

Evaluación, mantenimiento y automatización del Horno Fishier Isotem Serie 300

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Enríquez Villarroel, Raúl Andrés

16 de marzo de 2022





Contenido

Justificación e importancia

Objetivos

Desarrollo

Conclusiones y recomendaciones



Justificación e importancia

Justificación

Es indispensable realizar mantenimiento a equipos de uso recurrente, conocer su funcionamiento, y disponer de la documentación del equipo.

Importancia

Uso adecuado del equipo como recurso brindado por la universidad para el desarrollo académico de sus estudiantes.



Objetivos

Objetivo general

Modernizar el horno “FISHER ISOTEMP® 300 SERIES MODEL 338F” del laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Objetivos específicos

- Diseñar un plan de mantenimiento del equipo.
- Caracterizar el horno mediante un sistema de pruebas y el modelamiento del proceso térmico.
- Diseñar e implementar un sistema de control automatizado de calentamiento del horno.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Inspección

Características del horno

- Alimentación de 220(V) AC monofásico.
- Sistema de calentamiento por serpentín.
- Sistema de ventilación por motor monofásico y ventilador centrífugo.
- Control de temperatura por termostatos de gas encerrado.

Variables medibles

- Voltaje suministrado: V
- Corriente producida: I
- Resistencia eléctrica del serpentín de calentamiento: R_{serp}^E
- Temperatura del aire: T_{∞}



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Pruebas

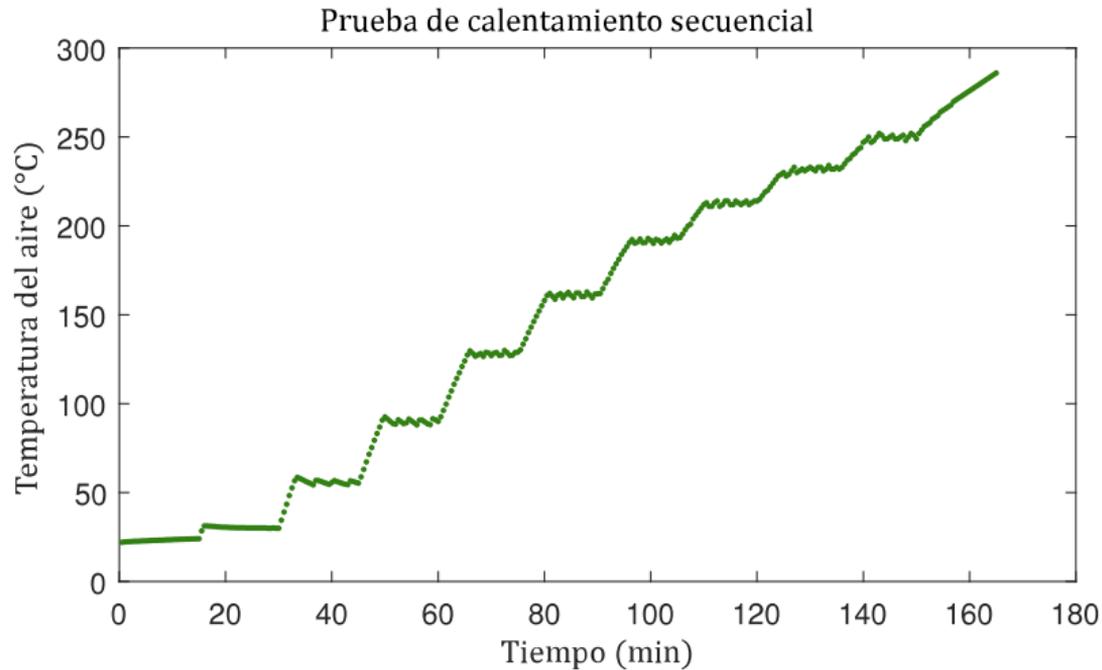
Protocolo de pruebas

- Prueba de calentamiento secuencial.
- Prueba de calentamiento continuo.
- Prueba de enfriamiento continuo.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Pruebas





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Pruebas

Medidas	LOW	2	4	6	8	10	12	14	16	18
\bar{T}_{st}	23.28	30.28	55.92	89.96	128.1	161.05	191.81	212.8	231.57	249.78
sd	0.495	0.331	1.063	1.216	0.989	1.167	1.215	1.105	1.468	1.357
$Rango$	1.6	1.2	4.2	4.4	3.3	4.1	4.5	3	6	5

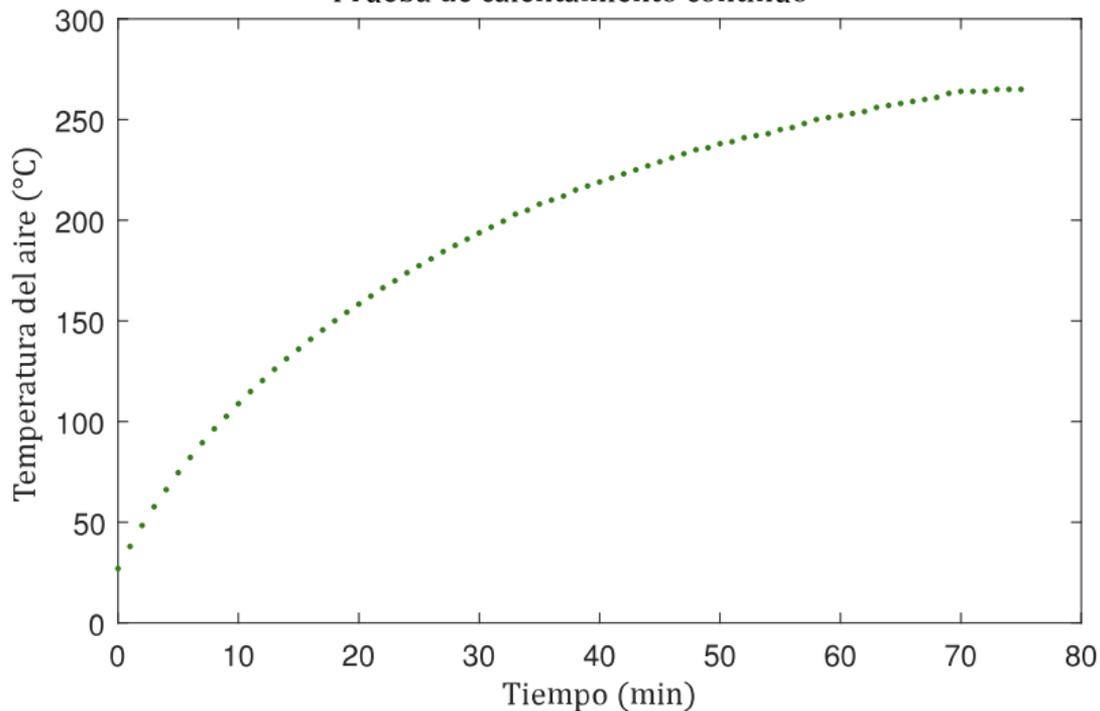
- En la posición 16 existe la mayor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 1.468 puntos.
- En la posición 2 existe la menor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 0.331 puntos.
- Rangos de variación de temperatura de entre $1,2^{\circ}C$ y $6^{\circ}C$.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Pruebas

