

DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA DIDÁCTICA PARA EL SEGUIMIENTO DE OBJETOS CON VISIÓN ARTIFICIAL

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC ROBOTICS PLATFORM FOR THE TRACKING OF OBJECT WITH ARTIFICIAL VISION

Karla Liliana Puga Nathal

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Guzmán, México
karla.pn@cdguzman.tecnm.mx

Salvador Esparza Godínez

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Guzmán, México
L17290344@cdguzman.tecnm.mx

Cynthia Yvonne Mejía Cárdenas

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Guzmán, México
L17290367@cdguzman.tecnm.mx

Ramón Chávez Bracamontes

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Guzmán, México
ramon.cb@cdguzman.tecnm.mx

Recepción: 13/noviembre/2022

Aceptación: 22/diciembre/2022

Resumen

Se presenta una investigación basada en el diseño e implementación de una plataforma robótica de entrenamiento que permite a los estudiantes experimentar, caracterizar y establecer el modelo matemático que controla la respuesta del sistema cuando detecta un objeto en movimiento. La propuesta surge de la necesidad de incorporar prácticas de laboratorio para fortalecer los conceptos tratados en el aula, ya que se ha observado que en instituciones públicas de nivel superior en ocasiones es difícil el equipamiento de los laboratorios, por lo que resulta apremiante desarrollar propuestas que coadyuven al fortalecimiento y desarrollo de aprendizajes prácticos. El escenario didáctico se fundamenta con la teoría de aprendizaje por indagación, que enfatiza la importancia de la actividad práctica en la escuela. Los resultados obtenidos son el prototipo funcional, el escenario para programar y experimentar con diferentes algoritmos de control y evidencias de su incorporación en el aula.

Palabras Clave: Control automático, plataforma interactiva didáctica, visión artificial.

Abstract

An investigation is presented based on the design and implementation of a robotic training platform that allows students to experiment, characterize and establish the mathematical model that controls the response of the system when it detects a moving object. The proposal arises from the need to incorporate laboratory practices to strengthen the concepts covered in the classroom, since it has been observed that in higher level public institutions it is sometimes difficult to equip the laboratories, so it is urgent to develop proposals that contribute to the strengthening and development of practical learning. The didactic scenario is based on the inquiry learning theory, which emphasizes the importance of practical activity in school. The results obtained are the functional prototype, the scenario to program and experiment with different control algorithms and some evidence of its incorporation in the classroom.

Keywords: *Artificial vision, automatic control, interactive didactic platform.*

1. Introducción

La educación superior basada en competencias busca que los estudiantes adquieran una formación integral y desarrollen las capacidades propias de su carrera, considerando la construcción de conocimientos, habilidades, destrezas y actitudes que le permitan resolver situaciones de su entorno laboral [UNESCO, 2019]. Por tanto, es importante garantizar el acceso a laboratorios equipados y actualizados [López, 2012], ya que son el primer ambiente que tienen los estudiantes para pasar del saber al saber hacer, al poner en práctica los conocimientos teóricos [Rúa, 2012].

La interacción en el laboratorio es un eje central en la formación de competencias específicas y genéricas de un ingeniero, ya que le permite lograr experiencias de aprendizaje que coadyuvan a la comprensión de la teoría tratada en el aula [Edward, 2016]. Desafortunadamente algunas instituciones educativas cuentan con

laboratorios obsoletos o carecen del equipamiento adecuado para demostrar los saberes adquiridos de los estudiantes y la formación de competencias que son requeridos por el sector laboral y educativo [Rodríguez, 2020].

Los escenarios basados en plataformas didácticas permiten simular y visualizar la representación de modelos matemáticos que describen el comportamiento de un fenómeno, además de favorecer la construcción de conceptos relacionados con diversas áreas del conocimiento, promoviendo el pensamiento crítico y el capital del conocimiento, [Barrera, 2018]. Particularmente, conceptos relacionados a la inteligencia artificial, que es el área de conocimiento que da respuesta a las necesidades de diferentes sectores tales como medicina, ingeniería, economía, biología, informática, física, matemáticas y en robótica y automatización de sistemas. De la inteligencia artificial surgen los sistemas de visión artificial en la década de 1960 [Benites, 2014], volviéndose un campo emergente de estudio hasta años más recientes con el desarrollo exponencial de las ciencias computacionales [Szeliski, 2018]. La visión artificial es aplicable en prácticamente cualquier industria que necesite extraer o procesar información del entorno [Morante, 2012]. Esta área del conocimiento estudia la extracción de información de una imagen para hacer que una máquina la codifique o ejecute una determinada tarea con éxito [Saripudin, 2019]. Además, trata de imitar la visión humana, reconociendo patrones, extrayendo características, y haciendo pasar la información de la imagen por distintas capas para la distinción de estas características [Mangkusasmitho, 2018].

