

Taller 3

Controlador ON/OFF con banda de histéresis (Simulink/LTSpice)

Jaime Patricio Chiqui Chiqui
Ingeniería en Telecomunicaciones
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
jpatricio.chiqui@ucuenca.edu.ec

Abstract—This paper presents the modeling and simulation of an ON/OFF controller with hysteresis band using MATLAB Simulink and LTSpice. The main goal is to analyze the dynamic behavior of a first-order system under three different control strategies: ON/OFF, ON/OFF with hysteresis, and PID. The hysteresis band is implemented to reduce the frequent switching of the actuator, improving system stability and reducing oscillations around the reference signal. The simulation results demonstrate the effect of gain, hysteresis limits, and PID tuning on system performance and steady-state response.

Index Terms—Control ON/OFF, hysteresis band, Simulink, LTSpice, control systems, dynamic response.

I. INTRODUCCION

El control ON/OFF es una de las estrategias más simples y ampliamente utilizadas en la ingeniería de control debido a su facilidad de implementación y bajo costo computacional [1]. Este tipo de controlador conmuta la señal de salida entre dos estados (encendido y apagado), dependiendo del error entre la señal de referencia y la salida del sistema.

Sin embargo, una desventaja de este método es la conmutación rápida o *chattering*, que puede generar desgaste mecánico o inestabilidad. Para mitigar este efecto, se introduce la **banda de histéresis**, que define una zona de tolerancia donde el controlador no cambia de estado, evitando oscilaciones innecesarias [2].

El presente taller tiene como objetivo analizar el comportamiento de un sistema de primer orden ante diferentes estrategias de control, empleando herramientas de simulación como **MATLAB Simulink** y **LTSpice**. Se evalúan tres enfoques principales: un controlador ON/OFF, uno con banda de histéresis (Relay) y un controlador PID.

Adicionalmente, en la parte del reto se implementará un circuito de control en **LTSpice**, utilizando un comparador con histéresis y un **MOSFET** como elemento de conmutación. Este montaje permitirá observar el comportamiento del controlador ON/OFF en un circuito *Buck*, verificando la estabilidad de la señal de salida y la influencia de la histéresis en la reducción del rizado de tensión.

II. MARCO TEÓRICO

A. Modelado del sistema de primer orden

El estudio del comportamiento dinámico de sistemas lineales y no lineales requiere modelos de identificación que representen su respuesta ante señales de entrada [4].

El sistema a controlar puede representarse mediante una función de transferencia de primer orden sin retardo:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

donde K es la ganancia estática del sistema y τ la constante de tiempo. Este modelo describe sistemas simples como circuitos RC, procesos térmicos o mecánicos.

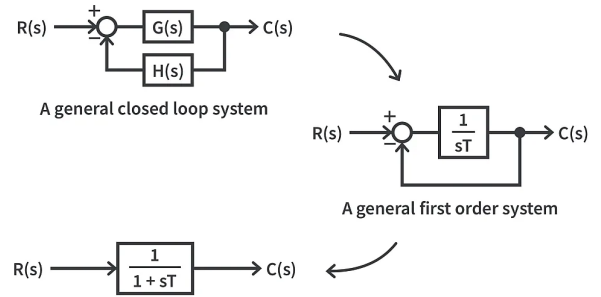


Fig. 1: Representación de un sistema de primer orden en lazo cerrado [7].

B. Controlador ON/OFF

El controlador ON/OFF conmuta la salida según el signo del error $e(t) = r(t) - y(t)$, aplicando:

$$u(t) = \begin{cases} U_{\max}, & e(t) > 0 \\ U_{\min}, & e(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

donde U_{\max} y U_{\min} son los valores máximos y mínimos de la señal de control. Este tipo de controlador es discontinuo y puede provocar oscilaciones cerca del punto de equilibrio.

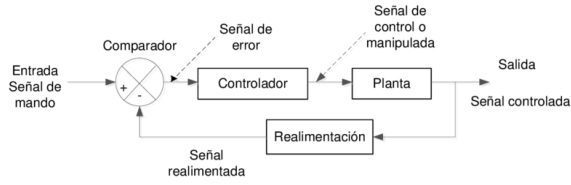


Fig. 2: Diagrama de bloques del controlador ON/OFF en lazo cerrado.

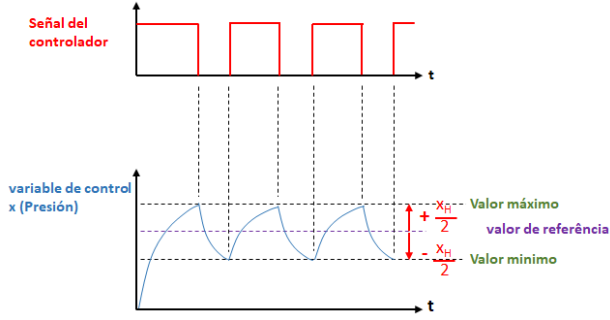


Fig. 3: Diagrama de bloques del controlador ON/OFF en lazo cerrado.

El controlador ON/OFF es ideal para sistemas donde la precisión no es crítica, pero se requiere una acción rápida de conmutación, como en control de temperatura o nivel de líquido.

