

# Desarrollo de un gemelo digital didáctico para un helicóptero de 1 GDL

*Development of a didactic digital twin for a helicopter of 1 DOF*

- Jorge Rodrigo Cervantes-Pozas** es estudiante de Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Nacional de México en Celaya (México) (19030896@itcelaya.edu.mx).
- Juan Carlos Valencia-Vallejo** es estudiante de Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Nacional de México en Celaya (México) (20030052@itcelaya.edu.mx).
- Armando Figueroa-Martínez** es estudiante de maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Nacional de México en Celaya (México) (m2403011@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0009-0006-0045-1057>), Ingeniero.
- Coral Martínez-Nolasco** es coordinadora del programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya (México). A partir de enero del 2024, recibe el reconocimiento por parte del SNII como Investigadora Nivel 1 (coral.martinez@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0001-6372-4426>), Doctora.
- Juan José Martínez-Nolasco** es Doctor en Ciencias en Ingeniería, egresado del Tecnológico Nacional de México en Celaya (México) (juan.martinez@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-4080-1286>), Doctor.

**Resumen:** El presente artículo propone el desarrollo de un gemelo digital que replica el comportamiento de un helicóptero de 1 grado de libertad con un enfoque académico y didáctico. El aporte de esta investigación es generar una herramienta de bajo costo que apoye al entendimiento y difusión del paradigma de gemelo digital. El trabajo se soporta de herramientas de código abierto en la creación de modelos digitales para sistemas de complejidad media, garantizando la correcta definición de sus principales características. Para alcanzar dicho objetivo, se recurrió al uso de un modelo que consta de un sistema físico basado en Arduino, mientras que la parte del sistema digital se soporta en el lenguaje Python. Se realiza una metodología de modelado de sistema basado en herramientas computacionales para la correlacionar el sistema físico y digital. La metodología aborda la comparación de mediciones de variables del sistema y mediciones realizadas a través de equipos de medición externos para cuantificación de errores. Los resultados mostraron que los errores del ángulo de posición entre el sistema físico y digital fueron en torno al 5%, la comunicación obtenida entre el sistema digital y el sistema físico probó ser eficiente teniéndose una respuesta rápida y precisa ante los cambios en las condiciones de funcionamiento de la parte física. En conclusión, este se logró alcanzar una aportación al paradigma de gemelo digital basado en herramientas de fácil aprendizaje y bajo costo orientado a aplicaciones en el campo de la mecatrónica principalmente.

**Palabras clave:** 1 GDL, gemelo digital, helicóptero, sistema, PID.

**Cómo citar:** Cervantes-Pozas, J.R., Valencia-Vallejo, J.C., Figueroa-Martínez, A., Martínez-Nolasco, C., & Martínez-Nolasco, J.J. (2024). Desarrollo de un gemelo digital didáctico para un helicóptero de 1 GDL. *Revista Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 25-37. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.25-37>.

Recepción: 26-09-2024  
Aprobación: 23-10-2024



**Abstract:** The present article proposes the development of a digital twin that replicates the behavior of a 1-degree-of-freedom helicopter with an academic and didactic approach. The main contribution of this research is generating a low-cost tool that supports the understanding and dissemination of the digital twin paradigm. The work is supported by open-source tools in the creation of digital models for medium complexity systems, for the correct definition of their main characteristics. For this objective, the model consisting of a physical system based on Arduino was used, while the digital system is supported by the Python language. The system modeling methodology is based on computational tools that is applied to correlate the physical and digital systems. The methodology contains a comparison of variable measurements from the system and measurements made through external measurement equipment so obtain the error quantification. The results show that the position angle errors with regard the physical and digital systems were around 5%. Communication between the digital and physical systems was efficient, providing a quick and accurate response in the changes of operating conditions in the physical part. In conclusion, a contribution to the digital twin paradigm is achieved, based on easy-to-learn and low-cost tools oriented to applications in the field of mechatronics.

**Keywords:** 1 DOF, digital twin, helicopter, PID, system.

### Introducción

El concepto de gemelo digital se originó en una presentación de la universidad de en 2002 inicialmente fue usado para fines de ciclo de vida del producto no obstante ha ido cambiando con el pasar de los años (Grieves & Vickers, 2017). Básicamente un gemelo digital se asume como una réplica virtual realizada emulando una entidad física, por ejemplo; la turbina de un avión, las palas de un aerogenerador, la fachada de un edificio, etc. Generalmente se incorporan datos en tiempo real que pueden ser captados a través de sensores. Los datos se pueden procesar posteriormente con inteligencia Artificial, computo en la nube y machine learning para reflejar cambios y resultados en el gemelo digital (Iberdrola, 2024). Aunque el concepto de gemelo digital ha sido definido de diversas maneras por académicos e industria, la mayoría coinciden en sus beneficios. Reduce costos operativo y tiempo, aumenta la productividad de los sistemas existentes, facilita el proceso de toma de decisiones, mejora los programas y a su vez, las actividades de mantenimiento, proporciona acceso remoto, crea un entorno de trabajo más seguro, promueve la sostenibilidad y ayuda al entendimiento del sistema sin necesidad de operación física (Singh et al., 2021).

