

# Ensayo Experimental de tres diferentes Leyes de Control con 2 Grados de Libertad

García Cortés Julio Zenón

Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte, Río Grande, Zacatecas, México, [profjulioz@hotmail.com](mailto:profjulioz@hotmail.com)

## RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de probar 3 diferentes leyes de control con 2 grados de libertad. En cada caso, el grado de libertad adicional se otorga de distinta forma a controladores automáticos convencionales. Se encontró que agregar un grado más de libertad a la ley de control beneficia el desempeño de los algoritmos de control, impactando favorablemente en su funcionamiento comparado con un controlador PID convencional usado como testigo.

**Palabras claves:** Ley de Control, Grados de Libertad, Control Automático.

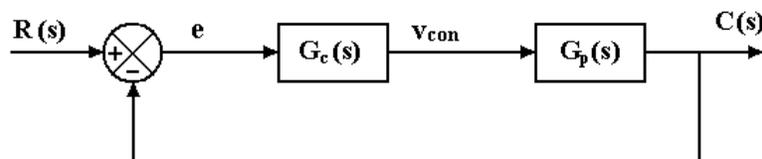
## ABSTRACT

In this paper, the results of testing 3 different control laws with 2 degrees of freedom are presented. In each case, the additional degree of freedom is given differently from conventional automatic controllers. It was found that adding a degree of freedom to control law benefits the performance of control algorithms and impacting favorably in performance compared with conventional PID controller used as a reference.

**Keywords:** Control law, Degrees of freedom, Automatic control.

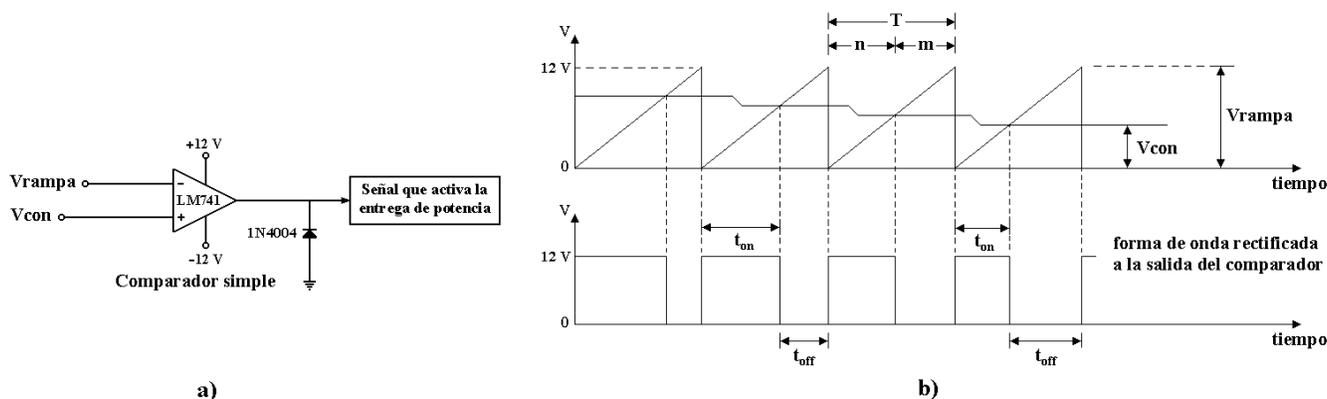
## 1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los controladores automáticos tienen un solo grado de libertad. En la Figura 1, se muestra el diagrama a bloques convencional de un sistema de control retroalimentado.



