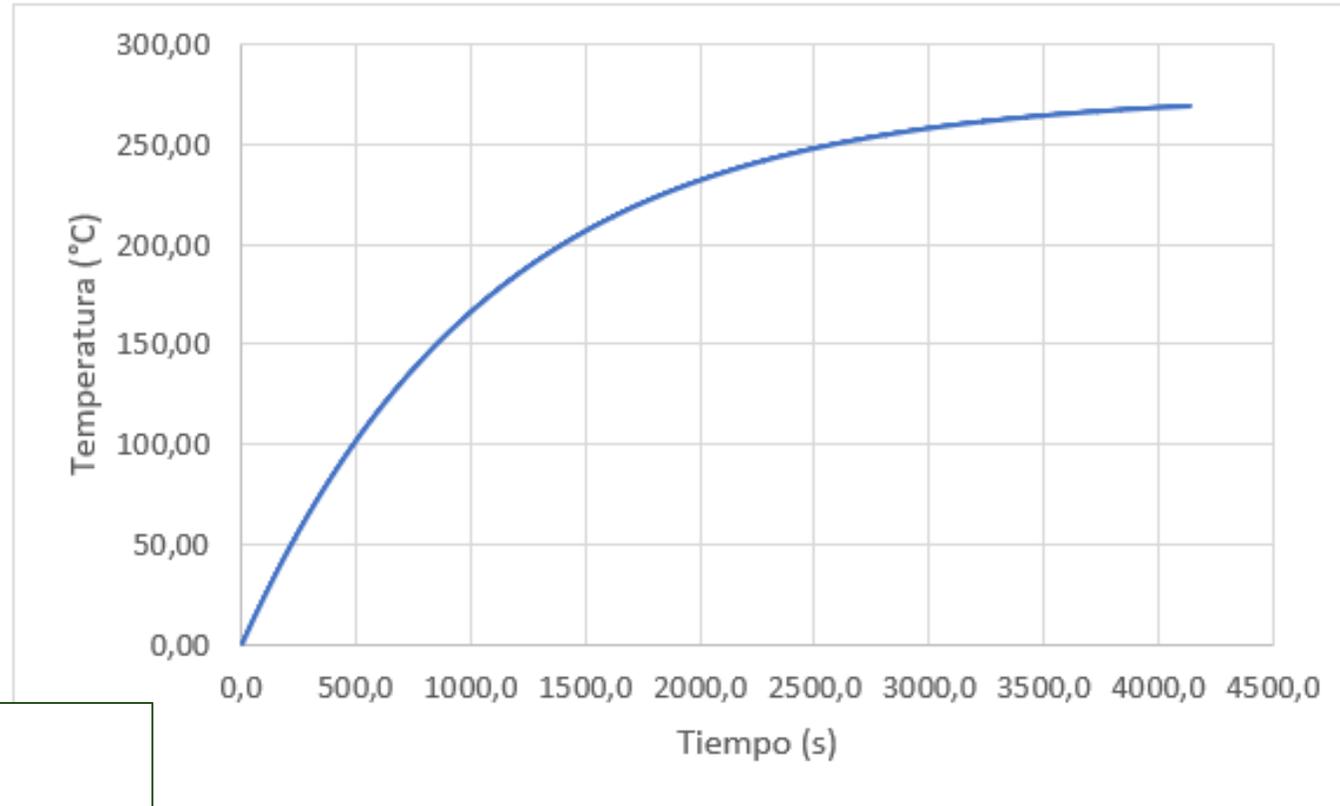
Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

*Curva modelada de temperatura vs tiempo.*



$$c(t) = K \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$c(t) = 275.21 \left( 1 - e^{-\frac{t}{1079.93}} \right)$$