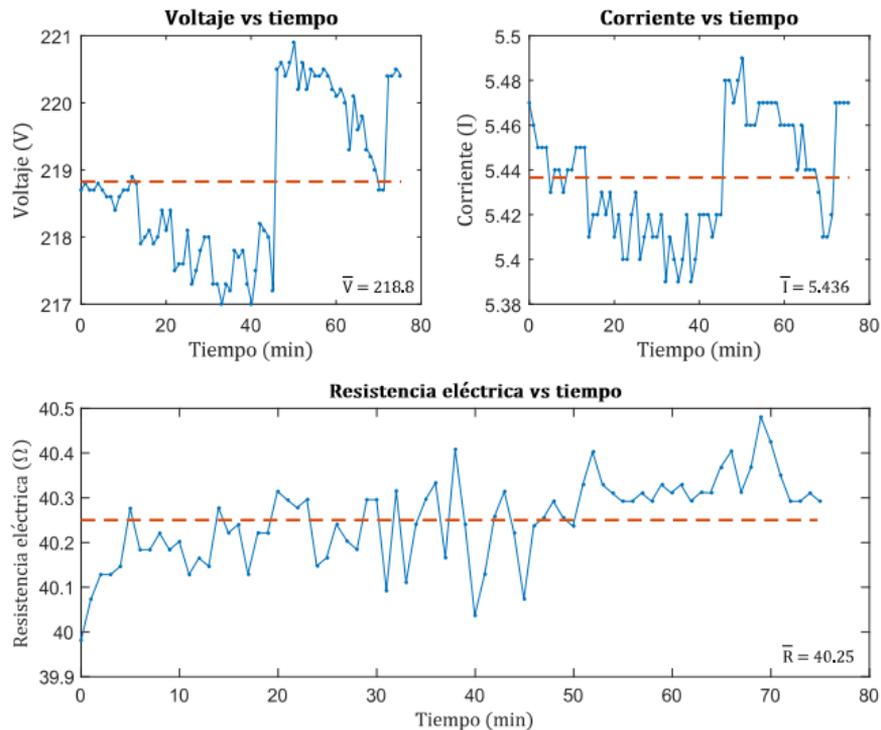
Prueba de calentamiento continuo





Desarrollo

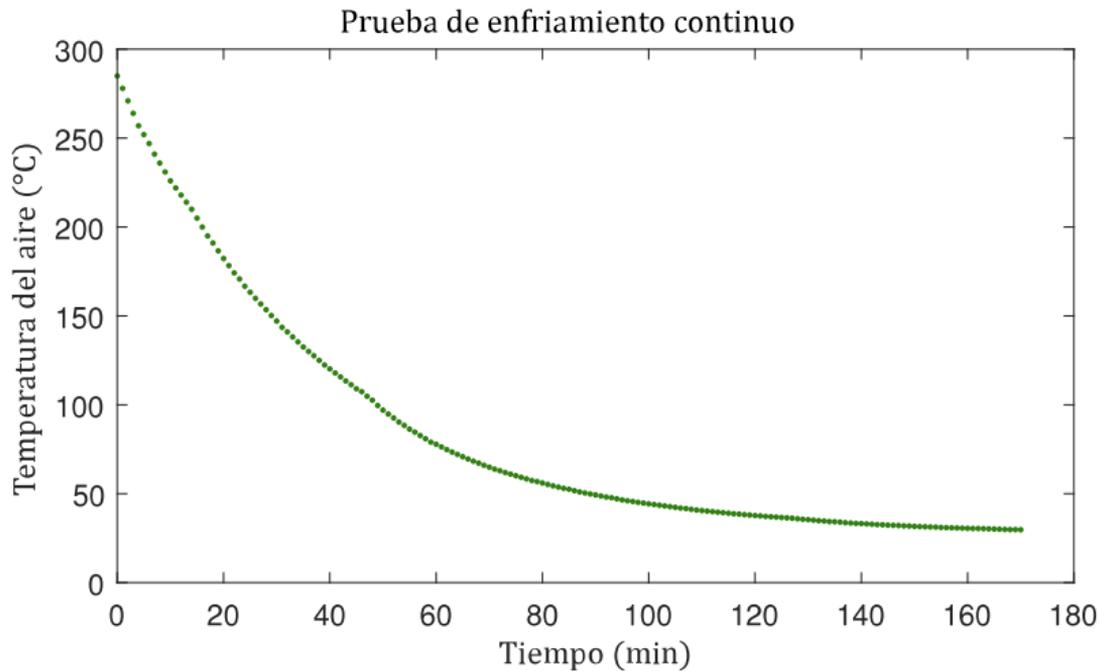
Caracterización de procesos del horno / Pruebas





Desarrollo

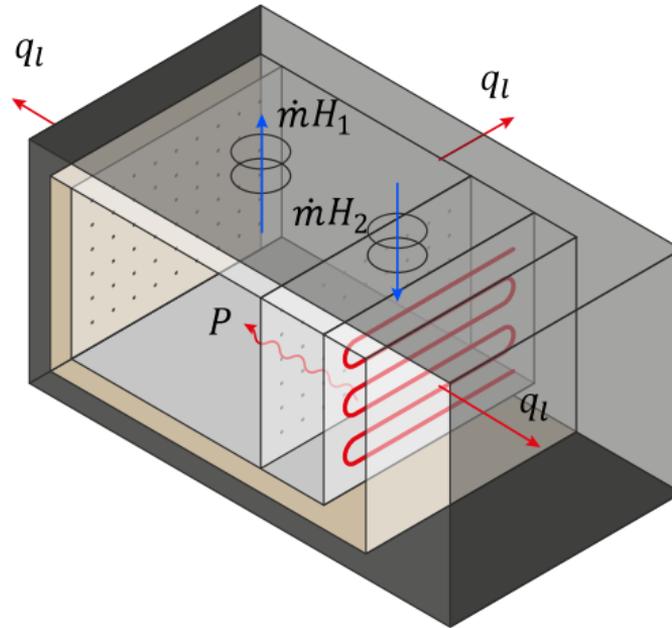
Caracterización de procesos del horno / Pruebas