**Figura 1: Sistema de control con un solo grado de libertad**

El grado de libertad que posee el sistema de la Figura 1, lo proporciona la señal de error "e". La ley de control asociada a él establece que si la señal de error "e" es grande, el voltaje de control "Vcon" será grande, por el contrario, si "e" es pequeña también el voltaje de control será pequeño. Los 3 controladores automáticos explicados en este trabajo tienen 2 Grados de Libertad, pero cada uno tiene distinta ley de control. Estos controladores se han probado en una planta con alta inercia térmica (horno eléctrico de mufla). En los 3 casos, para suministrar energía a la planta y efectuar el proceso de control de temperatura se emplea el método "Principio de control encendido - apagado" (Rashid, 2004). Este método también llamado método de control por paquetes, se implementó comparando el voltaje de control (Vcon), contra un voltaje diente de sierra (Vrampa). El resultado de esta comparación se ilustra en la Figura 2.

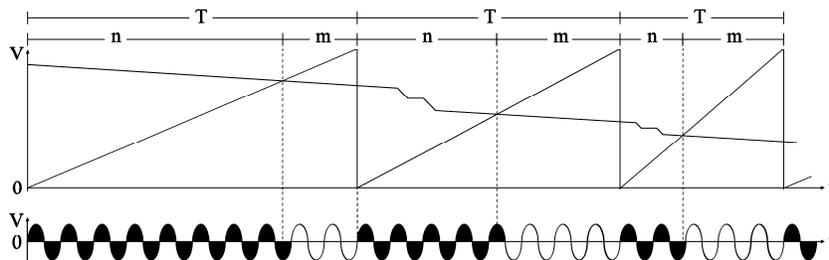


**Figura 2: a) Etapa de comparación b) Modulación de ancho de pulso por el método de control por paquetes**

En las aplicaciones de control industrial, normalmente el valor deseado de la variable controlada o referencia, permanece constante y se requiere una buena eliminación del efecto de las perturbaciones o sea, se necesita un buen control regulatorio. Sin embargo, eventualmente podría ser necesario cambiar el valor deseado de la variable controlada, en cuyo caso se requiere un buen seguimiento a esos cambios esto es, un buen servo control. Debido a que estos dos funcionamientos no pueden ser satisfechos en forma simultánea con un controlador de solo un grado de libertad (1GdL), la utilización de un controlador de dos grados de libertad (2GdL), permite sintonizarlo considerando el desempeño del control regulatorio y la robustez del lazo de control, y utilizar luego el parámetro extra que caracteriza al segundo grado de libertad para mejorar el desempeño del servo control (Alfaro and Vilanova, 2010). Para el diseño del sistema de control deben considerarse estos dos funcionamientos, sin embargo dependiendo de la estructura de control que se tenga, no siempre es posible especificar dinámicas de rendimiento independientes para cambios en el valor de consigna y para cambios en la perturbación (Alfaro et al, 2009). En este trabajo se proponen tres alternativas de implementación de controladores de 2 grados de libertad que tratan de satisfacer desempeños aceptables en los dos funcionamientos referidos. Para proporcionar un grado más de libertad a los controladores, se utilizaron transistores como elementos externos de configuración de amplificadores operacionales (Boylestad and Nashelsky, 2006).

### 1.1 VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE PAQUETE

El primer controlador con 2 grados de libertad que se ha propuesto, varía la longitud de paquete conforme la señal de error disminuye. Al principio del proceso de control, los paquetes son grandes, para que grandes cantidades de energía pasen a la planta y ésta se caliente lo más rápido posible. Cuando ya se está cerca del punto de consigna, la señal de error se hace pequeña y entonces la longitud de los paquetes disminuye para que la entrega de energía sea más frecuente y la planta no se enfríe (García et al., 2009), (García et al., 2010). En la Figura 3 se ilustra el concepto para brindar un grado mas de libertad al controlador.



**Figura 3: Modulación de ancho de pulso variando la longitud de los paquetes**

## 1.2 INCREMENTO DE LA GANANCIA DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA SEÑAL DE ERROR

El segundo controlador con 2 Grados de libertad probado, consiste en hacer variar la ganancia del algoritmo de control de acuerdo al valor que va adquiriendo la señal de error. Al inicio del proceso de control, la ley de control reconsidera la señal de error y mantiene la ganancia sin modificación si ésta señal de error es todavía muy grande; por otra parte, va aumentando poco a poco la ganancia conforme la señal de error se hace pequeña, para de esta forma, entregar más energía a la planta de la que normalmente correspondería, de manera que se logra eliminar el error de estado estacionario y que la planta no se enfríe. (García et al., 2010). En la Figura 4 se muestra el diagrama a bloques del sistema resultante.

