

Tipo de artículo: Artículo original

Control adaptativo de un motor trifásico para equipo de carga pesada empleando filtro Kalman

Three-Phase motor's Adaptive Control for heavy-duty equipment using Kalman filter

Jorge Humberto Vázquez Leiva ^{1*} , <https://orcid.org/0000-0002-7201-5514>

Alexander Peláez Llano ² , <https://orcid.org/0009-0003-3983-7713>

José Ernesto Vargas Fernández ³ , <https://orcid.org/0000-0003-4897-1618>

¹ Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”. Cuba. jhvazquez92@gmail.com

² Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”. Cuba

³ Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”. Cuba

* Autor para correspondencia: jhvazquez92@gmail.com

Resumen

Las plataformas giratorias para equipos de carga pesada existentes en el país datan de la década del 70 y utilizan sistemas de control basados en electrónica obsoleta. Después de tantos años de explotación, estos sistemas requieren cambios para adaptarse a las tecnologías actuales y satisfacer las demandas de precisión de los equipos modernos. Este estudio aborda la carencia de infraestructura para reemplazar estos sistemas de rotación, proponiendo la aplicación de la metodología de Identificación de Sistemas para obtener un modelo matemático que permita el diseño óptimo del elemento de control. Se implementa esta metodología para controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico junto con un variador de frecuencia, desarrollando una estructura donde la sintonización adaptativa de un controlador Proporcional Integral y Derivativo (PID) con filtro Kalman se realiza mediante un dispositivo digital programable ajustado según los resultados del análisis. La investigación emplea métodos científicos teóricos, empíricos y estadísticos, demostrando que los impactos se relacionan con la vitalidad, movilidad, reducción del consumo energético y aumento de la confiabilidad del sistema. Los resultados podrían aplicarse en equipos que empleen motores de corriente continua como elementos actuadores.

Palabras clave: Control adaptativo; filtro Kalman; variador de frecuencia

Abstract

The rotary platforms for heavy-duty equipment in the country date back to the 1970s and utilize control systems based on outdated electronics. After years of operation, these systems require updates to align with current technologies and meet the precision demands of modern equipment. This study addresses the lack of infrastructure to replace these rotation systems, proposing the application of System Identification methodology to obtain a mathematical model enabling optimal design of the control element. This methodology is implemented to regulate the speed of a three-phase induction motor alongside a frequency converter, establishing a framework where adaptive tuning of a Proportional Integral and Derivative (PID) controller with Kalman filter is executed through a programmable digital device adjusted based on analysis outcomes. The research employs theoretical, empirical, and statistical scientific methods, demonstrating impacts related to system vitality, mobility, energy consumption reduction, and enhanced reliability. The findings could be applicable to equipment utilizing DC motors as actuating elements.

Keywords: Adaptive control; Kalman filter; frequency converter



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional**
(CC BY 4.0)

Recibido: 17/03/2024
Aceptado: 20/05/2024
En línea: 28/05/2024

Introducción

Las plataformas pesadas giratorias son utilizadas en una variedad de aplicaciones tales como la manipulación de materiales, el transporte de cargas y la realización de tareas de construcción. Estos sistemas cumplieron satisfactoriamente su función, pero la reparación y mantenimiento se encarecen cada día más debido a la tecnología obsoleta que poseen, tal situación hace necesaria la modernización de dichas estructuras de control. Los principales cambios tecnológicos realizados consisten en la utilización de motores de corriente alterna (CA) asincrónicos en conjunto con variadores de frecuencia (MCA-VF/V), lo cual constituye una solución de uso muy extendido en los últimos años (Cinselmatic, 2004). La técnica mencionada permite una consiguiente actualización tecnológica y aumento de la eficiencia energética de los procesos industriales; pero ha tenido como principal problema la incapacidad de que el controlador cumpla con las exigencias necesarias del medio donde se implementan.

Una solución viable es implementar una estrategia de control Proporcional Integral y Derivativo (PID) adaptativo que permita más robustez y tolerancia a errores con respecto a los métodos de control convencionales. Esto se logra mediante el ajuste automático ante cambios en el medio, lo cual posibilita su funcionamiento estable, incluso en presencia de eventos inesperados en las condiciones de trabajo (Cinselmatic, 2004). Para ello se hace necesario la obtención de un modelo que describa el comportamiento complejo de las estructuras electromecánicas (Mir TN et al., 2022). Actualmente un volumen importante de investigaciones se ha orientado hacia la búsqueda de modelos que permitan llegar a la implementación de controladores para cumplir los requisitos técnicos en las innovaciones industriales (Ju Y. et al., 2021).

En la identificación de sistemas, existen tres tipos de modelos matemáticos para obtener la función de transferencia de un sistema, estos son: modelos de caja blanca, modelos de caja negra y modelos de caja gris. En este caso es conveniente aplicar metodología de caja negra, porque es un elemento que se estudia desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce, sin tener en cuenta su funcionamiento interno. En otras palabras, de un modelo de caja negra interesa su forma de interactuar con el medio que le rodea (en ocasiones, otros elementos que también podrían ser modelos de este tipo) entendiendo qué es lo que hace, pero sin dar importancia a cómo lo hace. Por tanto, de una caja negra deben estar muy bien definidas sus entradas y salidas, en cambio, no se precisa definir ni conocer los detalles internos de su funcionamiento (Schoukens J et al., 2019).



