

Sistema de control PID con sintonización por respuesta en frecuencia basado en microcontrolador



Colaboración

Benigno Muñoz Barrón; Luis Díaz Gómez; Jesús Eduardo Yáñez Chávez; José Miguel Hernández Paredes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

RESUMEN: El controlador PID es uno de los esquemas de control más utilizados. Sin embargo, a pesar de ser tan utilizado, no todas las herramientas son de fácil acceso para analizar su funcionamiento. En el presente trabajo se muestra el desarrollo y aplicación de una plataforma basada en un microcontrolador PIC18F4550 para la implementación de un controlador y la comunicación de los datos a través de USB en modo bulk. Se utiliza el método de respuesta en frecuencia para encontrar las constantes del controlador. Se validaron los resultados a través del control de velocidad de un motor de corriente directa.

PALABRAS CLAVE: PID, USB bulk, microcontrolador, control, respuesta en frecuencia.

ABSTRACT: The PID controller is the most used control scheme. However, even when it is so used, there are not tools with easy access to analyze their working. In this work a platform based on PIC18F4550 is presented for PID control implementation and USB communication through USB Bulk mode. Frequency response is used to calculate the PID constants. Results are validated through DC motor velocity control.

KEYWORDS: PID, USB bulk, microcontroller, control, frequency response.

INTRODUCCIÓN

El esquema de control PID (proporcional, integral, derivativo) es el más utilizado actualmente por su simplicidad, eficiencia y robustez [1]. Para obtener las ganancias del controlador existen diversas técnicas que han sido reportados, siendo la más utilizada el análisis de Ziegler-Nichols, y sus variaciones. Además, se han desarrollado otras técnicas de sintonización, incluyendo modificaciones que se han realizado a la estructura original del PID para mejorar su desempeño. Por otra parte la implementación del PID digital por medio de una ecuación en diferencias permite que se pueda programar en diferentes plataformas.

Es por esto que el estudio del PID es vigente, tanto como en metodologías de sintonización, como en esquemas de optimización. Por ejemplo [1] muestra en forma de tutorial diversas técnicas de diseño de controladores PID, sin embargo, aunque el desarrollo teórico del diseño de controladores es extenso, la implementación presentada es a través de MATLAB.

En [2] se muestra una aplicación de algoritmos genéticos para mejorar la sintonización de un PID para control de servomotores, la implementación se realiza en un FPGA (Field Programmable Gate Array), y en el algoritmo reportado se analizan varios parámetros para la optimización. En [3] se presenta un estudio de las estructuras se realiza un estudio para estructuras modificadas del PID FOPID, IOPID y SIMC PID aplicado a motores, utilizan como herramienta labview para la experimentación y una tarjeta de National Instruments.

Posteriormente [4] presentó un estudio de sintonización de controladores PID con algoritmos genéticos, para la implementación se utilizó Matlab y una tarjeta NI DAQ 6008. De igual manera [5] utilizó una tarjeta de National Instruments para la aplicación de un controlador PID en procesos de destilación. También [6] presentó la aplicación de un controlador PID mejorado con algoritmos genéticos para el control de temperatura y humedad.

Para la aplicación del controlador PID y tener mejor acceso y manejo de datos se ha reportado el uso de plataformas como Arduino, [7] presentó la aplicación de Arduino para controlar un UAV de 4 motores implementado el controlador en Arduino. Finalmente [8] presentó una simulación de utilizar un controlador PID, LQR y un PID fraccional, su estudio se queda en una simulación.

El estudio del controlador proporcional integral derivativo sigue vigente y en la implementación existen diversas opciones de hardware para integrarlo en las pruebas físicas, sin embargo, la cantidad de información que se maneja en el análisis de los esquemas de control hace que algunas plataformas no sean la mejor opción de implementación y algunos estudios se quedan en simulación.