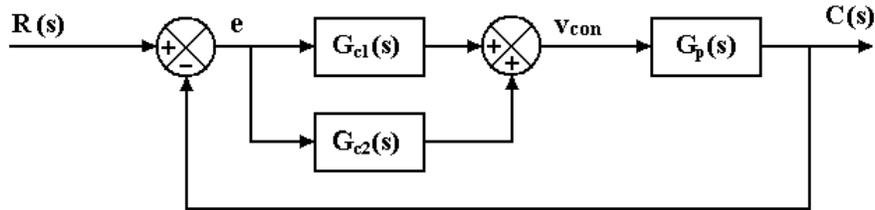


Figura 4: Sistema de control con dos grados de libertad reconsiderando la señal de error

## 1.3 INCREMENTO DE LA GANANCIA DEPENDIENDO DEL VALOR DEL PUNTO DE REFERENCIA

En el tercer controlador con 2 Grados de libertad planteado, su ley de control reconoce la señal de referencia (valor deseado) y dependiendo de su valor, modifica la ganancia de forma que, si el punto de consigna es muy grande, aumenta la ganancia; por otra parte, si el punto de consigna es muy pequeño, la ganancia se mantiene sin cambio. Lo anterior, porque cuando se eligen puntos de consigna muy grandes, las transferencias de calor cuando ya se está alcanzando el valor deseado, son también muy grandes, entonces se dificulta llegar al valor deseado, por ello hay que aumentar la ganancia cuando se solicitan puntos de referencia grandes y disminuirla cuando el punto de referencia es menor (García et al., 2011), (García, 2011). En la Figura 5 se muestra el diagrama a bloques del sistema resultante.

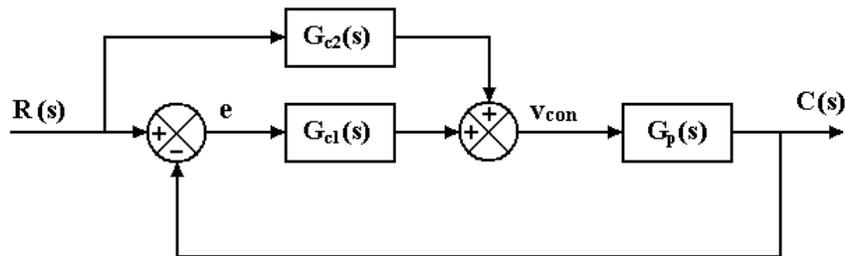
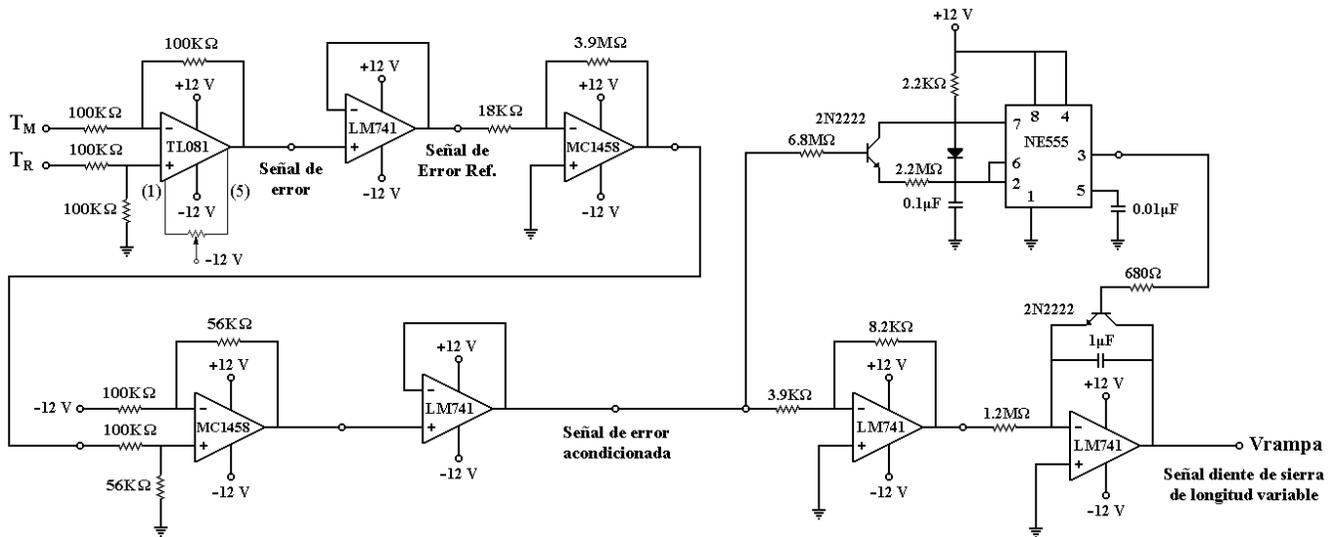


