

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA EN DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA PRUEBAS MECÁNICAS EN POLÍMEROS

Villalón Ramos, Victor Manuel; Ruiz Hernández, Raúl; Ramírez, Valdés, Francisco Javier;
Rosas González, Alicia; Ampudia Ramírez, Federico
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Reynosa
Departamento de Metal-Mecánica
Lomas del Real de Jarachina Sur. C.P. 88730, Reynosa, Tamps. México.
89 99 29 00 19
victor.vr@reynosa.tecnm.mx ; raul.rh@reynosa.tecnm.mx ; francisco.rv@reynosa.tecnm.mx ;
alicia.rg@reynosa.tecnm.mx ; federico.ar@reynosa.tecnm.mx

RESUMEN

Este trabajo documenta el diseño del control de temperatura aplicado para la cámara de pruebas de un dispositivo portátil para análisis de tensión mecánica en probetas poliméricas. Dentro de esta se encuentra un medidor de tensión por tracción (*pull tester*) donde se colocan las muestras de las mencionadas probetas para realizar el análisis de esfuerzo por tensión. La idea original era que la temperatura a la que se realizaban las pruebas fuera constante (70 °C), pero en la práctica se presenta el fenómeno de elevación descontrolada de temperatura (disparo térmico) llegando a más de 90 °C. Toda vez que el sistema solamente tiene un control ON-OFF (termostato), en este documento se propone la implementación de la técnica de control PID con el objetivo de mantener la estabilidad de la temperatura dentro de la cámara de pruebas, procurando minimizar fluctuaciones y evitando el disparo térmico.

Palabras clave: Control de temperatura, PID, Análisis mecánico en polímeros, Dispositivo portátil.

ABSTRACT

This work documents the design of the applied temperature control for the test chamber of a portable device for mechanical stress analysis in polymeric specimens. Inside this there is a tensile stress meter (*pull tester*) where the samples of the aforementioned test tubes are placed to perform the stress stress analysis. The original idea was that the temperature at which the tests were carried out was constant (70 °C), but in practice the phenomenon of uncontrolled temperature rise (thermal triggering), reaching more than 90 °C occurs. Since the system only has an ON-OFF control (thermostat), this document proposes the implementation of the PID control technique in order to maintain the stability of the temperature inside the test chamber, trying to minimize fluctuations and avoiding thermal tripping.

Keywords: Temperature control, PID, Mechanical analysis in polymers, Portable device.

1. INTRODUCCIÓN

Siendo primero por la supervivencia y después por el confort, desde que se conoció la técnica que permitió la generación del fuego, el tema del manejo y el control de la temperatura ha jugado un papel crucial para la humanidad. Las diferentes situaciones en las cuales un proceso térmico ha estado

involucrado en el desarrollo de la humanidad van de lo trivial a lo complejo. Se pueden citar los ejemplos de hacer hervir el agua con el objetivo de evitar enfermedades, así como el desarrollo de técnicas que facilitaron el tránsito de la edad de piedra a la edad del bronce o más tarde a la del hierro [1].

El eje rector de las civilizaciones que se han sucedido desde la antigüedad hasta nuestros días se basa en recursos tecnológicos y el mejor aprovechamiento y control de estos. Ciertamente, el tema de lograr hacer que un proceso realice la función que el usuario desea ha significado una importancia mayúscula.

Puntualmente en el tema de la termodinámica, el dominio de la técnica supuso el inicio de la metalurgia y la orfebrería. Con ello la evolución hacia el perfeccionamiento de mejores prácticas hicieron desarrollar nuevas áreas del conocimiento, tal es el caso de los procesos de control térmicos. Este tipo de procesos son esenciales para obtener mejores resultados trabajando con los mismos materiales, siendo uno de los casos más representativos el del acero templado [2].

