

# Benchmarking de Técnicas de Control Clásico en base a la Metodología aplicada en los laboratorios de la asignatura de pregrado Sistemas de Control II (ETN-902)

Víctor Hugo Sillerico J.  
victorsillerico@gmail.com

Jorge A. Nava A.  
jorgeantonio.navaamador@gmail.com

## ABSTRACT

*Se presenta la hermenéutica de trabajo que se aplica en el desarrollo de los proyectos de laboratorio de la asignatura de Sistemas de Control II de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Mayor de San Andrés. La metodología se apoya en las etapas de desarrollo que se dan en el desarrollo de proyectos complejos y con la participación de varios actores, es una derivación de la metodología RUP. Los proyectos de Laboratorio son 5 que se desarrollan durante el semestre correspondiente; parten de la selección de una planta de segundo orden, la cual se emula mediante el uso de computadores analógicos, esta planta es analizada mediante sus características temporales y frecuenciales, luego se definen las especificaciones funcionales deseables, para luego alcanzarlas a través de la integración de controladores o compensadores, bajo el enfoque de la teoría del Control Clásico. Una vez desarrollados los controladores, se analizan los resultados del sistema completo (controlador mas planta), y se concluyen analizando mediante benchmark las “mejores” características de desempeño. Con todo este proceso, el estudiante desarrolla capacidades técnicas con fundamento teórico suficiente, y disciplina para el desarrollo de proyectos, y finalmente carácter crítico para la selección de las opciones de buena performance.*

**Keywords** – Controladores, Compensadores, Control Clásico, Sistemas en Tiempo Discreto, Metodología de Desarrollo, Sistema Dinámico.

## I. INTRODUCCIÓN

Las actividades prácticas, destinadas a generar hábitos profesionales que mejoren el desempeño de los estudiantes, en el uso del recurso tiempo y de las adecuadas ba-

ses conceptuales, procedimentales, técnicas y tecnológicas, deben ir acompañadas de una motivación. En el caso de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, durante los últimos años, se han esquematizado y aplicado las siguientes motivaciones:

- Lograr a partir de una metodología formal, materializar el desarrollo de un proyecto de laboratorio, considerando desde el establecimiento de requerimientos, pasando por el diseño, hasta llegar a la implementación, y concluir con la valoración y análisis de los resultados.
- Desarrollar una asignatura con la seguridad de que al final del semestre, los conocimientos adquiridos serán plenamente satisfactorios y con la seguridad de su aplicación.
- Establecer la necesidad de valorar y analizar los resultados con el objeto de encontrar las bondades e inconvenientes que puede presentar una u otra técnica. Con el consiguiente potencial de elegir, a partir de benchmarking, el proyecto que mejor desempeño ofrezca, tanto en la etapa analítica (apoyada en conceptos teóricos), como en la etapa de simulación y en la posterior etapa de implementación.

De este modo, el estudiante puede validar en forma práctica los conocimientos adquiridos en clases teóricas, desarrollando competencias y aptitudes en el trabajo con sistemas de control en tiempo continuo y en tiempo discreto. Los proyectos de laboratorio que se abordan en la asignatura de Sistemas de Control II, se encuentran íntimamente relacionados con el programa del curso, y estos son:

- Laboratorio 1 – Control Clásico: Planta de Segundo Orden – Sistema Subamortiguado. Consistente en implementar una planta que represente un sistema de segundo orden con características de respuesta subamortiguada. La referida planta deberá emularse mediante un computador analógico que

permitiría observar y medir las características de respuesta temporal y en frecuencia de la misma.

- Laboratorio 2 y 3 – Control Clásico: Aplicación de Controladores Continuos. Orientado a desarrollar controladores continuos, como los vistos en la asignatura de Sistemas de Control I, es decir, considerando el diseño de sistemas de control de tiempo continuo (controlador PID), así como el diseño de sistemas de control en el dominio frecuencial (Compensadores PID, y Compensadores en adelanto y/o retraso de fase).
- Laboratorio 4 y 5 – Control Clásico: Aplicación de Controladores Discretos. Al igual que el anterior, orientado a desarrollar controladores digitales, considerando los conceptos de diseño en base a la respuesta temporal (controlador PID discreto) y a la respuesta frecuencial (Compensadores PID discreto, y Compensadores en adelanto y/o retraso de fase discretos). El desarrollo de los controladores puede darse, ya sea por discretización de los modelos continuos obtenidos en sesiones previas, o por realización de un nuevo diseño en base a la asignación de polos, o en base al análisis del dominio frecuencial.

