

A. Castelán Pérez et al.: Diseño y Simulación de un Controlador de Temperatura Basado en Planitud Diferencial para Edificios

Recibido 22 de agosto de 2024. Aceptado 29 de noviembre de 2024. Publicado 19 de diciembre de 2024. *ISSN: 2448-7775* 

# Diseño y Simulación de un Controlador de Temperatura Basado en Planitud Diferencial para Edificios

## ALEXIS CASTELÁN PÉREZ<sup>1\*</sup>, FRANCISCO BELTRÁN CARBAJAL<sup>2</sup>, IVÁN DE JESÚS RIVAS CAMBERO<sup>1</sup>, DAVID MARCOS ANDRADE<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Tulancingo, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. <sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, México. \*Autor de Correspondencia: alexis.castelan1294@upt.edu.mx

**RESUMEN** La creciente demanda de eficiencia energética en edificios ha impulsado el desarrollo de técnicas avanzadas para optimizar el control de temperatura y reducir el consumo energético. En este artículo se presenta el diseño de un controlador de temperatura basado en planitud diferencial, aplicado a un edificio con el objetivo de hacer un uso eficiente de la energía. El modelo matemático del edificio se basa en la metodología Grey-Box y representa la dinámica del sistema mediante circuitos eléctricos. El modelo seleccionado presenta la propiedad de planitud diferencial, lo que permite simplificar el diseño del controlador. Se realiza una simulación computacional del controlador en dos casos de estudio, variando las condiciones iniciales del sistema, así como la temperatura exterior y las trayectorias de referencia, con el objetivo de validar el esquema de control propuesto.

PALABRAS CLAVE - Planitud diferencial, Grey-Box, planeación de trayectorias.

## I. INTRODUCCIÓN

La transición hacia energías verdes es esencial para reducir la contaminación ambiental a nivel mundial. No obstante, el creciente consumo de energía eléctrica en las próximas décadas presenta un desafío significativo, especialmente considerando que aún hoy en día ocurren del suministro eléctrico [1]. interrupciones Estas interrupciones pueden deberse a diversos factores, como desastres naturales, problemas en la red de distribución o la incapacidad de satisfacer la demanda energética [2]. Los picos de demanda de energía eléctrica suelen coincidir con altas temperaturas ambientales, lo que aumenta el uso de dispositivos de refrigeración. En años recientes, se han realizado numerosos estudios para promover el uso eficiente de la energía eléctrica en edificios, enfocados en sistemas de calefacción, aire acondicionado y ventilación [3].

El modelado térmico de un edificio puede realizarse mediante la metodología Grey-Box, utilizando circuitos eléctricos RC para emular la dinámica térmica de un edificio [4]. Las resistencias y capacitancias térmicas en el modelado representan las características físicas del edificio. Las fuentes de voltaje pueden simular perturbaciones, mientras que las fuentes de corriente representan dispositivos de calefacción o aire acondicionado, según si la corriente entra o sale de un nodo. A menudo, algunos de los parámetros del edificio son desconocidos al usar la metodología Grey-Box, lo cual se resuelve mediante su estimación. La estimación de parámetros y las perturbaciones del sistema se discuten en [5], donde se emplea un modelo basado en Grey-Box. En [6], se describe un controlador predictivo basado en modelo para la regulación de la temperatura utilizando un modelo Grey-Box. Los modelos pueden incluir diversas partes del edificio, como muros internos, techo e incluso ventanas, como se muestra en [7].

La planitud diferencial es una propiedad estructural de algunos sistemas dinámicos que permite simplificar la planificación de trayectorias sin la necesidad de resolver ecuaciones diferenciales. La planitud permite una completa parametrización de todas las variables del sistema, ya sean entradas o salidas, en función de un conjunto de variables llamadas salidas planas y de un número finito de sus derivadas [8,9]. Existen diversos trabajos en los que se desarrollan controladores basándose en esta propiedad, como en [10], donde se desarrolla un controlador de posición para un motor de corriente continua de imanes permanentes. Otro ejemplo con máquinas eléctricas, específicamente un motor síncrono de imanes permanentes se presenta en [11]. En [12] se describe el diseño, simulación e implementación de un controlador para un convertidor DC-DC Boost. En el área de robótica también existen trabajos que utilizan controladores basados en la planitud diferencial, como en [13], donde se presenta el desarrollo de un controlador basado en esta propiedad aplicado a un cuadricóptero. En este sentido, la propiedad de planitud diferencial se presenta en una gran variedad de sistemas dinámicos, permitiendo la



A. Castelán Pérez et al.: Diseño y Simulación de un Controlador de Temperatura Basado en Planitud Diferencial para Edificios

simplificación en el desarrollo de esquemas de control para distintas tareas.

