



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



# **Análisis del consumo de combustible durante la cocción de piezas cerámicas mediante la comparación de dos tipos de controladores.**

Maestría en Máster en Electrónica y Automatización Mención Redes  
Industriales

Ing. Manobanda Cárdenas, Lenin Javier

Ing. Rivas Lalaleo, David Reimundo PhD.



# FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

- Según un informe de Greenpace y el Center for Clean Energy and Air Research, la contaminación del aire por combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural mata a casi cinco millones de personas cada año y causa daños por valor de miles de millones de dólares. (F, 2012).
- En los hornos tipo túnel el proceso de ajuste de temperaturas en la zona de precalentamiento es manual lo que conlleva a una deficiencia energética, consumo de recursos humano debido a que el operador debe estar en constante monitorio para evitar una desviación en las temperaturas y a su vez producción con defectos como sobrecalentamiento, hervido, crudo, etc

## ***Objetivo General***

Analizar el consumo de combustible durante la cocción de piezas cerámicas mediante la comparación de dos tipos de controladores.

# DESARROLLO

Para la obtención de los registros térmicos del horno tipo túnel se precisa que el horno tipo túnel se encuentre a 80°C temperatura en la cual el horno se considera apagado el horno, seguidamente continuamos los siguientes pasos:

Iniciar con el encendido de los quemadores a 50% debido a que por choque térmico se tiene que calentar paulatinamente

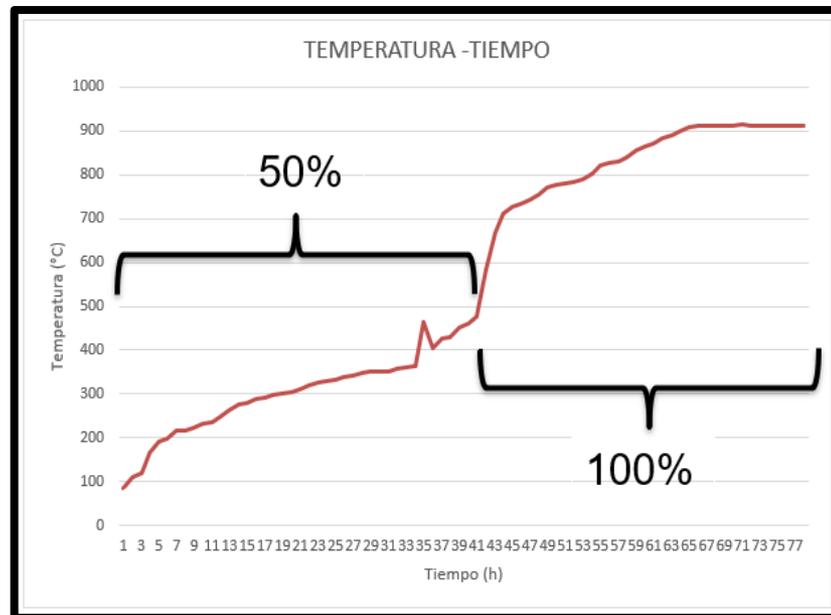
Muestrear la temperatura hasta que alcance su estabilidad térmica que es por aproximadamente 3 días cada hora desde una temperatura interna de 80°C, se toma cada hora debido a que la planta tiene una reacción lenta

Se tabula la información recolectada en un software especializado.

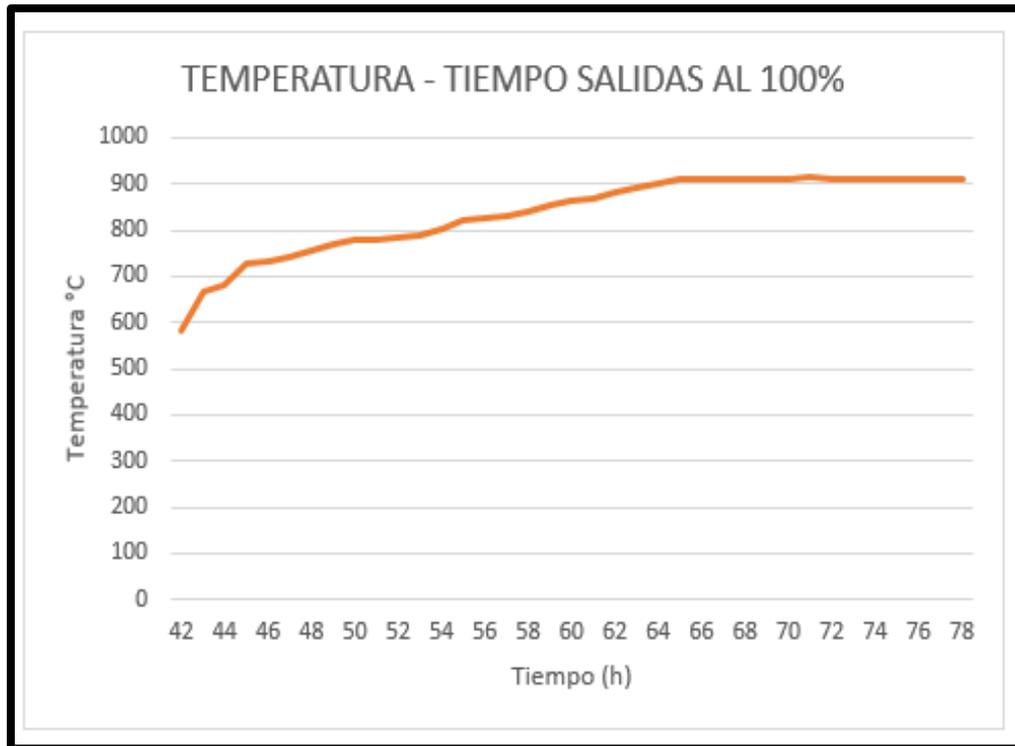
N°	Fecha	Hora	Temperatura
1	20/5/2022	7:00	85
2	20/5/2022	8:00	109
3	20/5/2022	9:00	121
4	20/5/2022	10:00	166
5	20/5/2022	11:00	193
6	20/5/2022	12:00	198
7	20/5/2022	13:00	217
8	20/5/2022	14:00	218
9	20/5/2022	15:00	223
10	20/5/2022	16:00	233
11	20/5/2022	17:00	235
12	20/5/2022	18:00	249
13	20/5/2022	19:00	265
14	20/5/2022	20:00	275
15	20/5/2022	21:00	279
16	20/5/2022	22:00	288
17	20/5/2022	23:00	293