Debido a las diversas ventajas y aplicaciones de los gemelos digitales, su adopción en distintos sectores se ha acelerado en los últimos años. Según un informe de Grand View Research, el mercado global de los gemelos digitales se valoró en 5040 millones de dólares en 2020 y se espera que alcance los 86090 millones de dólares en 2028 con una tasa de crecimiento anual compuesta del 42,7% de 2021 a 2028 (Grand View Research, 2021).

La implementación del gemelo digital permite realizar pruebas para el descubrimiento de puntos de optimización mientras se incluye la simulación de procesos. El perfil del sistema digital puede considerarse un componente fundamental en una estrategia de un control de circuito cerrado, donde la información proporcionada por el gemelo digital puede conducir a acciones físicas que impulsen cambios en los procesos de fabricación (Boschert & Rosen, 2016). Además, también permite una comprensión completa de los mecanismos operativos del sistema y contribuye a aumentar la agilidad y robustez en respuesta a perturbaciones. Los datos digitales proporcionan un puente entre las aplicaciones de software y los sistemas automáticos de procesamiento de información, convirtiéndose en el vínculo que une procesos de fabricación de diseño, producción

y mantenimiento de todos los sistemas modernos en los equipos industriales, automóviles, aviones y sistemas de energía (Attaran et al., 2024).

No obstante, existe una problemática en el sector educativo en el cual parece no se adopta aun del todo el potencial de los gemelos digitales como una innovación educativa que a su vez traerá una brecha de conocimiento entre el nivel educativo y profesional (Hedberg et al., 2016). Por estas razones es necesario que en el ámbito educativo se difunda el concepto de gemelo digital y como puede aplicarse al aprendizaje de diversas áreas entre ellas la mecatrónica (Ağca, 2023). Un aspecto para destacar es que la transición hacia la industria 5.0 se ha visto soportada en algunas áreas por los gemelos digitales y esto tiene particular interés ya que en campos como la ingeniería y las materias técnicas se requerirá capacitar y entender la diversidad de sistemas, herramientas e instrumentos (Khalid & Assistant, 2024).

En este trabajo, se desarrolla un gemelo digital de un helicóptero de 1 GDL. El sistema físico está constituido mediante una estructura de helicóptero de MDF, la parte de potencia se sustenta mediante dos puentes H y un motor DC el cual se encarga de generar el movimiento y fuerzas necesarias, en cuanto al control se lleva a cabo a través de una placa Arduino UNO que es el cerebro principal del sistema físico. Realiza tareas de comunicación con la interfaz además de ser el encargado del control. El gemelo digital esta soportado en Python con lo cual se apoya en software libre, dentro de las funcionalidades desarrolladas se tiene una representación 2D, graficas descriptivas del sistema y datos predictivos del sistema físico. La finalidad es generar una herramienta educativa e intuitiva para el entendimiento de los gemelos digitales para difundir sus capacidades, mostrar una aplicación básica haciendo uso de herramientas de fácil acceso para finalmente aportar a la adopción de esta tecnología en el ámbito educativo de la mecatrónica.

El artículo cuenta con 6 secciones 1) Introducción: en ella se establece que es un gemelo digital sus orígenes y funciones, así como la problemática que existe en la inclusión del paradigma en la educación en áreas como las ingenierías y materias técnicas. 2) Metodología: aquí se describen las fases del proyecto y los objetivos específicos de cada una de ellas. 3) Sistema físico: se describen los componentes físicos en el prototipo a replicar digitalmente, sus parámetros y variables. 4) Sistema digital: aquí se explica el algoritmo de funcionamiento que sigue el programa de Python para la interfaz del gemelo digital. 5) Resultados: muestra el funcionamiento del prototipo y la interfaz final del programa. 6) Discusión: las conclusiones y trabajos futuros relacionados.

