

# Analysis and Evaluation of the Efficiency of Laser Temperature Control System Using a Two Degree of Freedom System

Castro Cervantes Oscar Bryan, García Martínez Ángel Yael,  
Nava Clemente Luis Jesus, Rocha García Adriana  
National Polytechnic Institute  
Mexico City, Mexico  
dpb@ipn.mx

**Abstract** — Dynamic systems requiring two independent coordinates, or degrees of freedom, to describe their motion are known as "Two Degree of Freedom Systems" (TDOF). This study evaluates the performance of different controllers, specifically Proportional-Integral (PI) and Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, within TDOF systems. Through comparative analysis, we assessed various performance metrics, including response time, stability, and accuracy. The results indicate that while both PI and PID controllers offer significant control benefits, TDOF systems exhibit a superior response when utilizing PID controllers. Ultimately, we landed on the fact that a Two Degrees of Freedom System while assessing the efficiency of laser temperature control system achieves better performance with a PD-PD controller.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de control de temperatura para un láser, utilizando las funciones de transferencias obtenidas del artículo "Analysis and Evaluation of the Efficiency of Laser Temperature Control System" del National Research University of Electronic Technology ubicado en Moscú, Rusia. Estas funciones de transferencia proporcionan una base sólida para el diseño del controlador, permitiendo una aproximación precisa de la respuesta del sistema a cambios de temperatura y perturbaciones.

El diseño del controlador se lleva a cabo mediante un análisis de la respuesta del sistema ante las diferentes acciones de control básico como el proporcional, integral, proporcional-derivativo, proporcional-integral y proporcional-integral-derivativo. De la misma manera, se analiza las diferentes configuraciones de un sistema de control con dos grados de libertad para un mejor desempeño ya que, al separar las tareas de seguimiento de la referencia y de regulación de perturbaciones, podemos mejorar la respuesta transitoria, la estabilidad del sistema, rechazar perturbaciones y minimizar el error estacionario.

## DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA

A continuación, se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de temperatura del láser, en donde se incluyen las funciones de transferencia del artículo.

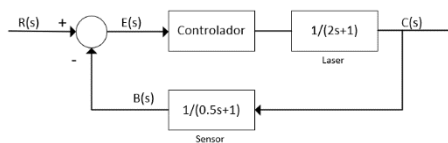


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema.

## ERROR ENCONTRADO EN LA PUBLICACIÓN ORIGINAL

Antes de empezar a mostrar los resultados con cada controlador diseñado queremos mostrar el pequeño error que se cometió en la publicación ya que no cumple con los parámetros o más bien con los entandares que se establecen a la hora de diseñar un controlador.

$$C = (1.1413) \left( \frac{(1 + 0.63s)(1 + 0.92s)}{s} \right)$$

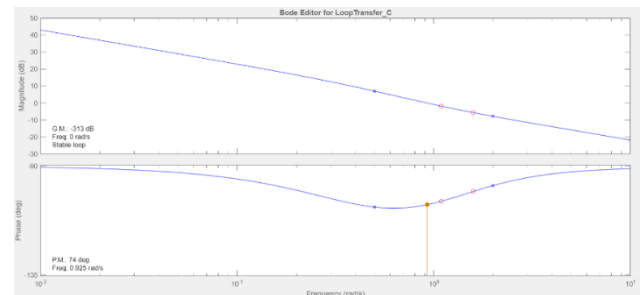


Fig. 2. Controlador proporcionado en la publicación original.

Como se observa GM es negativa con lo cual el controlador de la publicación no cumple con los estándares ideales de diseño los cuales son  $gm > 5$ , esto se considera como un controlador mal diseñado que puede ser inestable en ciertas situaciones.

## APLICACIÓN DE ACCIONES DE CONTROL BÁSICO

En el ámbito de la instrumentación y control, la regulación precisa de la temperatura es crucial para el funcionamiento eficiente de dispositivos sensibles como los láseres. Los controladores Proporcional-Integral (PI), y Proporcional-Integral-Derivativo (PID) son herramientas fundamentales que se utilizan para mantener la temperatura deseada en estos sistemas. Este reporte presenta una comparativa de estos cuatro tipos de controladores, evaluando su desempeño en el control de temperatura de un láser.

