

INFORME DE LABORATORIO: CONTROLADOR ON-OFF CON HISTÉRESIS

Karen Juliana Lesmes Calderón, Kevin Santiago Bedoya Merchán
Universidad ECCI

Bogotá

karenj.lesmes@ecci.edu.co, kevins.bedoyam@ecci.edu.co.

Resumen- *Este informe presenta el diseño e implementación de un sistema de control ON-OFF con histéresis para el llenado secuencial de frascos, utilizando un comparador LM339N y sensores ultrasónicos HC-SR04. El sistema integra modelado mecánico (SolidWorks), simulaciones electrónicas (Multisim y Proteus) y diseño de PCB (Ultiboard), cumpliendo con normas IPC. Se desarrolló un prototipo simulado en CAD y pruebas preliminares en protoboard que validan la estabilidad y confiabilidad del control, eliminando oscilaciones no deseadas mediante la correcta configuración de histéresis. Aunque no se fabricó la PCB ni la estructura física, las simulaciones y ensambles virtuales demostraron la viabilidad del sistema para automatizar procesos industriales de baja complejidad.*

Palabras clave- Comparador LM339N, Control ON-OFF, Diseño PCB, Histéresis, Multisim, SR-HC04.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control ON-OFF con histéresis son esenciales en procesos industriales que requieren estabilidad y precisión, como el llenado de recipientes, regulación térmica y control de niveles de líquidos[1]. Este informe presenta la implementación de un sistema de llenado secuencial de cuatro frascos dispuestos circularmente, utilizando un comparador LM339N con histéresis. El proyecto integra componentes mecánicos, electrónicos y de software para emular un proceso industrial automatizado, cumpliendo requisitos como sincronización de movimientos (giro de 90° por ciclo), detección de nivel y diseño de PCB conforme a normas IPC[2].

El sistema emplea un disco giratorio impulsado por un motor paso a paso y un disco fijo que soporta los frascos, controlado mediante un circuito ON-OFF

con histéresis. Durante el desarrollo se resolvieron problemas como interferencias eléctricas, falsos contactos en el LM339N y errores de ruteo en la PCB, mediante reubicación de componentes, ajuste de resistencias y verificación de continuidad[3]. El diseño mecánico fue modelado en SolidWorks, considerando el espacio para componentes y ruteo [4].

Finalmente, el proyecto valida conceptos teóricos de control automático, como la relación entre la histéresis y el tiempo muerto del sistema [2], y subraya la importancia de integrar simulación (Multisim), diseño de PCB (Ultiboard) y pruebas físicas para lograr soluciones industriales robustas.

MARCO TEORICO

El control ON-OFF con histéresis es una de las estrategias más simples y ampliamente utilizadas en la automatización industrial y doméstica para regular variables como temperatura, nivel de líquidos y presión. Su funcionamiento se basa en la conmutación entre dos estados (encendido y apagado) de un actuador, dependiendo del valor de la variable controlada respecto a un umbral predefinido[1].

Control ON-OFF: El control ON-OFF (también llamado control de dos posiciones o de relé) activa el actuador cuando la variable medida está por debajo de un límite inferior y lo desactiva cuando supera un límite superior. Es útil en sistemas donde se permiten oscilaciones y no se necesita alta precisión[1].

Histéresis en Sistemas ON-OFF: La histéresis es una característica clave en sistemas de control ON-OFF que introduce una zona muerta entre los

umbrales de activación y desactivación. Esto evita cambios bruscos y frecuentes ("ciclos rápidos"), mejorando la estabilidad y durabilidad del sistema[2].

Comparador con Histéresis: El control por histéresis en sistemas electrónicos se implementa comúnmente mediante un comparador con retroalimentación positiva, conocido como disparador de Schmitt. En este proyecto, se utiliza el comparador LM339N, un circuito integrado ampliamente empleado por su precisión y confiabilidad. El voltaje de referencia del comparador varía en función del estado de la salida, creando así la banda de histéresis. Matemáticamente, los umbrales de conmutación pueden expresarse como:

$$V_{umbral superior} = + \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Ecuación 1. Calculo umbral superior

$$V_{umbral inferior} = - \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Ecuación 2. Calculo umbral inferior

Donde V_{sat} es la tensión de saturación del comparador y R_1 y R_2 son las resistencias de la red de realimentación[3].