En el presente artículo se presenta una plataforma de control con conexión de alta velocidad USB, para probar la plataforma se presenta una aplicación que utiliza el método de respuesta en frecuencia para la sintonización del controlador, y que puede ser adaptada para ejecutar otros algoritmos o modificaciones del esquema PID, y se utiliza la conexión USB bulk entre un microcontrolador y una computadora para transferencia y análisis de datos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Controlador PID

Un controlador PID se expresa mediante la función de

transferencia de la ecuación 1. Este modelo describe el funcionamiento en tiempo continuo.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{Ec. 1}$$

Un equivalente en tiempo discreto del controlador mencionado se muestra en la ecuación y se obtiene al sustituir S por $\frac{1}{T(1-z^{-1})}$ donde T es el periodo de muestreo.

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(K_p + K_i T + \frac{K_d}{T}) + (-K_p - \frac{2K_d}{T})z^{-1} + (\frac{K_d}{T})z^{-2}}{1 - z^{-1}} \tag{Ec. 2}$$

$$K_1 = (K_p + K_i T + \frac{K_d}{T}) \tag{Ec. 3}$$

$$K_2 = (-K_p - \frac{2K_d}{T}) \tag{Ec. 4}$$

$$K_3 = (\frac{K_d}{T}) \tag{Ec. 5}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_1 + K_2 z^{-1} + K_3 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \tag{Ec. 6}$$

$$u[k] = u[k - 1] + K_1 e[k] + K_2 e[k - 1] + K_3 e[k - 2] \tag{Ec. 7}$$

La ecuación 7 muestra la ecuación en diferencias que permite implementar la versión digital de un controlador PID, esta ecuación puede ser fácilmente programable en un microcontrolador ya que consiste simplemente de multiplicaciones y sumas, así como corrimientos si se utilizan arreglos para el manejo del error y de la salida del controlador, los coeficientes dependen de las ganancias del controlador en forma continua y del periodo de muestreo como se muestra en las ecuaciones [3-5].

Respuesta en frecuencia

El comportamiento de un sistema puede obtenerse a través de un análisis de respuesta en frecuencia. Este análisis, de acuerdo con [9], consiste en excitar la entrada del sistema con una respuesta sinusoidal del tipo

$$x(t) = X \text{sen}\omega t \tag{Ec. 8}$$

Donde ω corresponde a la velocidad angular en radianes por segundo.

Para una función de transferencia

$$G(s) = \frac{p(s)}{q(s)} = \frac{p(s)}{(s + s_1)(s + s_2) \dots (s + s_n)} \tag{Ec. 9}$$

$$Y(s) = G(s)X(s) = \frac{p(s)}{q(s)}X(s) \tag{Ec. 10}$$

$$G(j\omega) = Me^{j\phi} = M \angle \phi \tag{Ec. 11}$$

Donde M es el cociente de amplitud entre las señales sinusoidales de entrada y salida, y ϕ es el ángulo de desfase entre la señal de entrada y la respuesta del sistema.

Margen de fase y de ganancia

Se define el margen de fase como la cantidad de retardo de fase adicional en la frecuencia de cruce de

ganancia requerida para llevar el sistema al borde de la inestabilidad.

$$\gamma = 180^\circ + \phi \quad \text{Ec. 12}$$

El margen de ganancia: Recíproco de la magnitud de $|G(j\omega)|$ en la cual el ángulo de fase es de -180° .

Frecuencia de corte: Es la frecuencia en la cual la magnitud es igual a 1. Esta frecuencia está relacionada a la velocidad de respuesta del sistema a través de la ecuación $\tau = \frac{1}{\omega_c}$. Donde t es la constante de tiempo de respuesta.

Como regla se considera que si el margen de fase es positivo el sistema es estable, y si es negativo el sistema es inestable. Para valores entre 30 y 45 grados se obtiene una respuesta subamortiguada, un margen de fase menor corresponde a una respuesta con menor amortiguamiento (mayor sobrepaso u oscilaciones), y mayor a una respuesta sobre amortiguada (puede ser lenta).

Sintonización por respuesta en frecuencia

El objetivo del método consiste en encontrar los parámetros de ganancia del controlador digital que hagan que el comportamiento del sistema corresponda con el deseado de acuerdo a las condiciones de estabilidad. Se puede realizar un análisis en tiempo continuo y posteriormente discretizar el controlador para que corresponda con el esquema de la figura 1. Debido a que se desea implementar un controlador digital, analizando en tiempo continuo, el efecto del periodo de muestreo se puede aproximar mediante

$$G(s) = e^{-\frac{sT}{2}}$$

De acuerdo con [10], el método de sintonización por respuesta en frecuencia puede resumirse en los siguientes pasos.