En la revisión de la literatura actualizada se parte de la aplicación de la metodología de identificación de sistemas para obtener la función de transferencia mediante mediciones de parámetros (Mir TN et al., 2022; Ju Y. et al., 2021; Schoukens J et al., 2019; Normey J et al., 2007). Algunos estudios tratan la inclusión de un controlador difuso para lograr la parada precisa del motor en una posición angular dada (Mir TN et al., 2022). En otra investigación es propuesto un controlador autoadaptable se propone un esquema de control de posición, velocidad y par del servomotor de CA basado en micro controladores para solucionar problemas como velocidad de procesamiento lenta, baja sincronización e integración (Ju Y. et al., 2021). Por otra parte en (Schoukens J et al., 2019; Normey J et al., 2007) se supera la adaptabilidad del controlador PID convencional mediante estimación de parámetros basado en predictor de Smith y filtro Kalman (Kalman RE, 1960), que se ha convertido en una herramienta clave para implementar el control adaptativo, porque permite estimar los parámetros del sistema de manera eficiente y en tiempo real. Este diseño, originalmente propuesto por Rudolph Emil Kalman en 1960, ha sido ampliamente utilizado en diversas aplicaciones de control y monitoreo de sistemas (Sánchez S et al., 2010; Díaz AM, 2012; Sánchez S et al., 2010).

Se puede observar que en (Sánchez S et al., 2010), se presenta un controlador adaptativo que utiliza el filtro Kalman para controlar la velocidad de un motor de inducción. Este trabajo muestra cómo esta técnica puede ser utilizada para estimar los parámetros del sistema y mejorar el desempeño del controlador. Por otra parte en (Díaz, 2012) se describe una variante lineal variable basada en cuaterniones para la unidad de control de un automóvil. Esta investigación muestra cómo el filtrado puede ser utilizado para estimar el estado del sistema y mejorar la precisión del control. Se presenta en (Sánchez S et al., 2010) un sistema de detección de fallas para un motor CA, este estudio aborda cómo el filtro de Kalman puede ser utilizado para detectar fallas en el sistema y mejorar la disponibilidad del mecanismo.

El éxito de las investigaciones anteriormente citadas, demuestra que es posible aplicar esta técnica para dar solución a la problemática existente. Por ello, el objetivo fundamental de este trabajo es el diseño de un sistema de control adaptativo basado en filtro Kalman para las plataformas antes citadas. Este enfoque busca mejorar la eficiencia, precisión y confiabilidad de estas plataformas al implementar un sistema de control que se ajuste dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno. La implementación se llevará a cabo en un dispositivo lógico programable, lo que permitirá una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a futuras necesidades y mejoras en estos sistemas.



Materiales y métodos

En la Figura 1 se observa un diagrama de bloques que permite ilustrar cada una de las etapas y los componentes que constituyen el sistema de control de velocidad para un motor de inducción trifásico. La función de cada elemento dentro del sistema es explicada posteriormente.



Figura 1. Diagrama de bloques para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico.

- **Variador de frecuencia:** Dispositivo encargado de realizar la conversión entre la señal de control (0 Volts [V] -10V) y los niveles de tensión y corriente entregados al motor. El dispositivo de actuación empleado corresponde con un variador de velocidad de marca Eurotherm y referencia 601 diseñado para controlar motores de inducción trifásicos.
- **Motor (M):** Constituye el elemento final de control o planta, corresponde con un motor de inducción trifásico SIEMENS de 3 caballos de fuerza [por sus siglas en inglés: hp] con velocidad nominal de 2000 revoluciones por minuto [rpm] ó 60 Hertz [Hz].
- **Perturbación:** Torque constante aplicado en el rotor del motor que permitirá verificar el efecto de la acción del control de velocidad.
- **Sensor:** Dispositivo encargado de realizar la conversión entre la variación angular del rotor (velocidad) y las señales eléctricas entregadas a los controladores.

- **Controlador:** Se implementó la estrategia de control adaptativo diseñada en una tarjeta FPGA DE0 NANO de ALTERA.

Desarrollo de la metodología de obtención del modelo matemático de caja negra correspondiente

Es preciso señalar que para las pruebas se adoptó el método científico-experimental (Montgomery DC, 2013). Durante el diseño de experimento y recolección de los datos, se determinó como rendimiento o variable dependiente la velocidad de rotación del motor ($\omega(rpm)$), la cual es calculada en la práctica por el FPGA, siendo definida en la ecuación (1) como la razón entre la cantidad de pulsos y el tiempo entre flancos (t_f) en que fueron obtenidos. Para ello se debe conocer la frecuencia con que el sistema de sensado percibe los 4 flancos de las aspas en una revolución. Posteriormente se hace la respectiva equivalencia a minutos.

$$\omega(rpm) = \frac{1}{4t_f} 60 \quad (1)$$

El factor experimental o variable independiente es la tensión de entrada (V), el cual tiene valores o niveles entre 0 y 10 V. La unidad experimental la constituye el sistema en estudio. Con la asignación antes planteada, se diseñó un experimento del tipo unifactorial completamente al azar, este se aplica cuando se quiere investigar la influencia de un solo factor, a varios niveles, en un rendimiento. Para que sea factible la aplicación de este diseño debe existir homogeneidad entre las unidades experimentales (Montgomery DC, 2013). El tiempo de muestreo de los datos estará en función de la máxima frecuencia generada por el sensor, que será la correspondiente al máximo valor de $\omega(rpm)$, y equivale a 120 Hz, por ello cumpliendo con el Teorema de Muestreo (Shannon CE, 1949), se muestreó a 250 Hz, equivalente a 4 milisegundos (ms).

El procesamiento de los datos se realizó con la ayuda de la herramienta STATGRAPHICS Centurión XV (Statgraphics, sin fecha). Con esta se obtuvo la relación matemática entre la variable de entrada y la de salida y se realizó el análisis de regresión simple. La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre $\omega(rpm)$ y V . La ecuación del modelo ajustado es:

$$\omega(rpm) = 77.4242 + 192.903 * V \quad (2)$$

El nivel de significancia (valor-P) es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula (Statgraphics, 2022), que en este caso es la influencia del voltaje de entrada en la velocidad de rotación del motor, en la tabla de análisis de varianza el valor - P toma un valor menor que 0.05, por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre $\omega(rpm)$ y



V con un nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado influye en el 99.9996% de la variabilidad en $\omega(rpm)$. El coeficiente de correlación es igual a 0.999998, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 1.30478. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. El error absoluto medio (MAE) de 0.944353 es el valor promedio de los residuos. Puesto que el valor -P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%.

