

Diseño de controlador de techo móvil para reducir la ganancia de calor y mejorar el confort

Jaziel Almeida de la Cruz-Jiménez ¹, Luis Enrique Angeles-Montero ^{2,*}, Iván Hernández-Pérez ³, Manuel Adolfo Custodio-Barragán ¹, Oscar Rafael Camacho-Cano ¹

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

² Técnico Académico del Laboratorio de Mecatrónica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

³ Profesor-Investigador de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

* Autor de correspondencia: a: luis.angeles@ujat.mx; Tel.: (+52) 9932115433

Diseño de Procesos Sustentables (Control de Procesos)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 29 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.606>

Resumen: Se presenta un prototipo de techo móvil que ajusta su posición automáticamente según el nivel de radiación solar que recibe, optimizando la regulación energía en forma de calor recibida por las edificaciones. Se utilizaron tres programas de software en este trabajo: LabVIEW, Simulink de MATLAB y Autodesk Fusion 360 para elaborar el diseño y controlar el movimiento del techo móvil. El control realizado en LabVIEW crea instrumentos virtuales los cuales muestran el funcionamiento de los motores y coordina la señal analógica del sensor fotorresistor y la señal digital del sensor ultrasónico, para establecer los parámetros de funcionamiento lineal del mecanismo. Para el diseño del techo móvil, se implementó un sistema en el cual los dos eslabones están sujetos a una lámina, por lo que tienen la función de elevarse para que ésta se separe o acerque al edificio. Para ello, los dos brazos usan un sistema de tijera, que se acciona por medio de un sistema de biela manivela y accionados con motores para que esta se pueda elevar. Este diseño fue elaborado en el software de diseño Autodesk Fusion 360. Este techo móvil busca mejorar la eficiencia energética al adaptar su configuración según le convenga al edificio, reduciendo la ganancia de calor durante el día y favoreciendo la disipación térmica nocturna. Se obtuvo el tiempo de muestreo de adecuado para el proceso, las constantes del controlador PID de manera teórica, en software y finalmente de manera experimental se ajustaron los parámetros para obtener los más adecuados para el proceso en físico.

Palabras clave: Control PID, Sintonización Ziegler-Nichols, Regulación Térmica, Interfaz Humano Maquina, Confort

Movable ceiling controller design to reduce heat gain and improve comfort

Abstract: This paper presents a mobile roof that automatically adjusts its position in response to solar radiation, thereby optimizing the thermal regulation of buildings. Three software programs were used in this work: LabVIEW, MATLAB Simulink, and Autodesk Fusion 360 to develop the design and control the system's motion. The control implemented in LabVIEW creates virtual instruments that display the operation of the motors and coordinate the analog signal from the photoresistor sensor and the digital signal from the ultrasonic sensor to establish the linear operating parameters of the mechanism. For the design of the mobile roof, a system was implemented in which the two links are attached to a sheet, so they have the function of raising it so that it separates from the building. To achieve this, the two arms use a scissor system, which is actuated by a crank-connector system and driven by motors to elevate the sheet. This design was developed using Autodesk Fusion 360 software. This movable roof aims to enhance energy efficiency by adjusting its configuration to match solar conditions, thereby reducing heat gain during the day and promoting thermal dissipation at night. The appropriate sampling time for the process and the PID controller constants were determined theoretically and in software. Finally, the parameters were adjusted experimentally to obtain the most suitable parameters for the physical process.

Keywords: PID control, Ziegler-Nichols tuning, Thermal regulation, Human Machine Interface, Comfort

Introducción

Las edificaciones representan el sector que consume más energía, con alrededor de un tercio de toda la energía producida. Entonces, son responsables de un tercio de las emisiones de CO₂ en el planeta (IEA, 2024). En climas cálidos la distribución del consumo de energía en el hogar indica que el 55% de la electricidad es consumida por los equipos de aire acondicionado (CONUEE, 2020). Entonces, es necesario implementar medidas para reducir la ganancia de calor

durante el día y enfriar efectivamente los edificios durante la noche. De esta forma, se puede disminuir el consumo de electricidad destinada al confort térmico.