La plataforma de entrenamiento que se presenta consta de un prototipo autónomo e interactivo dirigido a estudiantes que cursan asignaturas relacionadas con la inteligencia artificial y sistemas de control en donde es posible programar distintos algoritmos de control y de este modo el usuario puede experimentar y caracterizar controladores PID óptimos para los servomotores que activan el mecanismo cuando se detecta un objeto en movimiento.

2. Métodos

El desarrollo e implementación de la plataforma se realizó en dos etapas. La primera consistió en identificar y fundamentar las necesidades académicas de los

estudiantes y con base a ello se definió la metodología didáctica de la propuesta. En una segunda etapa de desarrollo se diseña la plataforma para que cumpla con los requerimientos establecidos. A continuación, se exponen los elementos más relevantes de estas dos etapas.

La importancia de los laboratorios en las escuelas de nivel superior

Un laboratorio es un espacio equipado con diversos instrumentos donde se realizan experimentos o investigaciones de diversas áreas de las ciencias [Tenreiro, 2016]. Específicamente los laboratorios en las carreras de ingeniería son utilizados como espacios de enseñanza y aprendizaje en donde se comprueban los principios teóricos de los conceptos que son abordados en el aula [Edward, 2016], donde se estudia el comportamiento de algunos fenómenos, así como para desarrollar investigación científica, ya que los laboratorios ofrecen diversos niveles de complejidad en el proceso de aprendizaje [Torres, 2015].

Una plataforma de entrenamiento robótica, entendida como una estación de trabajo interactiva en el que se realizan actividades para promover aprendizajes y en donde se modelan matemáticamente y se simulan situaciones mediante la computadora, favorece a la descripción y caracterización del comportamiento de un fenómeno, así como a la construcción y aplicación de conceptos de las ciencias [Infante, 2014].

En el contexto educativo, existen plataformas basadas en visión artificial diseñadas para el procesamiento de imágenes y son utilizadas en diferentes campos del saber, por ejemplo, el módulo didáctico para el reconocimiento y clasificación de piezas mecanizadas [Navarrete, 2015], donde los estudiantes pueden simular procesos industriales. El detector identifica las piezas que viajan a través de una banda de acuerdo con el color y forma y las coloca en recipientes correspondientes.

En la investigación, se realizó una búsqueda detallada de plataformas creadas en escenarios escolares que identifiquen formas y movimientos. Se encontraron mecanismos autónomos diseñados con la finalidad de proporcionar un espacio a los estudiantes para complementar los aprendizajes áulicos [Manobanda, 2019], [De la Cruz, 2017], [Gutiérrez, 2012], [Cruzado, 2017]. Una de las diferencias relevantes que se identifica entre la plataforma diseñada en la presente

investigación y otros trabajos es que la primera consiste en una plataforma de entrenamiento en donde el estudiante podrá experimentar directamente sobre los algoritmos de control que den cuenta de la respuesta del sistema en el seguimiento de formas con visión artificial detectadas mediante una cámara digital.

La plataforma consta básicamente de dos servomotores, cada uno requiere de un control independiente con que es posible realizar seguimiento horizontal y vertical de los objetos que se colocan frente a la cámara. También consta de un microcontrolador, en este caso fue utilizada una tarjeta Raspberry pi 4 que es el punto medular donde se centra el control del sistema.

La plataforma ofrece la oportunidad al estudiante de interactuar con el controlador que gobierna a cada servomotor, le permite definir las ganancias de cada tipo de control (k_d , k_p , k_i) y argumentar cuál será el PID idóneo para la respuesta del sistema. Para que el estudiante pueda caracterizar el sistema, fue necesario incorporar las herramientas de software MatLab, Simulink y LabView para el análisis del modelo matemático que resulta de su función de transferencia.

Definición de los requerimientos para la plataforma robótica interactiva

Para el diseño del prototipo fue necesario tener en cuenta las necesidades académicas que se pretenden atender. Una vez identificadas, la siguiente etapa de desarrollo fue definir las características del hardware y los requerimientos de software.

Primeramente, se incorporó una cámara matricial para la captura de video, se incluyó software con capacidad de ejecutar funciones de la librería OpenCV [Arévalo, 2012]. Fue necesario una unidad de procesamiento con capacidad para interactuar en su programación, dar soporte a la cámara y controlar los actuadores (motores).

Para el sistema se establecen dos grados de libertad lo que permite el seguimiento basado en la posición del objeto (x , y) con referencia al centro de una imagen 2D, actuadores mediante motores de DC y un mecanismo reductor de velocidad en base al movimiento de los objetos detectados por la plataforma, así como el máximo rango de visión permitido por la integración de los elementos.

Selección del Hardware

Los dispositivos seleccionados para la construcción del prototipo son:

- Raspberry Pi 4 B: Se selecciona esta tarjeta como unidad de procesamiento ya que es un ordenador completo que ejecuta un sistema operativo Linux.
- Cámara CSI: Se utiliza una cámara de 5 MP con salida CSI.
- Actuadores: Dos motores mini-Flanker con relación de salida 35:1, uno responsable de la rotación horizontal de la plataforma y uno de la vertical.
- Driver para motores DC: Puente H dual MX1508 con capacidad de corriente de hasta 1.5A y voltaje de 2V-9V.
- Alimentación: Placa de administración de energía Geekworm Raspberry Pi UPS HAT X708, para darle autonomía y movilidad al sistema.