La recolección de los datos arroja los resultados mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la recolección de datos

| Tensión de Entrada (V) | $\omega(rpm)$ | | |
|---------------------------|---------------|------------|-------------|
| | Réplica I | Réplica II | Réplica III |
| 0 | 77 | 77 | 77 |
| 1 | 270 | 270 | 270 |
| 2 | 463 | 463 | 463 |
| 3 | 656 | 654 | 656 |
| 4 | 849 | 850 | 848 |
| 5 | 1040 | 1042 | 1040 |
| 6 | 1235 | 1234 | 1235 |
| 7 | 1428 | 1428 | 1430 |
| 8 | 1621 | 1620 | 1621 |
| 9 | 1814 | 1815 | 1816 |
| 10 | 2007 | 2005 | 2003 |

Durante este paso se pudo determinar la relación entrada/salida mostrada en la Figura 2, con la cual se puede observar la inexistencia de valores indeseados, por lo que no es preciso aplicar técnicas de filtrado de los datos. Para la determinación de la estructura del modelo, se deben decidir dos cuestiones fundamentales, la primera es determinar si el sistema es lineal o no y la segunda, verificar su carácter dinámico. La linealidad del sistema se observa claramente tanto en la ecuación del modelo ajustado (2) como en la representación gráfica, no obstante con la ayuda de la herramienta STATGRAPHICS Versión: Centurion XV, se comprueba mediante la comparación de modelos alternos que es 100% lineal.



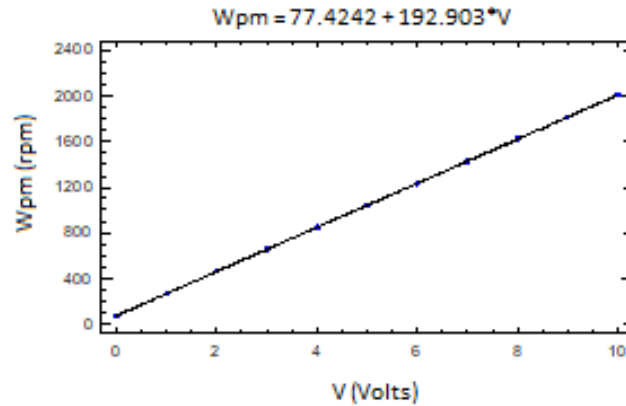


Figura 2. Gráfico del modelo ajustado obtenido mediante procesamiento de los datos.

Mediante la ayuda del toolbox IDENT de MATLAB®(MathWorks, sin fecha) (System Identification Toolbox) fue determinada la respuesta dinámica del sistema ante un estímulo de tipo paso escalón con valor deseado de 200. La Figura 7 ilustra la curva de respuesta ante un cambio instantáneo en el valor de referencia desde el reposo para establecerse en 200 rpm. De la gráfica se observa como la constante de tiempo del sistema (tiempo en que se alcanza el 62.8% del valor final) es aproximadamente 0.4s.

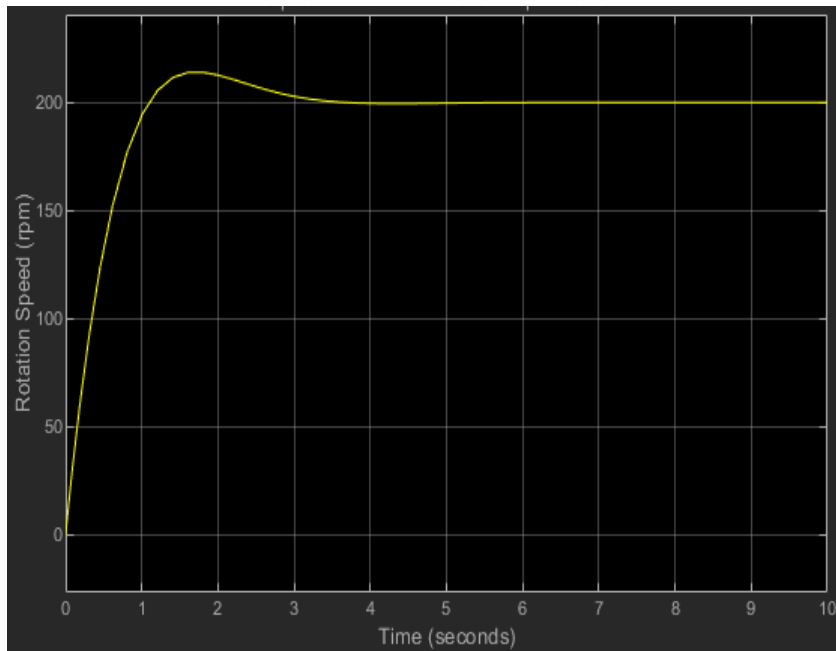


Figura 3. Respuesta del sistema ante un paso escalón a lazo abierto.

Se procede a realizar la estimación de parámetros del sistema, en ocasiones se emplean modelos de obtención mediante respuesta al paso escalón, que constituyen métodos determinísticos, dado que dicha señal lo es y no se consideran fuentes aleatorias en la descripción del proceso. Otro método se denomina: Determinación de valores característicos, estos constan de variedades según las características del sistema a modelar y constituyen modelos exploratorios previos para aplicar modelos de estimación y validación de alto orden, que se basan en señales de entrada del tipo secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS por sus siglas en inglés) de máxima longitud (Pérez M et al., 2023).