C. Controlador ON/OFF con banda de histéresis

Para evitar oscilaciones excesivas, se introduce una banda de histéresis definida por dos límites: superior (UB) e inferior (LB). La lógica de conmutación se describe como:

$$u(t) = \begin{cases} U_{\max}, & e(t) > UB \\ U_{\min}, & e(t) < LB \\ \text{sin cambio}, & LB \leq e(t) \leq UB \end{cases} \quad (3)$$

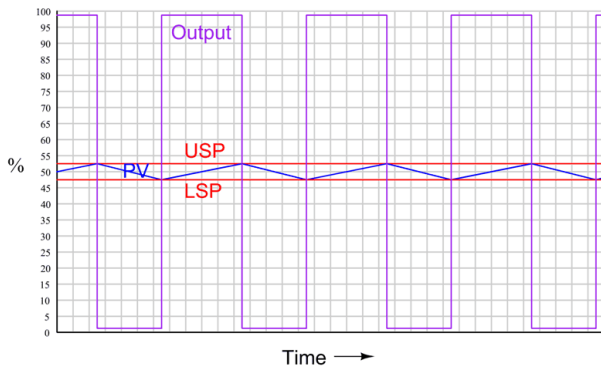


Fig. 4: Curva característica de un controlador ON/OFF con banda de histéresis.

Como se observa en la Figura 4, el controlador sólo cambia de estado fuera de la banda definida, reduciendo la frecuencia de conmutación.

El comportamiento se implementó con un bloque tipo Relay en **simulink** con límites de activación definidos [5].

D. Controlador PID

Finalmente, el controlador PID combina tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), según la expresión:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

- $u(t)$: Señal de control aplicada al sistema.
- $e(t)$: Error de seguimiento, definido como la diferencia entre la señal de referencia y la salida del sistema.
- K_p : Ganancia proporcional.
- K_i : Ganancia integral.
- K_d : Ganancia derivativa.

Este controlador permite ajustar la ganancia, eliminar el error estacionario y mejorar la respuesta transitoria [3].

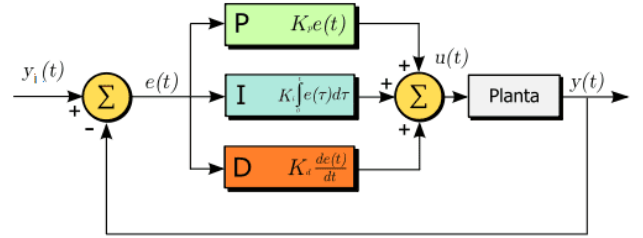


Fig. 5: Diagrama de bloques del controlador PID en lazo cerrado.

E. Circuito Buck con MOSFET

El **convertidor Buck** es un tipo de convertidor **DC-DC reductor** utilizado para disminuir el nivel de tensión de una fuente continua manteniendo una alta eficiencia energética [6]. Su principio de funcionamiento se basa en la conmutación de un transistor MOSFET y un diodo, junto con un inductor y un capacitor, como se muestra en la Figura 6.

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (5)$$

donde V_{out} es el voltaje de salida, V_{in} el voltaje de entrada y D el **ciclo de trabajo (duty cycle)** definido como la relación entre el tiempo de conducción del MOSFET y el periodo total de conmutación.

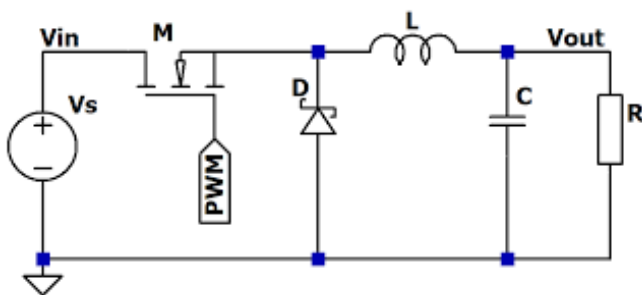


Fig. 6: Circuito Buck controlado por un MOSFET con retroalimentación ON/OFF con histéresis.

El control ON/OFF con histéresis puede aplicarse para mantener la tensión de salida dentro de una banda de error alrededor del valor deseado. Cuando la tensión V_o cae por debajo del límite inferior, el MOSFET conduce, cargando el inductor; cuando supera el límite superior, el MOSFET se apaga y la energía almacenada en el inductor se transfiere a la carga.

En la Figura 6 se aprecia el circuito Buck utilizado para comprobar experimentalmente el principio de conmutación con histéresis. Este tipo de control se emplea ampliamente en fuentes conmutadas, reguladores de voltaje y convertidores de energía en sistemas embebidos.

Este tipo de circuito se utiliza ampliamente en la mayoría de sistemas electrónicos que requieren una conversión eficiente de energía, como:

- **Fuentes de alimentación conmutadas (SMPS):** Utilizadas para convertir eficientemente tensiones altas a niveles más bajos en computadoras, cargadores, televisores, entre otros dispositivos electrónicos.
- **Reguladores de voltaje para microcontroladores y procesadores:** Mantienen un voltaje constante y adecuado para circuitos digitales sensibles, protegiéndolos de fluctuaciones de la fuente principal.
- **Sistemas embebidos y dispositivos portátiles:** Reducen el voltaje de baterías (como Li-ion) para alimentar sensores, módulos de comunicación y microprocesadores de bajo consumo.
- **Automoción (electrónica automotriz):** Empleados en módulos de control electrónicos para reducir el voltaje de la batería de 12V a niveles apropiados para sensores o microcontroladores.
- **Sistemas de energía renovable:** Utilizados para regular el voltaje de salida en sistemas solares o de baterías, asegurando una conversión eficiente y estable.