Figura 5: Sistema de control con dos grados de libertad considerando la señal de referencia

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR CON VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE PAQUETE

En la Figura 6 se muestra el diagrama del circuito que satisface las acciones requeridas según la ley de control impuesta para el controlador con variación de longitud de paquete (García et al., 2010).  $T_M$  es un voltaje que representa la temperatura en la mufla, mientras que  $T_R$  es un voltaje que representa la temperatura de referencia.

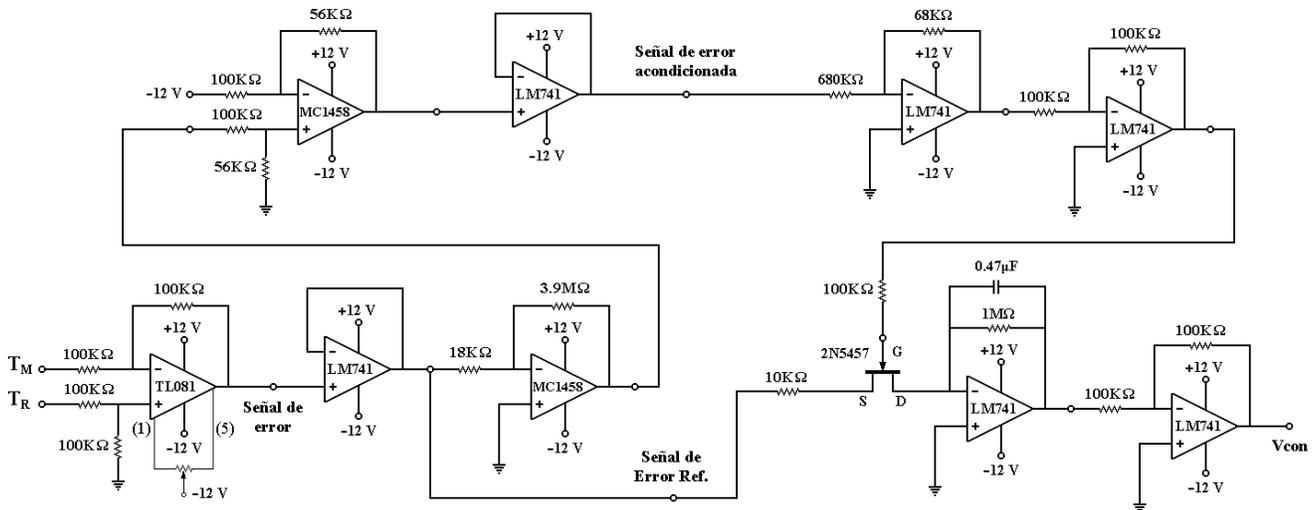


**Figura 6: Circuito electrónico para producir una señal diente de sierra de longitud variable**

El circuito se basa en un oscilador astable implementado mediante un NE555; el diodo de la terminal 7 a la 6, es para que el tiempo en estado bajo sea mayor que el tiempo en estado alto. El transistor 2N2222 funciona como una resistencia variable cuyo valor depende de la magnitud de la señal de error, de esta forma el tiempo en bajo es de longitud variable. Por otra parte, el tiempo en alto dura el tiempo preciso para cortocircuitar y descargar el capacitor del AO LM741 configurado como integrador. Cuando el NE555 envía un breve pulso en alto, en la salida del integrador el desarrollo del voltaje diente de sierra se detiene y cae a 0 voltios; El proceso se repite para obtener un voltaje rampa de longitud extensa si la señal de error es grande y de longitud corta si es pequeña.