Diseño y construcción física

Una vez definidos los requerimientos de la plataforma y seleccionado el hardware se realizó el diseño mecánico del prototipo. Se determinó que, para lograr un rango de visión amplio de la plataforma, ésta y todos los elementos de hardware deberían estar sobre una misma base móvil. Se definen el plano de referencia y los grados de libertad, identificando a *yaw* como el grado de libertad para la rotación horizontal, el cual permite a los motores girar la plataforma libremente. Del mismo modo, para dar el grado de libertad *pitch*, se decidió que la cámara sería el único elemento con esta rotación. Cabe señalar que el grado de libertad *roll* no se implementó para este prototipo, siendo una plataforma que solo actúa en dos grados de libertad. Con lo anterior se dividió el diseño CAD en tres partes principales: La base fija sobre la que se instala todo el prototipo, la base móvil para la tarjeta Raspberry y la base superior para el montaje de la cámara.

El diseño mecánico de la base fija se muestra en la figura 1. En su centro cuenta con un rodamiento 6204, que permite su ensamble con la base móvil inferior para que esta pueda rotar (*yaw*).

La base inferior de la figura 2 se ensambla a la parte exterior del rodamiento 6204, la cual cuenta con una cobertura para asegurar el motor a la base atornillándola por la parte inferior, los cuatro postes son el soporte de los separadores mecánicos para

la Raspberry y la estructura vertical de mayor altura es el soporte para la batería de alimentación del sistema.

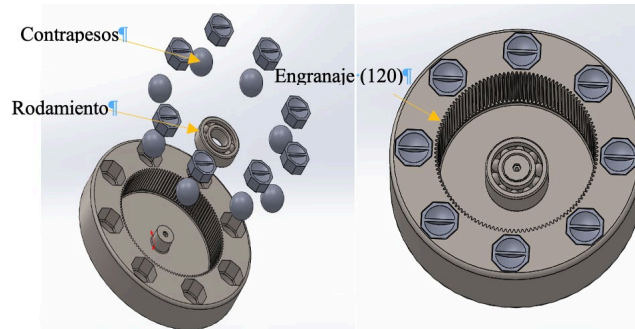


Figura 1 Base fija.

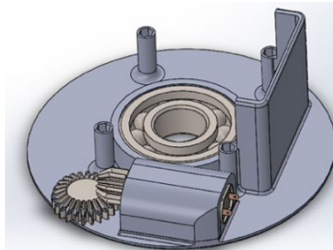


Figura 2 Base móvil inferior.

En la figura 3 se muestra la base superior, que se ensambla por encima de la tarjeta de distribución de potencia, esta cuenta con una caja de engranes compuesta de 4 ejes de rotación, que por las relaciones de transmisión de movimiento constituye un reductor 10:1, manteniendo una relación 350:1 del eje de la cámara con respecto al eje del motor. Esta base deja al descubierto y accesibles los puertos GPIO de la Raspberry.

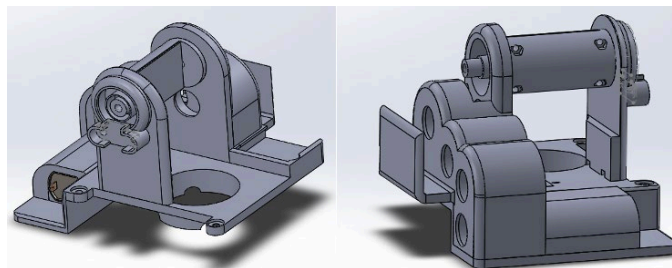


Figura 3 Base superior.

Controlador para los motores DC

Para describir electromecánicamente el controlador de los motores DC, se considera el circuito equivalente de un motor de corriente directa como el que se muestra en la figura 4.

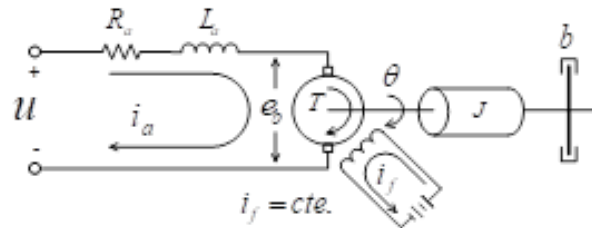


Figura 4 Circuito equivalente de un motor de corriente directa.