Al finalizar todos los laboratorios y en base a los resultados obtenidos, y registrados en una bitácora de trabajo, se elegirá (benchmarking), justificando y fundamentando la elección, el controlador o compensador de mejor performance.

## II. METODOLOGÍA APLICADA POR LABORATORIO

En todos los laboratorios, la metodología de trabajo se compone de tres etapas:

- Análisis y Diseño; que conlleva todo el desarrollo analítico y la fundamentación teórica del sistema en cuestión (planta o controlador) que nos conducirá a un diseño en base a especificaciones de rendimiento predeterminadas.
- Simulación; en la que empleando el software apropiado (p.ej.: Matlab, Scilab), se estudiará y analizará las características del sistema diseñado en la etapa previa; verificando si éste cumple o no con las especificaciones de rendimiento establecidas, para así de este modo proceder a la etapa final o volver a replantear el diseño (iterar para lograr mejores resultados).
- Implementación; la última etapa corresponde a la “Implementación” física del sistema, verificando, también en esta etapa, si se alcanzaron las especificaciones de rendimiento establecidas.



Figura 1: Etapas de la Metodología

El propósito de la metodología empleada es que el estudiante pueda consolidar los conceptos teóricos adquiridos, así como desarrollar un método genérico que permita encarar cualquier situación que se presente en la vida profesional, ya que un ingeniero, por la formación académica que recibe, debe estar preparado para abordar y resolver nuevos retos, propios de su campo laboral. Es así que ante un problema lo primero que se hará es analizar la situación con toda la información disponible, posteriormente procederá a evaluar los requerimientos y diseñar una solución, luego será recomendable simular de alguna forma el diseño, para comprobar que los resultados sean los deseados o mínimamente se aproximen lo suficiente a lo esperado, de este modo se evita gastos innecesarios, que podrían resultar de implementar un mal diseño que no solucione el problema. Después de realizar las simulaciones que sean necesarias, se pasará a la etapa de implementación del diseño elaborado, finalmente se realizará un análisis de los resultados obtenidos de la implementación, comprobando así que se hayan alcanzado los requerimientos que originaron todo el proceso.

## III. PROCEDIMIENTO DE LA METODOLOGÍA

### A. Análisis de Requerimientos

En esta etapa se realiza el análisis de todos los conceptos teóricos, necesarios para encarar el objetivo del proyecto de laboratorio en cuestión, se logra claridad sobre lo que se desea obtener, y la forma en la cual se va a presentar la solución.

### B. Diseño

El diseño se define como el proceso previo de configuración mental en la búsqueda de una solución, en este sentido en esta etapa definiremos especificaciones de desempeño para el sistema, según el laboratorio, y junto con la fundamentación teórica seleccionada en la etapa de análisis, se debe proponer una solución, que permita alcanzar los objetivos propuestos.

### C. Simulación en Matlab

Empleando MATLAB, que nos ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE), en el que se aplicará el *Control System Toolbox*, herramienta que proporciona algoritmos y aplicaciones estándar para la Teoría de Control, analizaremos, diseñaremos y ajustaremos los sistemas de control lineales de cada laboratorio de forma metódica. Pudiendo especificar nuestro sistema como una función de transferencia, como un sistema de espacio de estados,

polos, ceros y ganancia o como un modelo de respuesta en frecuencia. Entonces, para efectos de la simulación, las aplicaciones y las funciones, como los diagramas de respuesta escalón y los diagramas de Bode, nos permitirán visualizar el comportamiento del sistema en los dominios de tiempo y de frecuencia. Pudiendo en base a ello, afinar los parámetros del compensador, mediante el ajuste automatizado e interactivo.

Es así que es posible validar los diseños, verificando el tiempo de subida, el sobrepaso, el tiempo de establecimiento, los márgenes de ganancia y fase y otros requisitos. Todo el proceso permite entender el concepto de iteración con las etapas precedentes, para hacer los ajustes que correspondan en las etapas de análisis y diseño, por ejemplo. Se emplea también Simulink, que nos permite trabajar con la representación en diagrama de bloques del sistema de estudio (proyecto de laboratorio), esta herramienta es muy interesante ya que entre otras cosas nos permite ver cómo responde nuestro sistema ante perturbaciones de carga, para con ello analizar el Rechazo a las Perturbaciones.