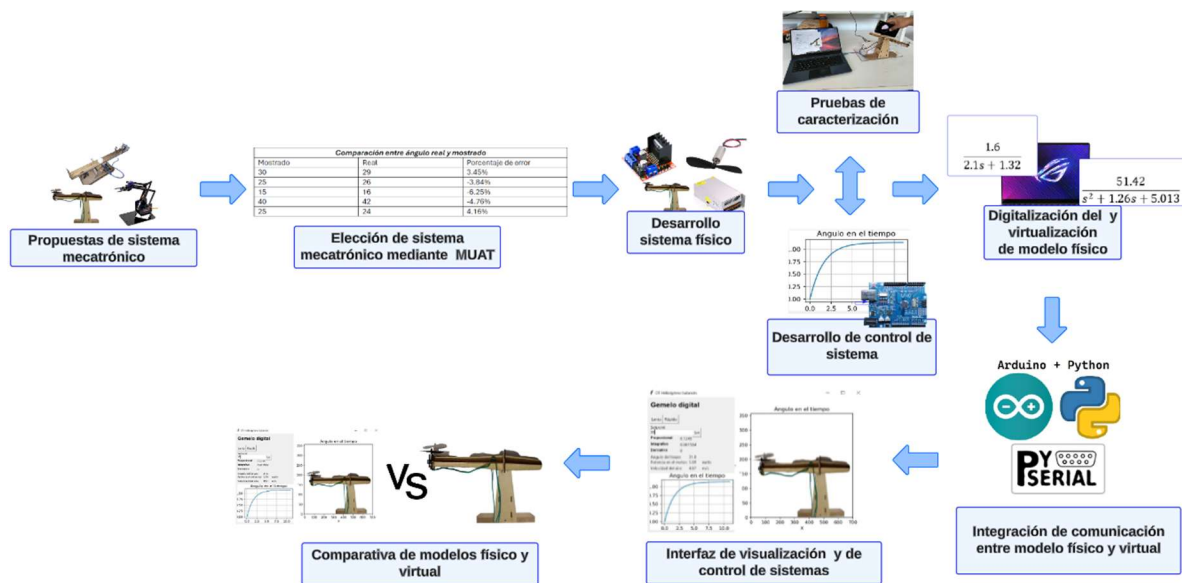
### Metodología

El desarrollo del gemelo digital consistió en varias etapas clave:

1. **Selección del Sistema Físico:** El objetivo de esta fase fue lograr que el sistema elegido pudiera ser accesible en términos de costos y fácil de replicarse en un entorno virtual. Se analizaron varias opciones; brazos robóticos y control de temperatura entre otros, mediante un análisis multiatributo, considerando factores como complejidad, costo, capacidad de visualización de cambios y posibilidad de virtualización. Finalmente, el helicóptero de 1 grado de libertad (1 GDL) fue seleccionado debido a su alta compatibilidad con los requisitos del proyecto.
2. **Desarrollo del Sistema Virtual:** Basado en el sistema físico seleccionado, se desarrolló un modelo digital utilizando el paradigma del gemelo digital. Este proceso incluyó la creación de una representación virtual precisa del sistema físico utilizando Python para las simulaciones y Arduino como la base de control del sistema físico.

3. **Adecuaciones de Control al Sistema Físico:** Con los dos sistemas seleccionados, se procedió a ajustar el sistema físico mediante un proceso iterativo de simulaciones y pruebas. Las adecuaciones incluían la mejora de los controles del sistema físico para garantizar que las respuestas del sistema virtual y físico fueran coherentes, tratando de minimizar los errores en la posición angular de ambos sistemas, como se especifica en los resultados del proyecto.
4. **Integración y Sincronización entre los Sistemas:** En la fase final se efectuó la sincronización y comunicación eficiente entre el sistema físico y el digital. La interfaz de comunicación entre ambos sistemas probó para garantizar la actualización óptima de las variables físicas en el modelo digital, logrando una sincronización aceptable y minimizando los errores.

**Figura 1.** Diagrama de metodología



La selección de un sistema mecánico que pudiera ser virtualización y accesible en costos tuvo varias alternativas las cuales se muestran en la Tabla 1. En ella se muestran los valores dados a cada opción referentes a los atributos, esto debido que la selección se hará mediante método de utilidad multiatributo. Las ponderaciones de los atributos dado los intereses del proyecto son Complejidad: 0.5, Costo: 0.4, Visualización de cambios: 0.7, Posibilidad de virtualización: 0.8.

**Tabla 1.**  
*Valoración de atributos de sistemas mecatrónicos*

Sistema	Complejidad	Costo	Visualización de cambios	Posibilidad de virtualización
Brazo robótico	2	2	5	2
Balancín de esfera	3	4	5	3
Control de velocidad	5	5	3	4
Control de temperatura	4	4	2	2
Helicóptero 1 GDL	4	5	5	4

Los resultados obtenidos del análisis multicriterio posicionaron helicóptero de 1 GDL como la mejor opción, los diversos valores de los demás sistemas se concentran en la Tabla 2. El margen de selección reducido entre el balancín de esfera muestra que también es una alternativa apta.