En el presente artículo se describe el diseño de un controlador de temperatura para un edificio, basado en la propiedad de planitud diferencial. Primero, se plantea el modelo dinámico que se utilizará, destacando esta propiedad. Después, se parametriza el sistema en función de la salida plana para emplearla en el diseño del controlador. A continuación, se propone dos casos de estudio mediante simulación computacional para validar el funcionamiento del controlador diseñado. Finalmente se analizan los resultados para obtener una conclusión del trabajo desarrollado.

### **II. DESARROLLO**

### A. MODELADO TÉRMICO DE UN EDIFICIO

En el modelado térmico de edificios se pueden seguir tres metodologías para la obtención de los parámetros del sistema. La primera es la metodología White-Box, que se basa en la descripción física del sistema utilizando leyes de conservación y balance de energía. El problema radica en que, si se modelan todos los fenómenos del sistema, el número de parámetros necesarios para una descripción adecuada puede aumentar rápidamente. La segunda metodología es la Black-Box, que se caracteriza por no contar con parámetros físicamente significativos. Su propósito es reproducir correctamente la relación entre las variables de entrada y las de salida. La obtención de los parámetros del sistema se realiza mediante técnicas de estimación. Finalmente, los modelos Grey-Box representan una forma híbrida entre las dos metodologías anteriores, ya que combinan parámetros obtenidos mediante leyes o principios físicos con aquellos obtenidos mediante técnicas de estimación [14].

Los modelos térmicos usando circuitos RC, se clasifican en función de cuantas resistencias y capacitores se usan para representar la dinámica del sistema. La complejidad del modelo está determinada por la propia estructura del edificio a modelar, en este caso se usa un modelo 2R2C, mostrado en la Fig. 1, en donde solo se consideran las paredes.



Fig. 1. Diagrama del circuito equivalente al edificio estudiado.

La dinámica del sistema está representada por las siguientes ecuaciones diferenciales.

$$\dot{T}_i = -a_{11}T_i + a_{12}T_w + b_1Q \tag{1}$$

$$\dot{T}_w = a_{21}T_i - a_{22}T_w + b_2T_o \tag{2}$$

con

$$a_{11} = \frac{1}{C_i R_i} \qquad a_{12} = \frac{1}{C_i R_i} \qquad b_1 = \frac{1}{C_i} \\ a_{21} = \frac{1}{C_w R_i} \qquad a_{22} = \frac{1}{C_w R_i} + \frac{1}{C_w R_w} \qquad b_2 = \frac{1}{C_w R_w}$$

donde  $T_i$  y  $T_w$  representan las temperaturas del interior del edificio y del muro respectivamente.  $T_o$  es la temperatura exterior y Q es la entrada de control, que puede ser una fuente de calor o un medio de refrigeración para el edificio.  $C_i$  y  $C_w$ son las capacitancias térmicas del interior del edificio y del muro respectivamente. La resistencia térmica del interior del edificio está representada como  $R_i$ , mientras que la del muro es  $R_w$ .

## **B. PLANITUD DIFERENCIAL**

Para que un sistema sea considerado diferencialmente plano, todas sus variables deben poder expresarse como funciones de la salida plana y un número finito de sus derivadas. Además, el número de salidas planas debe coincidir con el número de entradas de control del sistema [8]. Considerando estas condiciones, se puede establecer que la salida plana de este sistema es la temperatura del muro,  $T_w$ . A continuación, se muestra la parametrización del sistema, basada en el modelo dinámico descrito por las Ecs. (1) y (2), en términos de la salida plana  $y = T_w$  y sus derivadas.

$$y = T_w T_i = \frac{1}{a_{21}} \dot{y} + \frac{a_{22}}{a_{21}} y - b_2 T_o \gamma Q = \ddot{y} + \alpha_1 \dot{y} + \alpha_2 y + \phi$$
(3)

con

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= a_{11} + a_{22} & \alpha_2 &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \\ \gamma &= a_{21}b_2 & \phi &= -b_2\dot{T}_0 - a_{21}b_2 T_0 \end{aligned}$$