## 2.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR CON INCREMENTO DE GANANCIA DEPENDIENTE DE LA SEÑAL DE ERROR

En la Figura 7 se muestra el circuito que satisface la ley de control que gobierna el funcionamiento de un controlador proporcional + integral de ganancia variable en función de la magnitud de la señal de error (García et al., 2010).



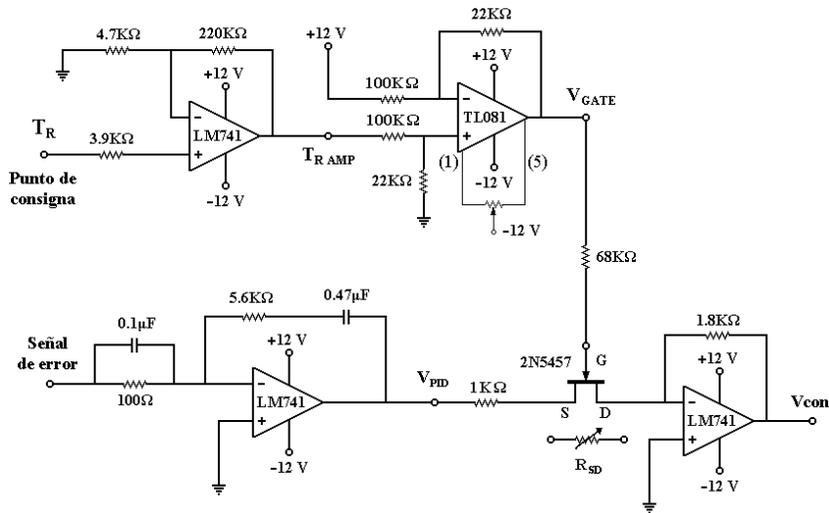
**Figura 7: Circuito electrónico de un controlador PI de ganancia variable.**

Primero, se obtiene una señal de error al comparar los voltajes  $T_M$  y  $T_R$  mediante el AO TL081 configurado como amplificador diferencial. Este voltaje es sostenido por un AO seguidor de voltaje que refuerza la señal de error. La señal de error ref., se aplica a la terminal Source de un transistor JFET 2N5457 que funciona como una resistencia variable S-D cuyo valor depende de la magnitud de la señal de error.

Por otra parte, la señal de error ref. Se adecua antes de aplicarse a la terminal Gate del 2N5457; primero se amplifica y se resta de  $-12V$ ; luego se divide entre 10 y por último se invierte de signo. De ésta forma, en conjunto con el capacitor, se implementa un algoritmo de control proporcional-integral de ganancia variable de acuerdo al tamaño de la señal de error, de forma que el voltaje de control ( $V_{con}$ ) será mayor de lo normal si la señal de error es pequeña y tendrá una magnitud normal si la señal de error es grande.