#### D. Simulación en Proteus

Por otro lado, la otra tarea de simulación descansa en *Proteus*, entorno de trabajo que brinda programas de diseño y simulación electrónica (desarrollados por Labcenter Electronics); que consta de dos programas principales Ares e Isis, y los módulos *VSM* y *Electra*.

*Isis*, Intelligent Schematic Input System, permite diseñar el layout del circuito eléctrico que deseamos realizar con los componentes pasivos, activos, y discretos e integrados, así como la consideración de fuentes de alimentación, generadores de señal y otros. Una vez realizado el diseño, con Isis simularemos en tiempo, mediante el módulo *VSM*.

Consecuentemente, nuestra Planta o Sistema que será emulado con “computadores analógicos” (mediante amplificadores operacionales), será valorado en su diseño, mediante la simulación previa a la implementación, excitando el sistema y observando su respuesta en tiempo.

De no cumplir el sistema con los requerimientos hechos, se debe verificar el diseño, de haber cambios (iteraciones correctivas), los mismos se harán con facilidad en la simulación, para estudiar los nuevos los resultados, aspecto que sería complejo de realizar en el sistema implementado, ya que se pueden afectar negativamente los componentes, los cuales en un principio son sencillos, pero ya cuando se trabaje con sistemas discretos se tendrá mayor cuidado con la manipulación del microcontrolador y conversores por ejemplo.

#### E. Implementación

Una vez simulado el sistema, y con la seguridad de que de que se alcanzaron las metas trazadas, se procede

a la implementación física del sistema y a su prueba en laboratorio, con los equipos disponibles.

La implementación física será sometida a las mismas pruebas hechas en la simulación (si fuera posible), en este sentido podemos ver con un osciloscopio, cómo responde el sistema a una entrada de tipo escalón, poniendo una tensión constante (fuente DC) a la entrada del sistema.

#### F. Valoración de Resultados

Al finalizar cada proyecto de laboratorio, se debe hacer una valoración de los resultados obtenidos tanto de la parte analítica, como de las simulaciones efectuadas en Matlab y Proteus, para finalmente considerar los de la implementación.

Una vez concluidos todos los laboratorios, y en base a los resultados obtenidos se debe elegir, en base a benchmarking de los parámetros o características temporales y/o frecuenciales, el controlador o compensador de mejor performance, aquel que cumpla “mejor” las especificaciones de funcionalidad definidas o asignadas.

### IV. TÉCNICA DE DISEÑO

#### A. En base a la respuesta temporal

En este caso nos enfocamos en la respuesta temporal que tiene dos partes un parte transitoria y una parte estacionaria, tiene además, varios parámetros que lo caracterizan como tiempo de crecimiento, tiempo pico, tiempo de establecimiento, máximo sobreimpulso, error de precisión, trabajaremos directamente con estos parámetros estableciendo especificaciones de desempeño, por lo general se emplea el máximo sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y la precisión estacionaria, con estas especificaciones y mediante relaciones matemáticas es posible establecer polos deseados, dominantes de la dinámica del sistema.

#### B. En base a la respuesta en frecuencia

El diseño de controladores en base a la respuesta frecuencial es adecuado en sistemas en los que se desconoce la función de transferencia o esta es difícil de caracterizar, una de sus ventajas es que se puede extender a sistemas no lineales. La compensación se puede realizar en serie o en paralelo siendo la primera la más sencilla de realizar.

Existe una estrecha relación entre la respuesta frecuencial y las características temporales de un sistema, como el Margen de Fase que proporciona una cierta idea del sobreimpulso que se tendrá; con la ganancia normalizada del diagrama de Bode puede establecerse el error en régimen permanente; la frecuencia de transición y la rapidez en la respuesta temporal están directamente relacionados.

Respecto a los compensadores, el Proporcional ayuda a reducir el error en estado estacionario, amplifica directamente la señal de error, el Proporcional-Integral (PI)

tiene contribución negativa de fase y atenúa la respuesta frecuencial, el Proporcional – Derivativo (PD), añade fase al sistema, disminuye el máximo sobreimpulso y acelera la respuesta frecuencial, el Proporcional – Integral – Derivativo (PID), permite obtener un mayor Margen de Fase, mejorando la velocidad de la respuesta original. Por otro lado, quedan los compensadores de fase, entre ellos: el Compensador de Adelanto de Fase, mejora la estabilidad relativa pero conlleva a un incremento del ruido; el Compensador de Retardo, resta fase al sistema y decrementa el módulo de la respuesta frecuencial.