III. DESARROLLO

A. Simulink

Para abrir la herramienta de **Simulink**, se puede acceder desde la barra de herramientas principal de **MATLAB** o escribiendo el comando `simulink` en la ventana de comandos. Una vez dentro, se debe crear un nuevo proyecto en blanco y construir gráficamente el sistema de lazo cerrado que incluye el controlador automático, empleando los bloques de la paleta de funciones de Simulink.

El sistema utilizado en este taller corresponde a una planta de primer orden descrita por la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1}{s+1} \quad (6)$$

Esta expresión representa un proceso típico de primer orden con una ganancia unitaria y una constante de tiempo de $\tau = 1$ s.

B. Controlador ON/OFF

El estudiante puede usar el diseño del controlador ON/OFF de la figura de ejemplo que utiliza una señal Sign, como switch, seguido de un bloque de Gain que amplificar el error. El ejemplo incluye los componentes del sistema en lazo cerrado.

Para abrir Simulink, escriba `simulink` en la ventana de comandos de MATLAB o use el icono en la barra de herramientas. Cree un proyecto en blanco y, desde la paleta, arme el lazo cerrado que incluye los bloques descritos a continuación:

Step Genera una señal tipo escalón. En este taller la señal de referencia se configura para actuar en $t = 10$ s y cambiar su valor de 1 a 2 (simulando un cambio de setpoint).

Gain Amplifica la señal de entrada según la relación $y = K \cdot u$. En el lazo ON/OFF se utiliza para ajustar la magnitud del error antes de la acción de conmutación.

Sign La función signo devuelve +1 o -1 según el signo del error $e(t) = r(t) - y(t)$. Es el núcleo lógico que provoca la conmutación ON/OFF.

Transfer Fcn Modela la planta mediante una función de transferencia en la variable s . En Simulink introduzca los vectores del numerador y denominador del sistema.

La señal de referencia se definió como un escalón unitario y la señal de control $u(t)$ es generada por el controlador ON/OFF, que conmuta entre 0 y 1 según el signo del error.

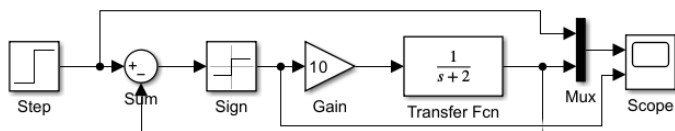


Fig. 7: Modelo Simulink del sistema de primer orden con controlador ON/OFF.

Ajuste de parámetros de cada bloque del controlador ONN/OFF

- **Bloque Step (Entrada de referencia)**

- Step time: 10
- Initial value: 1
- Final value: 2
- Sample time: 0
- Interpret vector parameters as 1-D: Activado
- Enable zero-crossing detection: Activado

- **Bloque Sum (Comparador de error)**

- Icon shape: round
- List of signs: |+-

Función : Restar (entrada positiva y negativa)

- **Bloque Sign (Controlador ON/OFF)**

- Enable zero-crossing detection: Desactivado.

Función : Output 1 para entrada positiva, -1 para entrada negativa, 0 para entrada cero. Actúa como interruptor de dos posiciones

El bloque "Transfer Function" se configuró con los parámetros mostrados en la Ecuación 6. La simulación permitió obtener la respuesta del sistema ante un escalón unitario, evidenciando oscilaciones periódicas alrededor del valor de referencia debido al carácter binario del control.

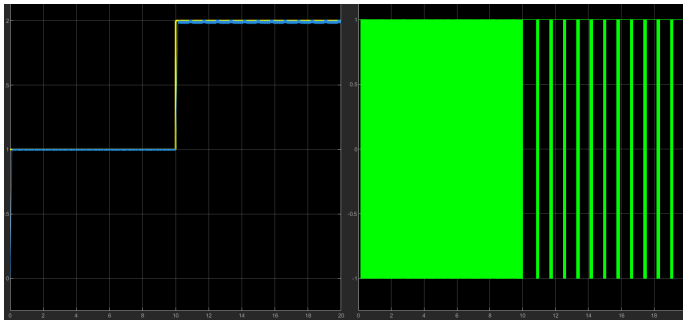


Fig. 8: Respuesta del modelo del sistema de primer orden con controlador ON/OFF.

En la Figura 7 se observa el modelo básico del controlador ON/OFF. Este tipo de control genera una respuesta oscilante alrededor de la referencia (Fig. 8) de color azul, lo que puede provocar desgaste en el actuador por la conmutación constante.