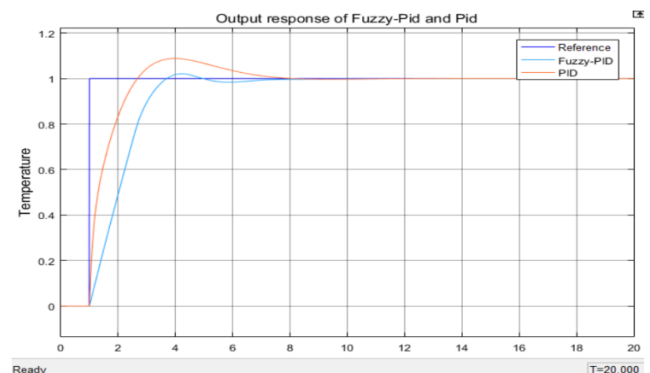


Fig. 3. Resultado proporcionado en la publicación original de controles PID y Fuzzy-PID.

## CONTROLADOR PI

En la regulación de la temperatura de láseres, los controladores automáticos son fundamentales. Este reporte se enfoca en el controlador Proporcional-Integral (PI), analizando su implementación y desempeño. Se presenta una comparativa de su efectividad frente a otros controladores como P, PD y PID, destacando sus ventajas en la corrección de errores y mantenimiento de la estabilidad del sistema.

$$C = (1.413) \left( \frac{(1 + 0.63s)(1 + 0.92s)}{s} \right)$$

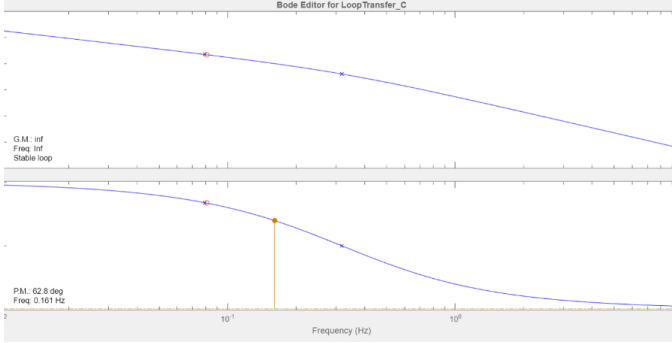


Fig. 4. Diagrama de Bode (PI).

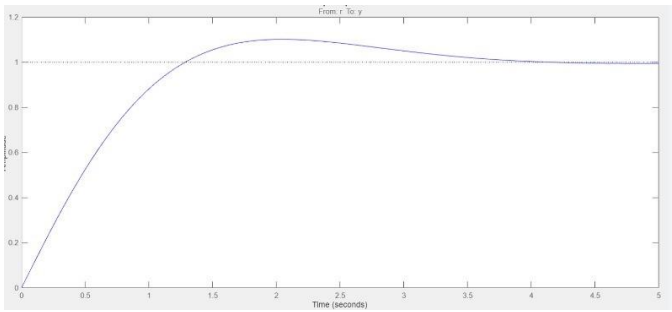


Fig. 5. Respuesta temporal (PI).

## CONTROLADOR PID PROPIO

En la regulación de la temperatura de un láser, la implementación de diferentes controladores automáticos es crucial para lograr un desempeño óptimo. En nuestras pruebas, el controlador Proporcional-Integral (PI) ha mostrado una mejor respuesta temporal en comparación con otros controladores, incluyendo el Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

$$C = (2.4) \left( \frac{(1 + 0.63s)(1 + 0.92s)}{s} \right)$$

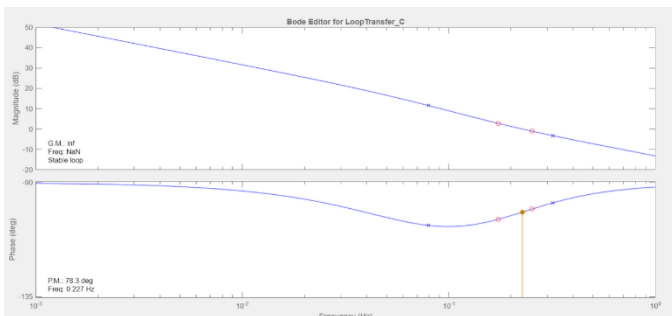


Fig. 6. Diagrama de Bode (PID - Propio).