Siendo las ecuaciones 1 y 2 la representación en variables de estado del sistema del motor de CD.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega r(t)}{dt} \\ \frac{di_a(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega r(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} TL \quad (1)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega r(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

- R_a : Resistencia de armadura, en Ohms
- L_a : Inductancia de armadura, en Henrios
- K : Constante del par motriz
- b : Coeficiente de rozamiento viscoso, en N-m/rad/s
- J : Momento de inercia del rotor y carga, kg-m²
- K_b : Constante de fuerza contraelectromotriz

Técnica de detección de formas

La plataforma consta de un sistema de visión, conformado por una cámara digital y una unidad de procesamiento encargada de la detección de características (color, forma) a partir de la representación matricial de la imagen capturada por medio de algoritmos de visión artificial. Esta unidad permite la programación de un controlador

discreto que interactúa por medio de puertos de entrada/salida digital para manipular la posición de la cámara por medio de dos servomecanismos, cada uno con un control independiente, con los que se podrá hacer seguimiento vertical y horizontal de una forma captada por la cámara.

Para la detección de formas se utilizó el principio de segmentación por color. El programa utiliza la librería de software libre OpenCV [Arévalo, 2012], para establecer distintas máscaras de color con base a un vector numpy, y el modelo de color HSV. La detección de contornos y el cálculo del centro del objeto se hace por medio del método `findContours`, de la misma librería OpenCV.

Construcción de la plataforma

Se obtiene el prototipo físico de la plataforma por medio de impresión 3D. Las primeras piezas impresas se utilizan como prueba para ajustar parámetros como la expansión horizontal, ya que para los rodamientos fue necesario ajuste de precisión para que se logre un ensamble a presión, sin tensar las piezas y provocar alguna fractura. La plataforma completamente ensamblada se muestra en la figura 5.

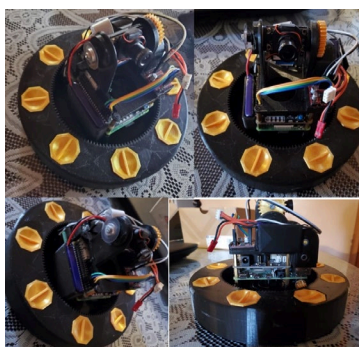


Figura 5 Plataforma funcional terminada.

Diseño del controlador digital para los motores CD

El prototipo cuenta con dos motores de CD, uno para girar verticalmente la cámara y otro para posicionar la cámara mediante giro horizontal. Los motores son iguales, lo que los diferencia son sus parámetros mecánicos.

El diseño de un controlador digital se realizó por emulación, primero se partió del diseño de un controlador continuo, posteriormente se seleccionó el periodo de

muestreo, para en seguida determinar su equivalente discreto al sustituir en él al controlador continuo.

3. Resultados

El prototipo funcional fue evaluado en laboratorio. Se diseñó una práctica donde estudiantes debían caracterizar distintos algoritmos de control y definir el ideal para realizar el seguimiento de alguna forma detectada por la cámara digital. Para esto, el estudiante debía identificar los parámetros de los motores y a partir de esta información diseñar un controlador discreto óptimo para el sistema.

A continuación, se describe las diferentes etapas de estimación de parámetros eléctricos y constantes mecánicas que desarrolló una estudiante del noveno semestre de la carrera de Ingeniería Electrónica. Es importante señalar que la metodología de análisis fue establecida por la estudiante, el papel del profesor fue de facilitador.

El punto de partida del análisis que realiza la estudiante fue determinar la resistencia de armadura R_a . Para esto realizó pruebas a rotor bloqueado, técnica que consiste en aplicar una tensión de entrada reducida y bloqueando el rotor, posteriormente realiza mediciones de la corriente y tensión aplicados obteniendo de 120 mA y 0.53 V respectivamente y calculando así la resistencia de armadura $R_a = 4.41 \Omega$.

Para determinar el valor de la inductancia de armadura, L_a , utilizó un puente medidor de inductancias, directamente en las terminales del motor, obteniendo una inductancia de armadura $L_a = 310 \mu H$. Para determinar el valor de la constante de fuerza contra-electromotriz K_b , realizó la medición de tres variables: el voltaje de armadura, la corriente de armadura y la velocidad angular en rad/seg. La tabla 1 muestran los valores obtenidos para diferentes voltajes de armadura.

Tabla 1 Variables medidas en el motor.

Voltaje de armadura (V)	Corriente de armadura (mA)	Frecuencia de encoder (Hz)	Velocidad angular (RPM)	Velocidad angular (rad/s)
2	129	906	162	16.96460
3	144	1455	261	27.33185
4	154	2030	364	38.11799
5	167	2600	467	48.90412
6	173	3100	557	58.32890

Utilizando los valores de la tabla 1, determinó la constante K_b mediante las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} = -K_b \omega r(t) - R_a i_a(t) + u(t) \quad (3)$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$K_b = \frac{u - R_a i_a}{\omega r} \quad (5)$$

Considerando los valores del último renglón de la tabla 1, determinó el valor de la constante de fuerza contraelectromotriz, $K_b = 0.089785$.