Todos los componentes de la envolvente contribuyen a las ganancias y pérdidas de calor de un edificio. Sin embargo, los techos de los edificios están expuestos a la radiación solar durante más horas que otros componentes. Se han desarrollado varias tecnologías para regular las ganancias de energía en los techos. Entre estas tecnologías se encuentran los techos ventilados que son una alternativa para reducir las ganancias de energía debido a dos características importantes. Primero, bloquean la irradiación solar directa, y segundo, evitan el sobrecalentamiento porque el flujo de aire entre las capas elimina una parte del calor absorbido por el techo. Aunque un techo ventilado tradicional es muy eficiente para reducir la ganancia de calor durante el día, cuando se oculta el sol, debido a su configuración, este tipo de techo presenta dificultades para emitir en calor en forma de radiación térmica. Entonces, le lleva más tiempo enfriarse que un techo convencional después de que se oculta el sol. Este problema se puede solucionar mediante la implementación de un techo con estructura móvil, que durante el día proporcione sombreado y durante la noche se retraiga para enfriarse radiativamente.

Un techo ventilado fijo puede reducir hasta el 59% de la ganancia de calor comparado con un techo convencional (Lima-Téllez *et al.*, 2022). Sin embargo, su desempeño térmico puede mejorarse si la lámina de sombreado pudiera cambiar su posición elevada a una posición en contacto con la envolvente para enfriar el edificio radiativamente durante la noche. En este proyecto se propone un techo ventilado móvil que ajusta automáticamente su posición de acuerdo con la presencia o ausencia de la radiación solar. Se presenta el diseño innovador de un techo móvil automático, así como sus componentes y las variables controladas para su funcionamiento. Dicho diseño contribuye a la mejora del confort y al ahorro de energía edificios ubicado en climas cálidos.

Una tecnología efectiva para reducir la transferencia de calor de los techos es el sombreado o bloqueo de la radiación solar. Los sistemas de sombreado pueden ser naturales como árboles o se pueden construir e instalar como un componente adicional. Los sistemas de sombreado construidos, también conocidos como techos ventilados, normalmente consisten en estructuras metálicas con láminas que bloquean la incidencia de la radiación solar. En el trabajo de (Lima-Téllez *et al.*, 2022) se encontró que un techo ventilado redujo la ganancia de calor entre 55 y 59% comparado con un techo convencional. Sin embargo, en el mismo trabajo se muestra que en ausencia de radiación solar, el techo ventilado continúa transfiriendo calor al interior debido a que la lámina que sirve como sombreado durante el día, también evita que la radiación térmica pueda emitirse al ambiente exterior evitando que el edificio se pueda enfriar mediante el mecanismo de enfriamiento radiativo nocturno.

En ese sentido, la presente propuesta, un techo móvil que bloquea la radiación solar durante el día y se mantiene en contacto con el edificio durante la noche logrando optimizar el comportamiento térmico de un techo. Se diseñó un mecanismo para ajustar la posición de la estructura y también se construyó el sistema de control para que el techo móvil funcione de forma automática. Para el control se usó una función de transferencia el cual es una función lineal que trabaja con herramientas matemáticas como la transformada de Laplace y transformada Z.

Materiales y Métodos

A continuación, se muestra la metodología usada para el diseño del controlador del techo móvil del prototipo. Se realizó el siguiente procedimiento: 1) Modelado del mecanismo en 3D, 2) Selección de sensores y actuadores, 3) Uso del método de sintonización de última ganancia, 4) Selección del periodo de muestreo y 5) Obtención de función de transferencia vía software e Implementación de interfaz para aplicar el controlador.

Modelado 3D del mecanismo del techo.

El software de modelado Autodesk Fusion 360 permite simular y predecir el movimiento de cualquier tipo de operación o proceso (Sánchez Márquez *et al.*, 2022). En la Figura 1 se muestra el mecanismo de tijera junto con el techo.

En la Figura 2 se muestra el mecanismo de tijera y el techo acoplado al prototipo de la casa. A los costados se muestran las bases que soportan a los motores que proporcionan el torque necesario para mover el techo secundario.