**Tabla 2.**  
*Resultados obtenidos de análisis multicriterio*

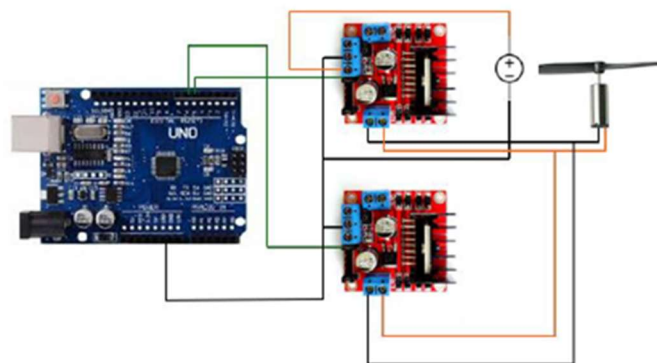
Sistema	Resultados de MAUT
Brazo robótico	1.66
Balancín de esfera	1.60
Control de velocidad	1.56
Control de temperatura	1.03
Helicóptero 1 GDL	0.3

Las diversas fases siguientes se concentran de manera general en referencia a dos grupos: sistema físico y sistema virtual que se desarrollan en apartados propios a continuación.

### Sistema Físico

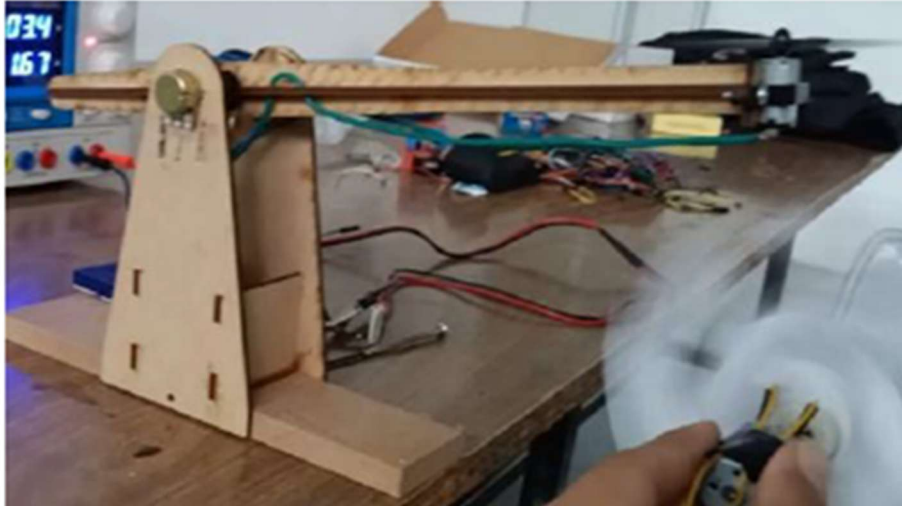
El sistema físico del helicóptero de un grado de libertad cuenta con distintos componentes, la parte referente a la potencia esta soportada por un par de puentes H en conexión paralela como se muestra en la Figura 2 debido al consumo registrado del motor generaba calentamiento excesivo. Ampliando de esta manera el amperaje máximo y reclutando ahora un segundo disipador de temperatura.

**Figura 2.** *Diagrama de control de motor*



La estructura del sistema físico se muestra en la Figura 3. El control fue aplicado mediante un PID embebido en Arduino. El PID posee dos modos de operación programados, un modo de estabilización rápido y un modo de estabilización lenta, la retroalimentación se realiza mediante un potenciómetro que alimenta a una entrada analógica de la placa de Arduino UNO.

**Figura 3.** *Helicóptero 1 GDL utilizado*



Una fase importante del sistema físico es su caracterización y modelado, diversas variables fueron recolectadas a través del uso del sistema. Dentro de estas variables se encuentran el ángulo, el voltaje del potenciómetro, la potencia consumida por el motor, velocidad del aire entre otras.

Cabe señalar que la velocidad del aire de las hélices es aproximada mediante el uso de un motor con palas que es usado como generador que se muestra en la Figura 4.

**Figura 4.** *Helicóptero 1 GDL utilizado*



Los valores de voltaje producido sobre velocidad de viento se obtienen inicialmente mediante el cálculo de la fuerza necesaria para mantener el brazo completamente horizontal.