Para el sistema que se muestra en la figura, la función de transferencia en lazo abierto está dada por la ecuación:

$$L(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \times K \times H(s) \times e^{-\frac{sT}{2}} \quad \text{Ec. 13}$$

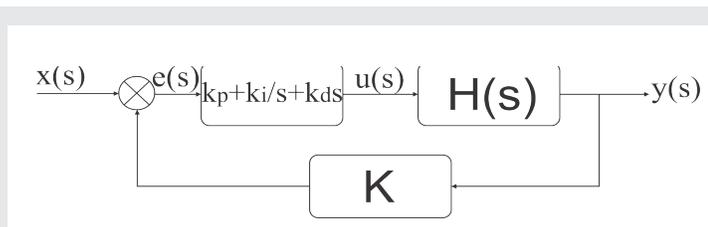


Figura 1. Esquema de control PID

a) Los objetivos están expresados en términos de la frecuencia de cruce y el margen de fase, para que se cumpla la regla de estabilidad.

$$|L(j\omega_c)| = 1 \quad \text{Ec. 14}$$

$$\Theta_m = 180^\circ + \text{Arg}[L(j\omega_c)] \quad \text{Ec. 15}$$

Usualmente, el sistema sin controlador no cumplirá con las condiciones establecidas por las ecuaciones 14 y 15, es por ello que el proceso consiste en encontrar las ganancias del modelo de PID cuya aportación ayude a satisfacer las condiciones.

El retardo asociado al muestreo tiene un magnitud unitaria, pero tiene un desfase que se encuentra mediante la ecuación.

$$\text{Arg}[e^{-\frac{sT}{2}}] = \frac{-\omega_c T}{2} \text{ rad} = \frac{-180\omega_c T}{2\pi} \text{ deg} \quad \text{Ec. 16}$$

De tal manera que las condiciones de estabilidad para el sistema de control ilustrado en la figura 1 queda expresado en las siguientes ecuaciones.

$$|(K_p + j\omega_c K_d) K H(j\omega_c)| = 1 \quad \text{Ec. 17}$$

$$\Theta_m = 180^\circ + \text{Arg}[H(j\omega_c)] + \tan^{-1}\left(\frac{\omega_c K_d}{K_p}\right) - \frac{-180\omega_c T}{2\pi} - 5^\circ \quad \text{Ec. 18}$$

$H(j\omega_c)$ y $\text{Arg}[H(j\omega_c)]$ pueden ser calculados si la función de transferencia $H(s)$ es conocida, por otra parte, estos parámetros también pueden ser obtenidos de forma experimental si el sistema está disponible.

b) Especifique el margen de fase Θ_m (relacionado con el amortiguamiento) y la frecuencia de cruce ω_c (relacionada al tiempo de respuesta mediante $\tau = \frac{1}{\omega_c}$).

c) Obtenga la función de transferencia en lazo abierto $H(s)$, y calcule la magnitud y la fase en la frecuencia de cruce deseada.

$$A = |H(j\omega_c)| \quad \text{Ec. 19}$$

$$\alpha = \text{Arg}[H(j\omega_c)] \quad \text{Ec. 20}$$

d) Calcule el ángulo necesario para cumplir la condición de estabilidad.

$$\beta = \Theta_m - 175^\circ - \alpha + \frac{180\omega_c T}{2\pi} \quad \text{Ec. 21}$$

e) Resuelva para las ganancias Proporcional y Derivativa

$$k_p = \frac{1}{AK} \cos \beta \quad \text{Ec. 22}$$

$$k_d = \frac{1}{\omega_c AK} \sin \beta \quad \text{Ec. 23}$$

f) Determine la ganancia integral.

$$k_i = \omega_c k_p \tan 5^\circ \quad \text{Ec. 24}$$

Plataforma de control

Para la implementación del algoritmo se diseñó un sistema automático basado en un microcontrolador PIC18F4550, este microcontrolador se utilizó para el desarrollo de la plataforma ya que cuenta con un módu-

lo USB 2.0 que se utilizó para la comunicación con una interfaz en computadora. Además entre los microcontroladores de 8 bits, a diferencia de otros semejantes, cuenta con un multiplicador por hardware de 8 bits lo que permite desarrollar operaciones a mayor velocidad, puede trabajar hasta 48 MHz, es posible configurar su pwm con una resolución de 10 bits y finalmente está disponible de forma comercial tanto en formato DIP como de montaje superficial. La plataforma desarrollada se resume en el esquema que se muestra en la figura 2.