### C. La importancia de la Asignación de Polos

La mayor parte de las implementaciones efectuadas, deja de lado la consideración de las especificaciones de desempeño funcional y su interrelación con las características temporales y frecuenciales de los sistemas, por lo que las implementaciones refuerzan negativamente el uso del procedimiento de “prueba y error”. Un correcto procedimiento, o que permite tener la certeza a-priori de los resultados, es el uso de mecanismos algo más formales, y que dejan de lado el procedimiento heurístico práctico-informal; consecuentemente, para diseñar el controlador PID, se recurre a la técnica de ubicación o asignación de polos, siendo necesario establecer especificaciones de desempeño, de modo que obtengamos con las mismas (mediante la relación de ecuaciones o traducción de especificaciones), un polo ideal deseado, que sea el dominante, el cual determinara la dinámica del sistema. Para lograr este objetivo insertaremos un cero que cambiara la dinámica del sistema y por tanto también la influencia de los polos y ceros dominantes, con esta nueva dinámica se analiza el lugar geométrico de las raíces (LGR), que nos brindara información para definir el segundo cero con ayuda de la condición de fase, y posteriormente definir la ganancia proporcional con ayuda de la condición de magnitud.

El diseño de un controlador específico en el plano “s” a través de la técnica de Asignación de polos, se reduce al cálculo de los parámetros óptimos que permite ubicar las raíces en lazo cerrado en determinada zona del plano s logrando así la dinámica requerida del sistema.

## V. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA A LOS PROYECTOS DE LABORATORIO DESARROLLADOS

### A. LABORATORIO 1 (Planta)

En base a lo señalado en la Introducción de este artículo, se consideró como Sistema o Planta, el caso de un motor de corriente continua.

### 1) Análisis y diseño:

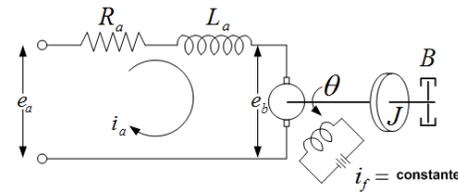


Figura 2: Equivalente electromecánico de la Planta

Las ecuaciones diferenciales obtenidas son:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = k_t i - B \frac{d\theta}{dt}$$

$$L \frac{di}{dt} = -Ri + V - e$$

$$e = k_c \frac{d\theta}{dt}$$

Considerando condiciones iniciales en el origen y aplicando Laplace al sistema de ecuaciones se obtiene la función de transferencia de la planta:

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{JLs^2 + (LB + RJ)s + (RB + k_c k_t)}$$

Donde las variables son:

$J =$  Momento de inercia del motor  $B =$  Coeficiente de fricción viscosa

Se fijaron los valores adecuados para tener una respuesta sub amortiguada, y la planta resultante es:

$$G(s) = \frac{2}{s^2 + 1,41s + 2}$$

### 2) Simulación

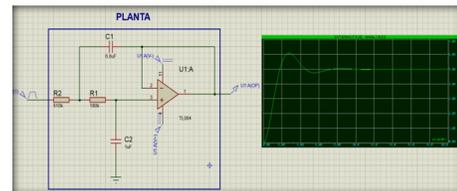


Figura 3: Simulación en Proteus: Respuesta a lazo abierto

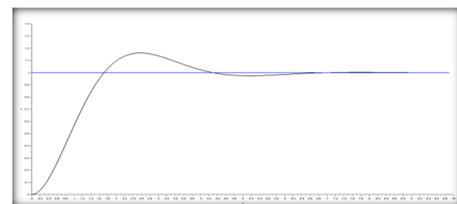


Figura 4: Simulación en Matlab: Respuesta a lazo abierto.

3) Implementación

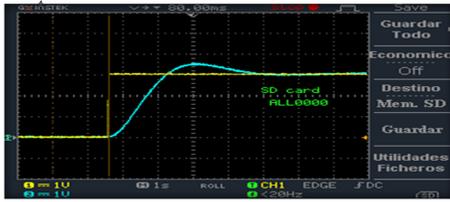


Figura 5: Respuesta a lazo abierto.