Esta fuerza generada por el empuje del giro de las aspas del rotor en aeronaves se calcula con la ecuación 1 donde  $P_e$  es el peso específico del fluido, aire en este caso,  $V$  es el volumen de este y  $F$  la fuerza de empuje.

$$F = (P_e)(Volumen) \quad (1)$$

De esa fórmula despejamos el valor de la velocidad de viento en función de la fuerza necesaria y la geometría de la hélice, obteniendo la ecuación 2 donde  $F$  es la fuerza,  $\delta$  es la densidad del fluido,  $g$  representa la aceleración de la gravedad y  $A$  es el área del conducto.

$$Velocidad = F/(\delta * g * A) \quad (2)$$

El valor inicial obtenido se utiliza como punto de referencia para establecer una relación lineal de la velocidad de viento con el voltaje generado en el prototipo de anemómetro. Despejando la fuerza de empuje de la ecuación 2 en función de la velocidad, podemos conocer en tiempo real la fuerza de empuje que estaría generando el helicóptero en cada posición e incluirla en la consola principal.

Los valores obtenidos de las diversas variables a distintos ángulos usados para la caracterización del motor se concentran en la Tabla 3.

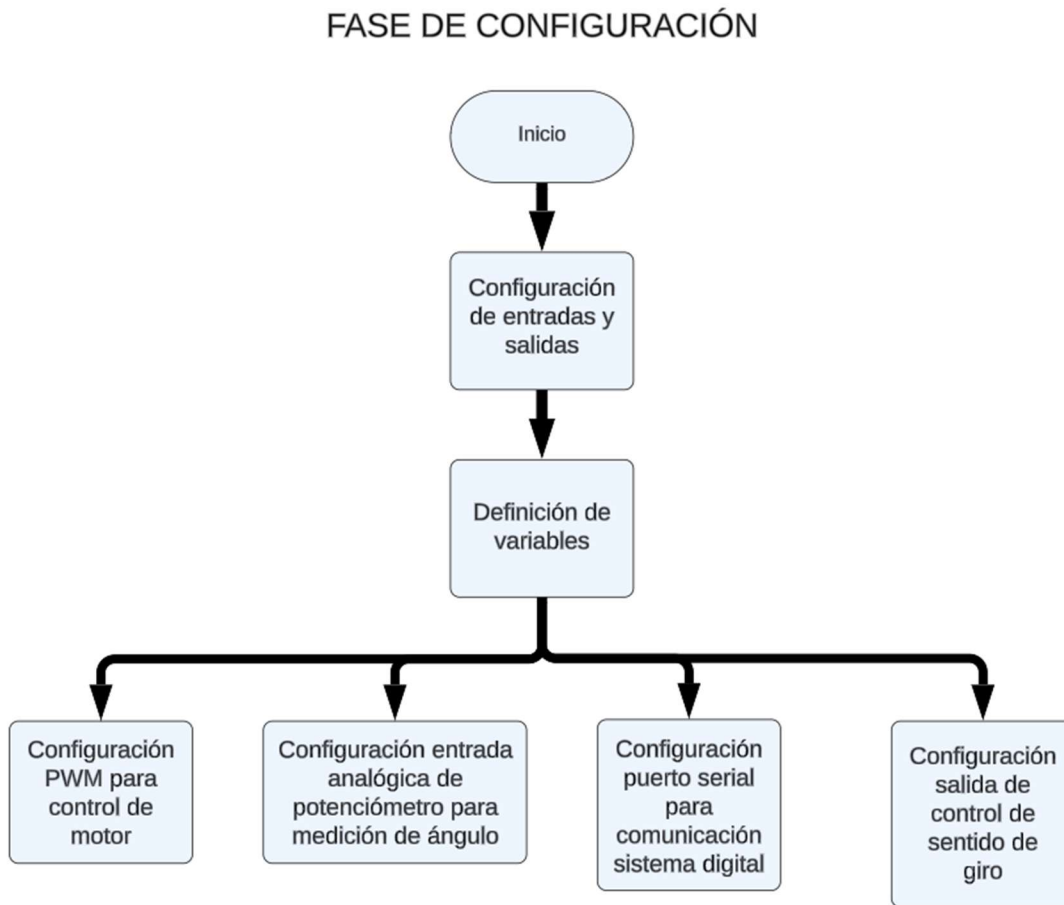
**Tabla 2**

*Valores recabados de variables muestreadas*

Ángulo	Voltaje Potenciómetro (V)	Velocidad del aire (m/s)	Voltaje motor (V)	Corriente motor (A)	Potencia (W)
0	0	0	0	0	0
0.1	0.21	2.793859649	2.7	1.38	3.726
15	0.33	4.390350877	3.2	1.48	4.736
30	0.342	4.55	3.3	1.75	5.775
45	0.389	5.175292398	3.4	1.77	6.018
60	0.404	5.374853801	3.5	1.81	6.335