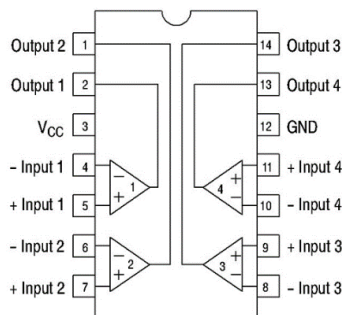


Figura 1 Datasheet LM339D tomado de: <https://acortar.link/ne5cdH>

Sensor HC-SR04: El sensor HC-SR04 este compuesto por un emisor y un receptor de ultrasonidos. Estos nos ayudan a medir la distancia a la que se encuentra un objeto justo frente a él, enviando un pulso de ultrasonidos y midiendo el tiempo que transcurre hasta que vuelve dicho pulso[5].



Figura 2 Sensor ultrasónico HC-SR04 tomado de <https://acortar.link/MAJNnS>

Arduino Uno: El Arduino Uno es una tarjeta basada en el microcontrolador ATmega328. Tiene 14 pines para entrada/salida digital (6 de estos pueden ser usados como PWM), 6 entradas analógicas, oscilador de cristal a 16 MHz, interfaz USB, jack de energía, conector ICSP, y botón de reset.

El Uno se diferencia de sus predecesores en que no usa un integrado conversor UART-USB. En lugar de esto, usa un Atmega16U2 programado como conversor UART-USB[6].

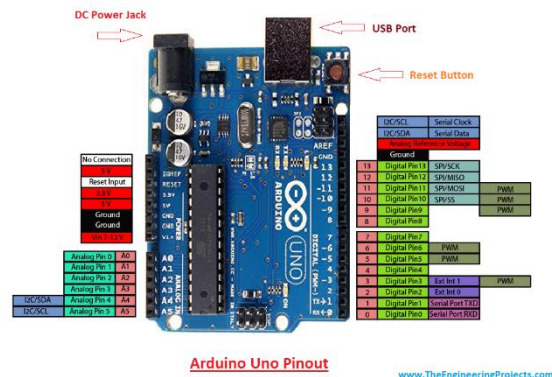


Figura 3 Datasheet Arduino Uno tomado de: <https://acortar.link/ZO41xs>

METODOLOGIA

1. Diseño del Circuito Electrónico

a. Selección de componentes:

- **Comparador LM339N:** Configurado con retroalimentación positiva para definir la histéresis ($\Delta U = 4^\circ C$).
- **Resistencias de ajuste:** Calculadas para establecer umbrales superiores ($U_H = 25^\circ C$) e inferior ($U_L = 21^\circ C$) mediante: $R_1 = 3k$ y $R_2 = 3k$

$$V_{umbral superior} = + \frac{3k}{3k + 3k}$$

Relación 0.5

Ecuación 3. Calculo umbral superior

- **Resistencias de configuración:** Calculadas en función de la ganancia y el voltaje de salida objetivo.

-**Resistencia 6.04k x 2:** Entre VCC a entrada de cada amplificador.

-**Resistencia 2k x 2:** Entre GND a entrada de cada amplificador.

- **Sensor HC-SR04:** Para la detección de distancia, para sensar el nivel de llenado de los vasos.
- **Servo motor MG-995:** Servomotor de piñonería metálica con un torque de hasta 15KG para el giro del plato de llenado.