### 2.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR CON INCREMENTO DE GANANCIA DEPENDIENTE DEL PUNTO DE REFERENCIA

En la Figura 8 se muestra el circuito para implementar la ley de control de un controlador PID de ganancia variable en función de la magnitud del punto de referencia (García et al., 2011).



**Figura 8: Circuito electrónico de un controlador PID de ganancia variable.**

El circuito funciona a partir de la señal de error, que se obtiene al comparar los voltajes  $T_M$  y  $T_R$  mediante el AO TL081 configurado como amplificador diferencial. Luego, el voltaje  $T_R$  se amplifica en el A.O. LM741 configurado como amplificador no inversor. Al voltaje resultante ( $T_{R\_AMP}$ ) se le restan 12 V y luego se divide entre un factor de aproximadamente 4.5. De esta forma, a la salida del amplificador diferencial implementado mediante un A.O TL081 se obtiene un voltaje negativo ( $V_{GATE}$ ) que dependiendo del punto de consigna elegido varía de  $-2.3V$  a  $-0.15V$ . Este voltaje es apto para ser aplicado a la terminal Gate del transistor JFET 2N5457, con el propósito de hacerlo funcionar como una resistencia variable S-D. Por otra parte, la señal de error se aplica de forma normal a la entrada de la estructura de control PID. La diferencia de funcionamiento comparada con un controlador PID de un solo grado de libertad es que ahora la parte destinada a ajustar la ganancia e invertir el signo tendrá la capacidad de modificar la ganancia de forma automática cuando se le exija controlar en puntos de consigna superiores, de tal forma que la ganancia será la normalmente ajustada cuando el punto de referencia es pequeño y aumentará en forma notable cuando el punto de consigna sea grande.

### 2.4 DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID DE 1 GRADO DE LIBERTAD

Para tener un punto de comparación del desempeño de los controladores diseñados, se implementó y sintonizó un controlador PID de un grado de libertad para probarlo en la planta piloto. El diagrama del controlador utilizado se muestra en la Figura 9. (García et al., 2011).

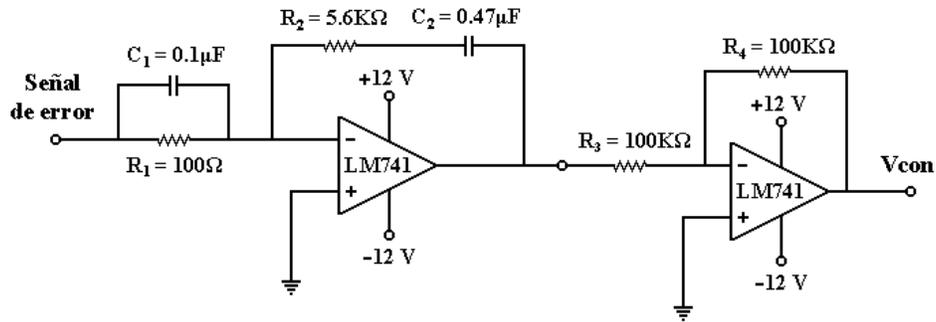


Figura 9: Circuito electrónico de un controlador PID tradicional.

### 3. RESULTADOS

Se realizaron pruebas utilizando los 3 controladores de dos grados de libertad, comparando los resultados con los obtenidos con un controlador PID tradicional. Básicamente los criterios de comparación son tres: El tiempo de levantamiento, el máximo sobreimpulso y el tiempo de asentamiento. En las Figuras 10, 11 y 12 se muestran las gráficas de cada caso para una prueba con el punto de consigna ajustado a 200°C.