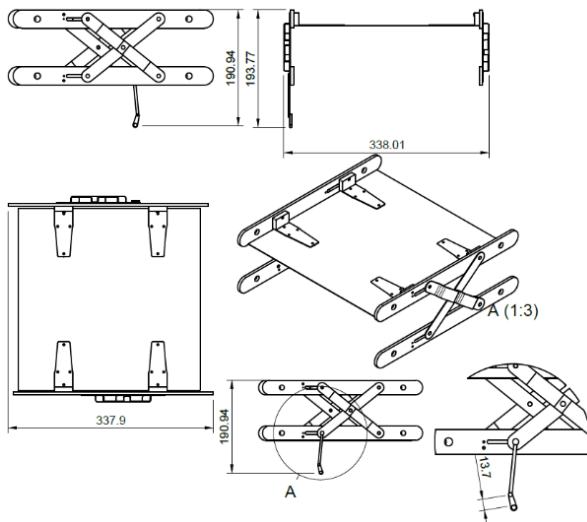


Figura 1. Mecanismo de tijera y techo

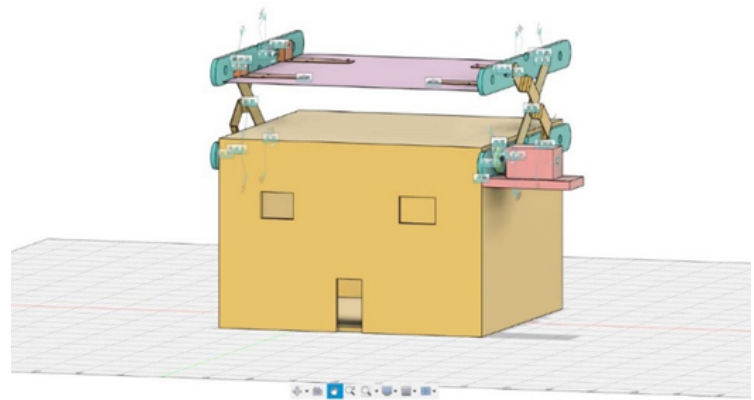


Figura 2. Mecanismo de tijera y techo

Sensores y actuadores

El sensor que se usó para detectar la iluminación fue una Fotoresistencia de 2 M Ω en la oscuridad y 50 K Ω con luz máxima (Bolton, 2013). La cual fue implementada en un arreglo de divisor de voltaje, para que al tener poca iluminación el voltaje de salida del circuito fuera menor y al incrementar la iluminación este se incrementa (Valencia & Londoño, 2022). El sensor usado para medir la distancia a la que se mueve el techo móvil con relación con el techo fijo fue el sensor ultrasónico HC-SR04. Se usaron dos Motores reductores de 12V a 62 RPM como actuadores, los cuales que fueron controlados con un Puente H L298. Como placa de adquisición de datos se utilizó un Arduino UNO. En la Figura 3 se muestra el prototipo de vivienda con la estructura del techo móvil en la parte superior.



Figura 3. Implementación del Prototipo

Método de sintonización de última ganancia.

Para realizar la sintonización del controlador PID, se utilizó el primer método Ziegler-Nichols (Bolton, 2001; Ogata, 2010; Patel, 2020). Este método transforma una señal tipo escalón unitario en una señal experimental de salida para controlar el ascenso y descenso de la estructura del techo.

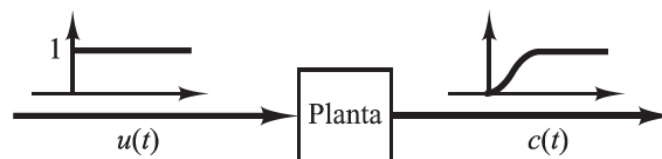


Figura 4. Respuesta de la planta a una entrada escalón unitario (Ogata, 2010)

La forma de la gráfica de la respuesta a un escalón unitario puede tener forma de S así como se muestra en la Figura 5. Esto es posible si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados (Ogata, 2010).

La grafica con forma de S tiene dos parámetros importantes: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . Los parámetros L y T se obtienen dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la gráfica, en la cual se debe determinar la intersección de la recta tangente en eje del tiempo y con la línea K (Figura 5). La función de transferencia que se obtiene es de primer orden la cual tiene un retardo como se muestra en la Ecuación 1 (Ogata, 2010).

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (1)$$

De acuerdo con el método de sintonización, los valores de K_p , T_i y T_d se muestran en la Tabla 1. La función de transferencia del controlador PID se muestra en la Ecuación 2 (Ogata, 2010).

Tabla 1. Regla de sintonización del controlador (Ogata, 2010)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (2)$$

Por lo tanto, al ingresar los datos en un formato Excel obtenemos una gráfica de manera experimental tipo S escalonado como se muestra en la Figura 6. Aplicando el método anteriormente descrito se obtuvo la siguiente grafica de manera experimental Figura 6. En la cual se puede notar que $L = 0.6$ segundo y $T = 3.0$ segundos. Por lo cual para los valores de $K_p=6$, $K_i=5$ y $K_d=1.8$.