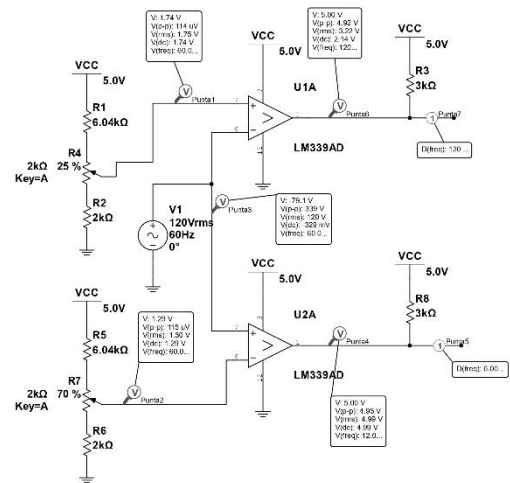
b. Configuración de histéresis:

- Aplicación de retroalimentación positiva al comparador para evitar *chattering*.
- Se realiza la simulación en Multisim para validar ΔU y tiempos de conmutación.

2. Simulación y esquema eléctrico

a. Modelado del sistema:

- Importación del esquemático electrónico al software.
- Se realiza el diseño del esquema eléctrico en Multisim, analizando y ajustando para obtener el voltaje y la ganancia deseada, para el correcto funcionamiento del circuito.
- Análisis transitorio para observar la respuesta del comparador ante cambios de nivel.

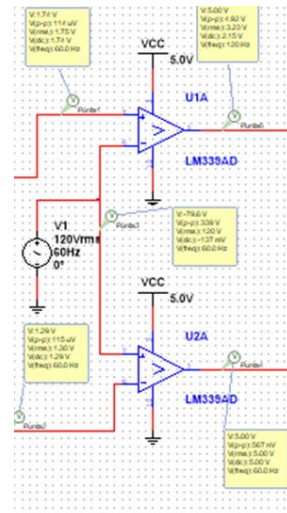


Esquema 1 Diseño electrónico Multisim

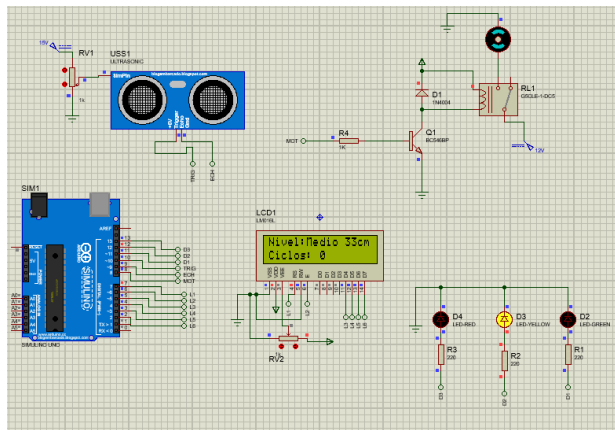
- Se realiza la simulación en Proteus utilizando el sistema embebido seleccionado, para que de esta manera se pueda generar un prototipo de funcionamiento requerido y previsto.

b. Corrección de oscilaciones:

- Ajuste de resistencias en la red de histéresis si se detectan conmutaciones rápidas (>15 ms).



Esquema 2 Medición de variables para revisión de oscilaciones



Esquema 3 Simulación en Proteus funcionando

c. Validación de parámetros:

- Verificación de la señal cuadrada en el osciloscopio virtual (amplitud: 0-5 V, frecuencia: 1-10 Hz).

3. Implementación en Laboratorio

a. Montaje físico en protoboard:

- Conexión independiente de cables de alimentación y señal para evitar ruido.

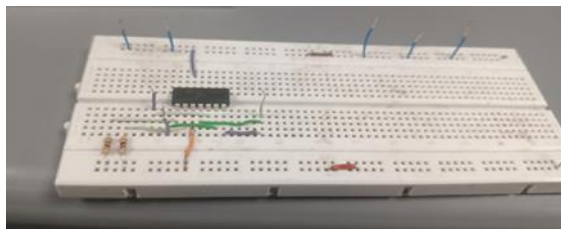


Figura 4 Montaje en Protoboard

- Uso de multímetro para verificar continuidad en conexiones críticas (ej. transistor-salida).