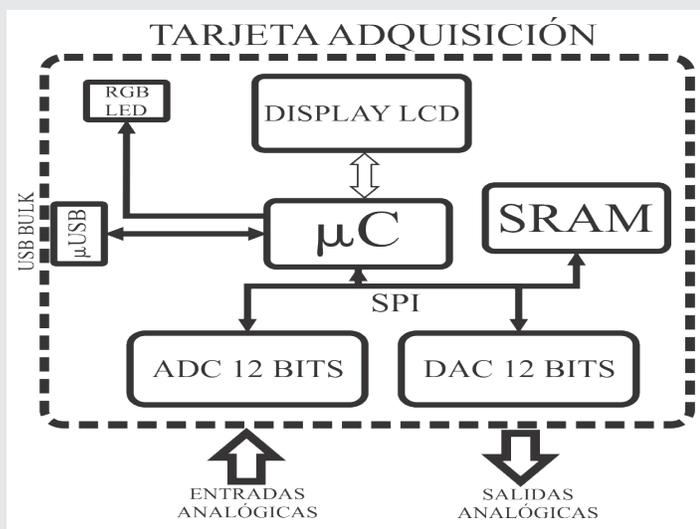


Figura 2. Esquema del sistema de adquisición

El microcontrolador utilizado es un pic18f4550, el convertidor analógico - digital es un MCP3208, el convertidor digital a analógico es un MCP4902, y la memoria SRAM es una 23LC1024, sus principales características se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Datos del ADC

MCP3208	
Número de bits	12 bits
Protocolo	SPI
Frecuencia de muestreo	100 kSPS
Canales	8
Voperación	2.7 - 5.5 V

Tabla 2. Datos del DAC

MCP4902	
Número de bits	12 bits
Protocolo	SPI
Tiempo de establecimiento	4.6µs
Canales	2
Voperación	2.7 - 5.5 V

Tabla 3. Datos memoria SRAM

23LC1024	
Número de bits	128k×8bit (1 Mbit)
Protocolo	SPI
Velocidad de reloj	20 MHz
Modo de operación	Byte, página y secuencial
Voperación	2.7 - 5.5 V

El sistema se desarrolló en una tarjeta de circuito impreso de dos capas, el cual se muestra en la figura 3.

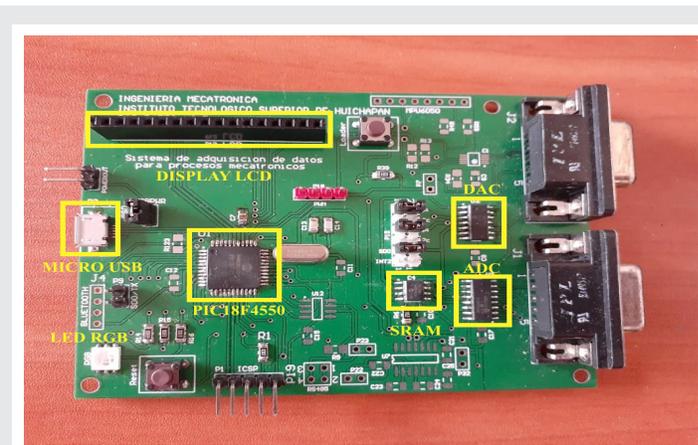


Figura 3. Sistema de adquisición de datos

Conexión USB Bulk

La conexión USB Bulk se realizó a través del módulo usb del pic18f4550. Este módulo soporta cuatro tipos de transferencias definidas en el protocolo USB.

Asíncrono: Provee un método de transferencia para grandes cantidades de datos, con un tiempo de entrega asegurado, sin embargo, la integridad no está asegurada.