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático

Balance de energía del fenómeno de calentamiento del aire

$$\underbrace{E_{in}}_{P+\dot{m}H_2} + \underbrace{E_g}_0 - \underbrace{E_{out}}_{q_l+\dot{m}H_1} = \underbrace{\Delta E_{sist}}_{\frac{dU_{sens}}{dt}}$$

- P : ganancia de calor por la potencia eléctrica y mecánica suministrada.
- $\dot{m}H_1, \dot{m}H_2$: flujo de energía tomado o cedido por el flujo de aire.
- $q_l = U_A(T_{\infty in} - T_{\infty out})$: calor perdido por las paredes.
- $\frac{dU_{sens}}{dt} = \rho_a c_{pa} \mathcal{V} \frac{dT_{\infty in}}{dt}$: calor almacenado en el sistema.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático

Consideraciones:

- $\dot{m}H = \rho v A (c_p T)$ tener en cuenta que $H_1 = c_p T_{\infty in}$ y $H_2 = c_p T_{\infty out}$
- Temperatura de exceso. $\Theta(t) = T_{\infty in}(t) - T_{\infty out} \quad \therefore \quad d\Theta = dT_{\infty in}$
- Utilizar propiedades del aire promedio constantes.
- Considerar dependencia del fenómeno solo del tiempo.

$$P + \rho v A (c_p T_{\infty out}) - [U_A \Theta + \rho v A (c_p T_{\infty in})] = \rho c_p \mathcal{V} \frac{d\Theta}{dt}$$

$$P - \rho v A c_p \underbrace{(T_{\infty in} - T_{\infty out})}_{\Theta} - U_A \Theta = \rho c_p \mathcal{V} \frac{d\Theta}{dt} \quad \rightarrow \quad P - \rho v A c_p \Theta - U_A \Theta = \rho c_p \mathcal{V} \frac{d\Theta}{dt}$$



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático

Resultado analítico de la ecuación

Forma de la temperatura de exceso del aire:

$$\Theta(t) = \frac{P}{\rho v A c_p + U_A} \left[1 - \exp \left(\frac{-(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p \mathcal{V}} t \right) \right]$$

Forma de la temperatura exacta del aire:

$$T_{\infty in}(t) = \frac{P}{\rho v A c_p + U_A} \left[1 - \exp \left(\frac{-(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p \mathcal{V}} t \right) \right] + T_{\infty out}$$



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático

Forma de la función obtenida

$$\Theta(t) = A[1 - \exp(-Bt)]$$

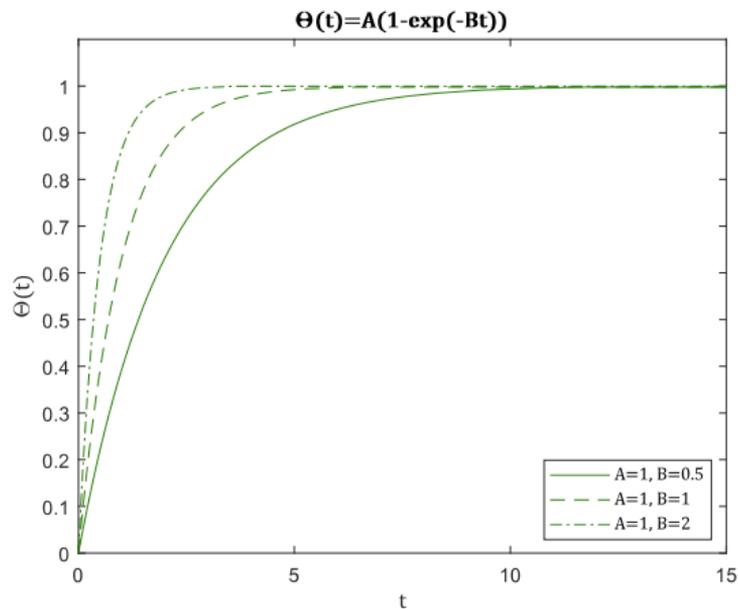
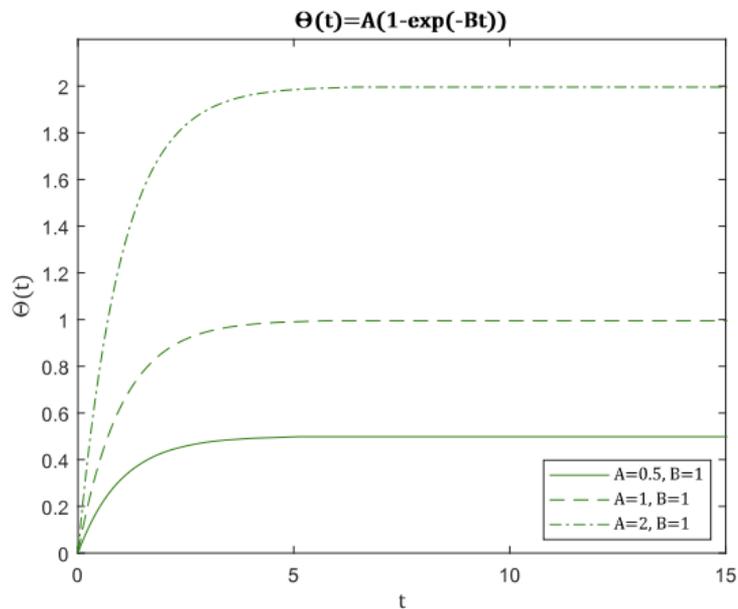
Donde:

- $A = \frac{P}{\rho_{\infty} v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A}$
- $B = \frac{(\rho_{\infty} v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A)}{\rho_{\infty} c_{p\infty} \mathcal{V}}$