Para la estrategia de control adaptativo pensada se hace necesario estimar el modelo de espacio de estados del sistema (Pérez M et al., 2023), el cual se determinó con el anteriormente citado toolbox IDENT, el resultado es de un error medio cuadrático de 0.01525 y un porcentaje de ajuste de 99.24%, que es un buen valor de ajuste, puesto que un porcentaje favorable de ajuste debe superar el 75% (Pérez M et al., 2023).

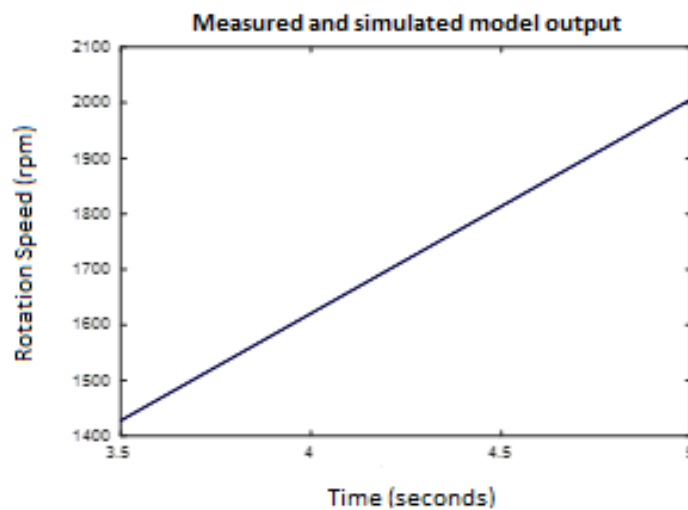


Figura 4. Salida del modelo de espacio de estados simulado y medido.

La estructura general del modelo en espacio de estados está dada por la ecuación de estados (3) y la ecuación de salida (4):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{3}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{4}$$

Donde:

A: matriz de transición del sistema,

B: matriz de entrada,



C: matriz de salida,
u: señal del control.

El modelo en espacio de estados obtenido del sistema en cuestión es de orden 1, donde x representa a la posición del eje del motor y su primera derivada (\dot{x}) a la velocidad angular. Las matrices que conforman el modelo de espacio de estados obtenido se muestran en (5), (6) y (7) respectivamente.

$$A = -1.02 \tag{5}$$

$$B = -6.393 * 10^{10} \tag{6}$$

$$C = 6.067 * 10^{-11} \tag{7}$$

Partiendo del modelo en espacio de estados identificado, el toolbox antes citado, permite calcular la función de transferencia correspondiente. Esto se logra a través de la transformación del modelo de espacio de estados a la forma de función de transferencia, lo cual facilita el diseño y sintonización de controladores como el PID adaptativo propuesto en esta investigación. Esta herramienta ofrece diversas técnicas de identificación, como la estimación de parámetros por mínimos cuadrados, que permiten obtener un modelo preciso y robusto del sistema. De esta manera, se obtiene un modelo matemático en forma de función de transferencia, como se observa en (8).

$$H(s) = \frac{s+4.8986}{s+1.02} \tag{8}$$

Estimación de parámetros empleando filtro Kalman

El filtro Kalman ofrece una forma de estimar el estado x_k de un modelo en un sistema estocástico lineal de dimensión finita (Castañeda JA et al., 2013). La estimación del proceso se puede ver como una forma de control por realimentación: el filtro estima el estado en algún tiempo y luego obtiene la realimentación en la forma de las medidas (más ruido). El teorema de Kalman se basa en la obtención de una ecuación que estime el estado posterior como una combinación lineal del estado anterior \hat{x}_{k+1} , una ponderación de la diferencia entre la medida actual y_k y una predicción de la medida $C_{\hat{x}_k}$ y la relación de la entrada de control B_{u_k} (Castañeda JA et al., 2013).

El modelo del proceso para estimación de parámetros se describe en (9), donde se toma a θ_k como el vector de estados definido por el filtro. El error está dado por e_k .

$$y_k = \Phi^T_k * \theta_k + e_k \tag{9}$$



Donde: θ_k es la matriz de parámetros $m \times p$ y ϕ^T_k es un vector de $p \times 1$ que contiene los valores pasados de la salida y la entrada.

Tomando como base la expresión de x_{k+1} correspondiente a un sistema estocástico lineal finito (Kalman RE, 1960), se puede escribir una ecuación del estado de la siguiente forma:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + w_k \tag{10}$$

Para este caso al aplicar el filtro Kalman al sistema anterior, $B=0$, $A=I$ y $C=\phi^T_k$ (Castañeda JA et al., 2013). Se asume que el estado inicial no está correlacionado con los errores y con varianza finita, los dos grupos de ecuaciones del filtro se presentan a continuación:

$$\hat{\theta}_{k|k-1} = \hat{\theta}_{k-1} \tag{11}$$

$$\Sigma_{k|k-1} = \Sigma_{k-1} + C_{w_{k-1}} \tag{12}$$

$$K_k = \Sigma_{k|k-1} * \phi[\phi^T * \Sigma_{k|k-1} * \phi + C_{\epsilon k}]^{-1} \tag{13}$$

Donde: K_k es la ganancia de Kalman, Σ_k es la covarianza del error de estado dadas las observaciones $\{y_k\}$ y ϕ representa a la matriz de transición de estado.

$$\Sigma_k = (I - K_k * \phi^T) * \Sigma_{k|k-1} \tag{14}$$

$$\xi_k = y_k - \phi^T \hat{\theta}_{k|k-1} \tag{15}$$

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k|k-1} + K_k \xi_k \tag{16}$$

Donde: $\hat{\theta}_{k|k-1}$ es la estimación media para θ_k dadas las observaciones y_1, \dots, y_{k-1} .