Figura 6: Respuesta a lazo cerrado.

B. LABORATORIO 2 (Control PID analógico)

Diseño de controladores continuos, PID en base a la respuesta temporal empleando la técnica de “Asignación de Polos”.

1) Análisis y diseño:

Las especificaciones de desempeño son:

$$MP \leq 15\%$$

$$t_s \leq 3[s]$$

$$e_{ss} = 0$$

Con las que se obtuvieron los polos deseados:

$$p_{i1} = -2 + j2, 1$$

$$p_{i2} = -2 - j2, 1$$

Se busca un controlador de la forma:

$$G_c = \frac{K_p(s+a)(s+b)}{(a+b)s}$$

Se fijara un cero en:  $a = -1, 4$

Y después de aplicar las condiciones de ángulo y magnitud se obtiene la función completa:

$$G_c = \frac{5,01(s+1,4)(s+1,43)}{(2,83)s}$$

2) Simulación:



Figura 7: Simulación en Proteus: Respuesta a lazo cerrado

3) Implementación:

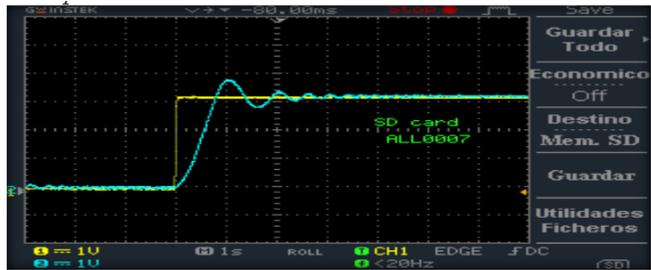


Figura 8: Respuesta a lazo cerrado

C. LABORATORIO 3 (Compensadores analógicos)

Diseño de tres compensadores continuos: uno de Retardo de fase, otro de Adelanto de fase, y otro de Retardo-Adelanto de fase, mediante el método de la “Respuesta en Frecuencia”.

1) Análisis y diseño

Las especificaciones de desempeño son:

$$MP \leq 15\%$$

$$t_s \leq 3[s]$$

$$e_{ss} = 0$$

El método empleado es el de “Respuesta en Frecuencia” ([1] y [2]).

Compensador de adelanto de fase:

$$G_c = \frac{6,71(s+1,54)}{(s+5,49)}$$

Compensador de retardo de fase:

$$G_c = \frac{(1+13,33s)}{0,84(1+15,87s)}$$

Compensador de retardo-adelanto de fase:

$$G_c = \frac{7,99(s + 1,54)(1 + 13,33s)}{(s + 5,49)(1 + 15,87s)}$$

2) Simulación:

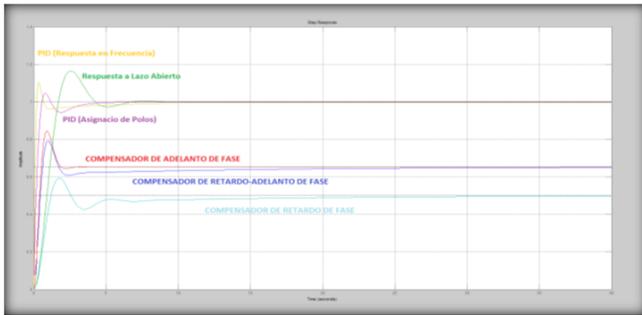


Figura 9: Simulación en Matlab: Respuesta a lazo cerrado

3) Implementación:



Figura 10: Circuito Compensador de Adelanto y Retardo.

D. LABORATORIO 4 (Control PID discreto)

Desarrollar un controlador digital PID, considerando los conceptos de diseño en base a la respuesta temporal.

1) Análisis y diseño

Se puede proceder por discretización del modelo continuo obtenido en el laboratorio 2, para ello se cuentan con varios métodos de discretización, entre ellos el uso del Método Trapezoidal o de Tustin, mediante el que se define la integral entre dos periodos de muestreo, como el trapecio que forman el valor actual de la función y el anterior.