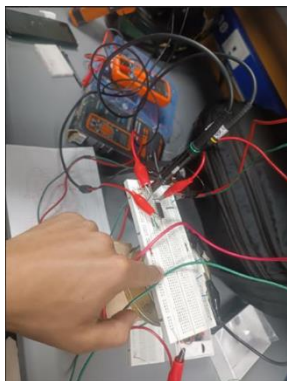


Figura 5 Configuración de cada conexión independiente

b. Pruebas iniciales:

- Medición de la señal del comparador con osciloscopio (KEYSIGHT DSOX1102G):

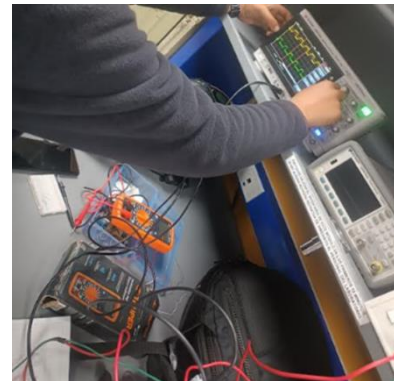


Figura 6 Verificación de señal y parámetros en el Osciloscopio

- Amplitud de ruido aceptable: <0.5 Vpp.

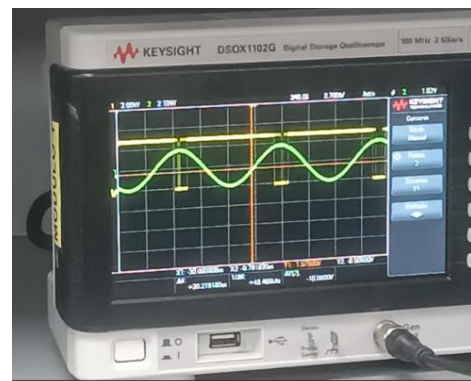
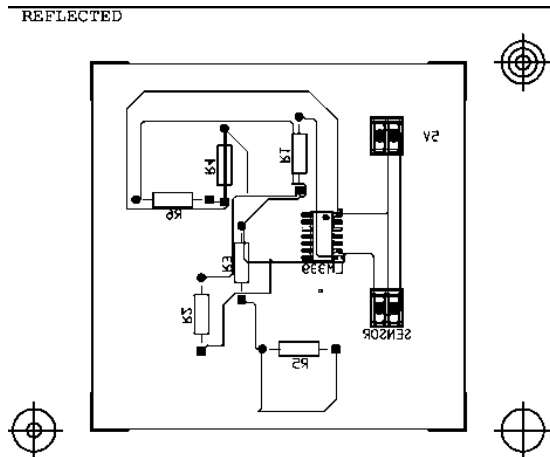


Ilustración 1 Verificación de las señales en el osciloscopio

4. Diseño de PCB en Ultiboard

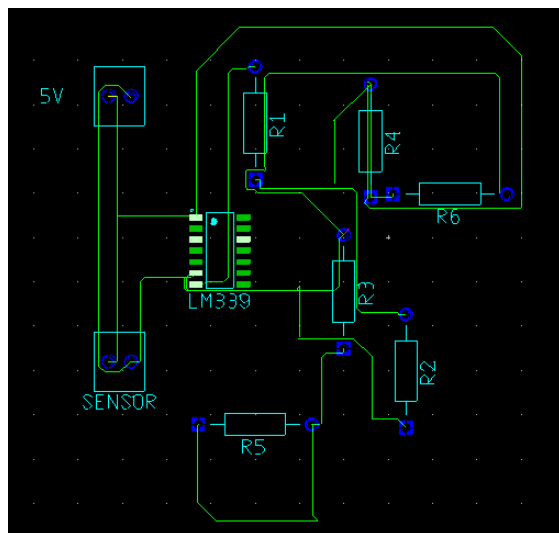
a. Ruteo de pistas:

- Separación mínima de 0.3 mm entre trazas críticas (ej. salida del LM339N a la base del transistor).