En base a las parametrizaciones mostradas en la Ec. (3), también es posible realizar la planificación de trayectorias de referencia para las demás variables del sistema.

$$y^{*} = T_{w}^{*}$$

$$T_{i}^{*} = \frac{1}{a_{21}}\dot{y}^{*} + \frac{a_{22}}{a_{21}}y^{*} - b_{2}T_{o}$$

$$Q^{*} = \frac{1}{\gamma}(\ddot{y}^{*} + \alpha_{1}\dot{y}^{*} + \alpha_{2}y^{*} + \phi)$$



#### A. Castelán Pérez et al.: Diseño y Simulación de un Controlador de Temperatura Basado en Planitud Diferencial para Edificios

## C. DISEÑO DEL CONTROLADOR

A partir de la tercera expresión de la Ec. (3) se obtiene el siguiente controlador proporcional-derivativo basado en planitud diferencial para el seguimiento de trayectorias de referencia de la variable plana y.

$$Q = \frac{1}{\gamma} (U + \alpha_1 \dot{y} + \alpha_2 y + \phi)$$
  

$$U = \ddot{y}^* - k_d \dot{e} - k_p e$$
(4)

donde  $y^*$  es la trayectoria de referencia de la variable plana del sistema, el error de seguimiento de la trayectoria está definido como  $e = y - y^*$ . Las ganancias del controlador se seleccionan mediante un sistema de referencia de segundo orden para la dinámica del error en lazo cerrado como:

$$\ddot{e} + 2\omega_n \zeta \dot{e} + \omega_n^2 e = 0$$

Así  $k_d = 2\omega_n \zeta$  y  $k_p = \omega_n^2$ , y si  $\omega_n, \zeta > 0$  se asegura la estabilidad del sistema.

Como se observa, la salida plana  $T_w$  es la que se regula por medio de este controlador, no obstante, la variable de interés es la temperatura interior del edificio  $T_i$ . Para resolver este inconveniente se propone la generación en línea de la trayectoria de referencia  $y^*$  mediante la solución de forma numérica de la Ec. (5) proponiendo la trayectoria de referencia  $T_i^*$ :

$$\dot{y}^{\star} = a_{21}T_i^{\star} - a_{22}y^{\star} + b_2T_o \tag{5}$$

## D. CASO DE ESTUDIO 1

En [15] se presentan varios casos de estudio sobre el modelado térmico de edificios, entre ellos uno que utiliza un modelo 2R2C similar al propuesto en este trabajo. De dicho estudio se extraen los parámetros indicados en la Tabla I, los cuales corresponden a un edificio con dimensiones de 6 m de ancho, 8 m de fondo y 2.7 m de altura. Estos parámetros, obtenidos mediante la metodología Grey-Box, se utilizan para la simulación del sistema en los dos casos de estudio abordados en este trabajo. En ambos casos de estudio, se considera que el actuador encargado de la calefacción y la refrigeración es una bomba de calor [16].

 TABLA I. PARÁMETROS DEL EDIFICIO USADOS EN AMBOS CASOS DE

 ESTUDIO.

| Parámetro      | Valor                 | Unidades |
|----------------|-----------------------|----------|
| R <sub>i</sub> | 0.0375                | [°C/W]   |
| R <sub>w</sub> | 0.3298                | [°C/W]   |
| C <sub>i</sub> | $5.123 \times 10^{6}$ | [J/°C]   |
| $C_w$          | $2.024 \times 10^3$   | [J/°C]   |

La temperatura exterior se propone como una onda sinusoidal para emular la variación de temperatura a lo largo del día (24 horas).

$$T_o = [27 - 5\sin(2\pi ft + \pi/4)] \ ^\circ C \tag{6}$$

donde f se establece para que la onda complete un ciclo en un día. Para este caso de estudio, se propone una temperatura exterior basada en la temperatura máxima promedio en el estado de Hidalgo, México, que es de 27 °C [17], considerando una variación de ±5 °C. En este caso de estudio se establecen las siguientes restricciones de operación:

- Al tratarse el caso de estudio de la reducción de temperatura en el edificio, la entrada de control *Q* siempre debe de ser negativa.
- La potencia máxima del dispositivo es de 1500 W.