Desarrollo

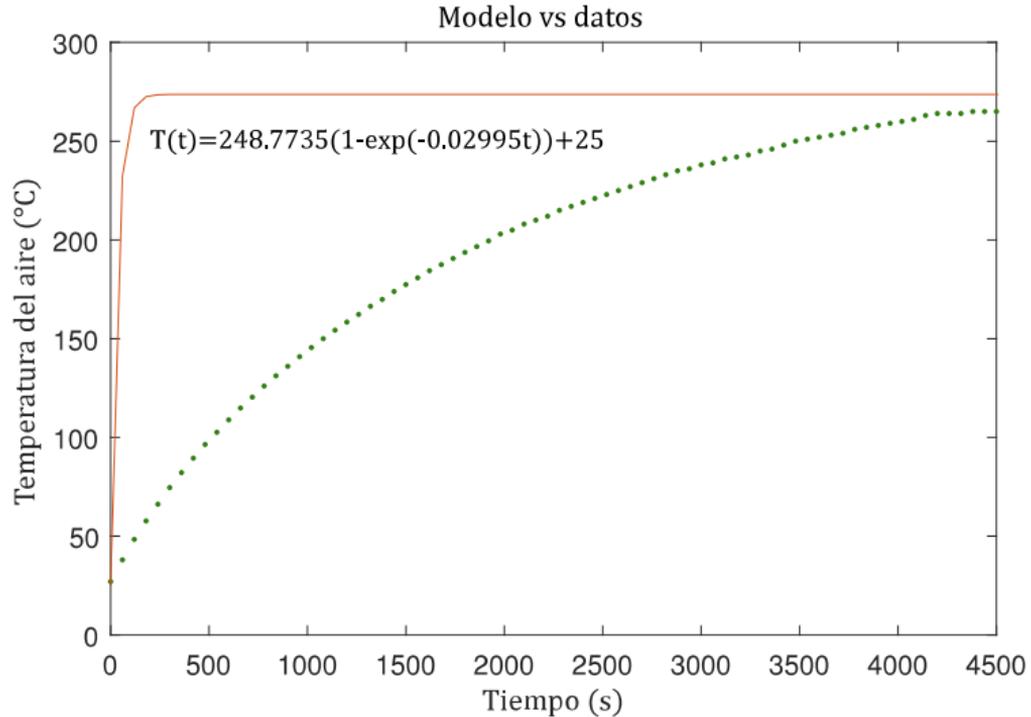
Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Comparación modelo vs datos





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Modelo matemático

Análisis del resultado de modelo

El coeficiente B es el que controla la rapidez del comportamiento creciente de la temperatura.

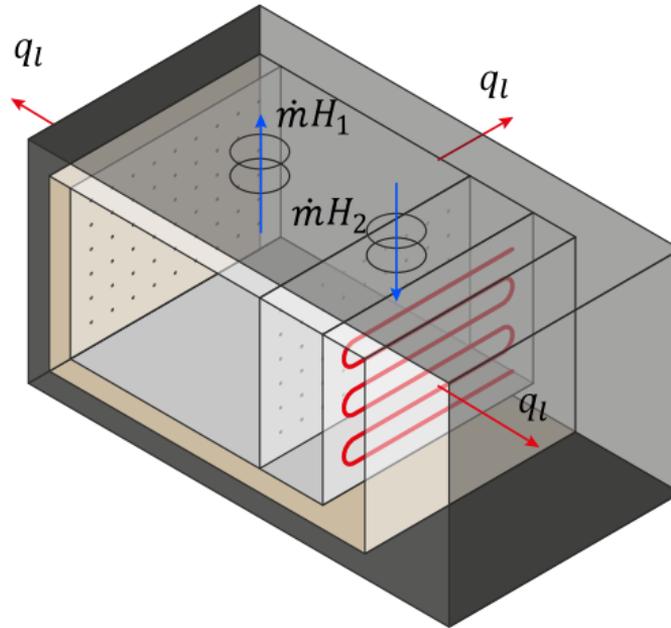
Para corregir este comportamiento del modelo matemático se propone lo siguiente:

- Evaluar el fenómeno de enfriamiento del aire para comparar propiedades y coeficientes.
- Realizar un ajuste por mínimos cuadrados y comparar esta función con la del modelo.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Corrección del modelo





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Corrección del modelo

Balance de energía del fenómeno de enfriamiento del aire

$$\underbrace{E_{in}}_{\dot{m}H_2} + \underbrace{E_g}_0 - \underbrace{E_{out}}_{q_l + \dot{m}H_1} = \underbrace{\Delta E_{sist}}_{\frac{dU_{sens}}{dt}}$$

$$\dot{m}H_2 - (U_A(T_{\infty in} - T_{\infty out}) + \dot{m}H_1) = \rho_{\infty}c_{p\infty}\mathcal{V}\frac{dT}{dt} \quad \rightarrow \quad -\rho\nu A c_p \Theta - U_A \Theta = \rho c_p \mathcal{V} \frac{d\Theta}{dt}$$



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Corrección del modelo

Resultado analítico de la ecuación

Forma de las temperaturas de exceso del aire:

$$\Theta = \Theta_i \exp\left(\frac{-(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p \mathcal{V}} t\right)$$

Forma de la temperatura exacta del aire:

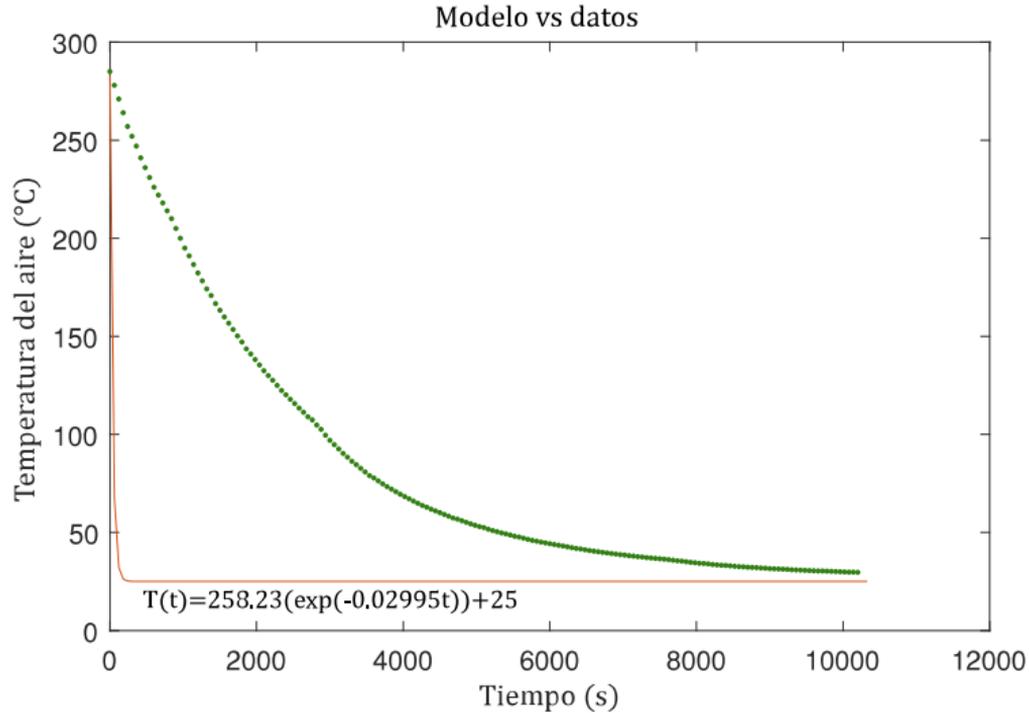
$$T_{\infty in} = (T_{\infty max} - T_{\infty out}) \exp\left(\frac{-(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p \mathcal{V}} t\right) + T_{\infty out}$$