Para la presente publicación, se trabajará en una planta que consiste en un dispositivo portátil que se compone de una cámara térmica para realizar pruebas de esfuerzo por tensión mecánica en probetas poliméricas. Para ello se utiliza un instrumento de medición de tensión (*pull tester*) que está ubicado al interior de la cámara de pruebas y cuyo acceso es a través de una compuerta frontal.

Toda vez que las pruebas de tracción deben de realizarse bajo una determinada temperatura, el aposento que alberga al *pull tester* posee un cuerpo calefactor que le permite llegar a los 70 °C, que es la temperatura preestablecida para este tipo de pruebas.

La idea principal es que el dispositivo sea portátil para poder desplazarlo hasta el pie de una máquina extrusora en producción para realizar pruebas en el mismo sitio.

Con base en el resultado es que se decide si se procederá a continuar con la producción de polímeros o en su defecto, se realizan los ajustes pertinentes hasta que las lecturas de las pruebas del *pull tester* sean las apropiadas según los parámetros indicados por la hojas de datos.

Cabe señalar que no obstante que la cámara de análisis posee un cuerpo calefactor en corriente directa, esta carece de un sistema de control de temperatura eficiente o útil, siendo que

únicamente se compone de un interruptor ON-OFF como forma de activar o desactivar la calefacción y un termostato. Es en este renglón donde se abre el área de oportunidad motivo de esta investigación y que se presenta como complemento y continuidad a una línea anterior la cual recoge el diseño conceptual de todo el dispositivo portátil para pruebas de tensión mecánica en muestras de polímeros [3].

2. METODOLOGÍA

Tomando en cuenta las características de operación citadas y habiendo detectado un área de oportunidad a resolver (control y la estabilidad de la temperatura) la idea central es trabajar con la misma planta (dispositivo portátil para pruebas de tensión en polímeros) pero con una propuesta de control diferente.

La metodología se basa en la descripción del escenario y en el diseño de un control con retroalimentación por sensor de temperatura empleando la técnica Proporcional-Integral-Derivativa utilizando como plataforma para adquisición y procesamiento de datos un microcontrolador de bajo costo ARDUINO® y el software de simulación numérica MATLAB-SIMULINK® como escenario de programación.

2.1. Planta

Para la propuesta que se documenta en el presente artículo, la variable a controlar es la temperatura interna de la cámara de pruebas del prototipo descrito. Recordar que este se compone de una cámara, en cuyo interior se alberga el dispositivo *pull tester* que sirve para medir la tensión mecánica ejercida en las probetas poliméricas. También existe un cuerpo calefactor que está integrado por un grupo de resistencias trabajando en Corriente Directa y es el encargado de elevar la temperatura al interior de la cámara de pruebas. Aunado a lo anterior, se encuentra un ventilador de recirculación, mismo que trabaja en sincronía con el cuerpo calefactor y sirve como un regulador térmico controlado por un termostato. Este último es el elemento con el que se establece la temperatura deseada actuando como el elemento de control. A la cámara se accede a través de la compuerta frontal, misma que es abatible. La descripción gráfica de los elementos que conforman el dispositivo se aprecia puntualmente en la Figura 1.

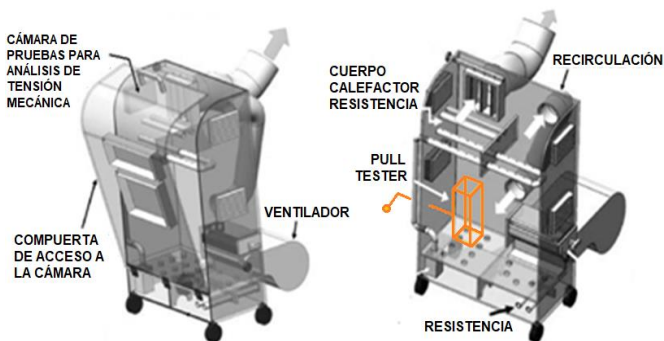


Figura 1. Infografía descriptiva de los elementos que conforman el dispositivo portátil para pruebas mecánicas en polímeros.