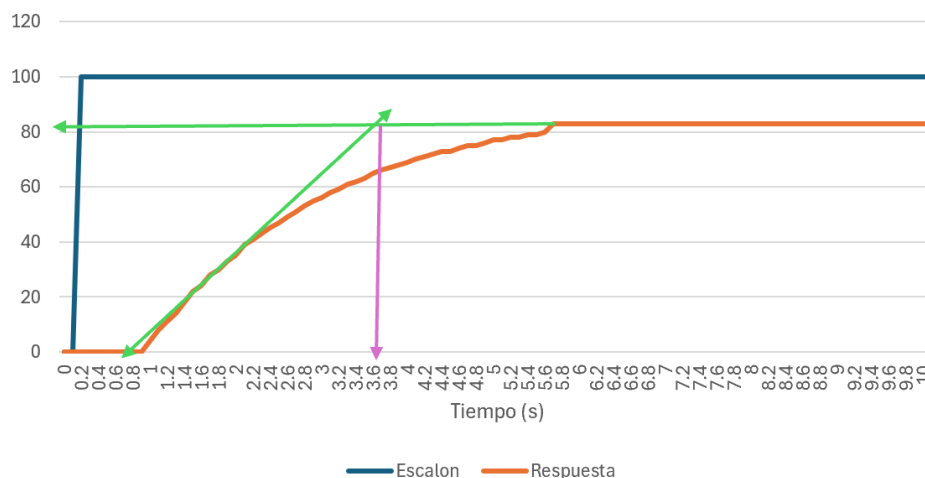


Figura 6. Gráfica de la respuesta experimental a entrada escalón

Periodo de muestreo

El periodo de muestreo que se debe usar en el controlador debe ser adecuado, ya que, si el periodo de muestreo es muy lento, el software LabView para la adquisición de datos no podrá captar la información de una planta con cambios

rápidos; esto permite tomar los datos del proceso que necesitamos de manera precisa, sin generar datos erróneos o que falten para obtener una lectura de la señal que se desea controlar.

De acuerdo (Bolton, 2001), al utilizar el método de sintonización de curva de reacción del proceso se puede tomar como periodo de muestreo entre $0.05L$ y $0.3L$, en el cual L es el tiempo muerto. Tomando en cuenta estos criterios se puede seleccionar un tiempo entre 0.03 s y 0.18 s. Se selecciona un tiempo de muestreo de 0.15 s debido a la baja velocidad con la que se capturan los datos permitiendo obtener una lectura con mayor precisión y fineza de la señal.

Obtención de función de transferencia vía software

Se utiliza el software Matlab y su paquetería simulink para sintonizar el controlador PID, el cual permite calcular la función de transferencia (Jiménez *et al.*, 2010). Dicha función es obtenida usando la transformada de Laplace, de acuerdo con el tiempo de muestreo utilizado durante la adquisición de datos del comportamiento del proceso (ecuación 3).

$$G_p(s) = e^{-1.15s} \left(\frac{0.854}{2.748s + 1} \right) \quad (3)$$

Al trabajar con Arduino se utiliza un control digital, por lo tanto, es necesario aplicar la transformada z en la función de transferencia tal y como se muestra en la ecuación 4.

$$G_p(z) = z^{-8} \left(\frac{0.01396z + 0.03141}{z - 0.9469} \right) \quad (4)$$

Esta ecuación permite crear el diagrama de bloques que se utiliza para el proceso de control del techo móvil, dicho diagrama muestra la discretización del PID, el tiempo de respuesta y la transformada Z . En la Figura 7 Se muestra el diagrama de bloques de lazo cerrado del proceso.