El coeficiente B del fenómeno de calentamiento es el mismo coeficiente B del fenómeno de enfriamiento



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Comparación modelo vs datos





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Comparación modelo vs datos

Análisis del resultado de modelo

- Despreciar los efectos espaciales es teóricamente correcto pero prácticamente incorrecto.
- Esta consideración asume que todo el volúmen de aire cambia su temperatura instantaneamente.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Mínimos cuadrados

Mínimos cuadrados para el calentamiento

Dada la función

$$\Theta(t) = A[1 - \exp(-Bt)]$$

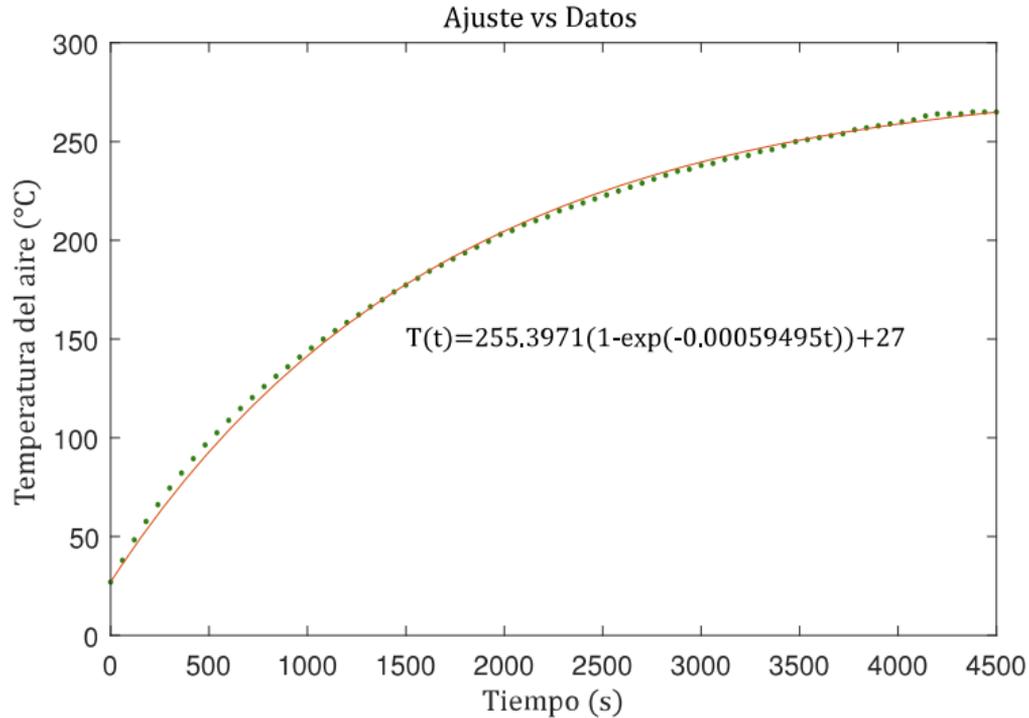
$$\ln(A - \Theta(t)) = \ln(A) - Bt \quad \rightarrow \quad Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$\beta_i = (X^t X)^{-1} X^t Y$$



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Mínimos cuadrados





Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Mínimos cuadrados

Comparación de coeficiente modelo vs ajuste

- Coeficiente de determinación del ajuste: 0,9978 – 99,78 %
- Error relativo entre coeficientes *A*: 0,026 – 2,6 %
- Error relativo entre coeficientes *B*: 43,3404 – 4334,04 %



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Corrección del modelo

Comparación de coeficiente modelo vs ajuste

Para corregir el coeficiente B se introduce el factor de corrección χ al modelo.

$$B = \chi \frac{(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p \mathcal{V}}$$

$$\chi = \frac{5,9495 \times 10^{-4}}{0,02995} = 19,868 \times 10^{-3}$$



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Corrección del modelo

Coefficiente χ en el modelo

Para corregir el coeficiente B se introduce el factor de corrección χ al modelo.

$$T_{\infty in}(t) = \frac{P}{\rho v A c_p + U_A} \left[1 - \exp \left(\chi \frac{-(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p V} t \right) \right] + T_{\infty out}$$

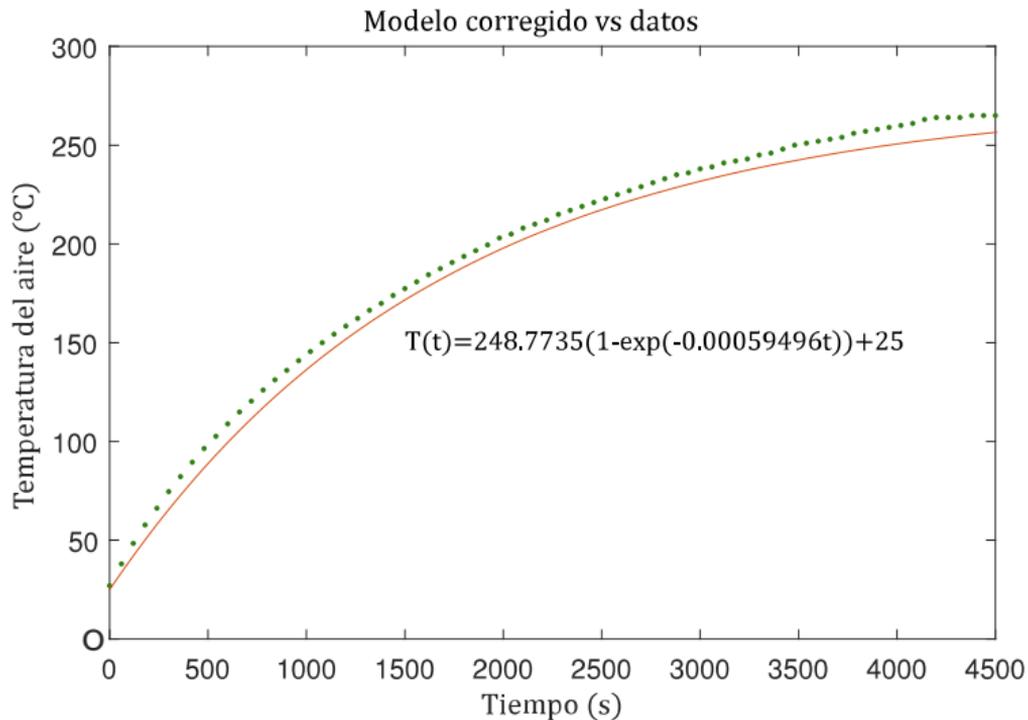
$$T(t) = 248,7735 [1 - \exp(-0,00059496t)] + 25$$

Coefficiente de determinación de esta nueva función: 0.9967.