Cabe destacar que la función del dispositivo portátil para pruebas mecánicas en polímeros es realizar un análisis de esfuerzo a través de la tensión mecánica ejercida en una probeta polimérica en un ambiente de temperatura que debe estar controlado a 70°C de manera constante. Para la realización de las pruebas se utiliza un sistema de medición analógico de tensión *pull tester* de la marca comercial MKELE [4], mismo que está instalado al interior de la cámara de pruebas y que puede funcionar soportando temperaturas de hasta 95°C según el fabricante (Figura 2-a). Con ese instrumento de medición se hace tensar una probeta hasta el punto de su deformación o ruptura y con base en las lecturas obtenidas, se determina el proceder de la producción en serie del polímero analizado o bien, los ajustes en los compuestos de la máquina extrusora si ese fuera el caso.

Por su parte, la probeta polimérica, es el elemento con una forma característica y un estándar de fabricación ASTM-D647 [11], parecido a una “i latina”, sobre el cual se efectuará el análisis físico de esfuerzos de tensión. Esta se obtiene del proceso de extrusión de una máquina moldeadora de plásticos y es la muestra en la cual se efectuarán los análisis que indiquen que el material que la conforma está acorde a los parámetros preestablecidos (Figura 2-b).

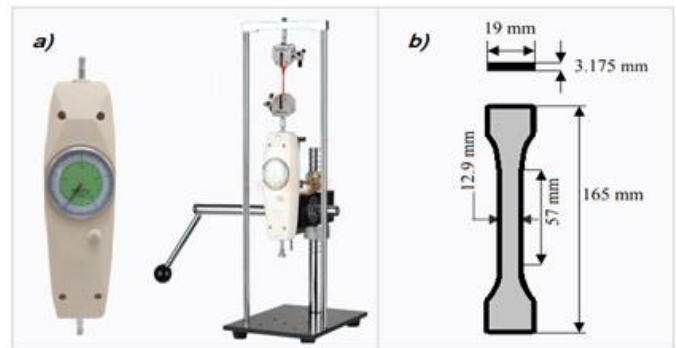


Figura 2. a) Instrumento para medir tensión mecánica en soporte (*pull tester*). b) Probeta polimérica para análisis de esfuerzo mecánico (tensión).

Como ya se hizo mención, el diseño del dispositivo portátil para pruebas poliméricas contempla una compuerta frontal que, en sí misma, constituye casi toda la cara frontal del citado dispositivo tal y como se muestra en la Figura 1. Desde luego, al abrir esta para colocar la probeta para análisis en el *pull tester*, la atmósfera al interior cambia drásticamente. Al cerrar de nuevo la compuerta, el cuerpo calefactor se encarga de llevar de nuevo a la cámara de pruebas a una temperatura determinada, no obstante esta no siempre se logra estabilizar a la temperatura preestablecida de 70 °C, siendo que en ocasiones se dispara hasta los 90°C poniendo en riesgo a los operadores o también puede llegar a presentar condición de avería para el medidor de tensión [5].

2.4. Programación

El programa que se encarga de controlar la temperatura está diseñado en SIMULINK® a través de la programación gráfica por bloques, la cual es una herramienta que este *software* posee. Para que esto sea posible, se deben de realizar las diligencias correspondientes a la instalación de las librerías *SUPPORT PACKAGE FOR ARDUINO HARDWARE* [8] que permiten a MATLAB-SIMULINK® reconocer a la tarjeta de adquisición de datos ARDUINO® como un periférico para lograr la comunicación entre *hardware* y *software*. Una vez que se realiza la configuración pertinente, se procede a diseñar el programa siguiendo el esquema básico de retroalimentación en lazo cerrado. En síntesis la dinámica consiste en que el sensor LM35 enviará señales analógicas producidas como efecto de la temperatura al dispositivo ARDUINO®. Este recibirá las mencionadas señales procesándolas acorde al programa de control PID que ha sido compilado, ejerciendo las acciones consecuentes y enviando la señal de control tipo *Pulse Width Modulation* PWM (Modulación por Ancho de Pulso en español) hacia el cuerpo calefactor que trabaja en corriente directa. Un alcance que posee este sistema es que se puede observar gráficamente la señal de control a través de la herramienta *scope*, esto permite al usuario monitorear en tiempo real el comportamiento de la temperatura al interior de la cámara y verificar si la respuesta es la deseada o se requiere ajustes. De igual manera, en caso de realizar cambios en el programa, estos pueden efectuarse en el momento de la ejecución del programa.