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

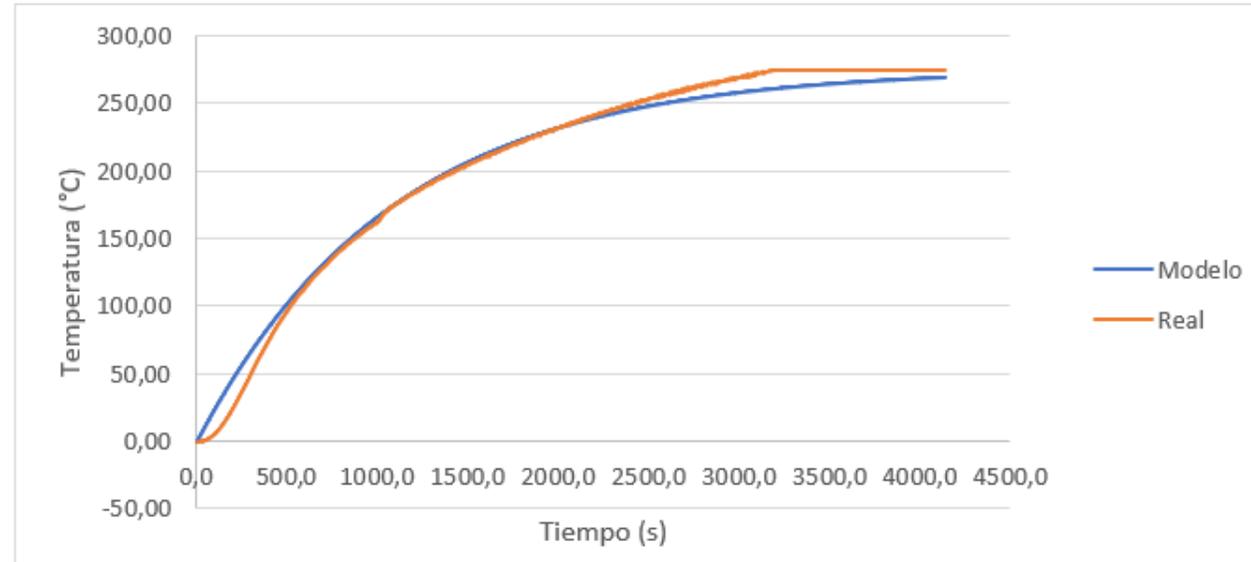
Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Comparación de respuesta real vs modelado



Constantes del controlador.