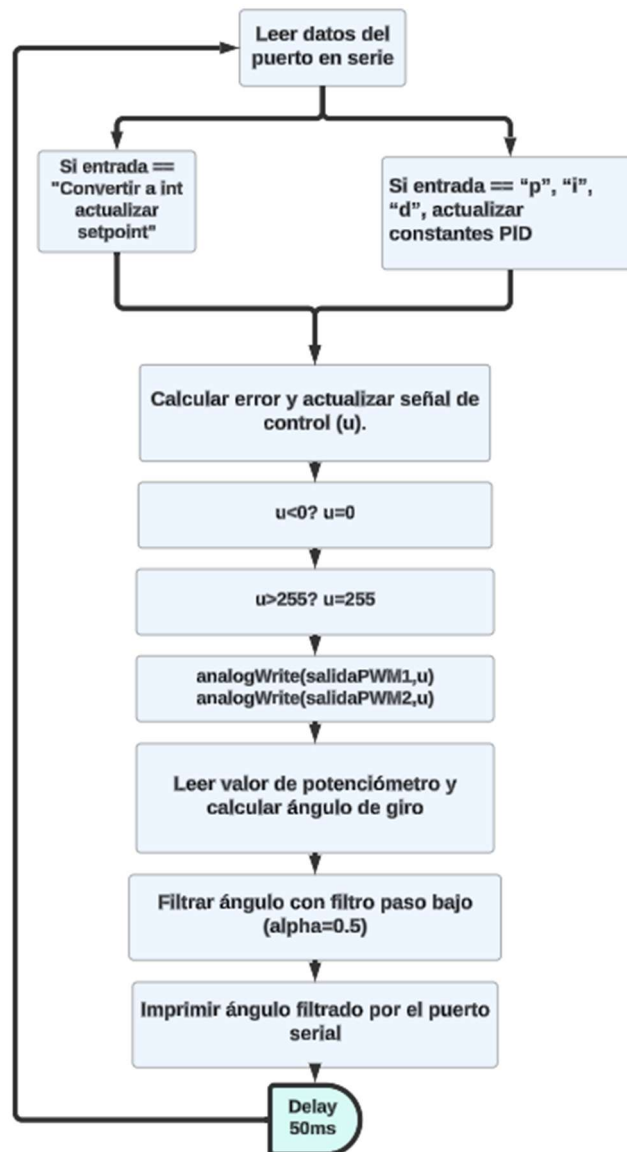
La parte del control fue realizada mediante la iteración de parámetros para lograr dos controladores distintos de PID esto con la finalidad de obtener un caso que presente una mayor oscilación inicial y un caso más con menor sobrepaso, de esta manera tener facilidad de visualizar las variaciones. Las constantes del controlador PID modo rápido son  $k_p = 0.81$ ,  $k_i = 0.002$  y  $k_d = 0.19$  mientras que para el modo lento son  $k_p = 0.7249$ ,  $k_i = 0.001544$  y  $k_d = 0.583$ . Con los parámetros y cálculos realizados se codificó un programa que involucrara las características necesarias para la integración del sistema físico en las siguientes etapas del gemelo digital. Dicho programa se subdivide en dos partes, la etapa de configuración ejecutada 1 sola vez al encender el sistema físico puede verse en la Figura 5 y la etapa cíclica que se ejecuta posteriormente y se repite hasta apagar el sistema físico. En la etapa de configuración los aspectos destacables de esta etapa consisten en principalmente habilitar y definir parámetros de los periféricos a usarse en la placa Arduino.

**Figura 5.** Fase de configuración programa de sistema físico.



La etapa cíclica se muestra en la Figura 6 e iniciara tras terminar la fase de configuración. Este proceso es el cual establece la comunicación entre el sistema físico y sistema digital, ejerce el control de cambios comandados desde el sistema digital y aplica el control del sistema físico.