Diseño del controlador PID por reubicación de polos

La técnica de asignación de polos puede ser empleada en la sintonía de diferentes algoritmos de control discreto (PID, modelo inverso, mínima varianza o control adaptativo) (Landau ID et al., 2019). Por lo que se procede a implementar la estrategia de control adaptativo del sistema por la técnica antes mencionada. Partiendo del modelo matemático es posible realizar control por asignación de polos, para posteriormente manipular la ubicación de esos polos en el lazo cerrado, cuyo comportamiento dinámico en el dominio discreto está dado por (17):



$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) \tag{17}$$

Donde:

$A(z^{-1})$: Polos a lazo abierto,

$y(t)$: Salida del sistema,

d : Retardo en tiempo discreto,

$B(z^{-1})$: Ceros a lazo abierto,

$u(t)$: Acción de control.

La ley de control, que obedece a la estructura RST (Reference Signal Tracking) (Kumar P et al., 2019), se compone de tres polinomios R, S y T, que se sintonizan por colocación de polos. Una variante de implementación es mediante el ingreso de la solución de dichos polinomios en un controlador PID. Para ello se parte de la ecuación que representa un controlador PID ideal y se reescribe por medio de la aproximación rectangular (Kumar P et al., 2019) en el dominio discreto:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \tag{18}$$

Donde:

$$q_0 = k_c \left[1 + \frac{t_s}{2t_i} + \frac{t_d}{t_s} \right] \tag{19}$$

$$q_1 = -k_c \left[1 - \frac{t_s}{2t_i} + \frac{2t_d}{t_s} \right] \tag{20}$$

$$q_2 = \frac{k_c t_d}{t_s} \tag{21}$$

Donde:

k_c : Ganancia proporcional,

t_i : tiempo integral,

t_d : tiempo derivativo,

t_s : tiempo de muestreo,

$e(t)$: error del sistema.

Llevando la ecuación discreta al dominio de Z:



$$\Delta u(t) = (q_0 + q_1 z^{-1} + q_1 z^{-2})e(t) \tag{22}$$

$$\Delta u(t) = (q_0 + q_1 z^{-1} + q_1 z^{-2})[y_i(t) - y(t)] \tag{23}$$

Comparando la ley de control PID anterior con (8), se tiene:

$$R(z^{-1}) = 1 \tag{24}$$

$$S(z^{-1}) = T(z^{-1}) = q_0 + q_1 z^{-1} + q_1 z^{-2} \tag{25}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la comparación con la ley de control PID, se obtiene el diagrama en bloques del sistema de control diseñado, el cual se muestra en la figura 7.

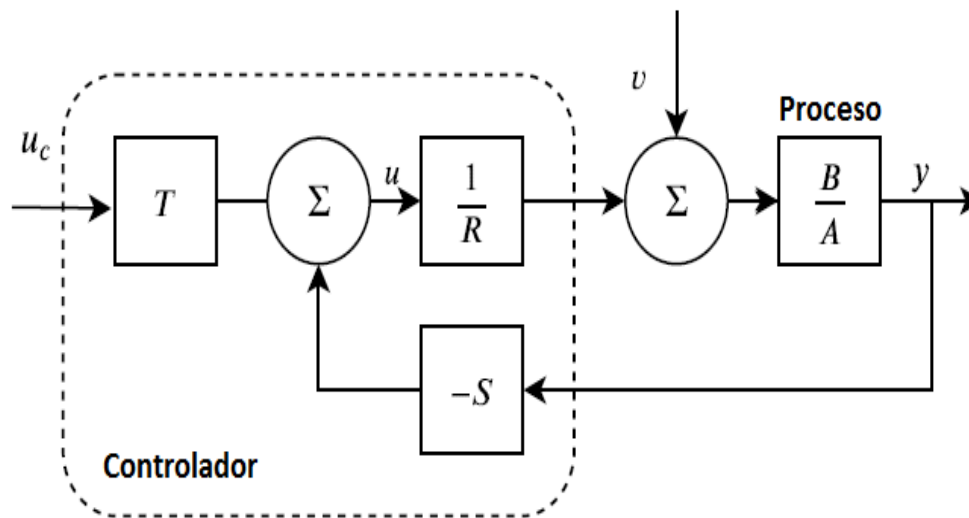


Figura 5. Sistema de control diseñado.

Resultados y discusión

La obtención de los resultados experimentales comienza con la verificación y análisis de la implementación del control RST dentro de un controlador PID. Esto se realiza para validar el desempeño del control RST en el conjunto MCA-VF). Este análisis permite evaluar la efectividad del controlador en el contexto específico del mecanismo actuador, asegurando que cumpla con los requisitos de desempeño que avalen un correcto ajuste de la estrategia de control adaptativo.

Posteriormente, se realiza un análisis más profundo del desempeño del mecanismo actuador modernizado en la plataforma pesada giratoria. Esta plataforma representa un entorno de pruebas más complejo y realista, donde se puede evaluar el comportamiento del mecanismo actuador en condiciones de operación más exigentes. El análisis de



los resultados obtenidos en esta plataforma permite validar la robustez y eficacia del mecanismo, brindando información valiosa sobre su rendimiento en escenarios más cercanos a las condiciones reales de uso.

La combinación de estos dos análisis, el del control RST en el conjunto MCA-VF y el del mecanismo actuador en la plataforma pesada giratoria, proporciona una evaluación integral del sistema de control y del mecanismo actuador, lo que permite identificar áreas de mejora y asegurar que el sistema cumpla con los parámetros fijados por el fabricante del sistema original.