Bulk: Permite una gran cantidad de datos para ser entregados, sin embargo, el tiempo de entrega no está asegurado.

Interrupción: Este tipo provee tiempo de entrega asegurado para pequeños bloques de datos más integridad asegurada.

Control: Este tipo es para control de dispositivos.

Para el desarrollo de esta plataforma se consideró el uso del modo bulk, ya que garantiza la integridad de los datos, y aunque el tiempo de entrega no está totalmente garantizado, usualmente permite una escritura y lectura cada milisegundo hacia la computadora. Además, el puerto USB es utilizado para la transferencia de datos, pero el controlador se ejecuta en el microcontrolador.

La integración de la plataforma al sistema de control se muestra en la figura 4, como puede observarse la tarjeta de adquisición de datos se conecta a la planta y a través de usb hacia una computadora para la transferencia de datos. La plataforma permite enviar los datos necesarios hacia la computadora.

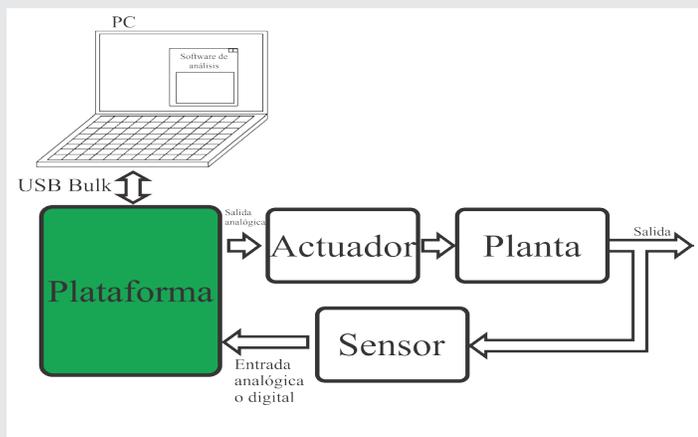


Figura 4. Integración de la plataforma

RESULTADOS

Se desarrolló un software de comunicación con una computadora personal que se muestra en la figura 5.

El software permite la configuración de los parámetros del controlador PID, realiza la discretización de las constantes y permite configurar el periodo de muestreo. El microcontrolador ejecuta el algoritmo de control PID y envía diferentes variables a la com-

putadora para ser analizados. Para probar el funcionamiento de la plataforma de hardware-sofware se utilizó un sistema de control de velocidad que se muestra en la figura 6, donde se utiliza un motor como sistema y un motor encontrado utilizado como sensor de velocidad.

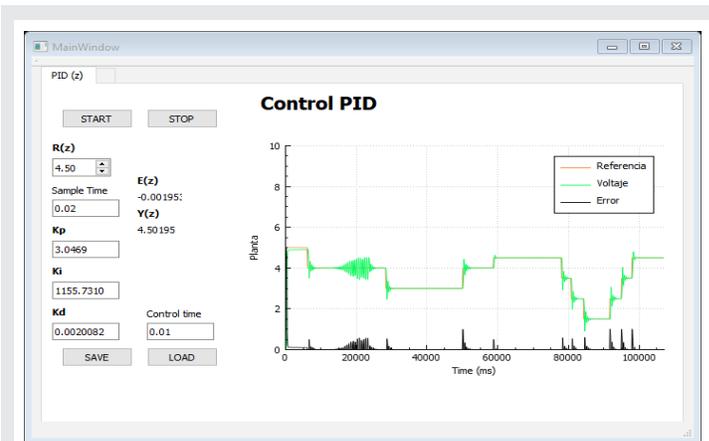


Figura 5. Interfaz de configuración para computadora personal.

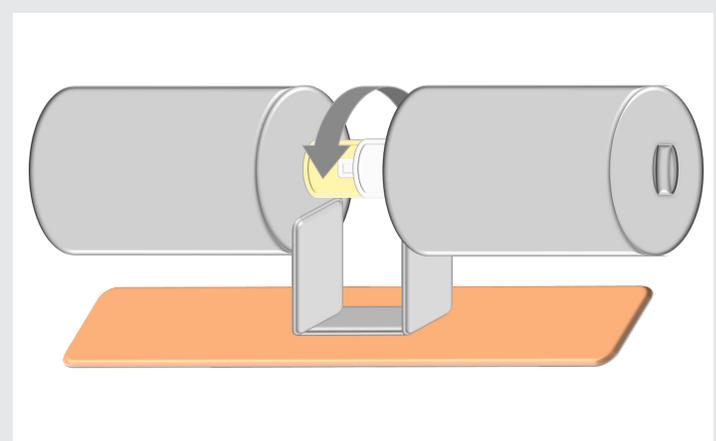


Figura 6. Sistema de control de velocidad de un motor de CD.