# MODELO MATEMÁTICO

- En base al registro térmico del horno se realiza la gráfica temperatura en relación del tiempo dando como resultado la figura



La curva de la figura se la considera como de primer orden porque responde a la ecuación (1) en el dominio de variables de estado y la ecuación (2) en el dominio del tiempo.



$$y(s) = \frac{K}{\tau s + 1} U(s)$$

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

Donde:

$y(s)$  = ecuación en función de variables de estados

$y(s)$  = ecuación en función del tiempo

$K$  = constante de ganancia

$\tau$  = constante de tiempo

$s$  = variable de estado

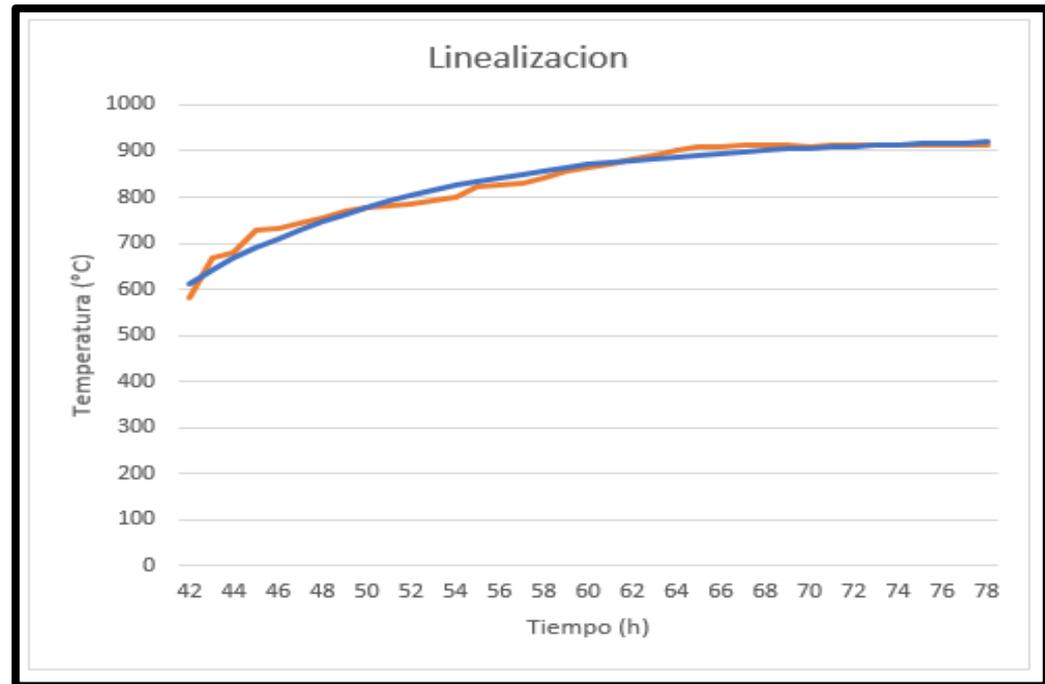
$t$  = variable del tiempo

$U(s)$  = entrada en variables de estado

$\Delta u$  = entrada en función del tiempo

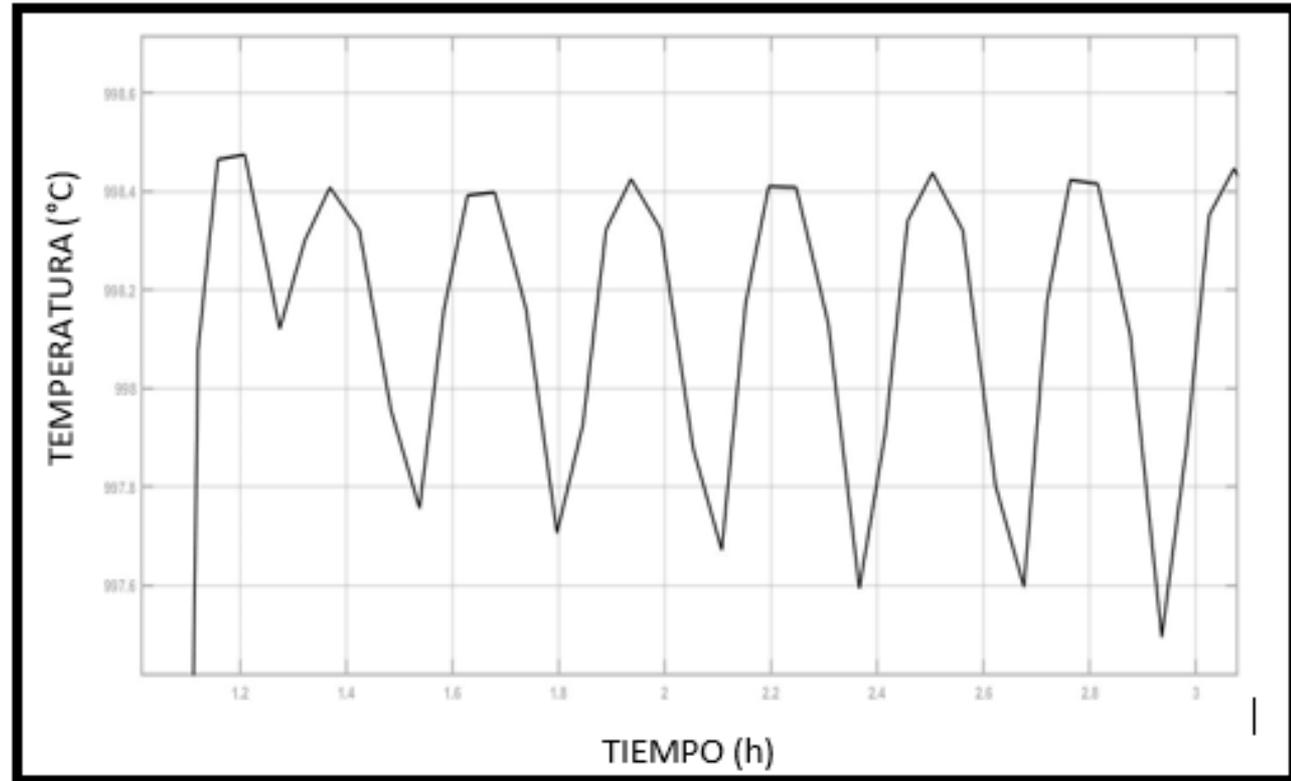
# LINEALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN

$$y(s) = \frac{6,95}{10,89s + 1}$$

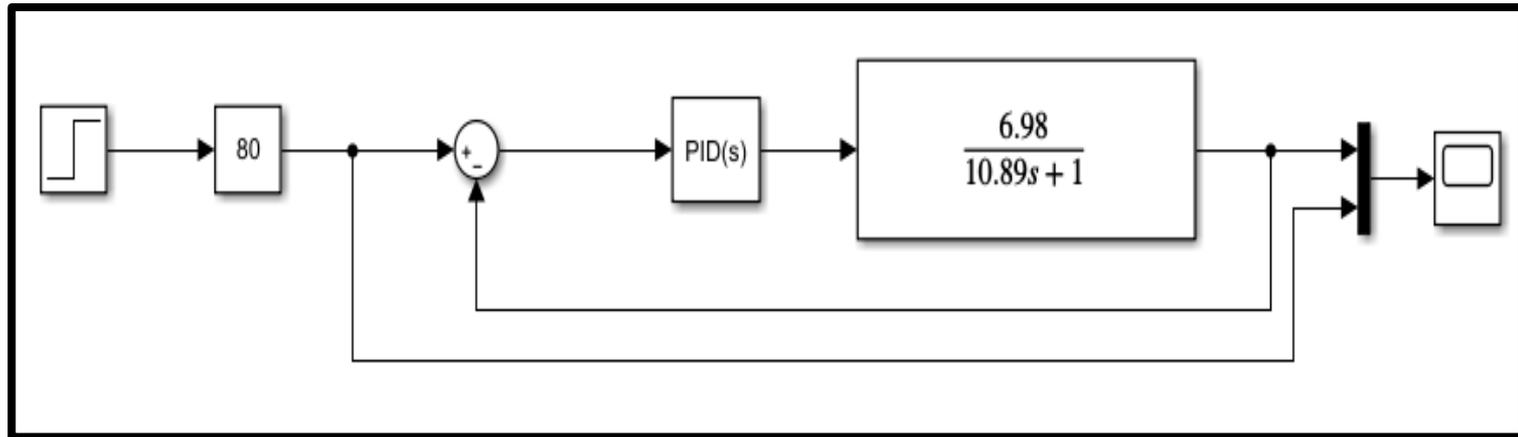


# CONSTANTE CRÍTICA

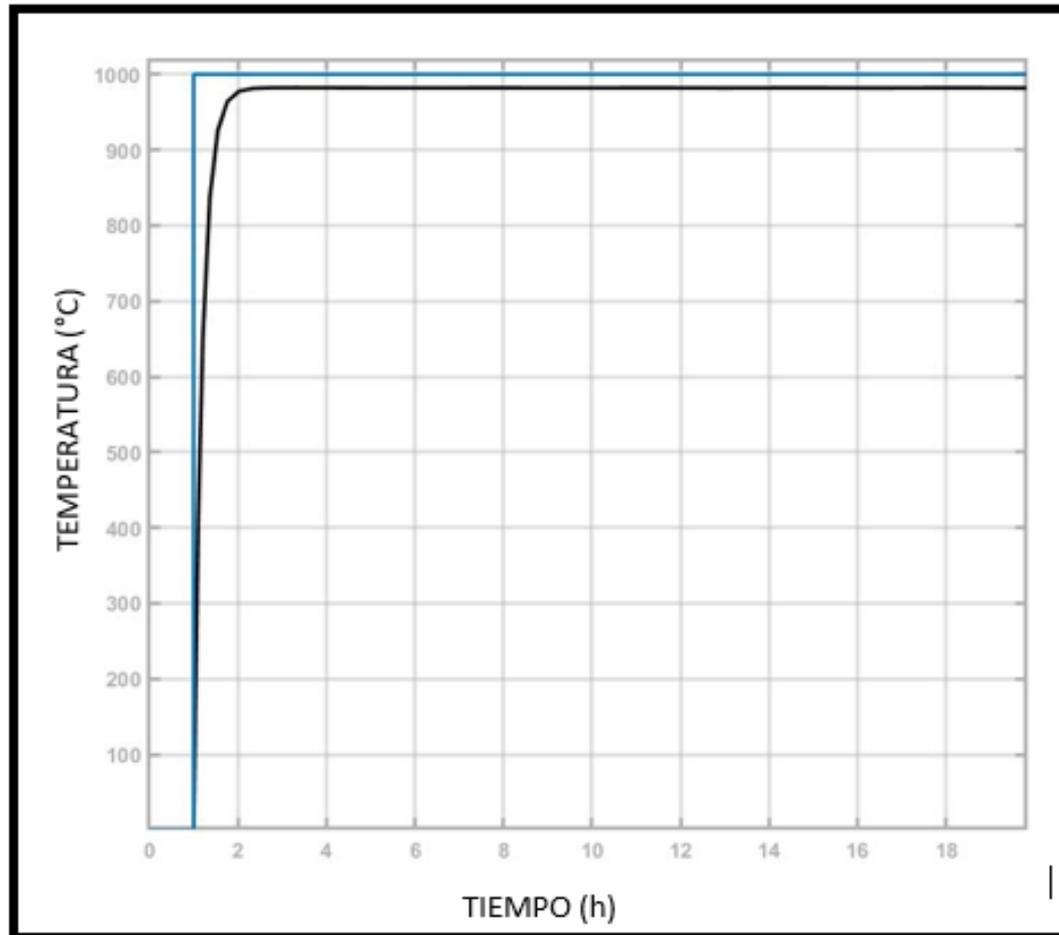
De la figura se encuentra el  $K_{cr} = 1.5$  y el tiempo entre crestas es de 15 seg empleando