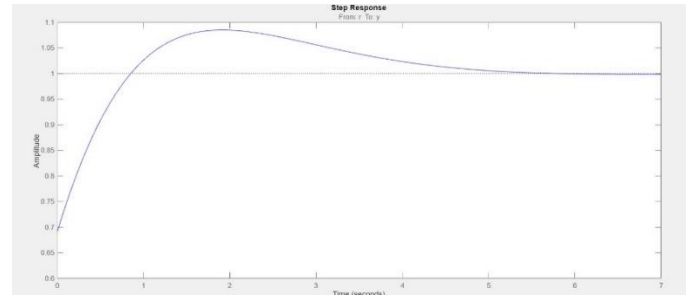


Fig. 7. Diagrama de Bode (PID - Propio).

Las pruebas realizadas han demostrado que el controlador PI ofrece una mejor respuesta temporal en comparación con el controlador PID. Aunque el PID proporciona una mayor estabilidad y precisión a largo plazo debido a su componente derivativa, la rapidez y eficacia del controlador PI en la corrección de errores lo han hecho más adecuado para las necesidades de este proyecto específico.

Por lo tanto, se concluye que el controlador PI es la mejor opción para el control de temperatura del láser en este contexto, debido a su superior respuesta temporal. Esto permite una corrección más rápida de las desviaciones de temperatura, asegurando un funcionamiento más eficiente y preciso del sistema.

## COMPARACIÓN EN SIMULINK

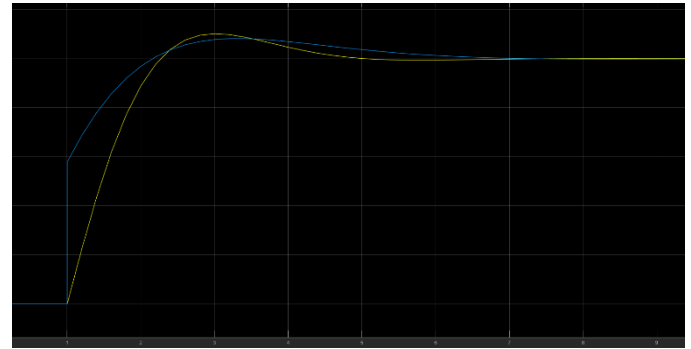


Fig. 8. Respuesta Simulink.

En esta imagen se observa la comparación entre el controlador PID original visto en la publicación como se puede mostrar el tiempo en que se estabilizan mejora o mejor dicho se iguala con un PI que nosotros diseñamos cuando se utiliza un propio PI, la curva amarilla es el PI y la curva azul es el PID mostrado en la publicación original.

Pero como veremos más adelante cuando comparemos nuestro PID diseñado con el de la publicación original cambia el tiempo de respuesta siendo este menor solo con moverle la ganancia y cambiando un poco el original de los ceros.

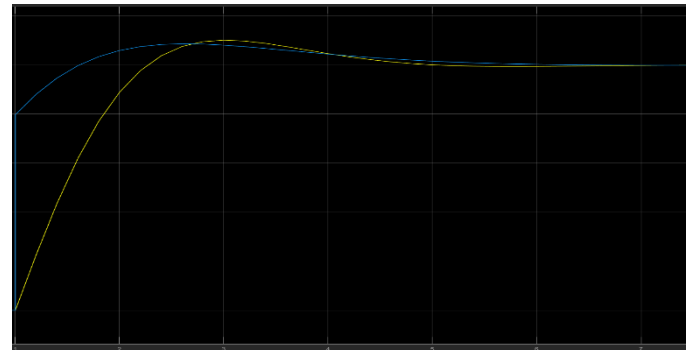


Fig. 8. Respuesta Simulink.