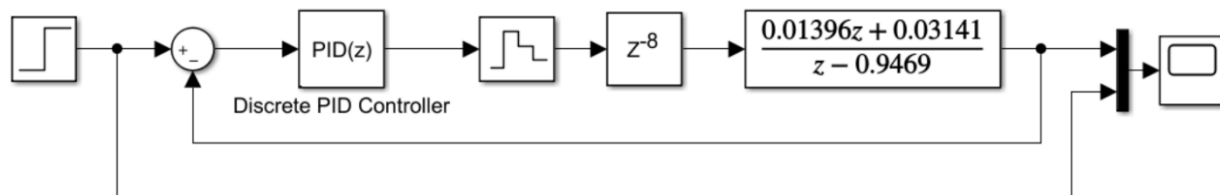


Figura 7. Diagrama de bloques de lazo cerrado

Es importante mencionar que al aplicar la auto-sintonización del diagrama de bloques de lazo cerrado en simulink permite encontrar los valores del proporcional (k_p), integral (k_i) y derivativo (k_d). Se obtuvieron los siguientes resultados: $K_p=2.465$, $K_i=0.57298$ y $K_d=0.61006$. En la Figura 8 se muestra gráfica de la respuesta (verde) con el controlador PID, el cual es sometido a una entrada escalón (rojo). Se puede notar que la respuesta tarda en estabilizarse a los 14 segundos y tiene un sobre paso de un 10%, lo que indica que los valores del controlador son adecuados.

Implementación de interfaz para aplicar el controlador

Para realizar la programación se usó el software LabVIEW el cual es un programa que permite diseñar

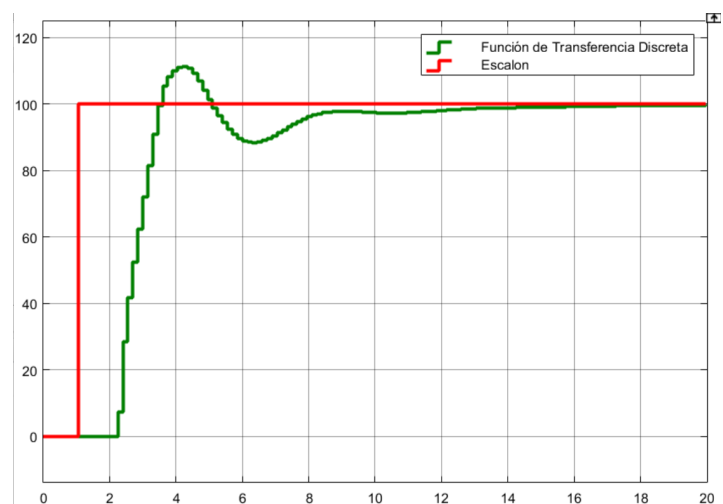


Figura 8. Respuesta de la planta con PID a una entrada escalón

diferentes tipos de control mediante las comunicaciones seriales con Arduino, puede realizar las interacciones de la Human Machine Instrument (HMI) (Schwartz & Manickum, 2015) mostrando parcialmente la programación por bloques para la activación de los actuadores de manera sincronizada y estableciendo parámetros que permitan controlar el proceso de manera eficiente. Por ello es posible que los valores del controlador PID sean ajustados para tener un mejor desempeño del proceso con los valores $K_p=1$, $K_i=0.33$ y $K_d=0.0$.