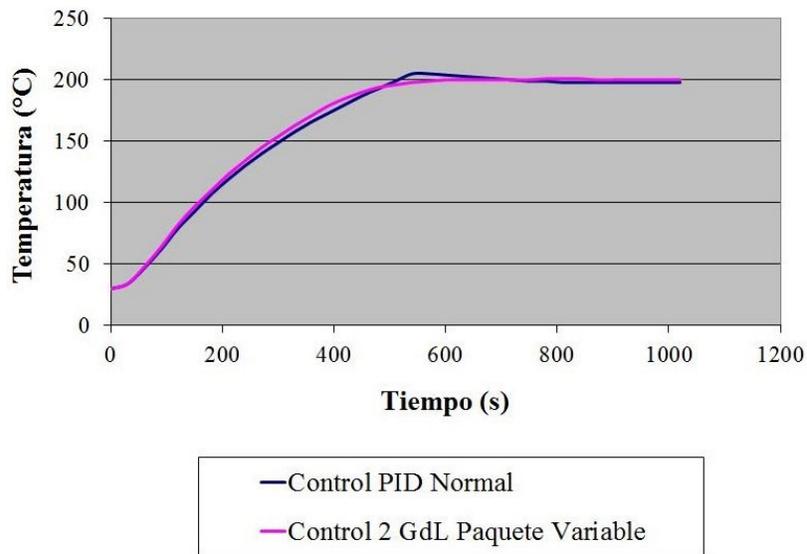


Figura 10: Resultado de la prueba a 200°C usando una señal diente de sierra de longitud variable.

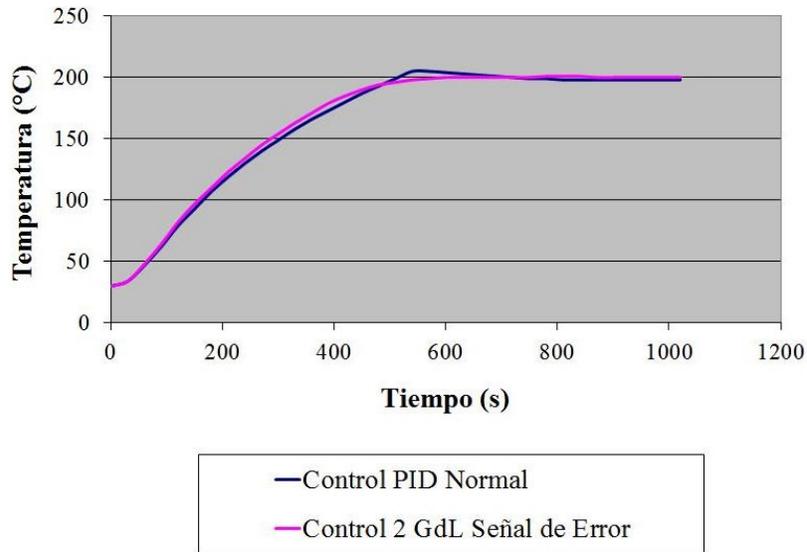


Figura 11: Resultado de la prueba a 200°C usando ganancia variable dependiente de la señal de error.

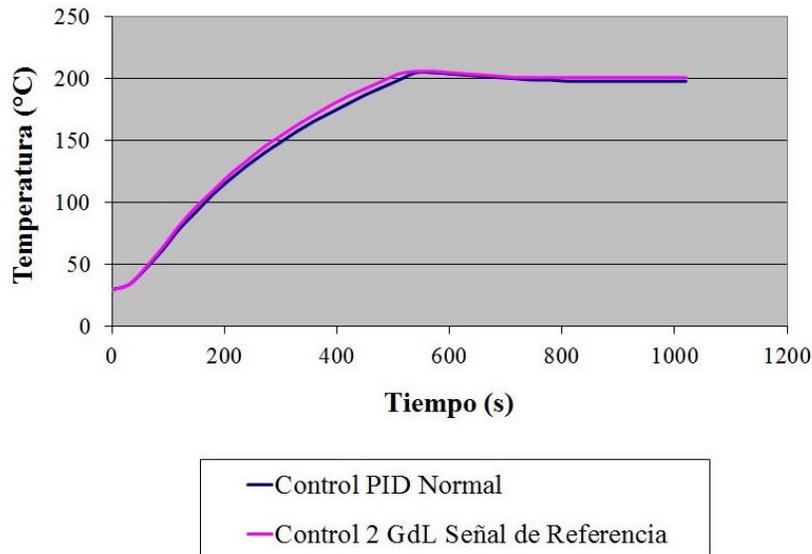


Figura 12: Resultado de la prueba a 200°C usando ganancia variable dependiente de la señal de referencia.