Esquema 4 Esquema de impresión para PCB

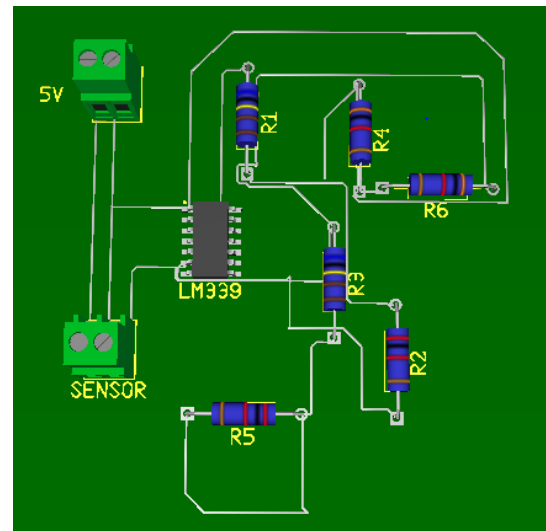
- Ancho de pistas: 0.5 mm (señales), 2 mm (alimentación) para reducir resistencia.



Esquema 5 Esquema circuito PCB

b. Prevención de interferencias:

- Conexión independiente de cada tierra y alimentación para cada punta del amplificador. Agrupación de tierras analógicas y digitales.



Esquema 6 PCB en diseño 3D

5. Diseño y Simulación de la estructura

a. Diseño de la base y elementos estructurales en SolidWorks:

- Se desarrolla inicialmente la base donde se construirá todo el modelo del proyecto. Se utiliza una visualización de madera OSB que es estético y cumple con los requisitos para la construcción del prototipo.

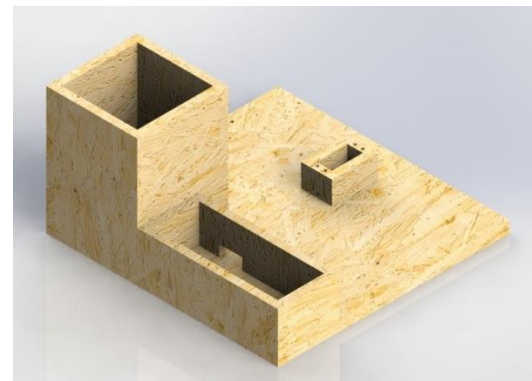


Figura 7 Base del prototipo

- Se construye según las medidas mínimas requeridas para el proyecto, un plato giratorio de 20cm



Figura 8 Plato giratorio

- Se construye el soporte del plato superior con el requerimiento de 20cm del plato al vaso, altura total de 28cm. Se realiza el diseño del plato superior con un diámetro de 20cm y un agujero para la caída del líquido. Además, se diseña el vaso para la simulación.



Figura 9 Diseño Vaso de icopor

- Se hace el diseño el deposito de agua y su enrutado de manguera para el llenado con agua.



Figura 10 Diseño depósito del agua y enrutado de manguera

b. Elementos electrónicos y actuadores para el diseño (no diseñados)

Elementos tomados de bibliotecas de internet para el diseño del prototipo.

- Arduino Uno para sistema embebido[7]

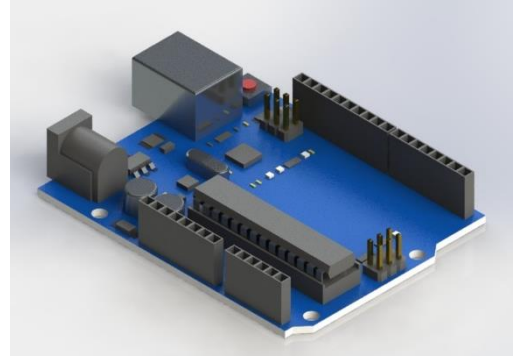


Figura 11 CAD Arduino Uno

- Servo motor MG995 para la rotación del plato giratorio[8]



Figura 12 Servomotor MG995 de torque 15kg

- Botón ON-OFF[9]
- Pulsador de Reset[10]
- Led semáforo para la indicación de llenado[11].

c. Diseño del sistema de sensado y potencia

- Diseño PCB: El diseño fue realizado totalmente manual en SolidWorks para la incorporación en el diseño y simulación lo más realista posible[4].