Variables	Valor
Kp	4.844
Kd	0.006655
Ki	57.31

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Desarrollo

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Desarrollo

Introducción

Objetivos

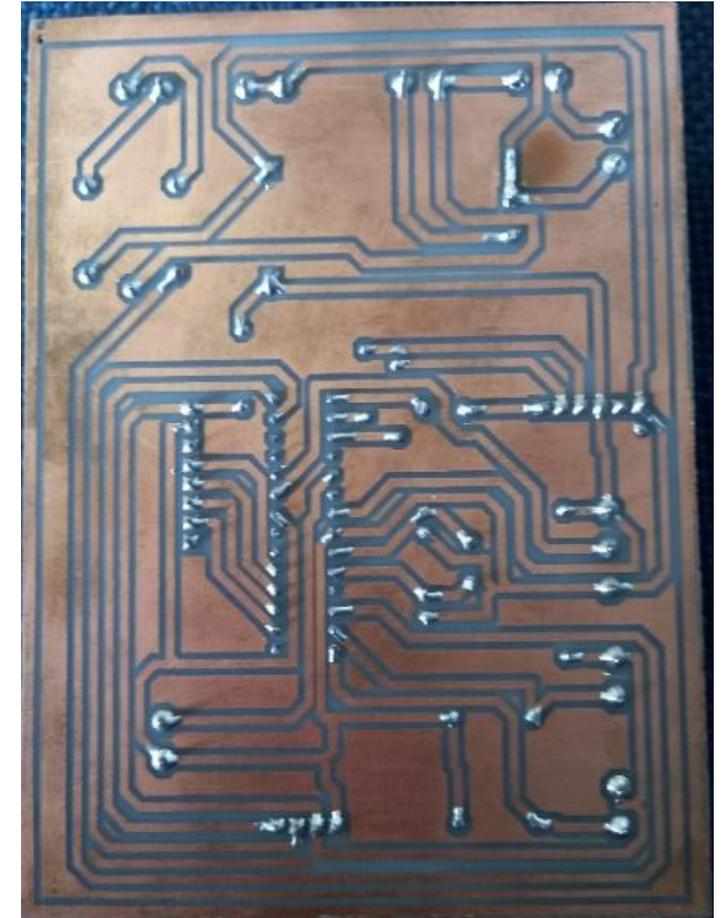
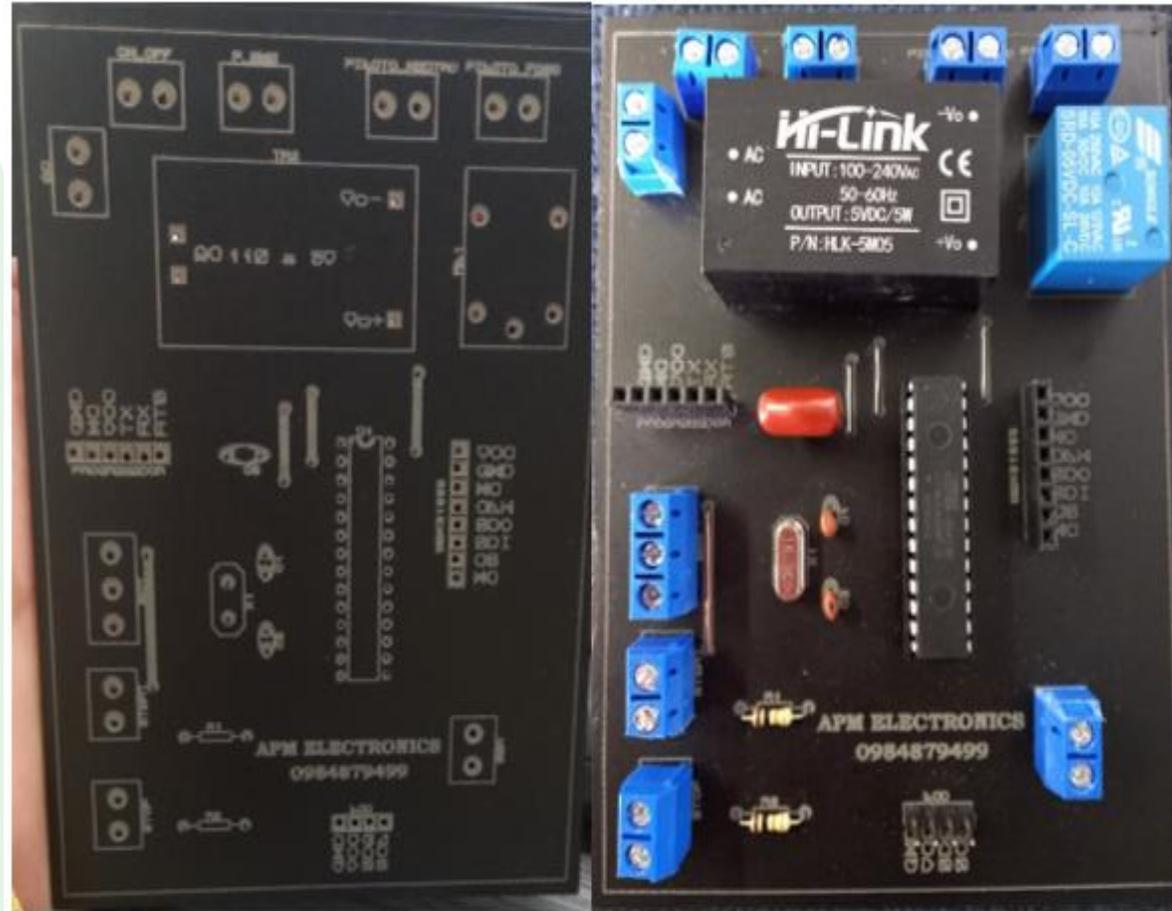
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Desarrollo

Introducción

Objetivos

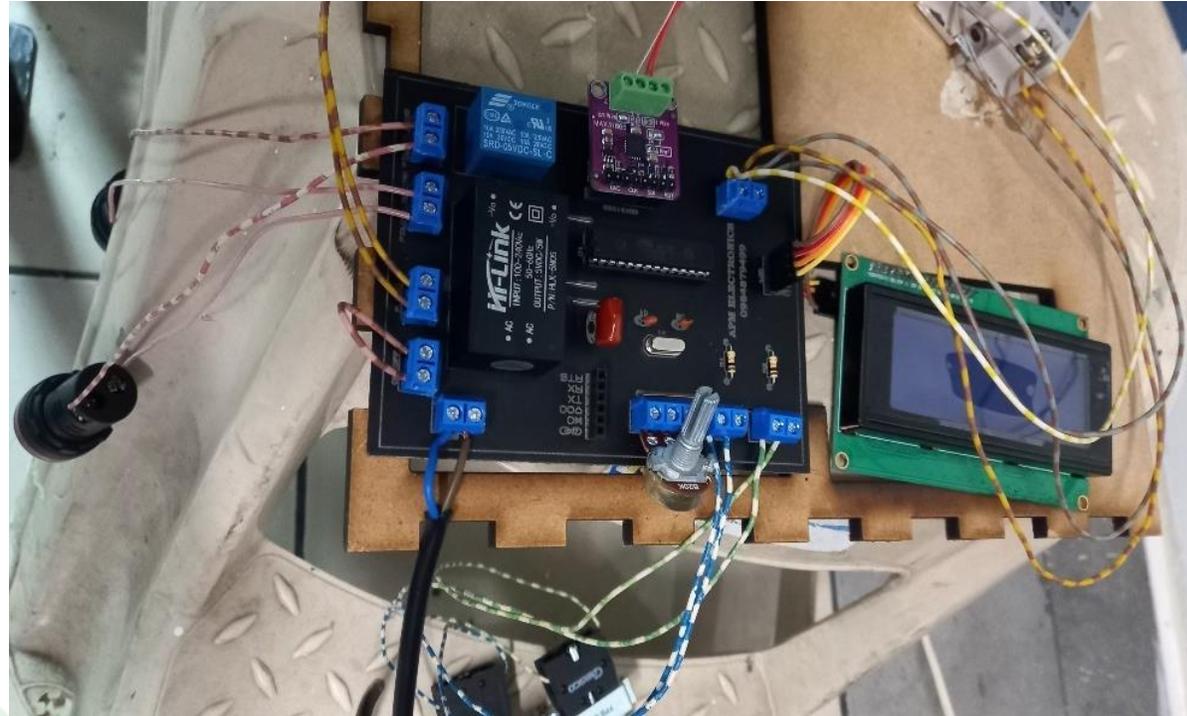
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros

# Desarrollo





# Desarrollo

Introducción

Objetivos

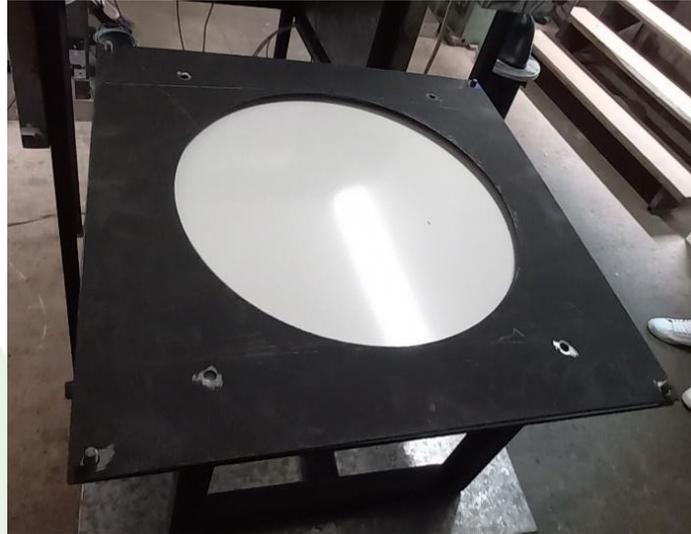
**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Desarrollo

Introducción

Objetivos

**Desarrollo**

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Pruebas y resultados

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Pruebas y resultados

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros





# Pruebas y resultados

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

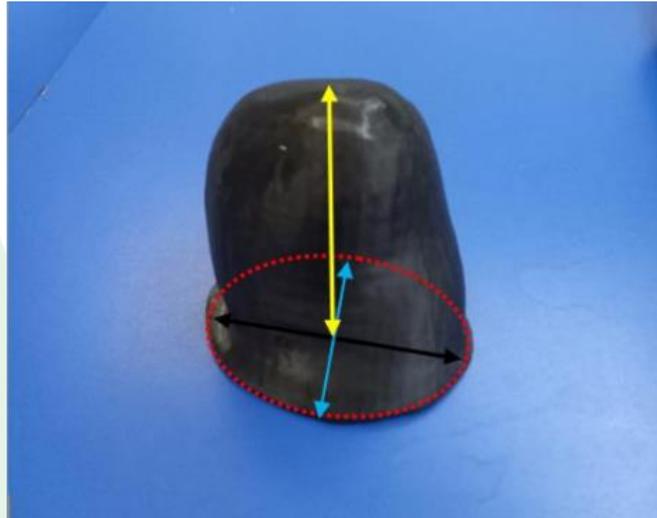
Trabajos Futuros





# Pruebas y resultados

## *Medidas de control del molde original*



Medida	Valor	Unidad
Eje menor	82.4	mm
Eje mayor	103.7	mm
Altura	139.2	mm

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Pruebas y resultados

## Medidas de las pruebas realizadas

	Dimensiones (mm)		
	Eje menor	Eje mayor	Altura
<b>Prueba 1</b>	81,8	103,9	140
<b>Prueba 2</b>	82,1	103,4	138,2
<b>Prueba 3</b>	82,9	104,4	139,9
<b>Prueba 4</b>	82,3	103,4	138,4
<b>Prueba 5</b>	82,4	103,7	140,1
<b>Prueba 6</b>	81,8	104,2	139,2
<b>Prueba 7</b>	82,1	103,6	138,3
<b>Prueba 8</b>	82,3	103,7	138,2
<b>Prueba 9</b>	82,5	104,1	139
<b>Prueba 10</b>	82,8	103,9	139,9