# CONTROLADOR PP



TIPO DE CONTROLADOR	Kp	Tl	Td
P	0.5Kcr	Infinito	0



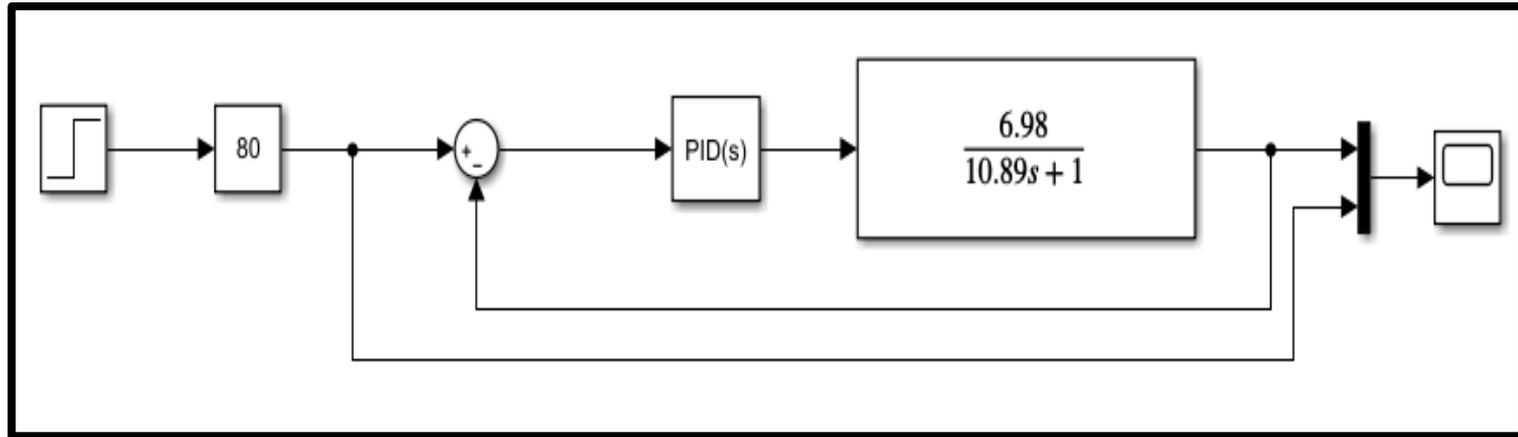
**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

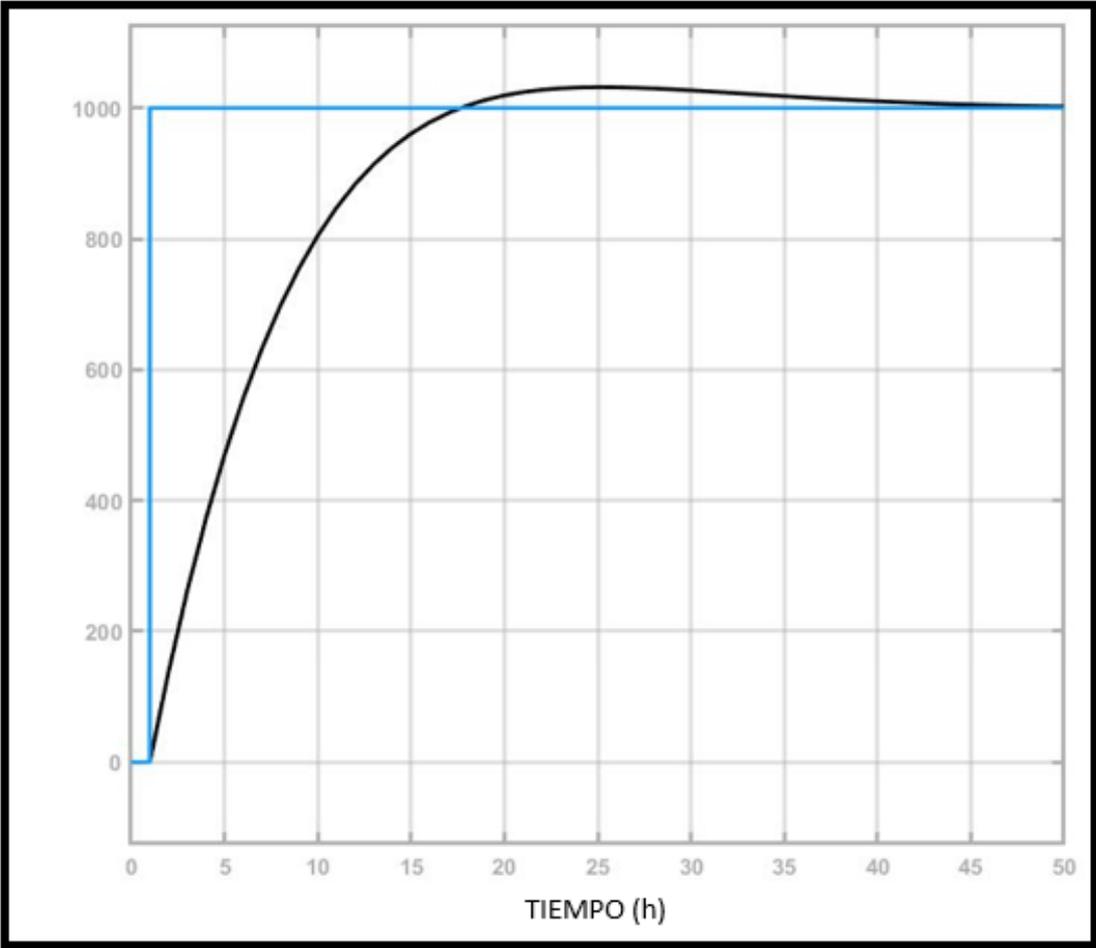
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