Un resultado interesante para la investigación fue que para estimar el resto de los parámetros del modelo la estudiante construyó un instrumento virtual empleando el software de LabView, el diagrama se muestra en la figura 6. La figura 7 muestra la gráfica de la respuesta de la velocidad angular del motor utilizando una frecuencia de muestreo $f_s=1000$ Hz, un pulso de tensión de entrada de 5 V y procesando 10,000 muestras mediante una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008.

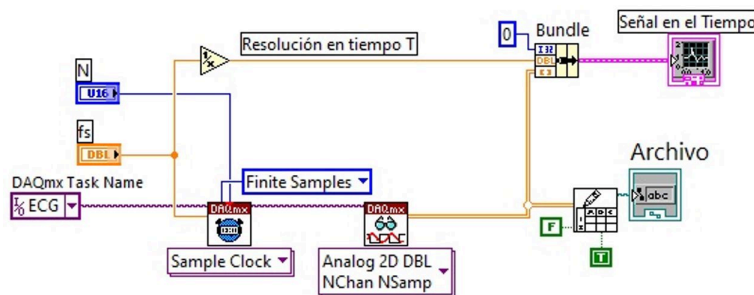


Figura 6 Instrumento virtual de LabView para adquirir datos del motor.

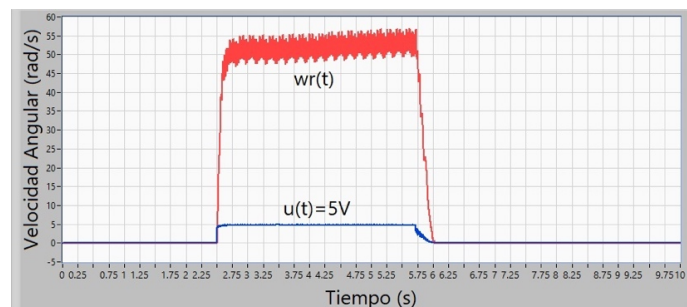


Figura 7 Respuesta de velocidad angular del motor para una entrada escalón de 5V.

Posteriormente, establece la función de transferencia del motor, ecuación 6, utilizando el MatLab y las señales de entrada y salida registradas en un archivo de datos, con una aproximación del 94.34%, y una función de transferencia de primer orden, ecuación 7, con una aproximación del 94.1%.

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{16790}{s^2 + 83.62s + 1729} \quad (6)$$

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{197.2}{s + 20.28} \quad (7)$$

La estudiante estima los parámetros de la ecuación de transferencia de los motores. Una vez definidos, diseña la simulación del motor en lazo abierto, como se muestra en la figura 8.

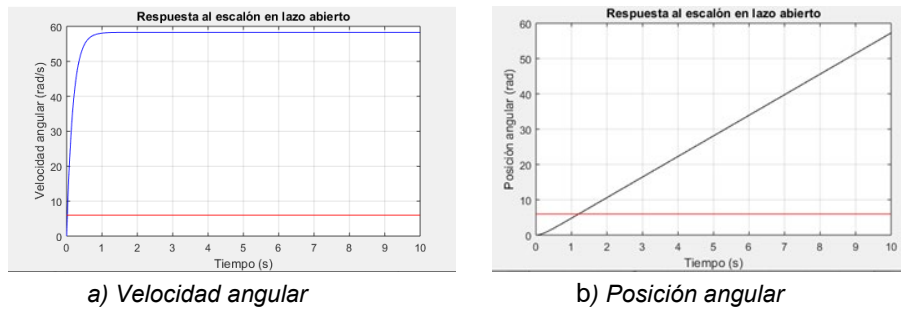


Figura 8 Respuesta del sistema para un escalón de 6 voltios.

Para simular y sintonizar el sistema en lazo cerrado con controlador PID, se utilizó el programa Simulink de MatLab figura 9. En esta simulación se consideró inicialmente el bloque PID con $K_p = 8$, $K_i = 0.5$ ($T_i = 2$) y $K_d = 1$. El resultado de la simulación se muestra en la figura 10 y corresponde al sistema de control de posición vertical de la cámara.

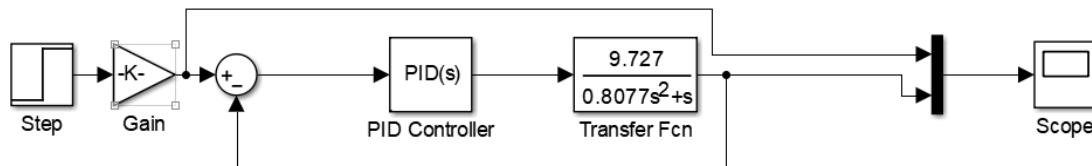


Figura 9 Sistema en lazo cerrado con controlador PID.