En la Figura 5 se muestra el panel de trabajo del entorno gráfico SIMULINK® en donde se muestra el circuito que comprende el sistema de control PID para temperatura.

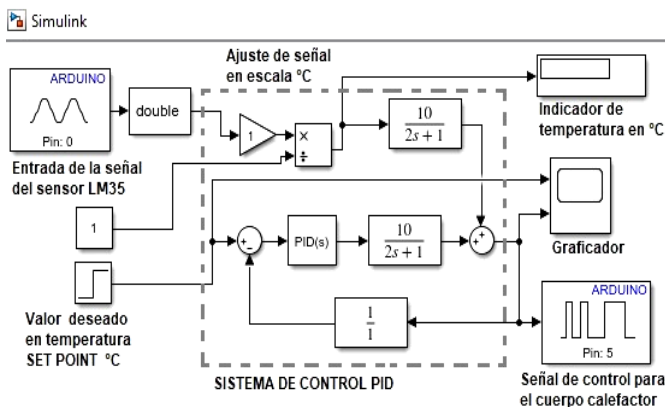


Figura 5. Diagrama de bloques realizado en SIMULINK® como propuesta para el sistema de control de temperatura.

Como se puede apreciar en la Figura 5, la adquisición de la señal eléctrica del sensor LM35 se realiza a través del bloque ENTRADA DE LA SEÑAL DEL SENSOR LM35 en el PIN:0 (ver Figura 4 y su correlación con la Figura 5). Después de ello, se ha diseñado un AJUSTE EN LA SEÑAL

EN ESCALA °C con el objetivo de acondicionar la señal de entrada. El ajuste inicial de temperatura se realiza por el usuario en el bloque VALOR DESEADO DE TEMPERATURA SET POINT °C, el valor de esta se apreciará tanto en el INDICADOR DE TEMPERATURA EN °C así como la señal en el GRAFICADOR. La señal que se obtiene será elemento de contraste que se conectará a la entrada del SISTEMA DE CONTROL PID, el cual a su vez se compone del bloque PID(s), donde se introducen los valores numéricos para cada constante de P, I y D. Seguidamente se encuentra un conjunto de bloques que albergan a la ecuación de la FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA, estas son de PRIMER ORDEN de la forma $\frac{10}{2s+1}$, constituyendo la correspondencia de respuesta que se desea obtener del sistema. Esta se basa en la relación entre la señal de salida con respecto a la señal de entrada en el dominio de la frecuencia [8 y 10]. Cabe señalar que para esta investigación la FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA $\frac{10}{2s+1}$ se ha calculado a través de datos experimentales partiendo de los cambios aplicados a la señal de entrada del sistema (Pin: 0) y observando el comportamiento de la salida [5 y 8]. Una Ecuación de PRIMER ORDEN satisface los requerimientos de la respuesta para este sistema toda vez que la respuesta es lineal. Se pueden observar dos bloques que contienen estas ecuaciones y que forman parte de la arquitectura propuesta en esta investigación. Como parte de las ecuaciones que representan la FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA también se observa que el LAZO DE RETROALIMENTACIÓN posee un bloque con una expresión $1/I$, misma que se ha colocado en este punto por efectos de sincronización del sistema.