Figura 6. Fase cíclica del sistema físico



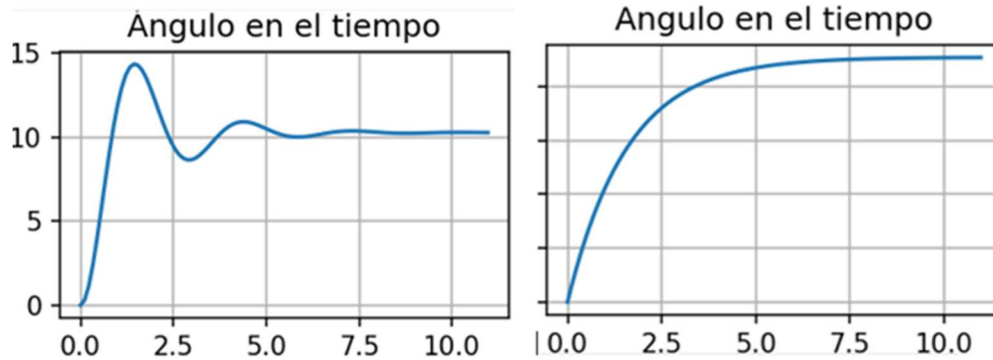
### Sistema Digital

El sistema digital está constituido por un programa hecho con la base en Python 3.9 el cual inicia configurando el puerto serial para establecer la comunicación con Arduino. Este programa crea una interfaz gráfica para mostrar y recibir valores con el usuario.

Para el envío de datos, la programación permite escribir los de valores de ganancias según requiera el usuario para el PID. Para un uso didáctico más sencillo del prototipo, se sintonizan los valores predefinidos de las constantes tanco para un modo lento como para el rápido del helicóptero. Estas ganancias se envían a la placa presionando un botón para el comportamiento deseado concatenando una letra «p», «i», o «d» que sirve como un carácter identificador para cada una de las ganancias. Para la selección del ángulo deseado del sistema se incluye una casilla de entrada que encargara del envío como «setpoint» para el control del sistema físico. Este se envía sin un carácter identificador como en los valores anteriores, evitando así la confusión entre los valores.

La predicción de comportamiento se da mediante la graficación de la respuesta escalón de la función de transferencia obtenida para cada comportamiento, estas gráficas se muestran en la Figura 7. Dentro de esta gráfica podemos observar el cambio de amplitud respecto al tiempo que se espera una vez se envíe el «setpoint» para el proceso. Remplazando esta gráfica con la que se seleccione según se seleccione un modo de comportamiento durante la ejecución del programa.

**Figura 7.** Gráficas de predicción en el programa. a) Modo rápido b) Modo lento



La retroalimentación del sistema físico se efectúa mediante la lectura de los valores del ángulo proporcionado por el Arduino, los cuales son leídos por el programa e incluidos en una animación que gira imágenes del prototipo de helicóptero incluidos como archivos png que emulan el movimiento natural del balancín en la posición real que se esté percibiendo en ese momento, para evitar un retraso en la señal se incluye una función que vacía todos los valores que se tengan acumulados en el buffer del puerto, para así captar de manera inmediata el valor más reciente que llegue en la comunicación, contando únicamente con el retraso preestablecido dentro de la programación de Arduino. También se presenta en la interfaz los valores que describen el comportamiento del motor como lo son la potencia consumida y velocidad del aire, estas variables se rigen por las ecuaciones mostradas en la sección del sistema físico.

## Resultados

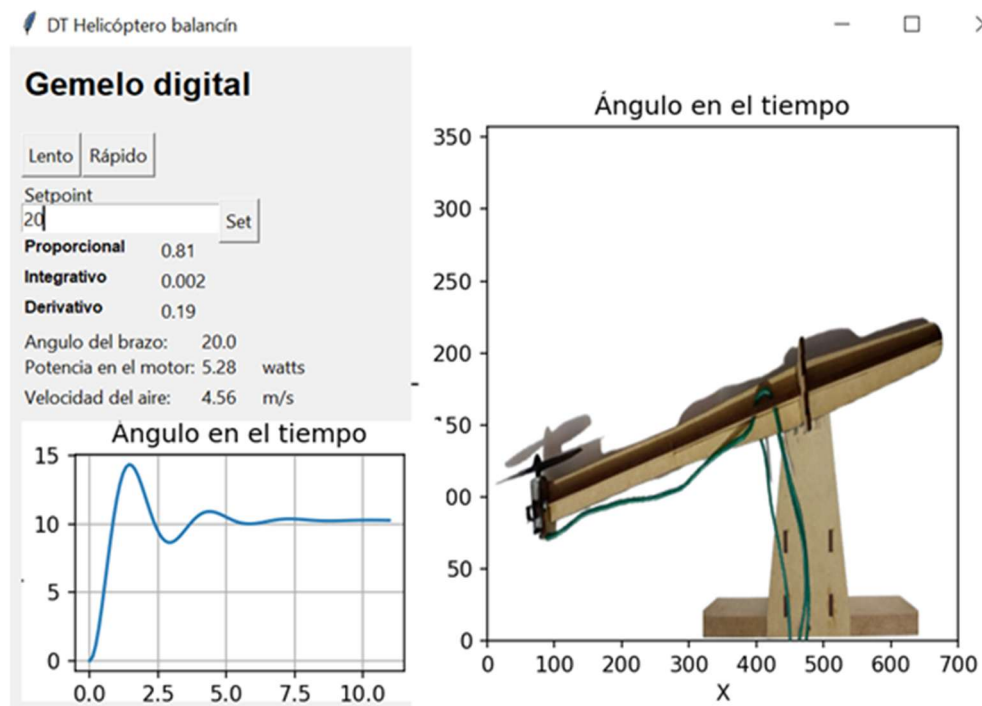
La capacidad de un gemelo digital de apegarse lo más posible al comportamiento de su contraparte real es el aspecto que más se debe cuidar en productos resultantes de este paradigma de modelación. En la parte física, el prototipo presentó un comportamiento correcto y estable con las ganancias del controlador definidas la Figura 8 muestra el sistema físico resultante.