El controlador se probó a diferentes periodos de muestreo, alcanzando un máximo de 1 KHz para obtener comunicación en línea con el software en computadora. Los resultados obtenidos se muestran en la figura.

Para obtener los parámetros de sintonización del sistema, descritos en la metodología se realizaron pruebas tanto con equipo de laboratorio como con la plataforma desarrollada. El esquema de prueba se muestra en la figura 7.

Los motores utilizados son motores de marca generica a 20 Volts de alimentación, como actuador se utilizó un servoamplificador marca Crouzet BDE Pro 84855104, y para la identificación se utilizaron un generador y un osciloscopio, como la plataforma desarrollada.

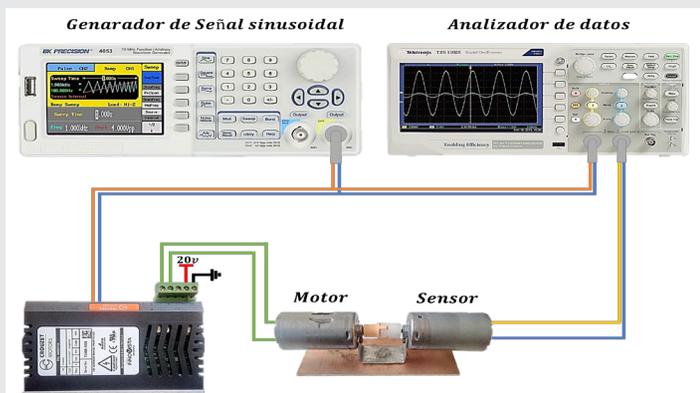


Figura 7. Esquema de prueba para identificación del sistema

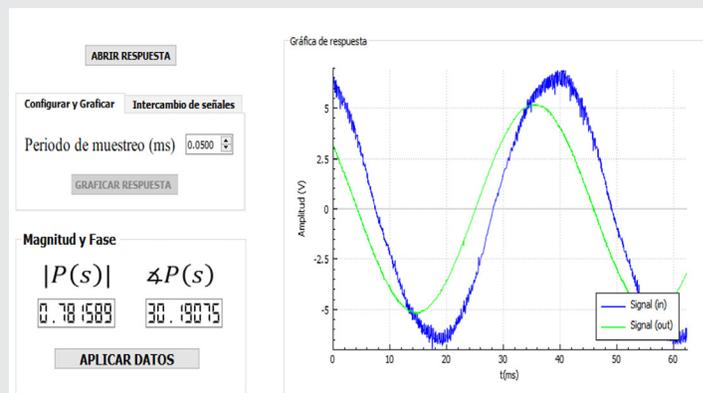


Figura 11. Obtención de magnitud y ángulo de desfase.

En las figuras 8-10 se muestran los resultados obtenidos de respuesta para diferentes frecuencias. La señal graficada en azul es la señal que se inyecta al sistema, la señal roja es la respuesta del sistema. Como puede observarse la frecuencia de la respuesta es la misma que la de la señal de entrada, pero existen cambios tanto en la magnitud como en la fase. Estos parámetros son estimados como se muestra en la figura 11, para aplicar el algoritmo de sintonización y obtener las ganancias del controlador que cumplen las condiciones de estabilidad.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en pruebas realizados en un rango de frecuencias (tiempos de respuesta).