# CONTROLADOR PI



TIPO CONTROLADOR	DE	Kp	Ti	Td
PI		0.45Kcr	0.8333Pcr	0

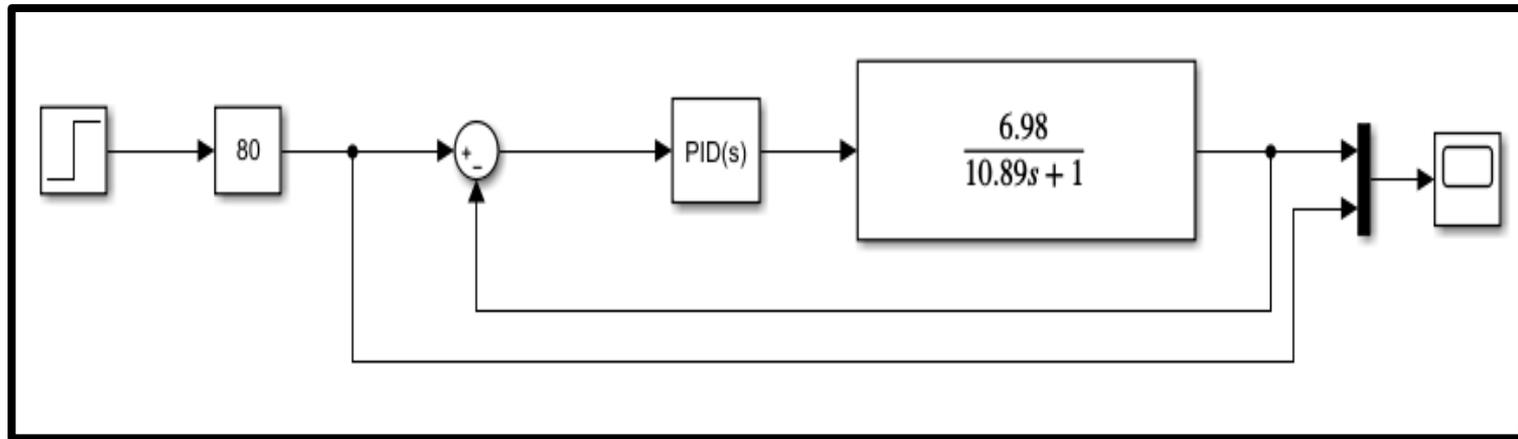


**ESPE**

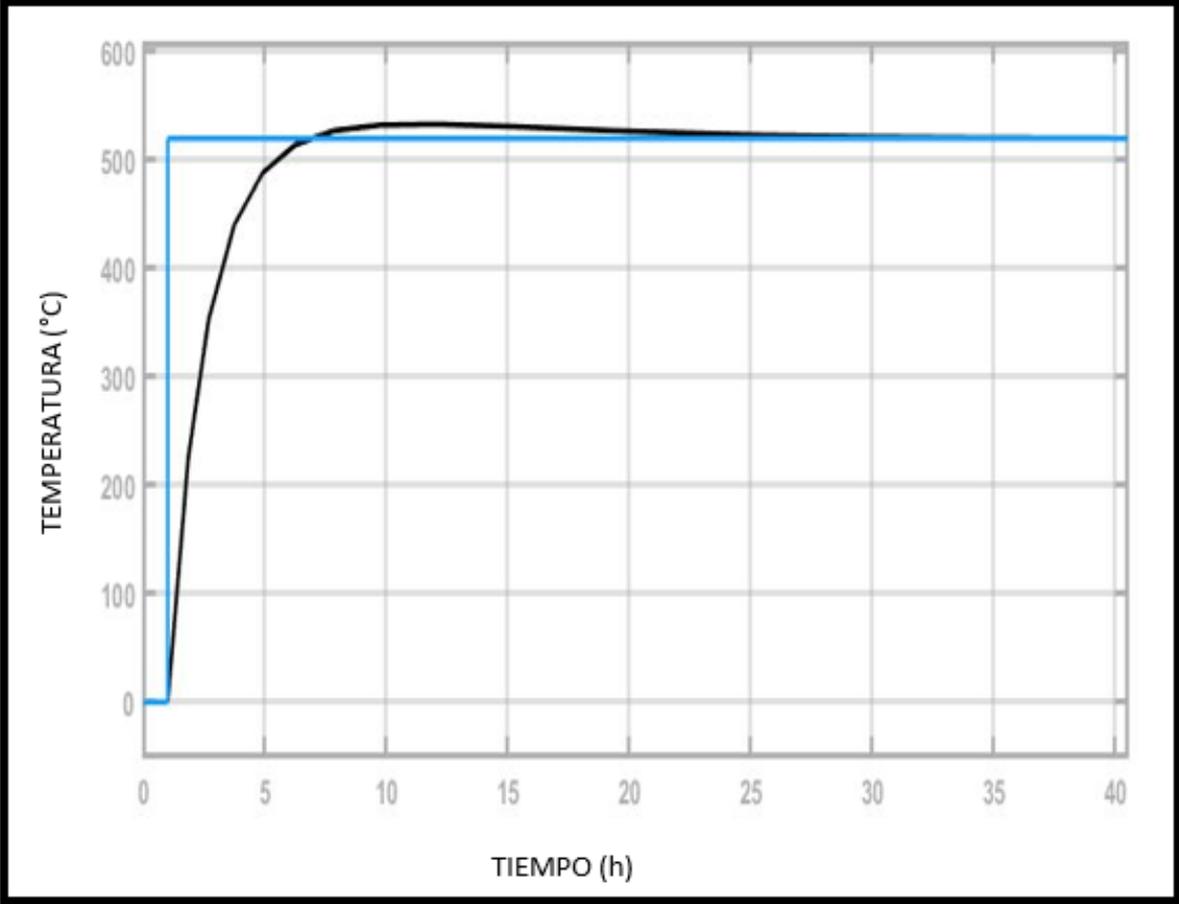
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