**Figura 8.** Prototipo físico de helicóptero balancín



La animación de movimiento presente en la interfaz mostrada en la Figura 9 replica con similitud el movimiento del brazo en todo momento, lo que nos permite conocer su estado ante alteraciones externas fuera del uso del operador. La interfaz muestra la predicción de comportamiento en modo rápido. Incluyendo los valores de energía y viento presentes en la ejecución.

**Figura 9.** Interfaz del gemelo digital en Python



Para validar el comportamiento del sistema con la realidad, se corroboraron las mediciones del potenciómetro usando la herramienta de nivel presente en algunos smartphones. En este caso un Oppo Reno 5 Lite con brújula y giroscopio incluidos. La comparativa de medición se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Comparación entre ángulo real y ángulo mostrado*

Mostrado	Real	Error
30	29	3.45%
25	26	3.85%
15	16	6.25%
40	42	4.76%
25	24	4.17%

### Discusión

En este trabajo se logró realizar el gemelo digital de un prototipo sencillo de helicóptero balancín por medio del uso de las funciones disponibles en el lenguaje de código abierto de Python, estas nos permitieron emular correctamente el movimiento del prototipo dentro de la consola, así como mostrar en todo momento la información del consumo de energía, la fuerza de empuje y la velocidad de viento generada por el motor durante su ejecución, así como la generación de una gráfica prediciendo su comportamiento esperado antes del arranque del sistema.

Dichos datos cumplen los requisitos de comportamiento que describen la esencia del gemelo digital importar el comportamiento de este identificando sus valores y reacciones a diversos estímulos comparándolo con su comportamiento real reflejado. Resultaría interesante escalar el prototipo a un entorno tridimensional para comparar sus características descriptivas con las de softwares empresariales de gemelos digitales como los ofrecidos por la empresa Dassault Systems para evaluar si es posible crear opciones académicas igual de efectivas. Así como la posible incorporación de bases de datos o tecnologías 4.0 para poder monitorear los sistemas a distancia a través de la nube.

También es una buena opción el incluir en trabajos futuros el uso de algoritmos inteligentes enfocados en la estimación y predicción de variables para evitar la limitación a modos de operación predefinidos por el programador.

Concluyéndose así que la herramienta desarrollada tiene un buen aporte en la difusión del paradigma de gemelo digital en el ámbito académico dado la buena coherencia entre los sistemas físicos y digitales además de ayudar a generar conocimientos secundarios en el proceso de desarrollo del prototipo y sistema virtual.

### Referencias

Grieves, M. W., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)

- Iberdrola. (2024, May 24). ¿Qué es un gemelo digital? <https://www.iberdrola.com/innovacion/gemelos-digitales>
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- Grand View Research. (2021). Digital Twin Market Size, Share & Trends Analysis Report By Solution Component Digital Twin Market Size & Trends. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market>
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital twin—The simulation aspect. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic Futures* (pp. 59–74). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5)
- Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital twins and industrial internet of things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
- Hedberg, T., Lubell, J., Fischer, L., Maggiano, L., & Feeney, A. B. (2016). Testing the digital thread in support of model-based manufacturing and inspection. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(2), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.403269>
- Ağca, R. K. (2023). Using digital twins in education from an innovative perspective: Potential and application areas. *Education Mind*. <https://doi.org/10.58583/pedapub.em2306>
- Khalid, M., & Assistant, S. (2024). Digital twins and engineering education: Current status. *International Journal of Information Science and Technology*, 6.