## SISTEMA DE CONTROL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Un controlador de dos grados de libertad (2DOF) permite ajustar de forma independiente las respuestas de la trayectoria de referencia y las perturbaciones.

### CONFIGURACIÓN PD-PD

Se utilizó la configuración PD-PD en donde ambos lazos (referencia y retroalimentación) tienen un controlador PD pero con diferentes parámetros, porque permite un mejor ajuste de la respuesta transitoria del sistema, ya que se puede reducir el tiempo de establecimiento y la sobre-oscilación de manera más efectiva.

Para evaluar el desempeño de un controlador de dos grados de libertad en la regulación de la temperatura de un láser, se ha implementado una configuración PD-PD en MATLAB. Esta configuración se compone de dos controladores Proporcional-Derivativo (PD) que trabajan en conjunto para mejorar la respuesta del sistema y reducir las oscilaciones.

### DISEÑO DEL CONTROLADOR C2 (LAZO DE RETROALIMENTACIÓN)

Se diseñó para minimizar el impacto de las perturbaciones, mejorando la robustez y estabilidad del sistema.

$$C2 = (2.862)(1 + 11s)$$

A continuación, se presenta el diagrama de Bode correspondiente a este controlador. Este diagrama muestra las características de frecuencia del controlador, incluyendo su ganancia y fase, lo cual es fundamental para analizar su desempeño en el dominio de la frecuencia.

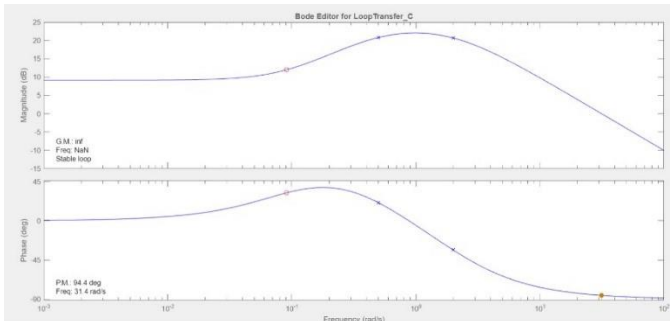


Fig. 9. Diagrama de Bode C2 TDOF PD-PD.

El diagrama de Bode de C2 revela cómo el controlador PD afecta a la amplitud y fase del sistema en función de la frecuencia. La ganancia y el adelanto de fase proporcionados por el término derivativo (11s) son evidentes en las altas frecuencias, mejorando la respuesta del sistema y la estabilidad.

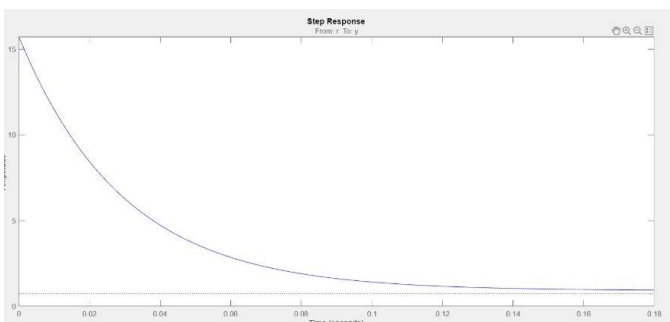


Fig. 10. Respuesta temporal C2 TDOF PD-PD.

La gráfica muestra la respuesta del sistema controlado por C1 a una entrada de escalón. Se puede observar que el controlador PD proporciona una rápida corrección del error inicial, debido a la acción derivativa que anticipa los cambios y mejora la velocidad de respuesta. Además, la respuesta temporal demuestra cómo el controlador ayuda a estabilizar el sistema rápidamente, minimizando las oscilaciones y el tiempo de asentamiento.