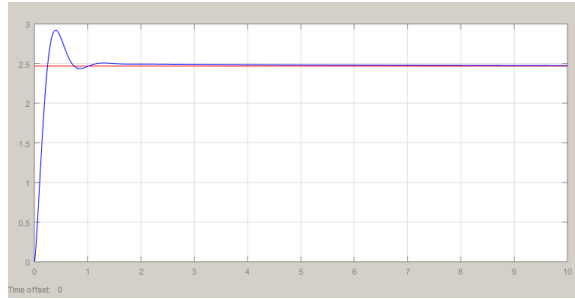


Figura 10 Simulación del sistema de posición en lazo cerrado, con controlador PID.

Para sintonizar el sistema en lazo cerrado, seleccionó la opción de Tune dentro del bloque del controlador PID, dando como resultado unos valores recomendados de $K_p = 0.2658$, $T_i = \frac{1}{K_i} = \frac{1}{0.07649} = 13.07$ y $T_d = 0.1611$. La simulación se muestra en figura 11. Para verificar el desempeño del controlador PI, y del controlador PD, en el seguimiento de una trayectoria distinta a un escalón, se simuló la respuesta a una rampa de subida y de bajada, como se muestra en la figura 12.

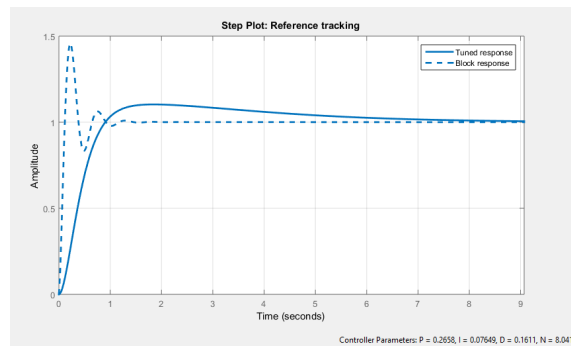


Figura 11 Sintonización del sistema en lazo cerrado con controlador PID.

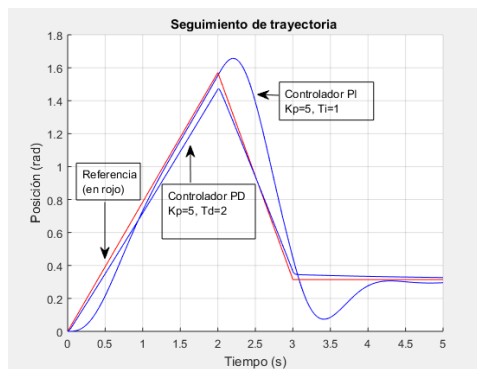


Figura 12 Seguimiento de trayectoria con controlador PI vs controlador PD.

En la figura 13 se muestra la respuesta del sistema de seguimiento de formas, utilizando controladores PID en ambos motores.

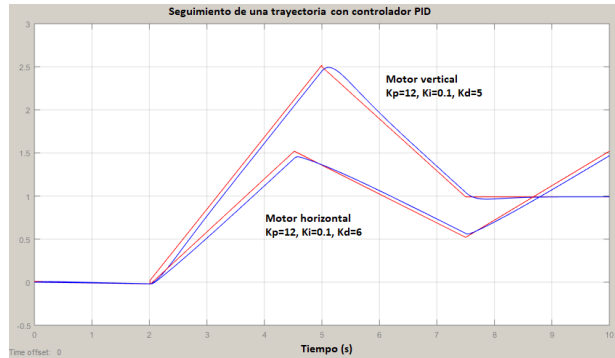


Figura 13 Seguimiento vertical y horizontal de forma.

Puesto que el control PID será implementado en un procesador digital, se hace necesario obtener una ecuación discreta equivalente del controlador PID continuo. La función de transferencia discreta que describe al controlador PID, ecuación 8.

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_P + \frac{K_I}{1 - Z^{-1}} + K_D(1 - Z^{-1}) \quad (8)$$

En donde, si se utiliza un periodo de muestreo T, tenemos que las constantes del controlador discreto, en función de las constantes del controlador continuo, ecuaciones 9, 10 y 11.

$$K_P = K_p - \frac{K_p T}{2T_i} = \text{ganancia proporcional} \quad (9)$$

$$K_I = \frac{K_p T}{T_i} = \text{ganancia integral} \quad (10)$$

$$K_D = \frac{K_p T_d}{T} = \text{ganancia derivativa} \quad (11)$$

A partir de ecuaciones anteriores es posible obtener la ecuación en diferencias (en el tiempo discreto), necesaria para programar el controlador en el procesador digital, ecuación 12.

$$m(k) = (K_P + K_I + K_D)e(k) - (K_P + 2K_D)e(k - 1) + K_D e(k - 2) + m(k - 1) \quad (12)$$

Para discretizar el compensador y obtener un modelo discreto confiable y estable utilizó la transformación bilineal o regla de Tustin. La función de transferencia para el servomotor vertical es la ecuación 13.

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{4.711 - 2.94z^{-1}}{1 - 0.7241z^{-1}} \quad (13)$$

A partir de la función de transferencia discreta dada por la ecuación 13 se obtiene la ecuación en diferencias, ecuación 14, con la que se programó el compensador en el procesador digital.

$$m(k) = 4.711e(k) - 2.94(k - 1) + 0.7241m(k - 1) \quad (14)$$

Al hacer la simulación del sistema en lazo cerrado con el compensador discretizado se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 14.