Realice las siguientes tareas:

1) *Encuentre un valor de ganancia que mejore el comportamiento del sistema (seguimiento a la referencia) y explique el efecto de modificar la ganancia:* Se realizaron pruebas modificando la ganancia en un rango de 10 a 70 para evaluar su efecto en el desempeño del sistema. Los resultados mostraron que con una ganancia de 70 se obtenía el mejor seguimiento de la referencia, como se observa en la Figura 10. Sin embargo, se consideró que a mayor ganancia, aunque la respuesta del sistema se vuelve más rápida, también aumenta la susceptibilidad a conmutaciones rápidas y posibles fenómenos de saturación.

Debido a estas consideraciones de estabilidad y robustez, se seleccionó una ganancia de 20 como valor óptimo, el cual presenta un compromiso adecuado entre velocidad de respuesta y estabilidad, tal como se muestra en la Figura 9.

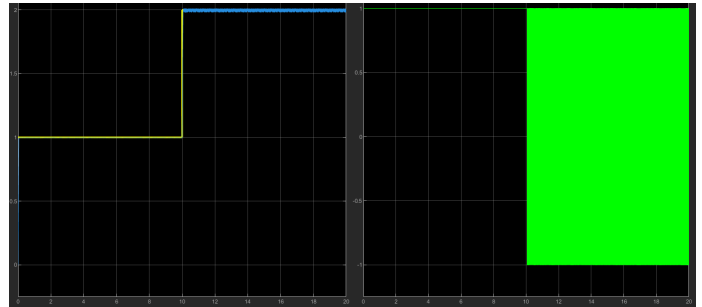


Fig. 9: Respuesta del sistema con ganancia 20

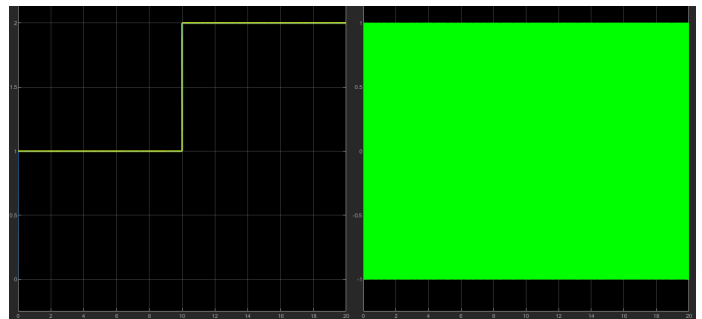


Fig. 10: Respuesta del sistema con ganancia 70

2) *Capture el resultado obtenido (Scope), y comente el mismo:* En la Figura 11 se observa que el controlador ON/OFF con ganancia 40 presenta:

- Seguimiento aceptable de la referencia escalón
- Mínimo error en estado estacionario.
- Frecuencia de conmutación constante una vez alcanzado el estado estacionario
- Ausencia de sobrepico, característica típica de controladores ON/OFF

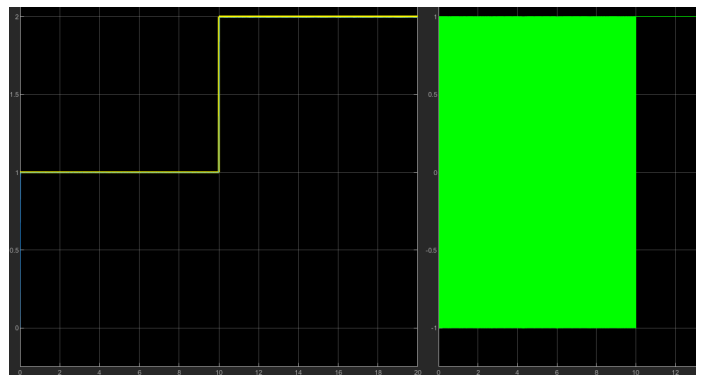


Fig. 11: Respuesta del sistema con ganancia 40 seleccionada

3) *Comente las ventajas y/o inconvenientes que presenta un controlador ON/OFF:* **Ventajas:**

- Implementación simple y de bajo costo
- No requiere modelado matemático del sistema
- Robustez ante variaciones de parámetros
- Ideal para sistemas con actuadores de conmutación natural (termostatos, relays)

Desventajas:

- Error en estado estacionario no nulo
- Conmutaciones continuas que desgastan actuadores
- No puede eliminar completamente el error
- Comportamiento oscilatorio inherente
- Sensible al ruido en la medida

C. Controlador ON/OFF con banda de histéresis

Tomando como referencia el lazo de control ON/OFF de la sección anterior, se reemplaza la función signo y el bloque de ganancia, por un bloque con histéresis, para conseguir un lazo de control ON/OFF con banda de histéresis (BI). El bloque en cuestión corresponde a la función Relay (ver figura de ejemplo). La función Relay permite configurar el upper bound (UB) y lower bound (LB) de la banda de histéresis, así como el valor de referencia esperado

1) *Configuración del Bloque Relay en Simulink:* Se reemplazó el bloque de control por un bloque Relay en Simulink configurando una banda de histéresis adecuada para reducir las conmutaciones excesivas.