Si la temperatura detectada por el sensor rebasa el valor deseado el sistema calefactor tendrá que disminuir su intensidad, mientras que si es menor al establecido la aumentará repitiendo la dinámica una y otra vez provocando una oscilación permanente conocida como control PROPORCIONAL (P). Por su parte, el control DERIVATIVO (D) es una reacción al cambio de la temperatura controlando la velocidad de respuesta del sistema calefactor para adaptarse con rapidez a los cambios. Por último, se tiene el control INTEGRAL (I), mismo que compensará la señal de diferencia en las oscilaciones para evitar que estas prevalezcan. La combinación de los parámetros PID logrará estabilizar la señal [10].

Para el cálculo de los valores de los campos PID, estos han sido obtenidos a través de un análisis electrónico utilizando un osciloscopio para observar la señal PWM de la salida realizando una comparativa con la herramienta *auto-tune* del mismo programa SIMULINK®. Al realizar varias pruebas partiendo de cifras sugeridas por el *software* y al observar estabilidad en el sistema, los valores finales obtenidos fueron P=80, D=20 e I= 70.

El parámetro del VALOR DESEADO se determina a través del bloque del escalón unitario, en el cual se teclea la temperatura de operación de la cámara de pruebas. Finalmente, la señal de salida se envía hacia el CUERPO

CALEFACTOR a través del puerto de salida PWM número 5~ (Ver Figura 4 y su correlación con la Figura 5). De esta manera es como se conforma un sistema de lazo cerrado, donde la señal del sensor se procesa en el microcontrolador y el actuador reacciona conforme la ley de control para que el efecto vuelva a ser sensado y se repita el proceso [5].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Teoría de Control propone varios esquemas para procesar señales y lograr que el sistema realice la función deseada, de manera estable y repetitiva [8 y 12]. En este caso, se tiene un dispositivo para pruebas mecánicas en polímeros en el cual se desea controlar la temperatura. Este ya cuenta con un control del tipo *ON-OFF*, el cual es el más simple de las técnicas de control debido a que únicamente se limita a realizar una comparación entre la variable de proceso y valor deseado, si la primera es menor a la segunda, el sistema se activa (*ON*) mientras que si es al contrario, el sistema se desactiva (*OFF*). Este tipo de sistema de control es inestable debido a que en ocasiones la temperatura se dispara llegando a superar los 90°C lo cual representa un riesgo potencial tanto para el operador como para el instrumento de medición *pull tester*.

De este modo es que se propone la implementación de un control PID que es una técnica de control que permite regular la acción en la variable en un proceso. Este calcula la diferencia entre la variable real contra la variable deseada. El parámetro Proporcional (P) mide la diferencia entre el valor actual y el deseado ejerciendo el cambio. El parámetro Integral (I) está relacionado al tiempo de respuesta para ejercer acción. Por su parte, el parámetro Derivativo (D) genera una acción predictiva a partir de la diferencia habida entre el valor deseado y el valor obtenido, iniciando una acción oportuna [5, 10 y 12].

3.1. Dinámica de pruebas

Se realiza el mismo procedimiento térmico evaluando el sistema de control *ON-OFF* primero y posteriormente el sistema PID para comparar gráficas de comportamiento. La prueba tiene una duración total de 600 segundos y el valor de temperatura establecido es de 70 °C. Cabe señalar que el sistema arranca desde una temperatura ambiente de 32 °C para ambos casos. Cuando la prueba llega a 300 segundos, se ejerce una perturbación consistente en abrir la compuerta de acceso a la cámara de pruebas durante 5 segundos después de los cuales se volverá a cerrar hasta completar el tiempo de prueba establecido.

En la Figura 6 se muestran las gráficas de comportamiento de la temperatura cuando esta variable es sometida a dos técnicas de control diferentes, *ON-OFF* y PID.