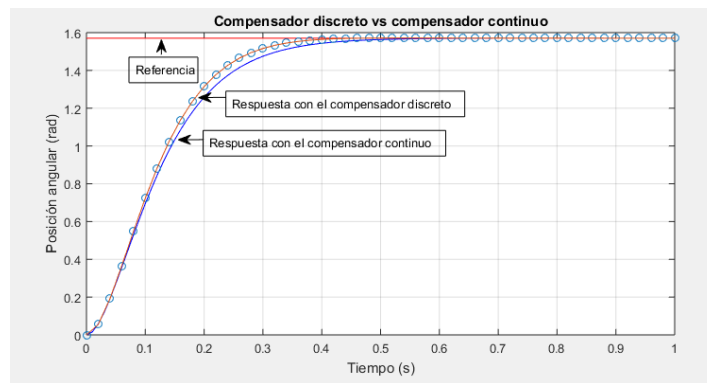


Figura 14 Respuesta del sistema al compensador discreto vs compensador continuo.

Para el caso del motor de giro horizontal, el procedimiento de diseño es idéntico y su función de transferencia discreta está dada por la ecuación 15.

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{26.95 - 24.12z^{-1}}{1 - 0.7241z^{-1}} \quad (15)$$

A partir de la función de transferencia discreta dada por la ecuación 15 se obtiene la ecuación en diferencias, ecuación 16.

$$m(k) = 26.95e(k) - 24.12e(k - 1) + 0.7241m(k - 1) \quad (16)$$

La estudiante desarrolla un algoritmo en Python y crea registros de memoria que guardan las salidas y errores anteriores para contrastarlos con los resultados

obtenidos en sus simulaciones. La etapa final de análisis fue en la plataforma funcional y consistió en programar los diferentes controladores PID y observar la respuesta del sistema cuando se colocó un objeto en movimiento frente a la cámara. Los resultados del experimento se muestran en la figura 15.

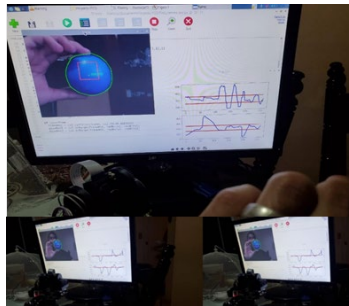


Figura 15 Experimentos sobre distintos controladores implementados en código.

La estudiante concluye que en las simulaciones con el controlador PID, observó que, para el seguimiento de posición, un controlador PI no muestra un buen desempeño. El mejor desempeño fue el del controlador PD o un controlador PID con una ganancia integral mínima.

4. Discusión

Los elementos utilizados en este prototipo permiten al estudiante mejorar y ampliar la usabilidad del prototipo, el procesador utilizado y en sí el sistema operativo Linux con el que cuenta. Facilita la implementación de controles distintos que requieran de mayor procesamiento, o bien, utilizar sensores y dispositivos con distintas interfaces de acuerdo con los GPIO de la Raspberry Pi 4B e incorporar estas variables como un sistema más complejo.

Se obtuvo un resultado satisfactorio, sentando las bases con esta plataforma para el futuro desarrollo de prácticas donde los estudiantes implementen conceptos prácticos en situaciones reales presentes en el ámbito industrial.

En cuanto a los objetivos del proyecto, tal como se estableció en el objetivo general de la investigación, se diseñó, desarrolló e implementó una plataforma robótica fija basada en visión artificial, capaz de identificar diversas formas y realizar el

seguimiento mediante algoritmos de control mientras éstas se mueven. Con esta propuesta los estudiantes que cursan las asignaturas relacionadas con estas áreas de la ingeniería podrán observar, demostrar y experimentar los conceptos involucrados en el diseño de algoritmos de control y visión artificial para el seguimiento de formas.

En la investigación se consideró diseñar el prototipo desde la selección del hardware más adecuado hasta el diseño de la parte mecánica para su óptima funcionalidad, pasando por la caracterización del sistema para establecer la estrategia de control idónea. Se diseñó la estructura física del prototipo pieza a pieza y se revisó y ajustó su acoplamiento hasta lograr su montaje.

5. Conclusiones

Los resultados que la investigación aportan al terreno escolar en el área de control e inteligencia artificial es una metodología de diseño que permite a los estudiantes aplicar los conceptos tratados en el aula. El prototipo provee a las instituciones públicas de una alternativa que puede ser incorporada en los laboratorios ya que resultó una plataforma funcional y accesible que permite generar actividades en el contexto de laboratorio escolar.