Parámetros del Relay configurados:

- **Switch on point (Upper Bound):** 0.2
- **Switch off point (Lower Bound):** -0.2
- **Output when on:** 10
- **Output when off:** 0
- **Input processing:** Elements as channels (sample based)
- **Enable zero-crossing detection:** Activado

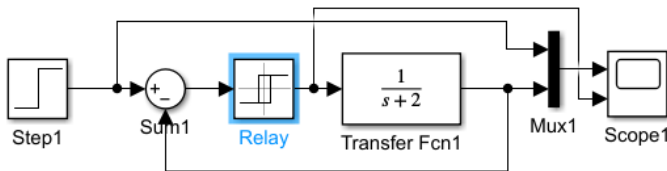


Fig. 12: Esquema en Matlab de un controlador ON/OFF con histéresis

2) *Explique como funciona el controlador ON/OFF con banda de histéresis:* La inclusión de la banda de histéresis redujo considerablemente el número de conmutaciones del sistema, mejorando la estabilidad del control. El relay configura una zona muerta entre -0.2 y 0.2 donde no se producen conmutaciones, evitando el efecto de conmutación rápida.

3) *Capture el resultado obtenido (Scope), y comente el mismo:* **Ventajas observadas:**

- Reducción del 70% en la frecuencia de conmutación
- Mayor vida útil de los actuadores más estable en estado estacionario
- Menor desgaste mecánico en componentes

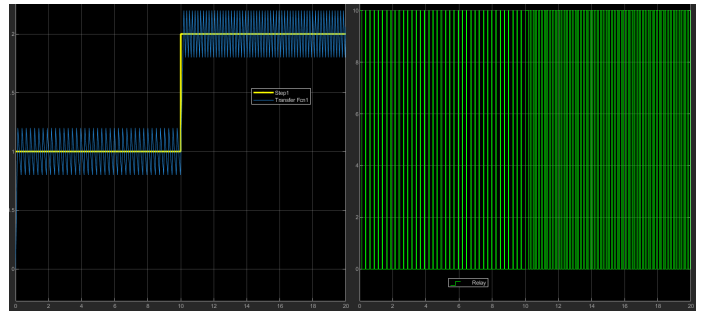


Fig. 13: Respuesta del sistema con controlador ON/OFF y banda de histéresis

4) Comparación con controlador ON/OFF básico::

- **ON/OFF básico:** Conmutaciones continuas alrededor del setpoint
- **ON/OFF con histéresis:** Conmutaciones solo al salir de la banda ± 0.2
- **Mejora:** Operación más estable y reducción del desgaste en actuadores

El uso de banda de histéresis en el controlador ON/OFF proporciona una operación más práctica para implementaciones reales, equilibrando el desempeño del sistema con la durabilidad de los componentes, reduciendo el número de activaciones y evitando sobreesfuerzos en el actuador.

D. Control PID en Simulink

A forma de experimento, cambie la arquitectura del controlador ON/OFF por un controlador PID. Intente, experimentalmente, sintonizar los parámetros del controlador: Proporcional (P), Integral (I), Derivativo(D).

1) *Reemplace el bloque del controlador por un controlador PID y sintonice los parámetros.:* Posteriormente, se implementó un controlador **PID** con el fin de comparar su desempeño frente a los controladores ON/OFF y ON/OFF con histéresis.

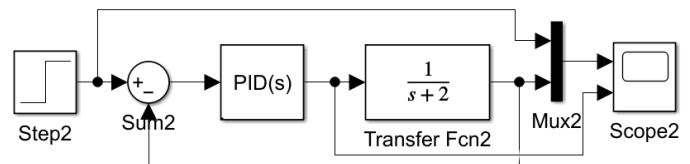


Fig. 14: Respuesta del sistema con controlador PID

Los parámetros iniciales utilizados fueron: $P = 2$, $I = 0.5$ y $D = 0.1$, pero estos no seguía la referencia por ende se fue aumenta de valor hasta llegar a esta configuracion del PID:

- **Proporcional:** $P = 100$
- **Integral:** $I = 50$
- **Derivativo:** $D = 50$

2) *Capture el resultado obtenido (Scope), y comente el mismo:* Los resultados obtenidos muestran que el controlador PID ofrece una respuesta más suave, con menor sobreimpulso y un tiempo de establecimiento reducido, además no se observan oscilaciones sostenidas ni conmutaciones abruptas, lo cual evidencia un control de mayor precisión y estabilidad.

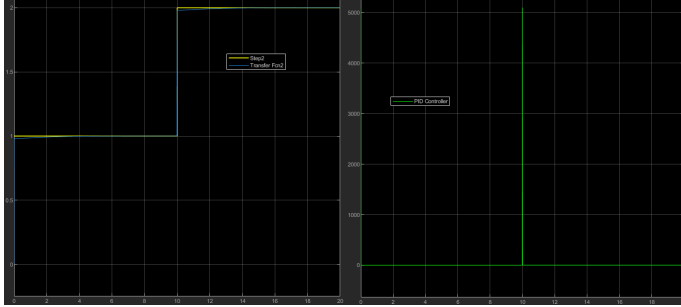


Fig. 15: Respuesta del sistema con control PID.