### DISEÑO DEL CONTROLADOR C1 (LAZO REFERENCIA)

Se realizaron los ajustes necesarios para optimizar la respuesta del sistema a los cambios en la señal de referencia, logrando un tiempo de establecimiento rápido y una menor sobre-oscilación.

$$C1 = (67.08)(1 + 9.5e - 6s)$$

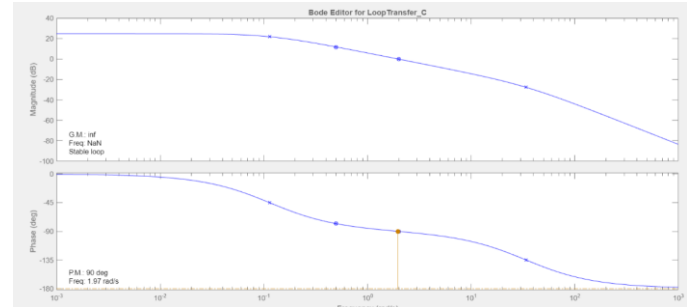


Fig. 11. Diagrama de Bode C1 TDOF PD-PD.

A continuación, se presenta la respuesta temporal de este controlador. Esta respuesta muestra cómo el controlador C1 afecta la salida del sistema en el tiempo, proporcionando una visión clara de su desempeño dinámico.

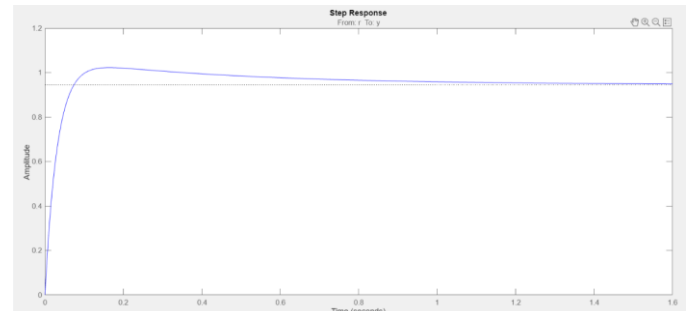


Fig. 12. Respuesta temporal C1 TDOF PD-PD.

La implementación de un controlador de dos grados de libertad en configuración PD-PD ha demostrado ser más efectiva que el uso de controladores PI o PID para la regulación de la temperatura de un láser. Como se mencionó anteriormente, esta configuración ofrece un equilibrio óptimo entre rapidez de respuesta y estabilidad, superando las limitaciones observadas en los controladores PI y PID. Las simulaciones y análisis de los diagramas de Bode y respuestas temporales confirman que el controlador PD-PD proporciona un control más preciso y estable, lo que lo convierte en la mejor opción para este proyecto.

## CONCLUSIÓN

En este proyecto, se ha evaluado la efectividad de diferentes tipos de controladores en la regulación de la temperatura de un láser, una tarea crítica en el campo de la instrumentación y control. Se compararon específicamente los controladores Proporcional-Integral (PI),

Proporcional-Integral-Derivativo (PID), y una configuración de dos grados de libertad utilizando dos controladores Proporcional-Derivativo (PD-PD).

A través de simulaciones detalladas en MATLAB, se pudo observar que el controlador PI ofreció una excelente respuesta temporal, superando al PID en rapidez de corrección de errores. Sin embargo, la configuración PD-PD demostró ser superior en términos de estabilidad y precisión a largo plazo. Los diagramas de Bode y las respuestas temporales generadas permitieron un análisis exhaustivo de las características de frecuencia y comportamiento dinámico de cada controlador.

Las simulaciones confirmaron que el controlador PD-PD proporciona un equilibrio óptimo entre rapidez y estabilidad, superando las limitaciones de los controladores PI y PID. Esta configuración mejoró significativamente la capacidad del sistema para mantener la temperatura del láser dentro de los límites deseados, reduciendo las oscilaciones y el tiempo de asentamiento.

Dado lo anterior se concluye que la elección correcta del controlador puede optimizar el rendimiento del sistema y garantizar su fiabilidad en entornos operativos diversos y exigentes en el campo de la Instrumentación y Control.

#### REFERENCIAS

[1] National Research University of Electronic Technology, Htin, L. O., Schagin, A., & Kyaw, Z. Y. (s. f.). Analysis and evaluation of the efficiency of laser temperature control system.