Desarrollo

Caracterización de procesos del horno / Corrección del modelo





Desarrollo

Mantenimiento preventivo

Partes del horno

- Carcasa
- Puerta
- Cámara principal
- Serpentín
- Ventilador
- Motor
- Aislante
- Sistema de control



Desarrollo

Mantenimiento preventivo

Actividades realizadas

- **Limpieza:** Actividad periódica que mantiene los componentes del horno libre de impurezas y suciedad que dificulten o imposibiliten su buen funcionamiento.
- **Inspección de estado:** Revisión visual o con instrumentos de verificación tanto de componentes eléctricos como mecánicos para obtener información del funcionamiento de los mismos.
- **Calibración:** Corrección de posición o ajuste de componentes mecánicos o corrección de calibración y/o programación de componentes electrónicos sujeto a afecciones sufridas por el uso del equipo.
- **Cambio de componentes:** Reemplazo de componentes que hayan cumplido su tiempo de vida útil para prevenir paros imprevistos del horno.
- **Lubricación:** Lubricar motor según indicaciones del fabricante.



Parámetros de diseño

- Tolerancia de temperatura en estado estable: $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- Máxima temperatura requerida: 250°C
- Alimentación del sistema de control: directamente de la fuente del horno

ON - OFF vs PID

- Proceso intrínsecamente lento.
- Beneficios del PID no aprovechados.
- Único aporte del PID mantener la temperatura en un valor constante.
- Control ON - OFF con relé puede efectuar el control bajo los parámetros de diseño.

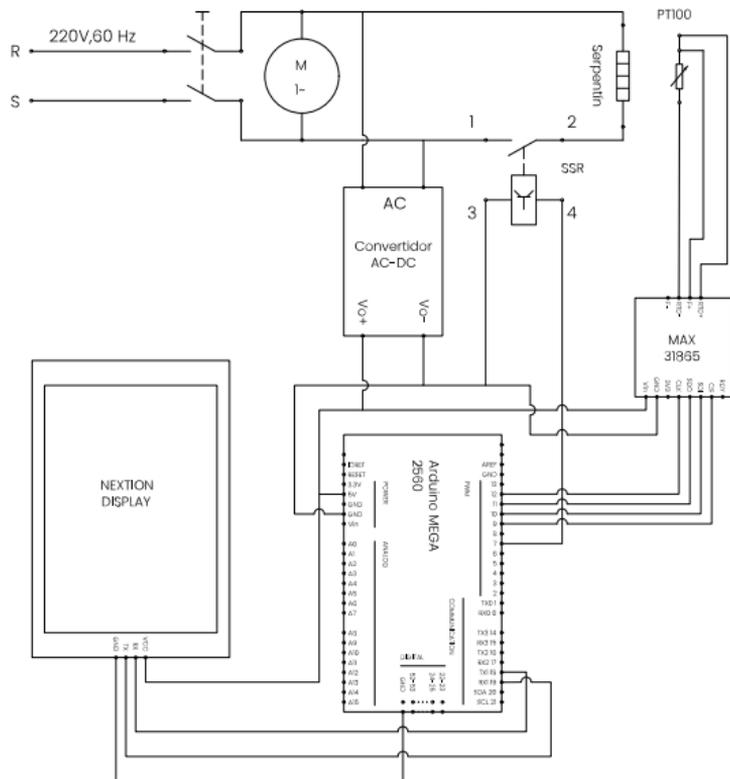


Desarrollo

Automatización

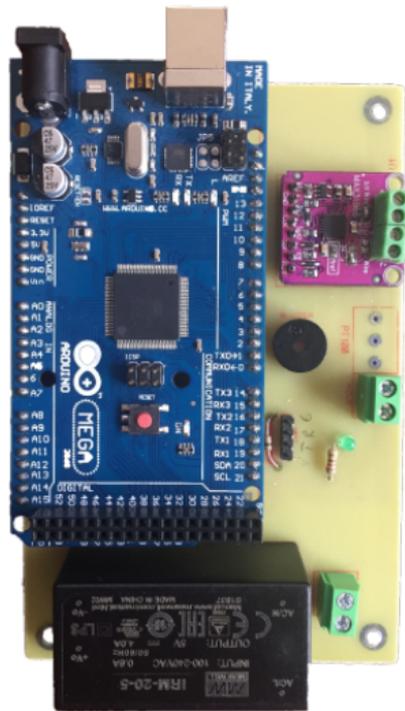
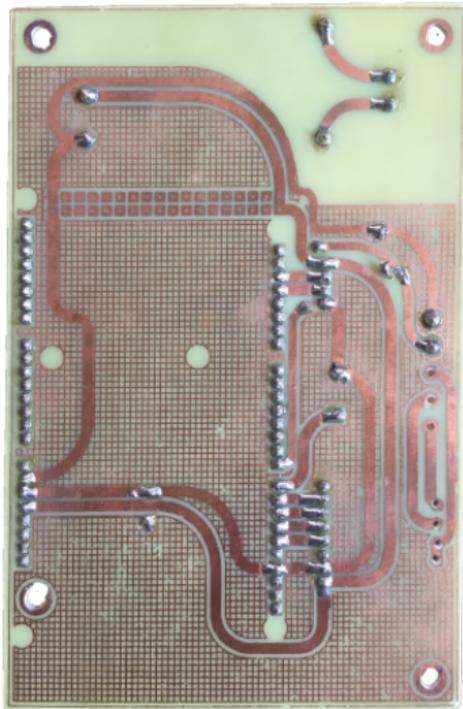
Instrumentos utilizados

- Sensor de temperatura: PT100
- Acondicionador de señal: MAX31865
- Actuador de control: SSR
- Controlador: Arduino mega 2560
- Alimentación independiente: IRM 20-5
- HMI: Pantalla táctil Nextion





Desarrollo Automatización





Desarrollo

Automatización

Sobre el diseño de la interfaz

- Permite ingresar datos de temperatura.
- Permite ingresar datos de tiempo en minutos y segundos.
- Gráfica la temperatura seteada y medida.
- muestra el tiempo total transcurrido.
- permite detener el proceso en cualquier momento.