Se asume que el edificio no está habitado durante todo el día, por lo que, para optimizar el consumo de energía eléctrica, no se utiliza un valor constante como referencia para la temperatura. La mayor reducción de temperatura se planifica cuando el edificio está en uso. Por ello se propone una trayectoria de referencia para  $T_i$  definida por la curva de Bézier representada por

$$T_{i}^{\star} = \begin{cases} T_{b,0}, & 0 \leq t < t_{1} \\ T_{b,0} + (T_{b,1} - T_{b,0})\varphi_{1}, & t_{1} \leq t < t_{2} \\ T_{b,1} + (T_{b,2} - T_{b,1})\varphi_{2}, & t_{2} \leq t < t_{3} \\ T_{b,2}, & t \geq t_{3} \end{cases}$$
(7)

con

$$\varphi_j = \sum_{i=1}^{3} r_i \left( \frac{t - t_{2,j}}{t_{2,j+1} - t_{2,j}} \right)^{2+i}$$

donde  $j = 1, 2, T_{b,0} = 24 \text{ °C}, T_{b,1} = 21 \text{ °C}, T_{b,2} = 18 \text{ °C}, t_1 = 0 \text{ h}, t_2 = 10 \text{ h}, t_3 = 24 \text{ h}, r_1 = 10, r_2 = -15 \text{ y} r_3 = 6.$  Las condiciones iniciales del sistema son  $T_i(0) = 24 \text{ °C} \text{ y} T_w(0) = 22 \text{ °C}$ . Para  $T_{b,2}$ , se consideró la temperatura media anual en el estado de Hidalgo, México, que es de 16 °C [17], sumándole 2 °C adicionales para aumentar el confort en el edificio. La trayectoria de referencia para la salida plana  $y^*$  se obtiene en línea resolviendo de forma numérica la Ec. (5).

En la Fig. 2 se muestra el resultado para el Caso de Estudio 1 de la temperatura interior  $T_i$ , se observa un muy buen seguimiento de la trayectoria de referencia propuesta en la Ec. (7). Esto incluso cuando existen variaciones de la temperatura exterior, lo que valida el buen desempeño del controlador desarrollado.





Fig. 2. Temperatura interior del edificio y su trayectoria de referencia para el Caso de Estudio 1.

La grafica de la Fig. 3 presenta los datos obtenidos de la simulación computacional de la temperatura del muro. Recordando que la trayectoria de referencia  $T_w^*$  es generada por medio de la solución numérica de la Ec. (5). No se observa a simple vista una diferencia entre la trayectoria de referencia con la señal obtenida de la simulación, considerando que el controlador diseñado regula esta variable.

Pasando ahora con la entrada de control Q, mostrada en la Fig. 4, se observa que en la mayor parte del tiempo de simulación se sigue de buena forma la trayectoria  $Q^*$ . No obstante, se presenta un pequeño error en los mínimos que pueden justificarse debido a una pequeña diferencia entre la salida plana con su trayectoria de referencia y de sus derivadas temporales.

Por último, en la Fig. 5 se muestra la temperatura exterior  $T_o$  usada para este Caso de Estudio 1, el cual se presenta en la Ec. (6).



Fig. 3. Temperatura del muro y su trayectoria de referencia para el Caso de Estudio 1.

A. Castelán Pérez et al.: Diseño y Simulación de un Controlador de Temperatura Basado en Planitud Diferencial para Edificios



Fig. 4. Entrada de control y su trayectoria de referencia para el Caso de Estudio 1.



Fig. 5. Temperatura exterior para el Caso de Estudio 1.

## E. CASO DE ESTUDIO 2

El segundo caso de estudio se centra en la calefacción del edificio, considerando que la temperatura exterior es menor a la interior en t = 0. La temperatura exterior está definida por:

$$T_o = [10 - 5\sin(2\pi ft + \pi/4)] \ ^\circ C \tag{8}$$

Se propone esta función debido a que oscila entre valores cercanos a la temperatura mínima promedio de 4 °C y la temperatura media anual de 16 °C, correspondientes al estado de Hidalgo, México [17]. Las restricciones a las que está sujeto el controlador en este caso de estudio son:

- Caso contrario al anterior, los valores para la entrada de control *Q* siempre deben de ser positivos.
- La potencia máxima del calefactor es de 1500 W.