Validación del controlador PID implementado

Para la validación del controlador es fundamental observar la respuesta del sistema a las señales de entrada. En este análisis, se debe verificar si la respuesta del sistema controlado con el controlador PID ajustado con los parámetros del controlador RST se ajusta a las expectativas teóricas y a los objetivos de control planteados. Al comparar la gráfica de la señal de entrada (referencia) con la señal de salida del sistema controlado, se busca confirmar que el sistema responde de manera adecuada a las variaciones de la señal de referencia. Es crucial observar si la respuesta del sistema es estable, precisa y rápida, reflejando un seguimiento efectivo de la señal de referencia. Además, se debe evaluar si el sistema alcanza el estado estacionario deseado sin oscilaciones excesivas ni errores significativos (Pan W et al., 2018).

La validación de la acción del controlador diseñado en el conjunto MCA-VF se realiza siguiendo el esquema en bloques mostrado en la figura 6.

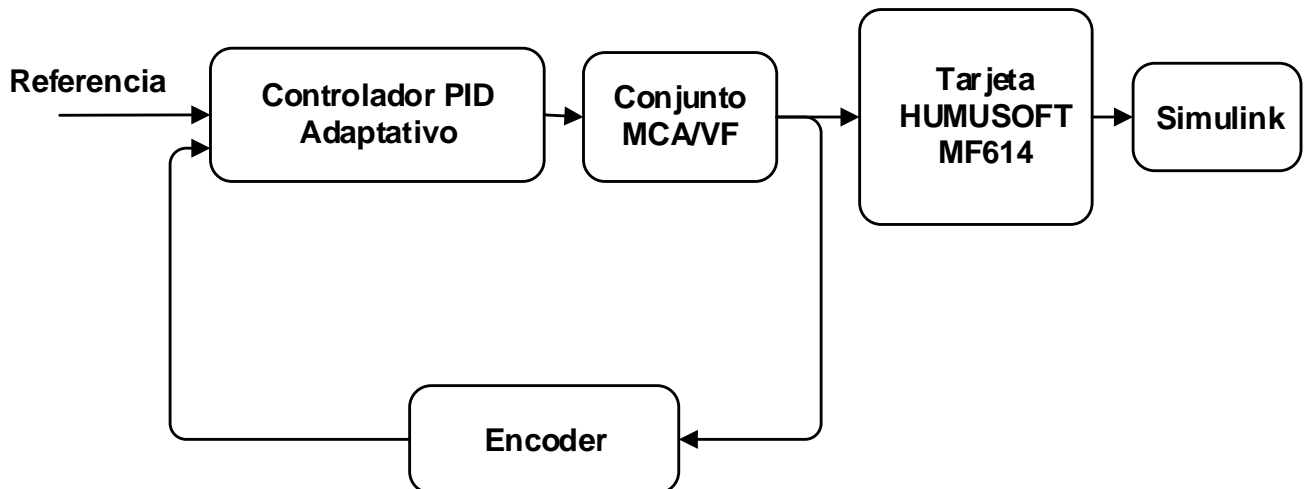


Figura 6. Esquema para validación del controlador PID adaptativo.

Los equipos empleados, además del controlador implementado, se relacionan a continuación:

- Variador de frecuencia marca Eurotherm y referencia 601.
- Motor de inducción trifásico marca SIEMENS con 3 caballos de fuerza con velocidad nominal de 2500 rpm o 60 Hz.
- Encoder de tipo incremental marca DENMARK con 12 bits de resolución.
- Tarjeta de adquisición HUMUSOFT MF614 (Yue Z et al., 2021) para, mediante el toolbox Real Time Target de MATLAB, observar en Simulink la señal a la salida del sistema.
- PC con procesador AMD E-300 DualCore CPU 1.30 GHz, sistema operativo WINDOWS 10 PRO de 64 bits, 6 GB de memoria RAM.
- Tarjeta DE0-NANO de TERASIC (Texas Instruments, sin fecha)

En la figura 6 se puede observar la respuesta del sistema controlado. La respuesta del sistema refleja capacidad de adaptación a las variaciones de la señal de referencia, cumpliendo con los objetivos de control planteados y garantizando un funcionamiento correcto en términos de estabilidad y precisión en la respuesta.