En la Tabla 1 se muestra un concentrado de los principales parámetros de comparación.

Tabla 1: Resultados de los principales parámetros de comparación

| Tipo de Controlador       | Tiempo de Levantamiento | Máximo Sobreimpulso | Tiempo de Asentamiento |
|---------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| PID Normal                | 512 s                   | 5°                  | 670 s                  |
| 2 GdL Paquete variable    | 575 s                   | 1°                  | 565 s                  |
| 2 GdL Señal de Error      | 570 s                   | 1°                  | 560 s                  |
| 2 GdL Señal de Referencia | 485 s                   | 6°                  | 675 s                  |

Se realizaron pruebas con el punto de consigna ajustado en diferentes valores, éstas pruebas están documentadas en las referencias citadas, sin embargo, por cuestiones de espacio en éste artículo se consideran representativas las pruebas efectuadas a 200°C.

#### 4. CONCLUSIONES

En base a los resultados, se concluye que agregar un grado de libertad a un algoritmo de control convencional agrega robustez a su ley de control y tiene un impacto favorable en el desempeño del controlador. Es interesante notar como en los tres casos considerados el controlador con dos grados de libertad, independientemente de la naturaleza de su ley de control, logra mejorar el desempeño del controlador PID tradicional utilizado como testigo en alguno o algunos de los criterios de comparación planteados.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El Autor agradece al Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte los apoyos y permisos recibidos para la ejecución de una serie de proyectos que dieron lugar a ésta publicación.

#### REFERENCIAS

- Alfaro, V. M., and Vilanova, R., (2010). “Sintonización de los controladores PID de 2GdL: desempeño, robustez y fragilidad”, en *memorias de XIV Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA 2010)*, Santiago, Chile.
- Alfaro, V. M., Arrieta, O., and Vilanova, R., (2009). “Control de Dos-Grados-de-Libertad (2-GdL) aplicados al “Benchmark” de Sistemas para Controladores PID”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol. 6, No. 2, pp. 59-67.
- Boylestad, R. L., and Nashelsky, L., (2006). *Electronic Devices and Circuit Theory*, 9<sup>a</sup> ed., Pearson Prentice Hall, USA, pp. 445.
- García, J. Z., (2011). “Algoritmo de Control PI No Lineal Programado en un Microcontrolador PIC 16F84A para una Aplicación de Control de Temperatura”, en *memorias de CAIP'2011*, pp. 617-623, Girona, España.
- García, J. Z., Caltenco, J. H., and Carrillo, F. J., (2011). “Controlador Proporcional+Integral+Derivativo con Etapa de Autosintonización”, en *memorias de Congreso en Computación y electrónica CONCyE 2011*, Zacatecas, Zacatecas, México.
- García, J. Z., Espinoza, M., and Rodríguez, A., (2009). “Resultados Experimentales al implementar diferentes Bases de Tiempo en un Sistema de Alta inercia Térmica utilizando un Controlador Proporcional y el Método de Control por Paquetes”, en *memorias de XI Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, pp. 819-823, México, D.F.
- García, J. Z., Rodríguez, A., and Caltenco, J. H., (2010). “Controlador Proporcional-Integral No Lineal Aplicado a un Sistema de Alta Inercia Térmica Utilizando el Método de Control por Paquetes con base de Tiempo Variable”, en *memorias de XII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, pp. 253-258, México, D.F.
- Rashid, M. H., (2004). *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, 3<sup>a</sup> ed., Pearson Educación de México, S. A. de C.V., México, pp. 500-502.

#### **Authorization and Disclaimer**

*Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.*