# CONTROLADOR PID



TIPO DE CONTROLADOR	KP	TI	Td
PID	0.6Kcr	0.5Pcr	0.125Pcr

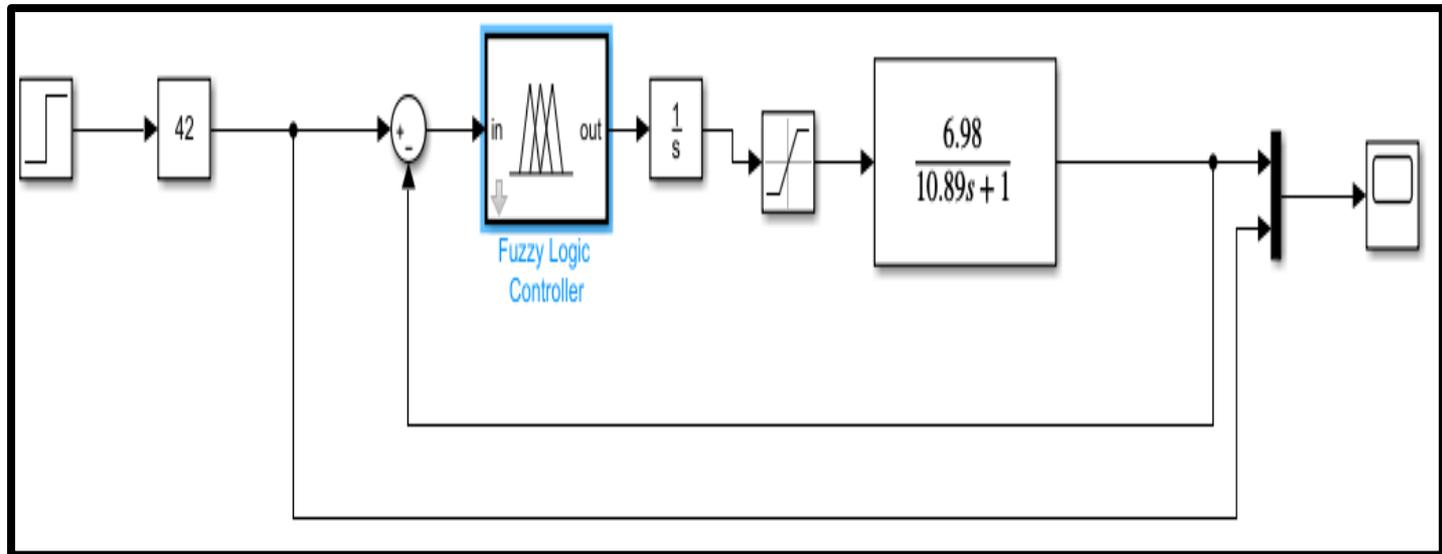


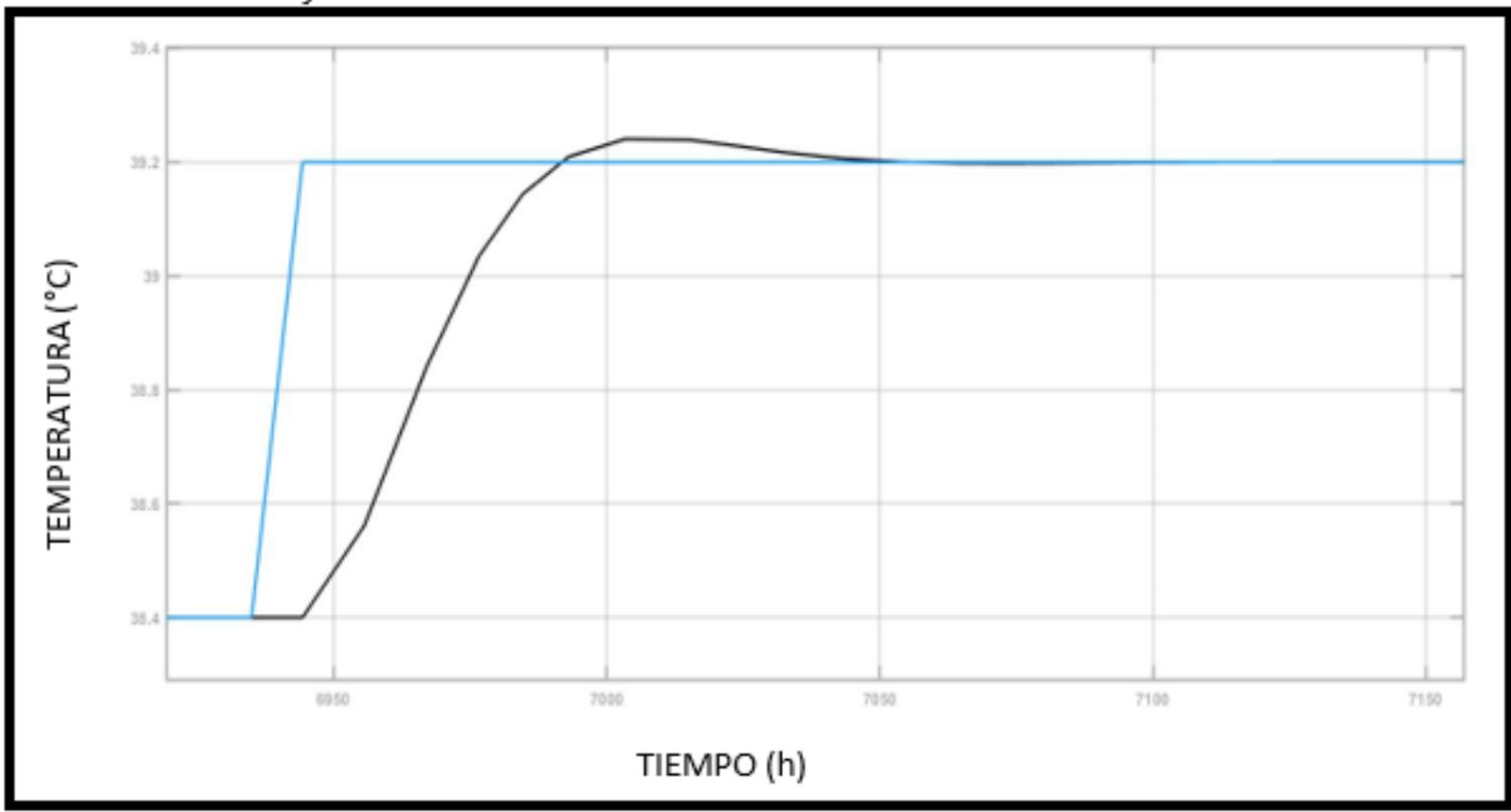
**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

# CONTROLADOR FUZZY





# Selección del controlador

Los parámetros que se consideró para la selección del controlador son los siguientes:

- Sobre impulso no mayor a 1%
- Tiempo de estabilización menor a 50 seg
- Versatilidad
- Costo más económico
- Facilidad de implementación

## Evaluación de controladores



	COSTO DE IMPLEMENTACIÓN	FACILIDAD DE IMPLEMENTACION	VERSATILIDAD	COSTO DE MANTENIMIENTO	TIEMPO DE ESTABILIZACION <50seg	SOBREIMPULSO <1%	TOTAL
CONTROL PID	1	1	0	1	1	1	5
CONTROL FUZZY	0	1	1	1	0	1	4
CONTROL PP	0	0	0	0	0	0	0
CONTROL PI	1	1	0	0	0	1	3

1 PUNTO A FAVOR

0 PUNTO EN CONTRA



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

# Análisis del consumo de combustible

- El análisis se lo llevo a cabo con las temperaturas tomadas por los operadores desde el 1 de enero del 2022 hasta 1 de julio de 2022 los datos se tomaron cada dos horas debido a que el operador tiene que acercarse para ajustar manualmente la presión de aire en este tiempo, de los datos recolectados

# PROMEDIO SEMESTRAL

	Promedio Enero	Promedio Febrero	Promedio Marzo	Promedio Abril	Promedio Mayo	Promedio Junio	Promedio semestral
1	907,45	906,64	906,29	904,25	905,21	904,04	905,44
2	905,39	909,61	906,14	907,57	903,32	904,86	906,45
3	903,32	905,89	902,43	904,21	907,96	910,00	905,91
4	904,35	905,43	904,29	904,93	905,57	904,75	904,82
5	908,06	905,89	904,79	904,07	902,61	908,07	905,35
6	906,87	905,00	904,00	906,54	904,93	906,96	905,68
7	904,87	905,89	907,93	905,14	904,54	906,93	906,42
8	906,45	902,71	905,39	904,39	905,50	905,96	904,80
9	904,68	906,04	904,57	902,54	903,07	908,54	904,77
10	903,23	902,64	905,68	904,14	905,50	905,75	904,83
11	904,23	904,96	904,75	906,25	909,46	904,00	905,94
12	902,68	906,29	905,32	905,82	907,50	902,93	905,41