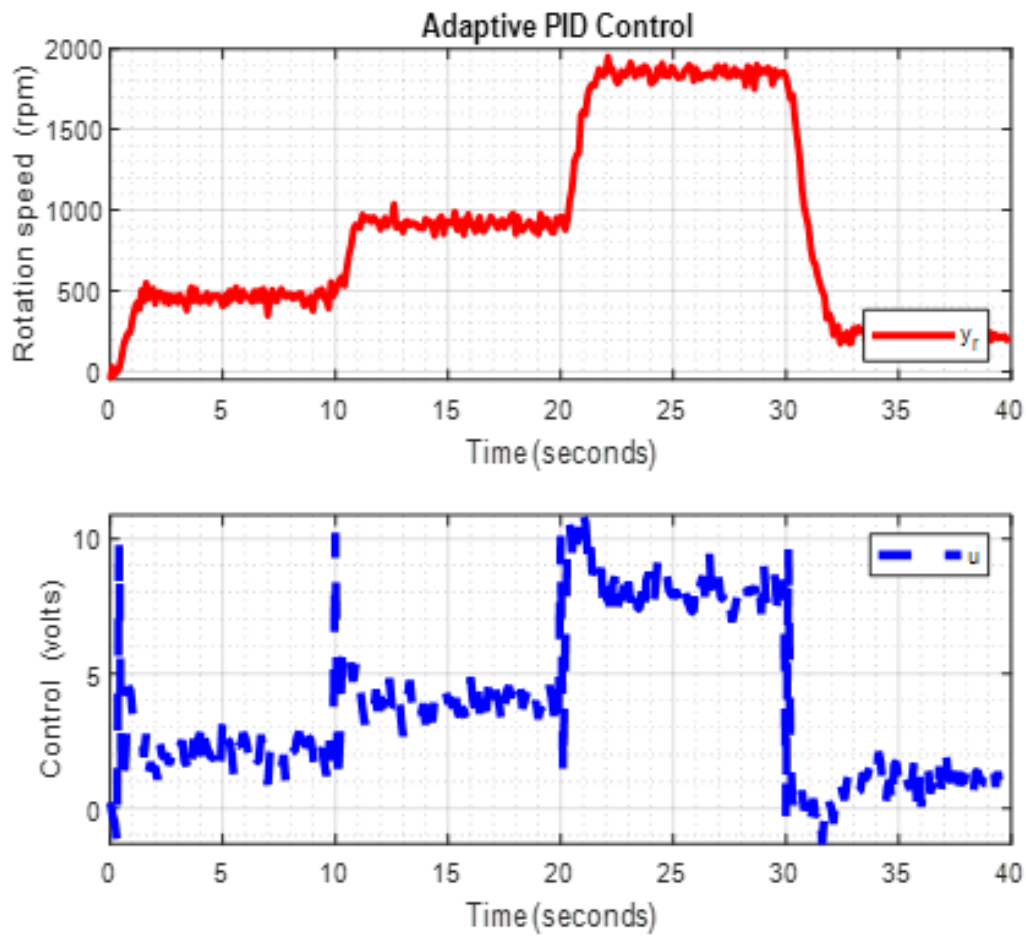


Figura 7. Simulación del algoritmo de Control PID.

Análisis del desempeño del controlador acoplado a la plataforma

Según estudios previos, la medición de variables clave en la plataforma del equipo de carga pesada con PID Adaptativo es esencial para evaluar su rendimiento. Comparar estas mediciones con los valores de referencia del fabricante en el manual original del sistema, tal como se menciona en (HBM, 2023), permite ajustar los parámetros del controlador y mejorar su rendimiento.

Para ello se realizaron mediciones de las variables de interés en la plataforma del equipo de carga pesada con PID Adaptativo incorporado. Los instrumentos de medición empleados son los propios indicadores de parámetros del equipo. Se partió de los datos iniciales de la carga establecidos en dicho manual, estos se muestran en la tabla 2.



Tabla 2. Datos iniciales de la carga.

| Datos | Plano de medición | |
|-------------------------|-------------------|----------|
| | Horizontal | Vertical |
| Masa (Kg) | 15000 | 6000 |
| Radio medio (cm) | 240 | 600 |
| Velocidad Angular (rpm) | 7 | 2,3 |

Con las condiciones iniciales igualadas a como se establece en la documentación del fabricante se procede a realizar el control de la plataforma, prestando atención a las variables de salida que intervienen en el proceso. En este caso por tratarse de un sistema de gran peso se debe medir la potencia consumida por la carga (Centro Nacional de Metrología, 2008), así como el torque necesario para realizar el movimiento angular. La variable velocidad se calcula para obtener la aceleración de la plataforma y se controla para obtener un sistema con un mínimo de oscilaciones (Liu C-L et al., 2020). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Principales resultados obtenidos.

| Parámetro | Sistema | Plano de medición | |
|-------------------------------------------------|--------------------|-------------------|------------|
| | | Horizontal | Vertical |
| Aceleración angular (a) (rad/seg ²) | Original | 0.2±0.2 | 0.2±0.2 |
| | Con PID Adaptativo | 0.3 | 0.3 |
| Torque de fuerza (T) (Nm) | Original | 24405 ±500 | 47455 ±500 |
| | Con PID Adaptativo | 24100 | 47050 |
| Potencia de carga (W) | Original | 2500 ±500 | 1500 ±500 |
| | Con PID Adaptativo | 2900 | 1800 |

Con el valor calculado se obtuvo un promedio de 2235 W o 2.23 kW de potencia necesaria para el motor asincrónico de inducción. Teniendo la potencia necesaria del motor asincrónico se empleó un criterio para la selección de la velocidad de dicho motor, teniendo en cuenta que los cálculos se realizaron en la carga y entre ésta y el motor existe un reductor, el cual tiene una relación de transmisión que exige una velocidad del motor cercana a 1900 rpm. Lo cual demuestra la capacidad de soporte del conjunto formado por el motor de corriente alterna y el variador de frecuencia empleado, puesto que sobrepasan esa cifra.



Aunque para las condiciones citadas se llevó a cabo el control de la plataforma de forma exitosa, aunque se debe seguir trabajando en la mejora de errores obtenidos cuando se gira a baja velocidad. Esto puede solucionarse empleando un dispositivo de medición con mayor exactitud como un tacómetro o un encoder de mayor resolución, ya que ambos son fabricados con el objetivo de medir velocidad de rotación y de esta forma optimizar aplicaciones industriales (Liu Z et al., 2022). Otro aspecto al cual se debe prestar atención en estructuras mecánicas de gran peso, es el aumento repentino en algunos casos de la aceleración angular (Liu Z et al., 2022). Este efecto indeseado fue solucionado mediante la adición de límites de saturación que garantizaron que se mantuviese este parámetro en los valores establecidos por el fabricante.

Conclusiones

Con el valor calculado se obtuvo un promedio de 2235 W o 2.23 kW de potencia necesaria para el motor asincrónico de inducción. Teniendo la potencia necesaria del motor asincrónico se empleó un criterio para la selección de la velocidad de dicho motor, teniendo en cuenta que los cálculos se realizaron en la carga y entre ésta y el motor existe un reductor, el cual tiene una relación de transmisión que exige una velocidad del motor cercana a 1900 rpm. Lo cual demuestra la capacidad de soporte del conjunto formado por el motor de corriente alterna y el variador de frecuencia empleado, puesto que sobrepasan esa cifra.