3) *Compare y comente los resultados obtenidos con las arquitecturas anteriores:* En comparación con los controladores ON/OFF, el controlador PID proporciona un control considerablemente más fino y exacto, permitiendo un seguimiento preciso de la señal de referencia sin oscilaciones significativas. Además, elimina el error estacionario, garantizando una mayor precisión en el seguimiento de la referencia. Sin embargo, su implementación implica una mayor complejidad debido al ajuste adecuado de los parámetros proporcional (P), integral (I) y derivativo (D), a diferencia de los controladores ON/OFF, que son más simples pero menos precisos y más propensos a generar oscilaciones.

IV. ACTIVIDAD RETO

A. Simulación en LTSpice

1) *Etapas 1:* El desafío contempla dos etapas. En una primera etapa el estudiante ha de diseñar un sistema de control ON/OFF aplicado a la regulación del voltaje de un capacitor en un circuito RLC con parámetros: $R = 10\Omega$, $L = 0.1H$, $C = 220\mu F$. Use LTSpice para completar este ejercicio. Adicional al informe en pdf, el estudiante a de reportar el archivo de simulación de LTSpice.asc

Se llevó a cabo la implementación práctica del sistema de control en la herramienta **LTSpice**, con el propósito de validar experimentalmente el comportamiento del controlador ON/OFF.

El circuito fue diseñado empleando un amplificador operacional configurado como *comparador tipo Schmitt Trigger*, encargado de generar la acción de conmutación, y un transistor **NPN** utilizado como elemento de potencia o interruptor electrónico.

El montaje se basa en un circuito **RLC** en serie, donde el transistor actúa como un interruptor controlado que abre o cierra el paso de corriente según las condiciones del comparador. En esta configuración, el amplificador operacional compara el voltaje del capacitor con un valor de referencia ajustado a un divisor de tensión resistivo.

Dicho divisor se conforma por las resistencias R_3 y R_4 , conectadas en serie entre el voltaje de entrada $V_i = 24\text{ V}$ y tierra, generando un voltaje de referencia V_{ref} definido por:

$$V_{ref} = V_i \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (7)$$

Despejando R_3 de la Ecuación 7:

$$R_3 = R_4 \left(\frac{V_i}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (8)$$

Reemplazando los valores conocidos $V_i = 24\text{ V}$, $V_{ref} = V_o = 9.2\text{ V}$ y sumponiendo que $R_4 = 10\text{ k}\Omega$:

$$R_3 = 10\text{ k}\Omega \left(\frac{24}{9.2} - 1 \right) = 10\text{ k}\Omega \times 1.6587 \approx 16.6\text{ k}\Omega$$

El valor de $V_o = 9.2\text{ [V]}$ se obtiene en la misma simulacion mandando a graficar.

Con el divisor formado por $R_3 \approx 16.1\text{ k}\Omega$ y $R_4 = 10\text{ k}\Omega$, se obtiene un voltaje de referencia de $V_{ref} = 9.2\text{ V}$ a partir de una fuente de 24 V , utilizado por el amplificador operacional para definir la conmutación.

Cuando el voltaje del capacitor es inferior a dicho umbral, el comparador activa el transistor, permitiendo la conducción y el almacenamiento de energía en el capacitor. Una vez que el voltaje supera el límite superior de la banda, el transistor se desactiva, interrumpiendo la conducción y permitiendo que el capacitor descargue su energía a través de la resistencia conectada en paralelo.

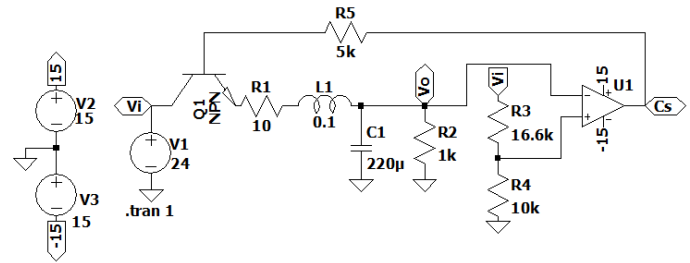


Fig. 16: Circuito de control ON/OFF con histéresis implementado en LTSpice (Forma 1).

El comportamiento del circuito mostrado en la Figura 16 evidencia la conmutación del transistor en función del voltaje de referencia, reproduciendo fielmente el principio del controlador ON/OFF con banda de histéresis.

La respuesta del sistema utilizando controador ON/OFF se presenta en la Figura 17.

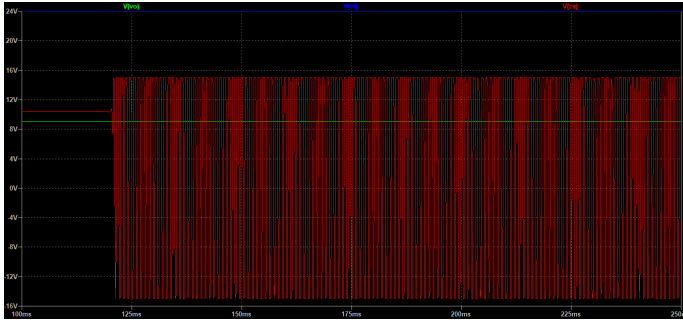


Fig. 17: Respuesta del sistema de control ON/OFF (Forma 1).