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

### Promedio semestral



$$y = 10^{-17}x^6 - 7x10^{-14}x^5 + 2x10^{-10}x^4 - 2x10^{-7}x^3 + 0.0001x^2 - 0.0225x + 906.5$$



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

- Los datos recolectados durante 6 meses y con la ayuda de software especializado se determina la función que rige el comportamiento de la temperatura dando como resultado la ecuación 4 la cual se integra en intervalo de 1 a 2172 que es la cantidad de horas de muestreo, con esta integral obtendremos la cantidad de temperatura que se utilizó durante estos meses

# Cálculo de cantidad de temperatura sin controladores

$$y = 10^{-17}x^6 - 7 \times 10^{-14}x^5 + 2 \times 10^{-10}x^4 - 2 \times 10^{-7}x^3 + 0.0001x^2 - 0.0225x + 906.5$$

$$\int_0^y y = \int_1^{2172} 10^{-17}x^6 - 7 \times 10^{-14}x^5 + 2 \times 10^{-10}x^4 - 2 \times 10^{-7}x^3 + 0.0001x^2 - 0.0225x + 906.5$$

$$y = \frac{10^{-17}x^7}{7} - \frac{7 \times 10^{-14}x^6}{6} + \frac{2 \times 10^{-10}x^5}{5} - \frac{2 \times 10^{-7}x^4}{4} + \frac{0.0001x^3}{3} - \frac{0.0225x^2}{2} + 906.5x \Big|_1^{2172}$$

$$\Delta T = 2'178.141^\circ C$$

# Cálculo de cantidad de temperatura con controladores

Controladores	°C durante 6 meses	Sobreimpulso	°C+sobreimpulso	m <sup>3</sup>
Proporcional	1'953.900°C	0,57%	1'965.037,23	137.381,31
Integral derivativo				
Fuzzy	1'953.900°C	1,1%	1'975.392,9	138.105,30
Proporcional	1'953.900°C	5%	2'051.595	143.432,81
Integral				
Proporcional	1'736.800°C	0%	1'736.800	121.424,60

# ANÁLISIS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE

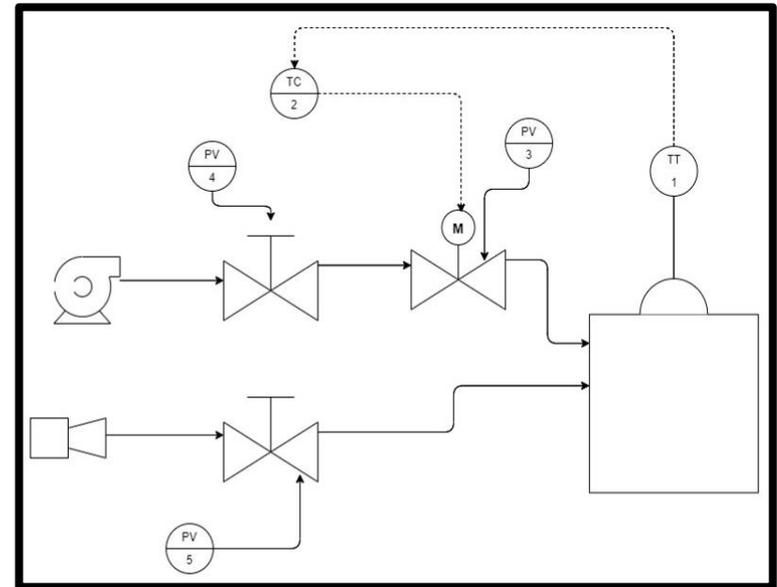
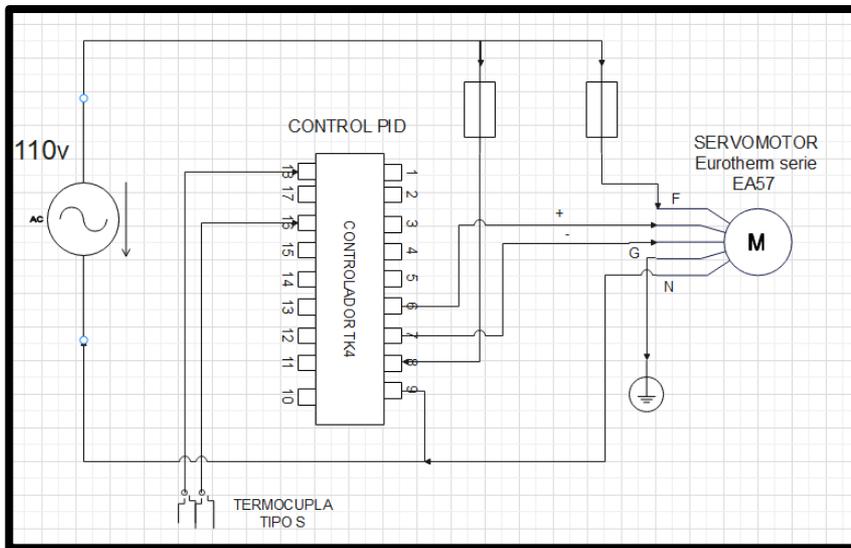
Según los reportes en este lapso de tiempo se ha consumido  $152.280 m^3$  de GNL mediante regla de tres se determina que mediante la implementación de un controlador automático el consumo sería  $137.381,31 m^3$  dando un ahorro de  $14.898,69 m^3$  de GNL según gnl global se conoce que el precio del  $m^3$  de GNL es de 0,40ctv el  $m^3$  dando un total de ahorro económica de 5.959,47\$ por lo que se puede decir que en 6 meses se recupera la inversión de la implementación de este sistema sin contar que se trabaje con GLP en este caso la inversión se recupera en 3 meses debido a que el GLP está a el doble de precio que el GNL, de forma similar si se disminuye el consumo de combustible se reduce la emanación de  $CO_2$