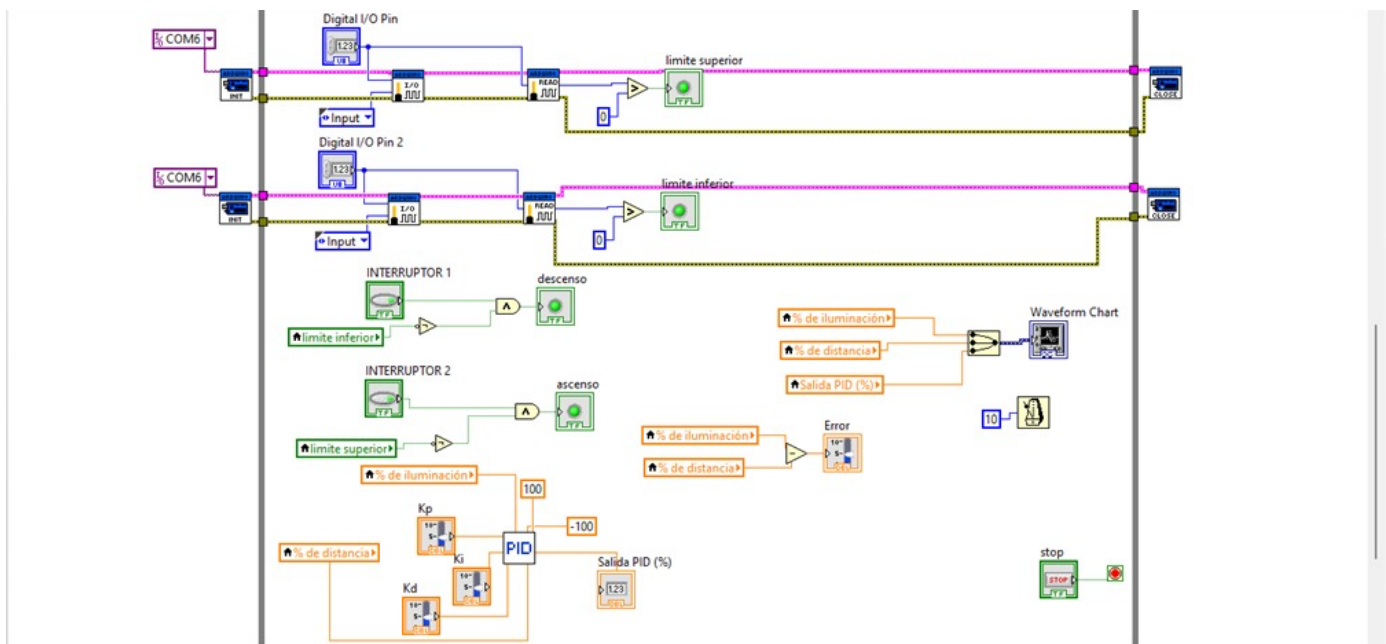


Figura 9. Respuesta de la planta con PID a una entrada escalón

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo demuestran que el mecanismo biela-manivela diseñado inicialmente cumple con la función de generar un movimiento lineal en ambas posiciones de la lámina del techo móvil. Este comportamiento valida los principios básicos de diseño y la selección inicial de componentes.

En la Figura 10 se muestra la interfase visual del programa diseñado por paqueterías de LabVIEW, el cual cuando el sensor detecta la iluminación del sol, el fondo del panel se muestra claro, lo que indica que es de día. El controlador acciona los motores para que el techo móvil se mueva hacia arriba, para así genera una sombra al techo.



Figura 10. Panel frontal de programación de día

En la Figura 11 se muestra el panel frontal cuando el sensor no detecta radiación solar, el fondo del panel se oscurece simulando la noche. El controlador acciona los motores para que el techo móvil se desplace hacia abajo, manteniendo la lámina-en contacto con la loza y este funcione como disipador de calor en la loza.

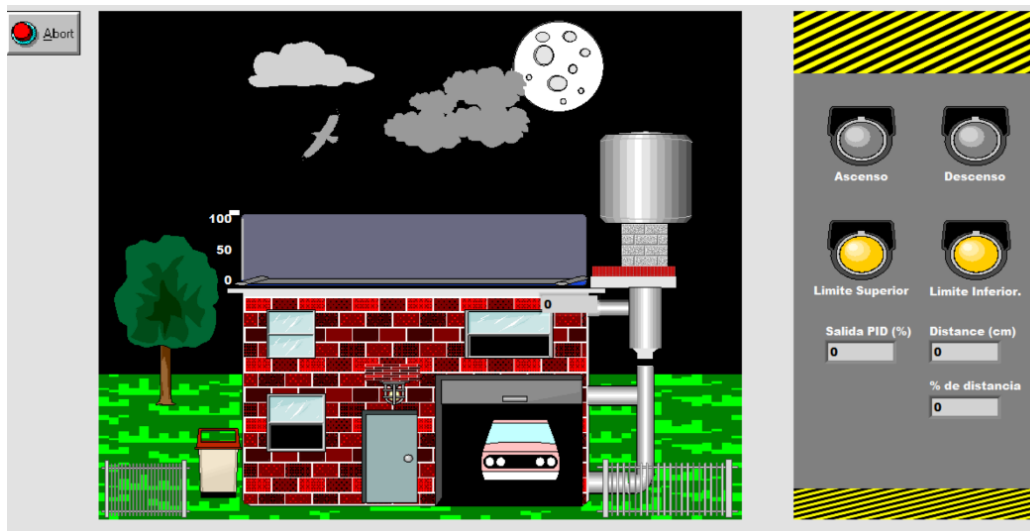


Figura 11. Panel frontal de programación de noche

El accionamiento del sistema demostró que es relativamente rápido, lo cual puede comprometer tanto la eficiencia operativa como la estabilidad del proceso. El análisis del funcionamiento del mecanismo reveló que la velocidad del movimiento es un factor crítico que afecta la movilidad y el control del sistema.