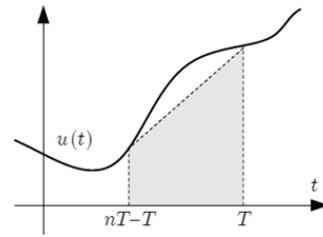


Figura 11: Base gráfica del método de discretización

$$y(nT) = y(nT - T) + T \frac{u(nT) + y(nT - T)}{2}$$

Con ello, se obtiene la ecuación de recurrencia del controlador, la misma que será implementada directamente en el microcontrolador.

2) Simulación:

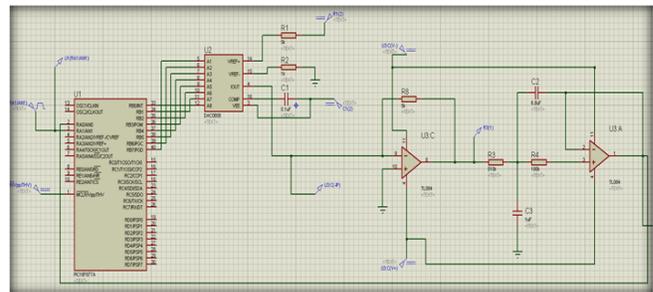


Figura 12: Proteus: Layout del sistema a lazo cerrado

3) Implementación:

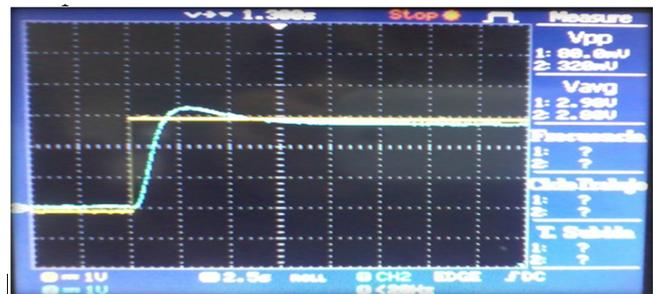


Figura 13: Respuesta a lazo cerrado.

VI. LABORATORIO 5 (COMPENSADORES DISCRETOS)

Desarrollar compensadores digitales, considerando los conceptos de diseño en base a la respuesta frecuencial (Compensadores en adelanto y/o retraso de fase discretos).

A. Análisis y diseño

El método utilizado para la discretización del compensador continuo, obtenido en un laboratorio anterior, es la transformada bilineal por el método trapezoidal, el cambio de variable para dicho método es el siguiente:

$$s = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

Con lo cual se obtiene una función en términos de z, y al aplicar la transformada inversa de Z, obtendremos la ecuación de recurrencia que será aplicada directamente en el microcontrolador.

B. Simulación:

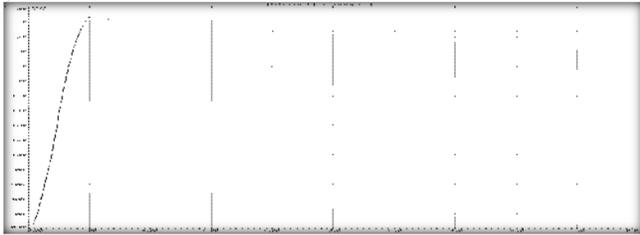


Figura 14: Proteus: Respuesta a lazo cerrado (compensador de adelanto-retardo)

C. Implementación:

Respuesta a lazo cerrado (compensador de adelanto-retardo)



Figura 15: Respuesta a lazo cerrado (compensador de adelanto-retardo)

VII. RESULTADOS OBTENIDOS

En la tabla a continuación se muestran los resultados obtenidos, con respecto a los parámetros de la planta.

En la tabla a continuación se muestran los resultados obtenidos, con respecto a las especificaciones de diseño que deben cumplir los controladores y compensadores diseñados.

Parámetro	Dato experimental	Dato simulación PROTEUS	Dato simulación MATLAB
Tiempo de retardo ( $t_d$ )	0.88 [seg]	0.96 [seg]	0.95 [seg]
Tiempo de crecimiento ( $t_r$ )	1.68 [seg]	1.63 [seg]	1.68 [seg]
Tiempo de pico ( $t_p$ )	2.52 [seg]	2.52 [seg]	2.56 [seg]
Sobre impulso máximo ( $M_p$ )	15.2 %	17 %	16 %
Tiempo de establecimiento ( $t_s$ , 2 %)	6.22 [seg]	5.94 [seg]	5.63 [seg]
Periodo entre picos ( $T$ )	5.5 [seg]	5.05 [seg]	5.29 [seg]
Segundo sobre impulso máximo ( $M_p'$ )	0.014	0.005	0.01
Relación ( $R_d$ )	0.058	0.029	0.062
Error en estado estacionario $\epsilon$	0	0	0
Relación de amortiguamiento ( $\zeta$ )	0.51	0.49	0.50
Frecuencia natural no amortiguada ( $\omega_n$ )	1.26	1.43	1.42
Frecuencia natural no amortiguada ( $\omega_d$ )	1.08	1.25	1.23

Tabla 1: Especificación de los marcadores.