Sobre el diseño del algoritmo

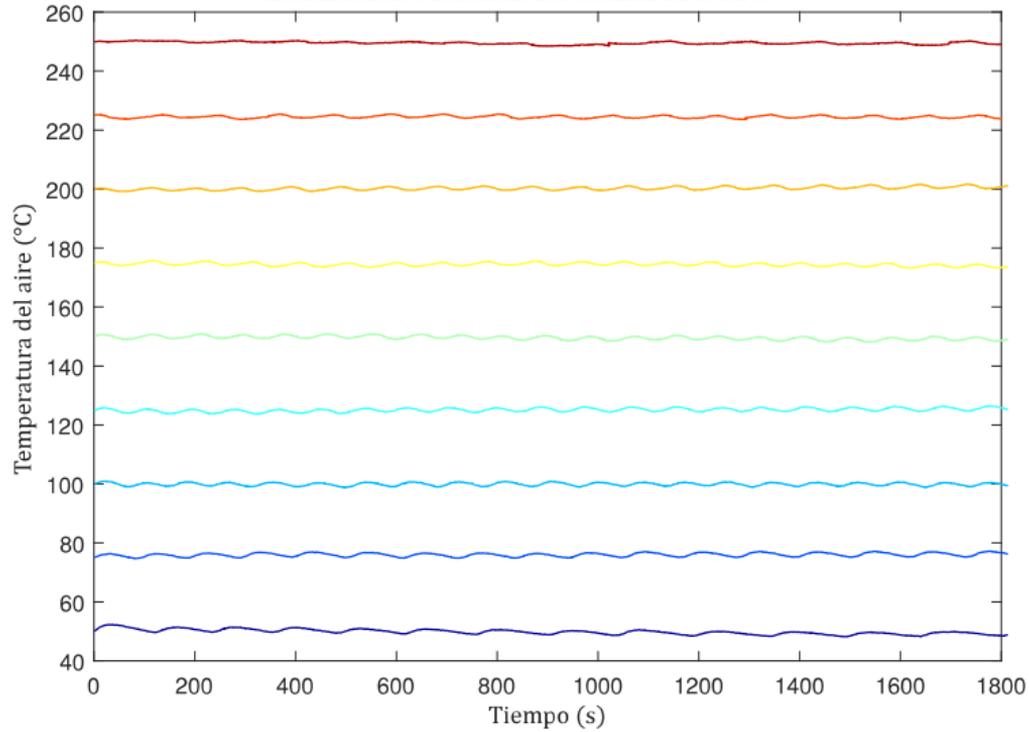
- Recibe datos de temperatura.
- Envía y recibe datos a la pantalla.
- Realiza el proceso de control.
- Emite una señal al finalizar el proceso.



Desarrollo

Automatización

Calentamiento secuencial con sistema de control





Desarrollo

Automatización

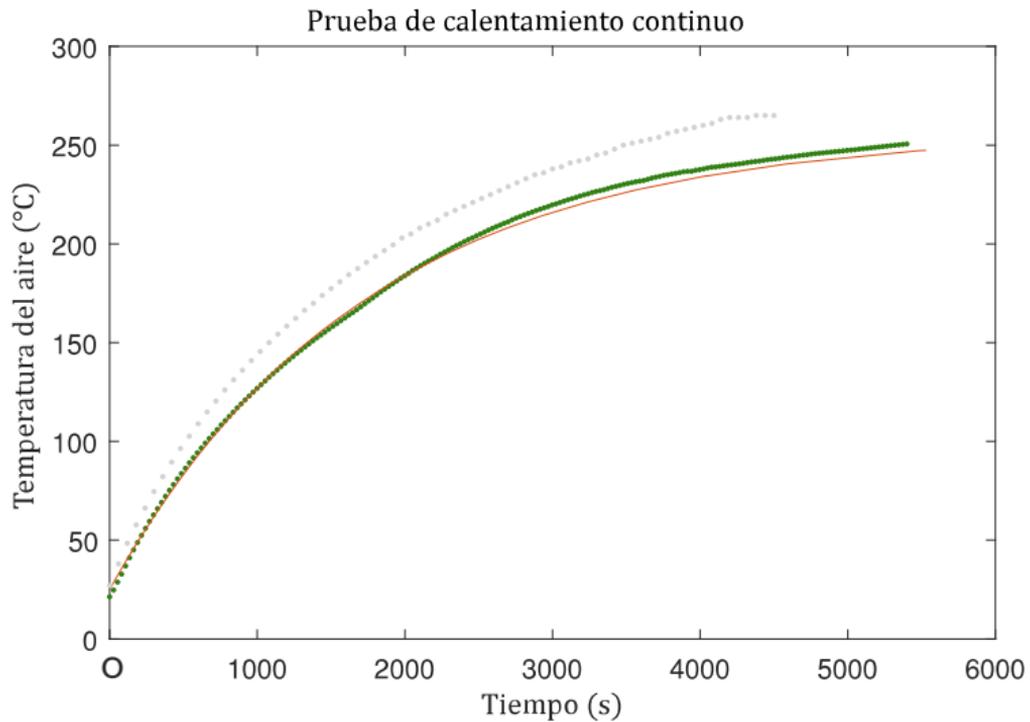
Medidas	T_{sp1}	T_{sp2}	T_{sp3}	T_{sp4}	T_{sp5}	T_{sp6}	T_{sp7}	T_{sp8}	T_{sp9}
\bar{T}_{st}	50.73	75.6	100.3	125.09	149.85	174.7	199.7	224.55	249.67
T_{sp}	50	75	100	125	150	175	200	225	250
$T_{sp} - \bar{T}_{st}$	0.73	0.6	0.3	0.09	-0.15	-0.3	-0.3	-0.45	-0.33
sd	0.56	0.57	0.5	0.54	0.51	0.46	0.42	0.4	0.28
$Rango$	2.86	1.96	2.08	2.16	2.22	1.77	1.5	1.55	1.2

- Los valores correspondientes a T_{sp2} presentan la mayor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 0.56 puntos.
- Los valores correspondiente a T_{sp9} presentan la menor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 0.28 puntos.
- Rangos de variación de temperatura entre $1,2^{\circ}\text{C}$ y $2,86^{\circ}\text{C}$.