Tabla 4. Identificación del sistema

Magnitud y fase de la planta		
Frecuencia	Magnitud	Fase (deg)
3 Hz	1.2791	-30.0008
6 Hz	0.9790	-51.4673
9 Hz	0.7257	-65.0047
12 Hz	0.5548	-73.9933
15 Hz	0.4402	-81.1480
18 Hz	0.3586	-86.0032
21 Hz	0.3076	-87.9338
24 Hz	0.2751	-92.8680

El método de sintonización sugiere hacer pruebas en un rango de frecuencias para obtener la respuesta adecuada. Aplicando el método en un rango de frecuencias entre 21 hasta 30 Hz, se obtuvieron las ganancias para el controlador que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Ganancias para diferentes parámetros de sintonización

Ganancias del controlador			
Θ	k_p	k_i	k_d
35	4.4122	551.4470	0.0002669
45	4.2796	534.8802	0.0007955
60	3.8396	479.8894	0.0018
75	3.1380	391.7517	0.0022

Al enviar estas ganancias a través del software hacia el sistema se obtuvieron las respuestas del sistema que se muestran en las siguientes figuras. Se agregan respuestas obtenidas a través de otros parámetros para mostrar cómo es posible cambiar el comportamiento del sistema al cambiar los parámetros de sintonización.

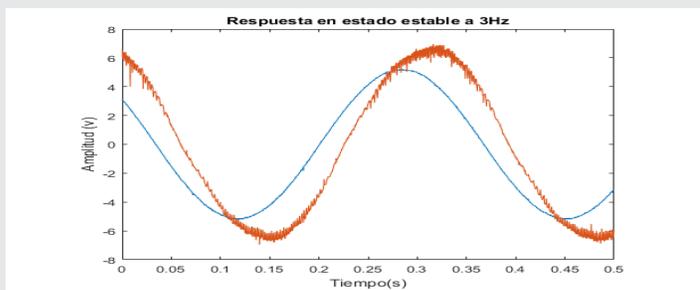


Figura 8. Respuesta obtenida a 3 Hz.

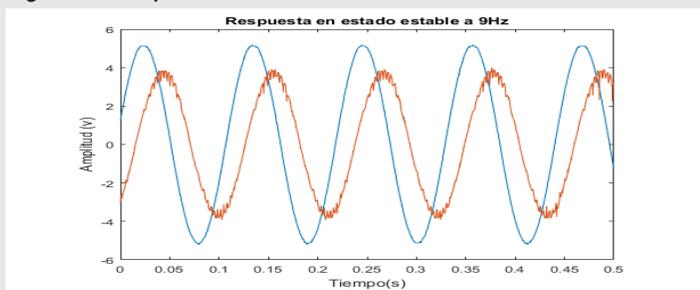


Figura 9. Respuesta obtenida a 9 Hz.

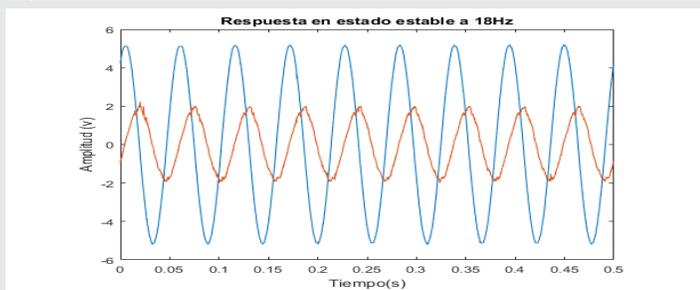


Figura 10. Respuesta obtenida a 18 Hz.

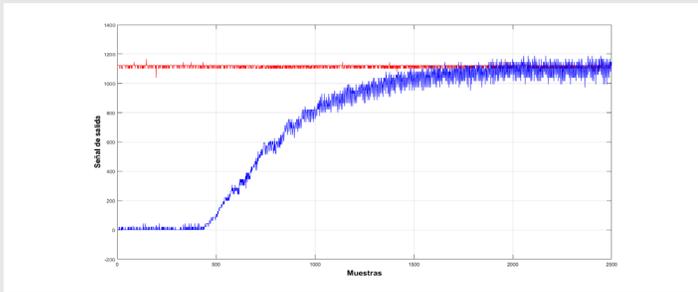


Figura 12. Margen de fase mayor a 60°.