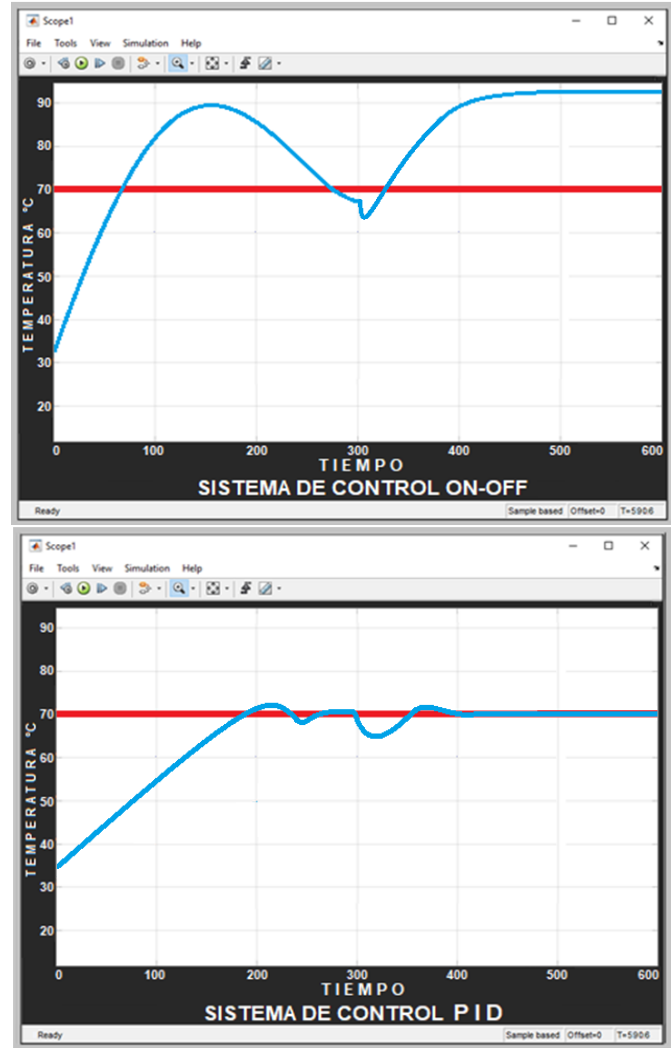


Figura 6. Comparativas de control *ON-OFF* y PID.

Comparativamente se puede apreciar una notable diferencia entre los dos tipos de control mostrados la Figura 6. Lo que sucede en el control *ON-OFF* es que el cuerpo calefactor comienza a trabajar hasta que el sensor indica que se ha alcanzado el valor establecido, una vez que eso sucede el sistema puede ser que se mantenga oscilante en una determinada temperatura, pero el reporte que indica el área de oportunidad que atiende esta investigación es que la temperatura se alcanza muy rápido tendiendo a rebasarse y no vuelve a regresar a un valor cercano a los 70 °C requeridos por el usuario. [8].

Por su parte, en la gráfica que muestra en la misma Figura 6, en la sección del control PID se aprecia una señal estable, cuya variable de control alcanza el valor deseado sin oscilaciones aunque en un tiempo mayor. Como su nombre lo indica, la naturaleza de funcionamiento de esta técnica se basa en la respuesta del sistema es proporcional entre la intensidad de la respuesta que se recibe del sensor y el elemento actuador, procesando lo valores de manera tal que, dependiendo

de que tan alejado del valor deseado se encuentre la variable a controla, se ejerza acción para aproximarla procurando no rebasar ese valor y moderando su intensidad conforme se acerca a este.

De esta manera es que, para los fines que se persiguen en la conformación de esta propuesta, se determina que el control PID presenta un comportamiento más conveniente [9].

4. TRABAJO FUTURO

Durante la realización de este artículo se pudo detectar un área de oportunidad concerniente al cálculo en el sistema de control. Se ha determinado que se podría mejorar el modelado matemático con el objetivo de afinar la obtención de las constantes P, I y D así como el cálculo para la FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA de PRIMER ORDEN que se ha utilizado. De igual manera, en lo relativo al control del sistema de análisis por tracción, se determina que este podría ser automatizado debido a que en la actualidad su operación es manual y la lectura de valores se realiza de manera directa en la carátula del instrumento *pull tester*. Después de una observación general, se apunta que un trabajo a futuro pretendería implementar un sistema automático para esta sección junto con monitor para observación de lecturas de esfuerzos en una ubicación más cómoda para el usuario al exterior de la cámara.