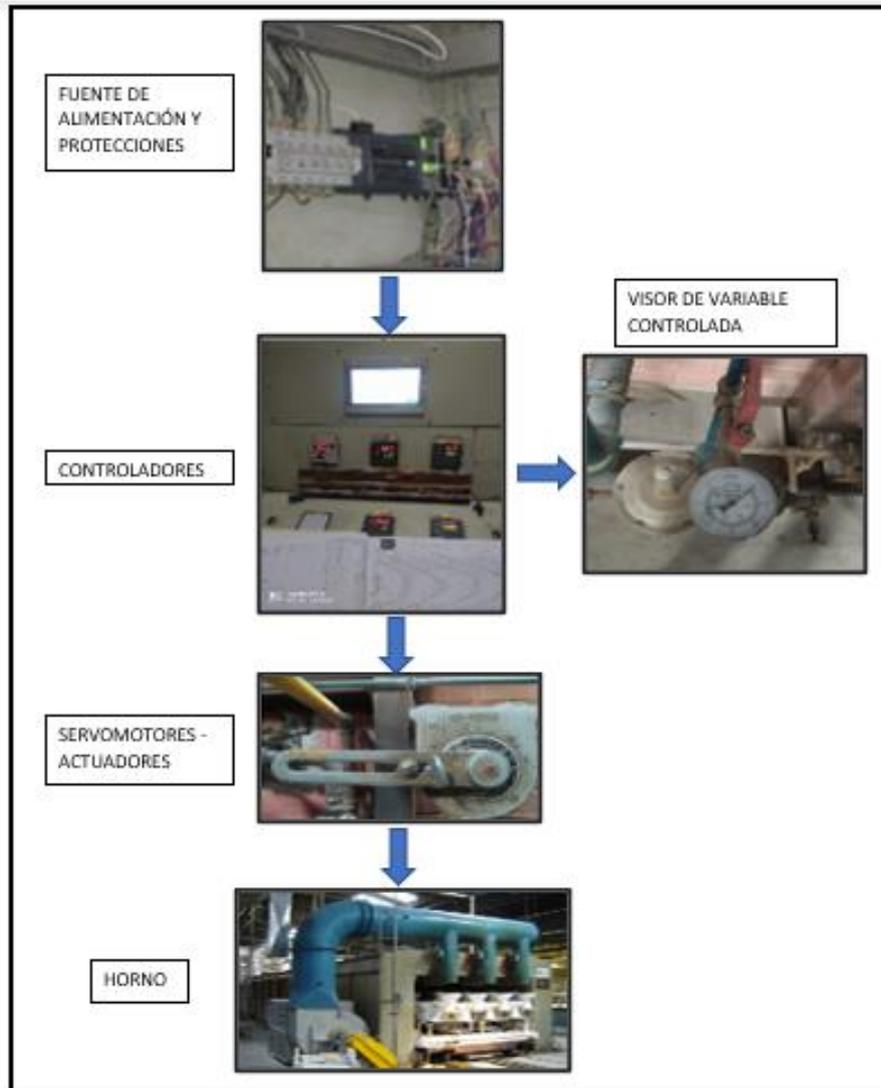
# AHORRO DE COMBUSTIBLE

Controladores	$m^3$	Ahorro $m^3$
Proporcional	137.381,31	14.898,69
Integral derivativo		
Fuzzy	138.105,30	14.174,7
Proporcional	143.432,81	8.847,19
Integral		
Proporcional	121.424,60	30.855,4

Si consideramos que el operador tarda 10 min cada dos horas para ajustar los manómetros para regular la temperatura de la z1 y a este valor lo multiplicamos por 12 tomas de medición y por 181 días tenemos un total de 21.720 min esto lo dividimos para 60 min lo que nos da 362 horas por cada 6 meses, la hora de un operador esta alrededor de 3,50 \$ dando como resultado una perdida por mano de obra de 1.267\$ una vez instalado el sistema automático esta cantidad de dinero también representa un ahorro adicionalmente el operador tendrá 2 horas diarias adicionales para realizar cualquier otra actividad siendo así más eficientes.

# PROPUESTA DE INSTALACIÓN





# COSTO DE INSTALACIÓN

*Costo de instalación de un controlador PID*



## MATERIALES PARA INSTALACIÓN

MATERIALES PARA INSTALACIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNI	COSTO TOTAL
Cable apantallado	200	metros	2,68	536
Cable para termocupla	200	metros	3,9	780
Termocupla tipo S 30"	1	und	150	150
Controlador autotronic TK4s	1	und	200	200
Mano de obra especializada	80	horas	40	3.200
Mano de obra	80	horas	5	400
Actuador	1	und	100	100
Servomotor	1	und	1.500	1.500
				6.866 \$



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CAMINO A LA EXCELENCIA

# CONCLUSIONES

- El modelo matemático de un horno tipo túnel se obtuvo a través de la recolección de datos durante 4 días cada hora de manera ininterrumpida desde un valor de  $80^{\circ}\text{C}$  hasta su estabilización  $913^{\circ}\text{C}$  dando como resultado un sistema de primer orden con  $\tau = 17h$
- Dos de los cuatro controladores analizados fueron comparados por su ahorro energético, por un lado, el PID tubo un ahorro energético de  $14.898,69 m^3$  mientras que el Fuzzy de  $14.174,7$ , además en el análisis de costos de implementación con el PID con un valor de  $6.866$  y el Fuzzy con un valor de  $6.930$ , se determina que el controlador PID es el que permite obtener una mayor eficiencia energética.
- Se seleccionó el controlador PID como más eficiente energéticamente hablando debido a que este tiene un consumo de  $137.381,31m^3$  seguido de Fuzzy con  $138.105,30m^3$ , a continuación, el PI con un consumo de  $143.432,81m^3$  y finalmente tenemos el PP  $121.424,60m^3$  que este por no llegar al SP es descartado

# TRABAJOS FUTUROS

- Enlazar las 3 zonas de quema del horno túnel mediante un controlador MIMO debido a la versatilidad del horno nos da la facilidad de implementar este tipo de controladores y así poder realizar un análisis de combustible más a profundidad y determinar si es factible en cuanto a costo beneficio
- El sistema permite acoplar la inteligencia artificial mediante la implementación de un sistema en tiempo real de los defectos producidos por variaciones térmicas en el horno, dando una solución inmediata para solventar este déficit mediante la variación de la curva de cocción en el horno siendo más eficientes energéticamente y a nivel de productividad
- Al momento el horno no consta de un registro de datos de temperatura ni de presión por lo que permite la implementación de un sistema de registro para obtener información tanto en tiempos pasados como en tiempo real para su comparación y su evaluación permitiendo tomar decisiones más certeras en cuanto a la manipulación de temperaturas en el horno