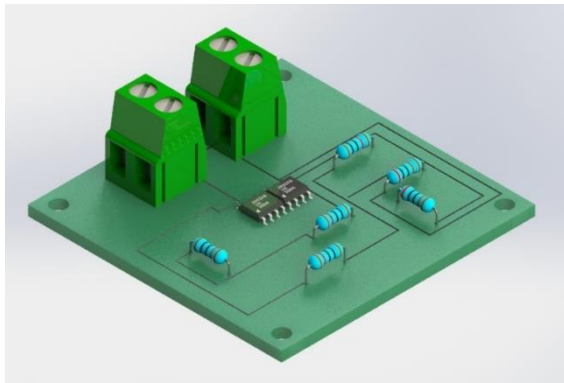


Figura 13 PCB diseñada en SolidWorks

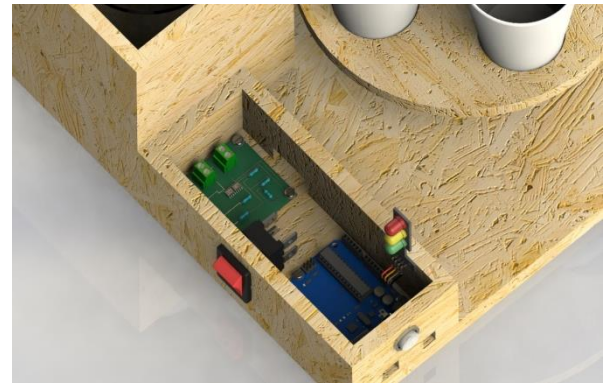


Figura 16 Tablero de control con botones y leds de llenado

- Sensor HC-SR04: Sensor tomado como elemento electrónico de internet, para ser incluido en el diseño[12].



Figura 14 Diseño Sensor HC-SR04

- Finalmente se tiene el prototipo con todas sus partes ensamblado, para más detalles se pueden comprobar en la vista explosiva e impositiva en los videos adjuntos.



Figura 17 Isométrico estructura prototipo

b. Ensamble del prototipo

- Se realizó el ensamble del prototipo, haciendo croquis de ensamble y relaciones de posición para ubicar el diseño como se preveía para construcción.



Figura 15 Ensamble elementos mecánicos y estructurales

- Ubicación de elementos electrónicos para el tablero de control:

RESULTADOS

Resultados de Simulación y Pruebas en Laboratorio

1. Simulación en Multisim:

El circuito del controlador ON-OFF con histéresis fue modelado y simulado exitosamente. Se verificó que el comparador LM339N, configurado con retroalimentación positiva, respondía correctamente a los cambios de nivel simulados por el sensor. La señal de salida mostró transiciones claras entre los estados ON y OFF al alcanzar los umbrales definidos, evitando oscilaciones indeseadas gracias a la histéresis implementada[4].

2. Diseño de PCB:

Se realizó el diseño del circuito 3D(PCB) en Ultiboard, cumpliendo con las normas IPC para el

ancho y separación de pistas, puntos de prueba y disposición de componentes. El layout fue verificado mediante las herramientas de diseño, asegurando la factibilidad de fabricación y el correcto funcionamiento del sistema en condiciones ideales[13].

3. Pruebas en protoboard:

Aunque no se construyó la PCB física, se realizaron pruebas preliminares en protoboard para validar el funcionamiento básico del controlador y la lógica de control. Se observó que el sistema respondía adecuadamente a la simulación de señales de nivel, conmutando el estado del motor y los indicadores según lo esperado[14].

4. Prototipo simulado en CAD

Aunque no se realizó la estructura física, se realizó un prototipo simulado en CAD, para demostrar la previsualización del proyecto y el funcionamiento mecánico.

5. Limitaciones y Observaciones

a. No se construyó la PCB:

Por motivos logísticos y de recursos, no fue posible fabricar la tarjeta PCB ni montar la estructura giratoria de los discos y frascos. Por tanto, todos los resultados prácticos corresponden a simulaciones y pruebas en protoboard, sin validación en condiciones reales de operación.

b. Estabilidad y robustez del sistema:

Las simulaciones demostraron que la implementación de histéresis en el comparador elimina el problema del “chattering” y mejora la estabilidad del sistema, permitiendo un control confiable del proceso de llenado automático.

CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de control ON-OFF con histéresis para el llenado automático de frascos permitió validar, a través de simulaciones y pruebas en protoboard, el funcionamiento estable y confiable de la lógica de control propuesta, cumpliendo con los objetivos planteados para la automatización de un proceso circular industrial sencillo.

La implementación de la histéresis en el comparador LM339N demostró ser fundamental para evitar oscilaciones indeseadas y conmutaciones frecuentes en la salida, mejorando la estabilidad del sistema y protegiendo los elementos de actuación, tal como se evidencia en los resultados de laboratorio.


Las simulaciones en Multisim confirmaron el correcto comportamiento del controlador: la señal de salida cambiaba de estado únicamente al alcanzar los umbrales definidos. Además, la simulación en Proteus, se comprueba el funcionamiento del sistema enviado a la realidad.

La imposibilidad de construir la PCB y la estructura física limitó la validación del sistema en condiciones reales; sin embargo, el diseño electrónico y el layout de la PCB cumplen con las especificaciones técnicas y normativas requeridas, estando listos para su fabricación y montaje.

El trabajo realizado permitió comprender la importancia de una adecuada configuración de la histéresis en sistemas ON-OFF, así como la relevancia de las etapas de simulación y pruebas preliminares antes de la implementación física, para identificar y corregir posibles errores de diseño y asegurar la funcionalidad del sistema.

En conclusión, el proyecto sienta una base sólida para la futura implementación física del sistema, demostrando la viabilidad y eficiencia del control ON-OFF con histéresis en aplicaciones de baja complejidad, y resalta la importancia de la simulación y el prototipado en el desarrollo de soluciones mecatrónicas.

REFERENCIAS

- [1] Ing. Lucía Hernandez, “Qué es el control de histéresis en sistemas ON/OFF .
- Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: https://sonilec.mx/que-es-el-control-de-histeresis-en-sistemas-on-off/?expand_article=1
- [2] Ing. Mec. Marcos A. Golato, “ACCIONES DE CONTROL,” May 2016. Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp->

content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf

[14] Kevin Bedoya, "Argumentos Propios," 2025.

- [3] "7.5: Comparadores - LibreTexts Español." Accessed: Apr. 23, 2025. [Online]. Available: [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Amplificadores_Operacionales_y_Circuitos_Integrados_Lineales_-_Teoria_y_Aplicacion_\(Fiore\)/07%3A_Circuitos_no_lineales/7.05%3A_Comparadores](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Amplificadores_Operacionales_y_Circuitos_Integrados_Lineales_-_Teoria_y_Aplicacion_(Fiore)/07%3A_Circuitos_no_lineales/7.05%3A_Comparadores)
- [4] Karen Lesmes, "Argumentos propios," 2025.
- [5] Leantec, "Datasheet HC-SR04." [Online]. Available: www.leantec.es
- [6] "ARDUINO UNO R3 CON CABLE USB." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mactronica.com.co/arduino-uno-r3-con-cable-usb>
- [7] "Arduino Uno | 3D CAD Model Library | GrabCAD." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/arduino-uno-36>
- [8] "MG995 Servo | 3D CAD Model Library | GrabCAD." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/mg995-servo-3>
- [9] "ON OFF TUSU | 3D CAD Model Library | GrabCAD." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/on-off-tusu-1>
- [10] "small push button | 3D CAD Model Library | GrabCAD." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/small-push-button-1>
- [11] "Traffic lights LED module | 3D CAD Model Library | GrabCAD." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/traffic-lights-led-module-1>
- [12] "HC-SR04 | 3D CAD Model Library | GrabCAD." Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: https://grabcad.com/library/hc-sr04-16/details?folder_id=14112831
- [13] Ing. Ana Sabrina Niño, "IPC 2220 PCB".