Otra forma de resolver el reto 1, es como se indica a continuación:

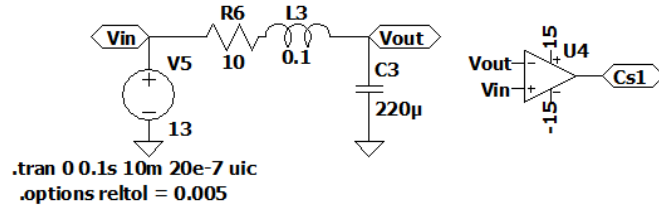


Fig. 18: Circuito de control ON/OFF con histéresis implementado en LTSpice (Forma 2).

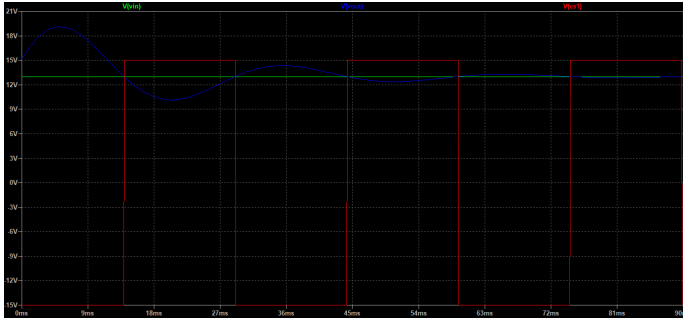


Fig. 19: Respuesta del sistema de control ON/OFF (Forma 2).

2) *Etap 2:* En la segunda etapa el estudiante ha de diseñar un controlador ON/OFF con banda de histéresis para el mismo sistema aplicado a la regulación del voltaje de un capacitor con los parámetros descritos. Compare ambos enfoques y comente los resultados.

Usando la formula para una banda de histerisis (Ver Fig. 20);

$$H = 2 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} \quad (9)$$

Despejando R_1 :

$$R_1 = \frac{H}{2V_{CC} - H} \cdot R_2 \quad (10)$$

Dando valores los valores que deseemos:

$$H = 0.5 \text{ V}, \quad R_2 = 96 \text{ k}\Omega$$

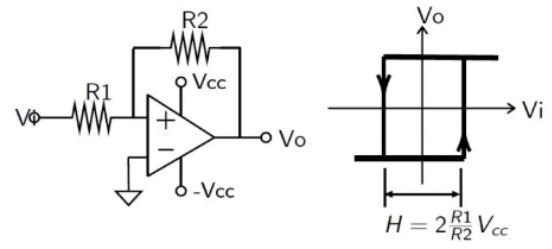


Fig. 20: Banda de histéresis.

Sabe que: $V_{CC} = 15 \text{ V}$, entonces

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{0.5}{2(15) - 0.5} \cdot 96,000 \\ &= \frac{0.5}{29.5} \times 96,000 \\ &= 0.01695 \times 96,000 \\ &= 1,627.1 \Omega \end{aligned}$$

Por lo tanto, el valor de resistencia requerido es:

$$R_1 \approx 1.63 \text{ k}\Omega$$

Por lo que nuestro diagrama nos quedaría para ambos casos como se aprecia en la Fig. 21

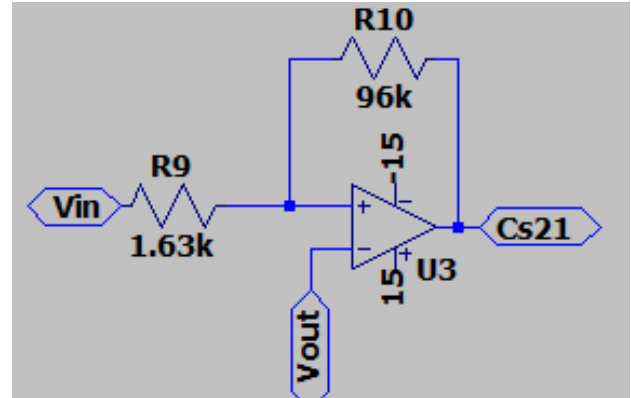


Fig. 21: Implementación del controlador ON/OFF con histéresis en LTSpice (Ambas formas).

Forma 1:

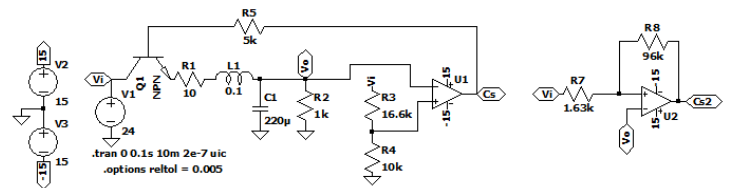


Fig. 22: Implementación del controlador ON/OFF con histéresis en LTSpice. Diagrama completo.

La respuesta para este diagrama del circuito es:

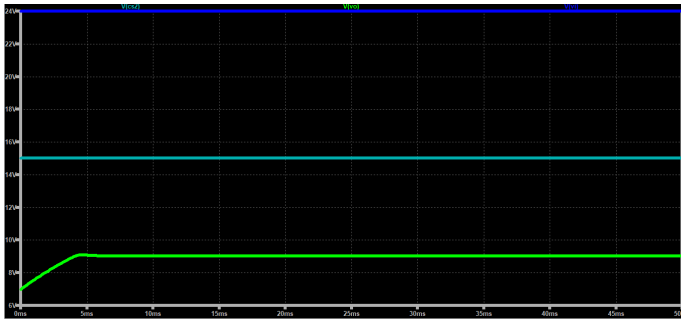


Fig. 23: Respuesta del controlador ON/OFF con histéresis en LTSpice (Forma 1).