Se debe seguir trabajando en la mejora de errores obtenidos cuando se gira a baja velocidad. Se propone como solución el empleo de un dispositivo de medición con mayor resolución (Liu Z et al., 2022). Otro aspecto al cual se debe prestar atención en estructuras mecánicas de gran peso, es el aumento repentino en algunos casos de la aceleración angular para lo cual se recomienda la adición de límites de saturación que aseguren no sobrepasar los límites establecidos por el fabricante.

Conflictos de intereses

Los autores no poseen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

1. Conceptualización: Jorge Humberto Vázquez Leiva, Alexander Peláez Llano
2. Curación de datos: Jorge Humberto Vázquez Leiva
3. Análisis formal: Alexander Peláez Llano, José Ernesto Vargas Fernández
4. Investigación: Jorge Humberto Vázquez Leiva, Alexander Peláez Llano
5. Metodología: Jorge Humberto Vázquez Leiva, José Ernesto Vargas Fernández



6. Software: Jorge Humberto Vázquez Leiva
7. Supervisión: Jorge Humberto Vázquez Leiva, Alexander Peláez Llano
8. Validación: Jorge Humberto Vázquez Leiva, Alexander Peláez Llano
9. Redacción – borrador original: Jorge Humberto Vázquez Leiva, Alexander Peláez Llano, José Ernesto Vargas Fernández
10. Redacción – revisión y edición: Jorge Humberto Vázquez Leiva, Alexander Peláez Llano, José Ernesto Vargas Fernández

Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento externa.

Referencias

- Cinselmatic. Variadores de frecuencia y los servomotores Cinselmatic [Internet]. [Citado 26 Feb 2024]. Disponible en: <https://cinselmatic.com/variadores-de-frecuencia/>
- Mir TN, Singh B, Bhat AH. “Single-Phase to Three-Phase AC-AC Converter Fed Low Speed Induction Motor Drive with Encoder less Control”. 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE); Trivandrum, India, 2022. p. 1-6.
- Ju Y., Chen T., Mu B., Ljung L. “On Asymptotic Distribution of Generalized Cross Validation Hyper-parameter Estimator for Regularized System Identification”, 60th IEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 1598-1602, 2021.
- Schoukens J, Ljung L. “Nonlinear System Identification: A User-Oriented Road Map”. IEEE Control Systems Magazine. 2019; 39(6):28-99.
- Normey Rico J, Camacho EF. “Control of Dead-time Processes”. London: Springer; 2007.
- Kalman RE. “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”. J Basic Eng. 1960; 82:35-45.
- Sánchez S, Giraldo E. “Control Adaptativo de Velocidad usando el Filtro de Kalman en un Motor de Inducción”. Revista Tecno Lógicas. 2010;(25):11-26.
- Díaz Díaz AM. “Filtro de Kalman lineal variable basado en cuaternas para unidad de medida inercial, con aplicación en dinámica de vehículos” [tesis doctoral]. A Coruña: Universidade da Coruña; 2012.
- Sánchez S, Giraldo E. “Control Adaptativo de Velocidad usando el Filtro de Kalman en un Motor de Inducción”. Revista Tecno Lógicas. 2010;(25):11-26.
- Montgomery DC. “Design and Analysis of Experiments”. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2013.



- Shannon CE. “Communication in the presence of noise”. Proc IRE. 1949; 37(1):10-21.
- Statgraphics. Manual de usuario [Internet]. Statgraphics; [citado 26 feb 2024]. Disponible en: <https://statgraphics.net/manual-de-usuario/>
- MathWorks. MATLAB. [Internet]. [citado 2024]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- Pérez M, Romero M, Suárez E, Vaughan N. “Uso de secuencias pseudoaleatorias de máxima longitud en la validación de modelos matemáticos”. Revista de Modelado Matemático. 2023; 15(2):45-58.
- Castañeda Cárdenas JA, Nieto Arias MA, Ortiz Bravo VA. “Análisis y aplicación del filtro de Kalman a una señal con ruido aleatorio”. Scientia et Technica. 2013; 18(1): Universidad Tecnológica de Pereira.
- Landau ID, Melendez R, Dugard L, Buche G. “Robust and Adaptive Feedback Noise Attenuation in Ducts”. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2019; 27(2):872-879.
- Kumar P, Kumar A. “Design and Implementation of a RST Controller for a DC-DC Converter”. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2019; 8(3):1-8.
- Pan W, Yuan Y, Ljung L. “Identification of Nonlinear State-Space System from Heterogeneous Datasets”. IEEE Transactions on Control of Network Systems. 2018; 5(2):737-747.
- Yue Z, Thunberg J, Yuan Y, Goncalves J, Ljung L. “System Aliasing in Dynamic Network Reconstruction: Issues on Low Sampling Frequencies”. IEEE Transactions on Automatic Control. 2021; 66(12):5788-5801.
- Texas Instruments. PMP10580 DE0-Nano User Manual (Terasic/Altera). [PDF]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu737/tidu737.pdf>
- HBM. Medición precisa de carga y fuerza en actuadores. [Internet]. 2023. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/8939/medicion-precisa-de-carga-y-fuerza-en-actuadores/>
- Centro Nacional de Metrología. Sistema de Medición de Posición y Fuerza de un Actuador a Músculo Artificial Mecano-Químico, Aplicado a la Robótica. [PDF]. 2008. Disponible en: https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/m2/sm2008-m229-1161.pdf
- Liu C-L, Shan L, Zhang Y, Chen Y-Y, Li J. “Hierarchical average-tracking algorithm for multiagent systems with unmatched constant references signals”. IEEE Trans Circuits Syst II Express Briefs. 2020;67(11):2642-6.
- Liu Z, Xiao G, Liu H, Wei H. “Multi-sensor Measurement and Data Fusion. Instrumentation & Measurement Magazine”. 2022; 25(1):28-36.