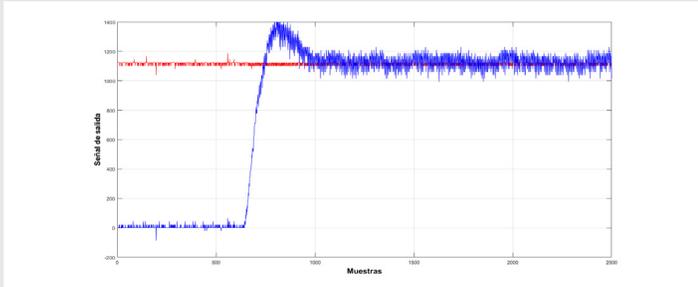


Figura 13. Margen de fase de 35°

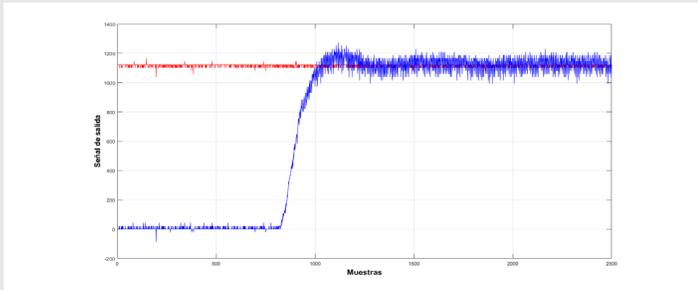


Figura 14. Margen de fase de 45°

Como puede observarse en las figura 12-14, al variar los parámetros de sintonización (en este caso el margen de fase) se obtienen diferentes respuestas del sistema, además la plataforma permite implementar el controlador y almacenar los datos de la respuesta para analizar su desempeño.

CONCLUSIONES

Se presentó una plataforma que consiste en un sistema de adquisición de datos y un software para implementar un sistema de control. Para probar la funcionalidad se implementó un sistema de control de velocidad sintonizado por respuesta en frecuencia, me demostró que tanto el algoritmo como la plataforma permiten implementar el algoritmo de control PID en el sistema mostrado, de igual manera se mostró que es posible variar los parámetros de sintonización para ver los efectos en el sistema. Se obtuvo una velocidad de muestreo de 1 KHz para la transferencia de datos en línea, sin embargo, se integró una memoria SRAM para adquisición de datos y posteriormente la descarga de los datos. La plataforma se utilizará para implementar y validar otros esquemas de control, aprovechando la velocidad de transferencia de información que ofrece el usb y la seguridad en la entrega de datos. El proyecto es distribuido por el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan y está disponible para quien desee utilizarlo y/o adaptarlo a su aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México por financiar parte de este proyecto a través de la Convocatoria 2019: Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Rivera Flores, D. E. (2007). Una metodología para la identificación integrada con el diseño de controladores IMC-PID. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4(4), 5,18.

[2] Jaen-Cuellar, A. Y., de J. Romero-Troncoso, R., Morales-Velazquez, L., & Osornio-Rios, R. A. (2013). PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(9), 324.

[3] Angel, L., & Viola, J. (2015). Design and statistical robustness analysis of FOPID, IOPID and SIMC PID controllers applied to a motor-generator system. *IEEE Latin America Transactions*, 13(12), 3724-3734.

[4] Angel, L., Viola, J., & Vega, M. (2019). Hardware in the loop experimental validation of PID controllers tuned by genetic algorithms. *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*.

[5] Joseph, A., & Vasanthi, D. (2019). Performance Analysis of PID Control Loops in Desalination Process using LabVIEW. *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*.

[6] Peng, Z. (2019). PID Control of Temperature and Humidity in Granary Based on Improved Genetic Algorithm. *2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*.

[7] Meslouli, I., Cherigui, N., Sedini, C., Choukchou-Braham, A., & Cherki, B. (2019). Quadrotor Based Arduino Design Using PID Control. *2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID)*.

[8] Orostica, R., Duarte-Mermoud, M. A., & Jauregui, C. (2016). Stabilization of inverted pendulum using LQR, PID and fractional order PID controllers: A simulated study. *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*.

[9] Ogata, K., Sebastián Dormido, Raquel Dormido Canto, Mariani, A., & Al, E. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Prentice Hall.

[10] Tal, J. (1994). *Step by Step design of motion control systems (1st ed.)*. Galil Motion Control. Inc.