PARAMETRO	VALORES TEORICOS				
	Planta	PID	Adelanto	Retardo	Adelanto- Retardo
Tiempo de Asentamiento	7 seg	3 seg	2 seg	24 seg	15 seg
Error estacionario	50 %	0 %	35 %	25 %	24 %
Máximo sobrepaso	30 %	15 %	28 %	30 %	20 %

PARAMETRO	SIMULACION EN MATLAB				
	Planta	PID	Adelanto	Retardo	Adelanto- Retardo
Tiempo de Asentamiento	7 seg	3.1 seg	1.76 seg	21.47 seg	16.03 seg
Error estacionario	50 %	0 %	35 %	26 %	25 %
Máximo sobrepaso	30.5 %	15 %	29.37 %	18.76 %	21.30 %

PARAMETRO	SIMULACION EN PROTEUS				
	Planta	PID	Adelanto	Retardo	Adelanto- Retardo
Tiempo de Asentamiento	7 seg	2.9 seg	1.5 seg	19 seg	16 seg
Error estacionario	50 %	0 %	33 %	25 %	27 %
Máximo sobrepaso	30.5 %	16 %	6 %	17 %	22 %

PARAMETRO	IMPLEMENTACION				
	Planta	PID	Adelanto	Retardo	Adelanto- Retardo
Tiempo de Asentamiento	6 seg	3.3 seg	3 seg	11 seg	3.5 seg
Error estacionario	50 %	1 %	35 %	24 %	28 %
Máximo sobrepaso	30.5 %	13 %	20 %	29 %	20 %

VIII. CONCLUSIONES

Se describió la metodología aplicada en la realización de laboratorios en la asignatura de Sistemas de Control II (ETN-902); se identificó y desarrollo mediante ejemplos, las etapas principales que implica el procedimiento de la metodología, como el “Análisis y Diseño”, la “Simulación en software” y la “Implementación y Valoración de Resultados”.

Se apreció como el método nos ayuda a consolidar los conceptos teóricos adquiridos, logrando una mejor comprensión de los mismos, también nos permite identificar limitaciones, y marcar las diferencias presentes en los datos obtenidos en los diferentes escenarios, datos teóricos, datos de simulación y datos experimentales.

El método nos conduce, al final, a tomar una decisión sobre la elección del “mejor” controlador en base al benchmark de los datos y resultados obtenidos de las características temporales y/o frecuenciales, de todo el trabajo realizado durante las sesiones de laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] Benjamin C. Kuo. *Sistemas de control automático*. 1996 (vid. pág. 5).
- [2] *Texto de referencia para la asignatura “Ejercicios de Sistemas de Control Discreto – ETN 902”*. Carrera de Ingeniería Electrónica, 2005 (vid. pág. 5).
- [3] Juan Gil y Rubidio Diaz. *Fundamentos de control automático de sistemas continuos y muestreados*. 2009.
- [4] S. Gomáriz y col. *Teoría de control – Diseño electrónico*. UPC, 1998.
- [5] K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. 3.<sup>a</sup> ed. Pearson-Prentice Hall, 1998.
- [6] K. Ogata. *Sistemas de control en tiempo discreto*. 2.<sup>a</sup> ed. Prentice Hall, 1996.
- [7] C.L. Phillips y H.T. Nagle. *Sistemas de Control Digital. Análisis y Diseño*. 1995.
- [8] Sebastian Reinoso, J.M. Aracil y F. Torres. *Control de Sistemas Discretos*. 7.<sup>a</sup> ed. Pearson-Prentice Hall, 1996.
- [9] *Transparencias presentadas en clase*. 2014.
- [10] *Guías de clase para prácticas y/o laboratorio*. 2014.