La trayectoria de referencia  $T_i^*$  se establece con la Ec. (7) donde  $T_{b,0} = 8 \,^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{b,1} = 16 \,^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{b,2} = 20 \,^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1 = 0$  h,  $t_2 = 12$  h y  $t_3 = 24$  h. Las condiciones iniciales del sistema son  $T_i(0) = 10 \,^{\circ}\text{C}$  y  $T_w(0) = 8 \,^{\circ}\text{C}$ .



A. Castelán Pérez et al.: Diseño y Simulación de un Controlador de Temperatura Basado en Planitud Diferencial para Edificios

En la Fig. 6 se presentan los resultados correspondientes para el Caso de Estudio 2, donde se controla la temperatura interior  $T_i$ , siguiendo la trayectoria de referencia  $T_i^*$  definida en la Ec. (7). Al analizar la gráfica, se observa que la trayectoria de referencia y la respuesta de la temperatura interior coinciden de manera precisa, lo que valida la efectividad del controlador propuesto en este trabajo.

Continuando ahora con el resultado de la simulación para la temperatura del muro  $T_w$ , que se presenta en la Fig. 7, se muestran resultados satisfactorios en el seguimiento de la trayectoria de referencia. Nótese que dicha trayectoria se genera en línea por medio de la solución numérica de la Ec. (5).

En la Fig. 8 se presenta la entrada de control Q usada para regular la temperatura del edificio. Al igual que en el caso anterior se puede obtener su trayectoria de referencia  $Q^*$  a partir de la parametrización del sistema en función de la salida plana del sistema. Se observa que existe una pequeña diferencia entre Q y su trayectoria de referencia, este error puede justificarse por una ligera diferencia entre la salida plana con su trayectoria de referencia y de sus derivadas temporales. Para finalizar, se muestra en la Fig. 9 la temperatura exterior  $T_o$  usada para este Caso de Estudio, en el cual la temperatura es inferior a la presentada en el primer caso.







Fig. 7. Temperatura del muro y su trayectoria de referencia para el Caso de Estudio 2.



Fig. 8. Entrada de control y su trayectoria de referencia para el Caso de Estudio 2.



Fig. 9. Temperatura exterior para el Caso de Estudio 2.

#### **III. CONCLUSIONES**

En este trabajo se desarrolló un controlador de temperatura basado en la propiedad de planitud diferencial para un edificio. Primero, se estableció el modelo matemático a utilizar y se parametrizó en función de la salida plana del sistema. Para validar el funcionamiento del controlador, se propusieron dos casos de estudio: en el primero, el objetivo era reducir la temperatura del edificio debido a altas temperaturas exteriores; en el segundo, se debía incrementar la temperatura interior del edificio debido a temperaturas exteriores templadas-frías. Los resultados de ambos casos indican que el controlador diseñado funciona de manera eficaz, permitiendo un uso más eficiente de la energía eléctrica. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, como la incorporación de un modelo matemático que represente con mayor precisión la dinámica térmica de un edificio y la implementación física del controlador lo cual será abordado en trabajos futuros.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo proporcionado para el desarrollo de este trabajo. De igual forma agradecen a los revisores designados a este trabajo, por su revisión, comentarios y recomendaciones para mejorar la calidad de este trabajo.