Desarrollo

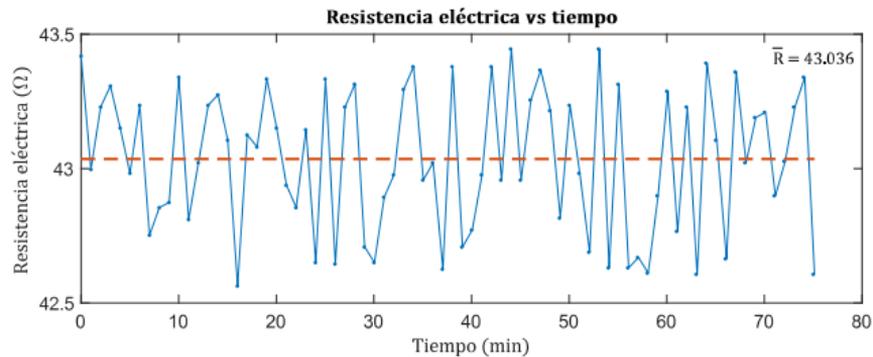
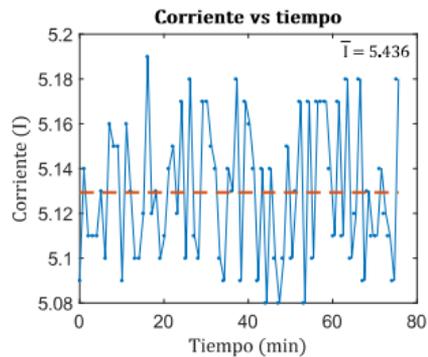
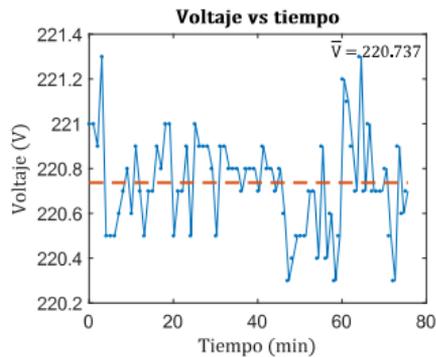
Automatización





Desarrollo

Automatización

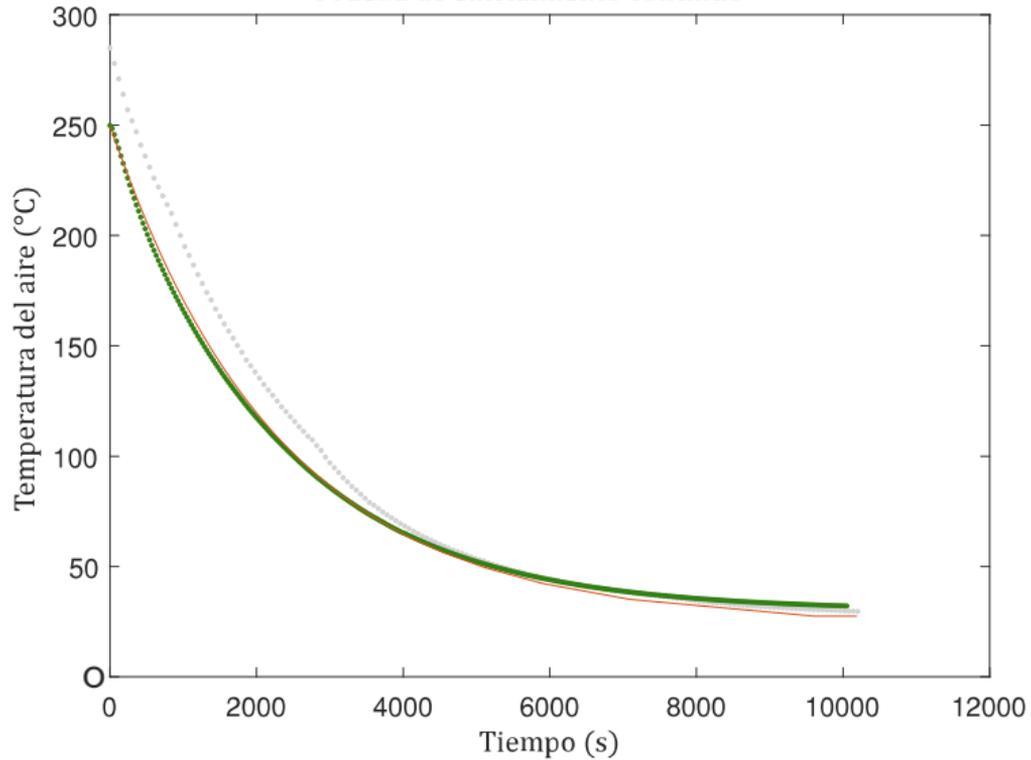




Desarrollo

Automatización

Prueba de enfriamiento continuo





Conclusiones y recomendaciones

Objetivo

Diseñar un plan de mantenimiento del equipo.

Conclusion

Se realizaron efectivamente las actividades planificadas en las partes del horno, además, la implementación del sistema de control como mantenimiento preventivo y modificativo, se desarrolló también un plan de mantenimiento y un manual de usuario.

Recomendación

Seguir el manual de usuario y el plan de mantenimiento para asegurar el buen uso del horno, realizar mantenimientos documentando cada actividad y ser cauto con el sistema de control.



Conclusiones y recomendaciones

Objetivo

Caracterizar el horno mediante un sistema de pruebas y el modelamiento del proceso térmico.

Conclusion

El modelo propuesto se ajusta un 99,67 % con los datos obtenidos, se corrigió objetivamente su problema inicial y se obtuvo un conocimiento profundo del comportamiento del fenómeno reflejado en las funciones de temperatura.

Recomendación

En caso de ser necesario, realizar un análisis más a fondo de las pérdidas de calor en las secciones calientes que no se pueden evitar.



Conclusiones y recomendaciones

Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de control automatizado de calentamiento del horno.

Conclusion

El sistema ON - OFF cumple adecuadamente las condiciones de diseño propuestas para el sistema de control, este garantiza un control mucho más estable que el sistema anterior y la interfaz ofrece la información necesaria del proceso programado.

Recomendación

Tener precaución con el manejo de la placa PCB y sus componentes, seguir el manual de usuario para un correcto uso del sistema.



¿PREGUNTAS?