## Medidas de dispersión del eje menor

Indicador	Valor
<b>Promedio</b>	82,3
<b>Varianza</b>	0,12
<b>Desviación Estándar</b>	0,35
<b>Rango</b>	1,1
<b>Coef. Variación</b>	0,004

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Pruebas y resultados

*Medidas de dispersión de las medidas de control del molde*

	<b>Eje menor</b>	<b>Eje mayor</b>	<b>Altura</b>
<b>Promedio</b>	82,3	103,83	139,12
<b>Varianza</b>	0,12	0,10	0,59
<b>Desviación estándar</b>	0,35	0,32	0,77
<b>Rango</b>	1,1	1,0	1,9
<b>Coef. Variación</b>	0,004	0,003	0,006

*Cálculo de errores de las medidas*

	<b>Eje menor</b>	<b>Eje mayor</b>	<b>Altura</b>
<b>Promedio</b>	82,30	103,83	139,12
<b>Original</b>	82,4	103,7	139,2
<b>Error absoluto</b>	0,10	0,13	0,08
<b>Error relativo</b>	0,12	0,13	0,06

Introducción

Objetivos

Desarrollo

**Pruebas y resultados**

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajos Futuros



# Conclusiones

La máquina termoformadora construida permite replicar moldes de prótesis de hombro con planchas de acrílico de 2, 3 y 4 mm de espesor.

La termoformadora es capaz de entregar un producto terminado en un tiempo menor a 20 minutos, lo cual representa una mejoría respecto al anterior sistema de fabricación de moldes usado por la empresa, el cual requería de un tiempo entre 17 a 19 horas.

El costo de producción de cada molde es menor en referencia al sistema anterior donde se requería 50 USD para la producción de cada uno. Con la máquina termoformadora el costo necesario para un molde es de 12 USD a 16 USD dependiendo el espesor de la lámina de acrílico.

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

**Conclusiones**

Recomendaciones

Trabajos Futuros



Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

**Conclusiones**

Recomendaciones

Trabajos Futuros

# Conclusiones

El cálculo del error absoluto del promedio de la altura de los moldes obtenidos aparenta que es la medida de control que menos difiere respecto al molde original, sin embargo, al tener una desviación estándar de 0.77 (la mayor de las 3 medidas), se confirma que es la medida con mayor variación respecto al promedio, es decir es la longitud menos estable, esto puede estar relacionado al corte manual del excedente de material.

La extracción del molde de termoformado se dificulta debido a los ángulos de salida no considerados en el diseño del molde. Se recomendó el rediseño del molde con dichas consideraciones.

La máquina termoformadora cumple con los requerimientos funcionales solicitados y las características del modelo combinado que fue producto del diseño mecatrónico.

Los moldes de prótesis obtenidos difieren en menos de 1 mm con respecto a las medidas geométricas del molde original.



# Recomendaciones

Se recomienda el uso de láminas de acrílico con certificado de calidad, el uso de láminas sin certificaciones produjo que el molde final se agriete debido a la poca uniformidad del espesor y la variación en la temperatura de deflexión.

Se recomienda el uso de un suministro estable de energía eléctrica, la variación del voltaje monofásico de la red afecta el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada.

Se recomienda el uso de un suministro estable de energía eléctrica, la variación del voltaje monofásico de la red afecta la generación uniforme de vacío de la bomba.

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

**Recomendaciones**

Trabajos Futuros



# Trabajos Futuros

Diseño y construcción de un sistema automático para el posicionamiento de la plancha precalentada sobre la torre de succión.

Diseño y construcción de una nueva torre de succión para mejorar el posicionamiento de la plancha precalentada y facilitar el corte de excedente de material.

Diseñar e implementar un sistema IoT para registrar y acceder a datos de las variables de la máquina termoformadora.

Diseñar e implementar un sistema de visión por computadora con cámara térmica para analizar el enfriamiento de las placas sobre el molde.

Introducción

Objetivos

Desarrollo

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

**Trabajos Futuros**

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



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**