#### REFERENCIAS

- Jha, A., Preonas, L., & Burlig, F. (2022). Blackouts in the developing world: The role of wholesale electricity markets. University of Chicago, Becker Friedman Institute for Economics Working Paper, (2022-01).
- [2] ZHANG, Y., ZHANG, F., Youchun, L. I., Lv, T. A. N. G., Xuehu, P. E. N. G., & Jianguo, M. O. (2021, February). Analysis Of Typical Power Grid Blackout Accidents And Suggestions For Countermeasures. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1754, No. 1). IOP Publishing.
- [3] Lymperopoulos, Georgios; Ioannou, Petros . (2020). Building Temperature Regulation in a Multi-Zone HVAC System using Distributed Adaptive Control. Energy and Buildings, (), 109825–. doi:10.1016/j.enbuild.2020.109825
- [4] Li, Y., O'Neill, Z., Zhang, L., Chen, J., Im, P., & DeGraw, J. (2021). Grey-box modeling and application for building energy simulations-A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, 111174.
- [5] Coffman, A. R., & Barooah, P. (2018). Simultaneous identification of dynamic model and occupant-induced disturbance for commercial buildings. Building and Environment, 128, 153-160.
- [6] Jeong, C., Brastein, O. M., Skeie, N. O., & Sharma, R. (2023). Hybrid Model Predictive Control Scheme for Controlling Temperature in Building under Uncertainties. IEEE Access.
- [7] Wang, S., & Xu, X. (2006). Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification. International journal of thermal sciences, 45(4), 419-432.
- [8] Sira-Ramirez, H., & Agrawal, S. K. (2018). Differentially flat systems. Cre Press.
- [9] Fliess, M., Lévine, J., Martin, P., & Rouchon, P. (1995). Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples. International journal of control, 61(6), 1327-1361.
- [10] Beltran-Carbajal, F., Favela-Contreras, A., Valderrabano-Gonzalez, A., & Rosas-Caro, J. C. (2014). Output feedback control for robust tracking of position trajectories for DC electric motors. Electric Power Systems Research, 107, 183-189.
- [11]Beltran-Carbajal, F., Favela-Contreras, A., Hernandez-Avila, J. L., Olvera-Tapia, O., Sotelo, D., & Sotelo, C. (2020). Dynamic output feedback control for desired motion tracking on synchronous motors. International Transactions on Electrical Energy Systems, 30(3), e12260.
- [12] Gil-Antonio, L., Saldivar, B., Portillo-Rodríguez, O., Vazquez-Guzman, G., & De Oca-Armeaga, S. M. (2019). Trajectory tracking control for a boost converter based on the differential flatness property. IEEE Access, 7, 63437-63446.
- [13] Tal, E., & Karaman, S. (2020). Accurate tracking of aggressive quadrotor trajectories using incremental nonlinear dynamic inversion and differential flatness. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 29(3), 1203-1218.
- [14] Lamberts, R., & Hensen, J. L. (Eds.). (2019). Building performance simulation for design and operation. Spoon Press.
- [15] Rosin, S. (2018). Reduced Order Modeling for Virtual Building Commissioning. MSc thesis, Boise State University.
- [16] Rivas-Cruz, F., Hernández-Martínez, E. G., & del Real, L. E. P. S. (2021). Heating and Cooling with Heat Pumps-Projects developed in Mexico. Renewable energy, biomass & sustainability, 3(2), 94-108.
- [17] INEGI. Clima Hidalgo. Consultado: Julio 19, 2024. [Online]. Disponible:

https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/ clima.aspx

### **BIOGRAFÍAS**



ALEXIS CASTELÁN PÉREZ Ingeniero en Robótica por la Universidad Politécnica de Tulancingo (2020), Maestro en ciencias con especialidad en Automatización y Control (2023) por Universidad Politécnica de Tulancingo. Actualmente es alumno del Doctorado en Optomecatrónica en la misma institución. Sus áreas de interés son la robótica, visión artificial, el modelado, identificación y control de

sistemas dinámicos.



FRANCISCO BELTRÁN CARBAJAL Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (1993) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la especialidad de Mecatrónica por el CINVESTAV-IPN (2004). Actualmente es Profesor-Investigador Titular C por Tiempo Indeterminado en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Sus principales áreas de interés en investigación,

innovación y desarrollo tecnológico son: Control de Vibraciones, Identificación de Sistemas, Maquinaria Rotatoria, Mecatrónica y Control de Sistemas de Conversión de Energía.



IVAN DE JESÚS RIVAS CAMBERO Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Tepic (1998), Maestro en ciencias de Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV unidad Guadalajara (2002) y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Industrial por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (2012). Actualmente profesor investigador en el área de investigación y posgrado de la Universidad

Politécnica de Tulancingo (UPT). Sus principales áreas de interés son el control de máquinas eléctricas y sistemas robóticos.



**DAVID MARCOS ANDRADE** Ingeniero en Robótica egresado de la Universidad Politécnica de Tulancingo (2018). Maestro en ciencias con especialidad en Automatización y Control por la Universidad Politécnica de Tulancingo (2021). Actualmente se encuentra cursando el segundo año de doctorado en el área de Optomecatrónica en la misma universidad. Sus principales líneas de

investigación se centran en electrónica de potencia, control de máquinas eléctricas y sistemas de conversión de energía eléctrica.