También se plantea una mejora en el diseño de la planta, particularmente del sistema de circulación de aire al interior de la cámara de pruebas.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los sistemas de control documentados en esta propuesta se presenta como una opción para comparar el comportamiento de la temperatura del dispositivo portátil para pruebas polimétricas sin necesidad de hacer modificaciones en la estructura principal, ni en el sistema del cuerpo calefactor. El comportamiento del sistema con la técnica *ON-OFF* (Figura 6) se observa inestable y no se puede aseverar que la variable de control se iguale al valor deseado. Se observa la tendencia a que la temperatura se dispare hasta los 90 °C y se presume que esto obedece a un sobre esfuerzo que realiza el cuerpo calefactor cuando detecta que la temperatura desciende del *SET POINT* señalado, sobreactuado sin tener un sistema de ventilación y desfogue de temperatura que de abasto la disipación de la temperatura excedente.

Por su parte, la gráfica que describe la técnica PID (Figura 6) se comporta estable y alcanza el valor establecido sin oscilaciones exageradas. Ambas propuestas fueron sometidas a las mismas condiciones de pruebas y perturbaciones.

En síntesis, el control PID permite un mejor control de la planta, no obstante, se debe de mencionar que el área de oportunidad detectada se centra en mejorar el tiempo de transición de la temperatura desde el inicio de la rutina de ejecución hasta que el valor alcanza el *SET POINT*, siendo que tarda casi 190 segundos en ejecutar la acción.

Un análisis rápido sugiere que la arquitectura física de la planta podría mejorar en el renglón del sistema circulatorio de

aire mismo que aunado a una nueva sintonización de *software* correspondiente a parámetros PID podría arrojar una mejor respuesta en cuanto al tiempo de ejecución.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Reynosa, particularmente a la Subdirección Académica, la Coordinación Institucional de Tutorías y al Departamento de Metal-Mecánica (Electromecánica y Mecatrónica) por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación.

7. REFERENCIAS

- [1] H. Alimen y M. Steve. "Prehistoria". Madrid: Siglo XX p. 58. ISBN 84-323-0034-9.
- [2] D, Heskell. "A Model for the Adoption of Metallurgy in the Ancient Middle East". *Current Anthropology*, vol. 24, no. 3, pp. 362-366. doi:10.1086/203007. 1983.
- [3] V. Villalón et al. Diseño de un prototipo de dispositivo portátil para pruebas mecánicas en polímeros. *Coloquio de investigación Multidisciplinaria* vol. 7, no.1, pp. 1158-1165. ISSN 2007-8102, 2019
- [4] Catálogo en línea Pull Tester. Consultado por última vez el 23 de julio del 2021. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/32973684565.html>
- [5] K, Ogata. *Ingeniería de Control Moderna* 5ta. Ed. México: Pearson, 2002.
- [6] Catálogo en línea ARDUINO. Consultado por última vez el 23 de julio del 2021. Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/duo>
- [7] Catálogo en línea LM35. 23 de mayo del 2021. <https://www.steren.com.mx/catalogsearch/result/?q=LM35>
- [8] F. Reyes, J. Cid y E. Vargas. *Mecatrónica Control y Automat.* México: Alfaomega. 2016.
- [9] C. Pérez. *MATLAB y sus aplicaciones en la ingeniería.* Madrid: Prentice-Hall, 2002.
- [10] A. Roca. *Control de procesos.* México: Alfaomega, 1998.
- [11] R. Ruiz et al. Control de variables en el proceso de inyección de probetas plásticas. *Pistas Educativas*, No. 118, septiembre 2016.
- [12] P. Lewis y C. Yang. *Sistemas de control en ingeniería.* Prentice-Hall. 2000.