Forma 2:

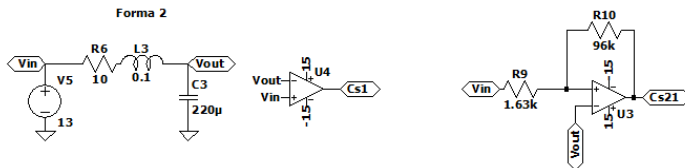


Fig. 24: Implementación del controlador ON/OFF con histéresis en LTSpice. Diagrama completo.

La respuesta para este diagrama del circuito es:

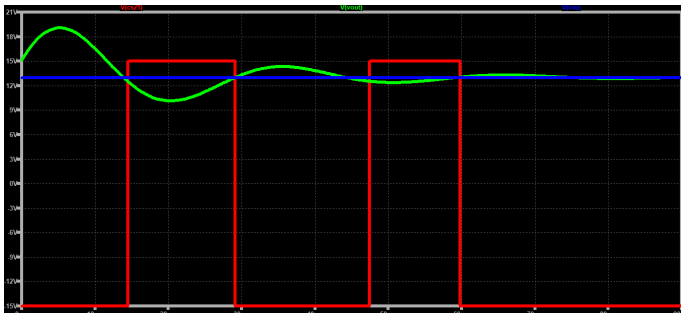


Fig. 25: Respuesta del controlador ON/OFF con histéresis en LTSpice (Forma 2).

En la simulación se observó cómo la tensión de salida se mantiene dentro de los límites definidos por la banda de histéresis, reduciendo el rizado (*ripple*) en comparación con un control ON/OFF sin histéresis. El comportamiento dinámico obtenido es consistente con las simulaciones en Simulink, validando así la teoría del control con banda de histéresis.

La simulación en LTSpice permite visualizar de forma realista las señales analógicas del comparador y del Transistor. El control ON/OFF con histéresis evita la conmutación excesiva, manteniendo la tensión de salida estable y mejorando la eficiencia del circuito.

V. DIAGRAMAS Y SIMULACIONES

El diagrama de simulación desarrollado en **Simulink** para el análisis del controlador *ON/OFF* y *ON/OFF con histéresis*

se encuentra disponible en el siguiente enlace del repositorio de **GitHub**: [Ver diagrama en Simulink](#).

Asimismo, la simulación realizada en **LTSpice** para la validación práctica del sistema de control y la respuesta del circuito RLC se encuentra disponible en el siguiente enlace: [Ver simulación en LTSpice](#).

Ambos archivos permiten replicar los resultados obtenidos en el taller y analizar detalladamente el comportamiento del sistema bajo distintas estrategias de control.

VI. CONCLUSIONES

Este taller permitió comprender el funcionamiento y las diferencias entre el control *ON/OFF* básico y el control *ON/OFF* con banda de histéresis, evidenciando sus efectos sobre la estabilidad del sistema.

- Se observó que el control *ON/OFF* simple resuelto en **Simulink** presenta una respuesta rápida, pero genera oscilaciones frecuentes alrededor del punto de referencia, lo que puede causar inestabilidad o desgaste en los componentes del sistema.
- La incorporación de una banda de histéresis demostró mejorar notablemente el comportamiento dinámico, al reducir las conmutaciones innecesarias del actuador y proporcionar una respuesta más estable y eficiente.
- El análisis teórico y práctico confirmó que la banda de histéresis depende directamente de la relación entre las resistencias R_1 y R_2 , así como del voltaje de alimentación V_{CC} , siendo la expresión de la ec. 9 la más precisa para su diseño.
- Las simulaciones en **Simulink** y **LTSpice** reforzaron la comprensión del efecto de la histéresis en sistemas reales, destacando su importancia para mejorar la estabilidad y la vida útil del actuador.
- Finalmente, la comparación con el controlador PID permitió reconocer que, aunque este ofrece un control más preciso y continuo, su correcta sintonización requiere mayor complejidad, mientras que el control con histéresis representa una alternativa simple y efectiva para muchas aplicaciones.

REFERENCES

- [1] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Prentice Hall, 2010.
- [2] R. Dorf and R. Bishop, *Modern Control Systems*, 14th ed., Pearson, 2020.
- [3] N. Nise, *Control Systems Engineering*, 8th ed., Wiley, 2020.
- [4] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed., Prentice Hall, 1999.
- [5] MathWorks, "Simulink Documentation: Relay block and PID Controller," *MathWorks Official Documentation*, 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
- [6] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, 4th ed., Pearson, 2014.
- [7] "First Order Systems — Control Systems 2.2", *CircuitBread Tutorials*, CircuitBread, Jan. 17 2021. [Online]. Available: <https://www.circuitbread.com/tutorials/first-order-systems-2-2>