En la Tabla 2 se muestran los resultados importantes de los parámetros del controlador. Se establece que el tiempo de muestreo óptimo debe ser de 0.15 segundos, se puede notar que los valores del controlador, teórico, software y ajustados tienen una variación significativa. Lo cual indica que las aproximaciones teóricas y mediante software nos permiten tener un punto de partida, para poder ajustarlo de acuerdo con las condiciones en las que se encuentre el proceso. Para mejorar el sistema de control se puede implementar otro tipo de control como lo puede ser modos deslizantes, redes neuronales, etc. De igual manera se puede realizar medición de temperatura del interior y del exterior en diferentes condiciones ambientales.

Tabla 2. Resultados del controlador PID a un tiempo de muestreo de 0.15 segundos

Tipo de controlador	K_p	K_i	K_d
Teórico	6	5	1.8
Software	2.465	0.57298	0.61006
Ajustado	1	0.33	0

Conclusiones

De acuerdo a lo presentado a lo largo de este trabajo se puede concluir que esta propuesta de diseño innovador para techos ventilados no solo mejora la funcionalidad y eficiencia para reducir la ganancia de calor en edificaciones, sino que también optimiza de manera automatizada el accionamiento del mecanismo de biela-manivela pensado como diseño inicial, así como la utilización de componentes electrónicos, como lo son el light dependent resistor (LDR) para los datos de variable de entrada de radiación solar, motores de corriente directa que ayuden al sistema a generar un movimiento lineal en ambas posiciones del techo y controladores como Arduino y drivers puente H L298N para el control de los motores de corriente directa. Para este tipo de proyectos se implementó un Human Machine Interface (HMI) para tener una visualización e interacción humano-máquina. se usaron tres softwares de programación para lograr el objetivo deseado del proyecto (LabVIEW, Matlab y Arduino uno). Se establecieron sistemas de control de lazo cerrado por medio de métodos como el de Ziegler-Nichols el cual calcula el tiempo de retardo del accionamiento del

mecanismo por medio de la transformada Z para controlar el ascenso y descenso del techo, todo esto usando comunicación de puertos seriales con Arduino. Finalmente se destaca que este diseño refuerza la importancia de la optimización continua en proyectos de diseño y automatización mecánica.

Agradecimientos y financiamiento: Al Dr. Luis Manuel López Manrique y al Laboratorio de Mecatrónica por el aporte de componentes electrónicos, instrumentos de medición y herramientas que se usaron a lo largo de este trabajo.

Bibliografía

- Bolton, W. (2001). *Ingeniería de control* (Segunda). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México.
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (5a edición). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2020). *Cuadernos de la CONUEE número 5. Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. Cuadernos de la CONUEE, 5*. México.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *More efficient and flexible buildings are key to clean energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/commentaries/more-efficient-and-flexible-buildings-are-key-to-clean-energy-transitions>
- Jiménez, L. M., Puerto, R., Reinoso, Ó., Fernández, C., & Ñeco, R. (2010). RECOLAB: Laboratorio remoto de control utilizando Matlab y Simulink. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2(2), 64–72. <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/8063>
- Lima-Téllez, T., Chávez, Y., Hernández-López, I., Xamán, J., & Hernández-Pérez, I. (2022). Annual thermal evaluation of a ventilated roof under warm weather conditions of Mexico. *Energy*, 246, 123412. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123412>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5th ed.). Pearson Educación. <https://doi.org/10.29057/ess.v5i10.3323>
- Patel, V. V. (2020). Ziegler-Nichols tuning method. *Resonance*, 25(10), 1385–1397. <https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z>
- Sánchez Márquez, J. A., Sánchez Ramírez, T. A., Gasca González, A., Martínez Jiménez, L. S., Guía Núñez, N. K., Ruelas Rodríguez, M., & Ramírez Sánchez, M. F. (2022). Optimización del proceso de diseño de prototipos mediante simulaciones de forma en 3D empleando Autodesk Fusión 360. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1–11. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3568>
- Schwartz, M., & Manickum, O. (2015). Programming Arduino with LabVIEW. In *LabVIEW Arduino*.
- Valencia, M. V., & Londoño, A. A. (2022). *Introducción a la adquisición y acondicionamiento de señales*. Instituto Tecnológico Metropolitano—ITM, Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.12622/5649>