De manera particular, los resultados que se reportan respecto al desempeño de la estudiante son enriquecedores para la investigación, ya que el planteamiento inicial que se le hizo fue que caracterizara el algoritmo de control óptimo para el sistema y se destaca que la estudiante estableció su metodología de análisis a partir de caracterizar la respuesta de los servomotores y así establecer la función de transferencia discreta del sistema. De esta manera es posible observar que la propuesta promueve la construcción de saberes, la construcción y puesta en escena de diferentes competencias que posee la estudiante mediante la experimentación con la plataforma. El porcentaje de confiabilidad del modelo matemático obtenido por la estudiante es mayor al 90%, lo que se considera aceptable. Es destacable también la importancia de las competencias que mostró la estudiante en el uso de herramientas complementarias como el LabView, MatLab y Symulink para la simulación de los modelos matemáticos obtenidos.

Se concluye también que la plataforma resulta útil para la promoción de aprendizajes relacionados con la aplicación de conceptos matemáticos en áreas como inteligencia artificial, visión artificial y sistemas de control ya que resulta indispensable generar modelos que permitan obtener los resultados esperados.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Arévalo V. M., González, J. & Ambrosio G. La librería de visión artificial opencv aplicación a la docencia e investigación, Dpto. De Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga. Madrid, España. 2012.
- [2] Barrera V. F. y Guapi A. La importancia del uso de las plataformas virtuales en la educación superior. *Revista Atlante*, No.1, 50-57, 2018.
- [3] Benítez, R., Escudero, G., Kanaan, S. y Rodó, D. M. Inteligencia artificial avanzada. Universidad Oberta Católica, Cataluña, España. 2014.
- [4] Cruzado, Y. A. Diseño de un módulo didáctico basado en visión artificial para la inspección de productos según su forma, color y/o dimensiones geométricas. Universidad Nacional de Trujillo. La libertad, Perú. 2017.
- [5] De La Cruz, A., Donoso, J., Gonzales, O. and Soto, R. Implementation of a classifier didactical machine for learning mechatronic processes, *Enfoque UTE*, Vol. 8, No. 3, 41 – 55, 2017.
- [6] Edward, N. S. The role of laboratory work in engineering. *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 39, No.1, 11-19, 2016.
- [7] Gutiérrez, J., Martínez, E., Peña, C. A. Development of a Training Module for Parallel Robotic and Artificial Vision with a Universal Gripper System. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*, Vol.1, No. 2, 74-80, 2013.
- [8] Infante, C. Propuesta pedagógica para el uso de laboratorios virtuales como actividad complementaria en las asignaturas teórico-prácticas. *Revista Mexicana de investigación Educativa*, Vol. 19, No. 62, 917-937, 2014.
- [9] Mangkusasmitho, F. T., Nugroho, B. R. Trilaksono and Indriyanto, T. Visual servo strategies using linear quadratic Gaussian (LQG) for Yaw-Pitch camera platform, 2018 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys), Bali, Indonesia. 2018.

- [10] López, A. M., Tamayo, Ó. E. Las Prácticas de Laboratorio en la Enseñanza de las Ciencias Naturales. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos* (Colombia), Vol. 8, No. 1, 145-166, 2012.
- [11] Manobanda, L. M. Implementación de un prototipo de máquina clasificadora y contadora de monedas basada en visión artificial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 2019.
- [12] Morante, C. S. Interfaz y librería para visión artificial, navegación y seguimiento en robótica, Tesis de grado, Dpto. de ingeniería en sistemas y automática, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España. 2012.
- [13] Navarrete F. R. Módulo didáctico para reconocimiento y clasificación de piezas mecanizadas mediante visión artificial. Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. 2015.
- [14] Rodríguez, J., Leyva, M. A. & Hernández, J. La Reforma de la Educación Superior en México, Entre la Espada y la Pared. *La Mirada de los Universitarios*. Polis, Vol.16, No. 1, 7-31, 2020.
- [15] Rua, A. M. L. y Alzate, Ó. E. T. Las Prácticas de Laboratorio en la Enseñanza de las Ciencias Naturales. *Revista Latinoamericana en Educación*, Vol. 8, No. 1, 145–166, 2012.
- [16] Saripudin, M. O. Asali, T. Indriyanto, T. y Trilaksono, B. R. Visual Servoing Using Mixed Sensitivity H_∞ Control for Yaw-Pitch Camera Platform. *IEEE, International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)*, No. 1, doi: 10.1109/ICAIIIT.2019.8834610, 48–53, 2019.
- [17] Szeliski, R. *Computer vision: Algorithms and applications*. Springer-Verlag New York Inc. Systems (ICSigSys), No. 1, 146-150, 2018.
- [18] Tenreiro, C., y Marques, R. Diseño y validación de actividades de laboratorio para promover el pensamiento crítico de los alumnos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, Vol. 3, No. 3, 452-466, 2016.
- [19] Torres, S. & Martínez, E. Laboratorio virtual de matemáticas como estrategia didáctica para fomentar el pensamiento lógico. *Revista Academia y Virtualidad*, Vol. 8, No. 2, 73-84, 2015.