

IMPLEMENTACIÓN Y COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE ALGORITMOS DE CONTROL DE VELOCIDAD CON CONVERTIDORES DE POTENCIA

IMPLEMETATION AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF SPEED REGULATION ALGORITHMS WITH POWER CONVERTERS

Georgiana Madrid González

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI, México
georgianamadrid@gmail.com

Mizraim Martínez López

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI, México
mmartinez@citedil.mx

German De La Cruz

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI, México
gmendez@citedi.mx

Marco Moran Armenta

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI, México
amoran@citedi.mx

Javier Moreno Valenzuela

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI, México
moreno@citedi.mx

Recepción: 21/noviembre/2025

Aceptación: 24/diciembre/2025

Resumen

En este documento se presenta la implementación y la comparación experimental de tres algoritmos de control reportados previamente en la literatura a un sistema convertidor reductor para la regulación de velocidad de un motor de corriente directa (CD). En particular, se implementa un controlador proporcional e integral, un controlador basado en un observador y un control por técnica de inversión. Se describe la plataforma experimental desarrollada para la validación de los algoritmos. Los resultados muestran que el controlador basado en observador ofrece el mejor desempeño, destacándose por su precisión en el seguimiento de referencia y su robustez a los cambios de referencia.

Palabras Clave: Control de velocidad, convertidor reductor, motor CD, sistemas de control.

Abstract

This document presents the experimental implementation and comparison of three controllers previously reported in the literature for a buck converter system for the speed regulation of a direct current (DC) motor. In this specific case, a proportional–integral controller, an observer-based control, and an inversion of control are implemented. The experimental platform developed for the validation of the control algorithms is described. The results show that the observer-based controller offers the best performance, standing out for its precision in reference tracking and its robustness to changes in reference.

Keywords: Buck converter, control systems, motor DC, speed control.

1. Introducción

El control de convertidores de potencia ha cobrado gran relevancia en los últimos años, especialmente en aplicaciones relacionadas con energías renovables [Karthikeyan, 2024], [Talooki, 2021], [Hasanpour, 2023]. En la mayoría de estos sistemas, donde es necesario controlar los picos de corriente, se utilizan convertidores reductores, los cuales transforman un voltaje de corriente directa (CD) en otro de menor valor, asegurando una operación eficiente y estable.

En particular, el sistema compuesto por un convertidor reductor y un motor de CD es ampliamente utilizado en vehículos eléctricos [Lomada, 2024], [Rakin, 2024], [Park, 2020], [Aguilar, 2025], debido a sus ventajas, como la reducción de pérdidas por disipación térmica y el aprovechamiento más eficiente de la energía almacenada en la batería. En este contexto, el diseño e implementación de controladores de velocidad eficientes y robustos resulta fundamental para mejorar el desempeño del sistema y garantizar su funcionamiento ante variaciones de carga o referencia.

Diversos enfoques de control para el convertidor reductor más motor de CD han sido propuestos en la literatura. Por ejemplo, en [Silva, 2012] se propuso utilizar un controlador jerárquico que controlaba la posición del motor, mientras que [Mohd,

2012] demostró que el control H_∞ ofrece un adecuado seguimiento de referencia. De igual forma, se han explorado métodos menos tradicionales, como el seguimiento de posición [Zhou, 2017] y estrategias basadas en controladores de rechazo activo de perturbaciones, combinados con estrategias como el control proporcional–integral generalizado [Guerrero, 2020]. Más recientemente, en [García, 2023] se demostró que suministrar señales de voltaje suaves al motor a través del convertidor mejora significativamente el desempeño del sistema. Entre los controladores relevantes destacan el controlador proporcional–integral (PI), el controlador basado en observadores y los métodos adaptativos, como el control por inversión (IOC del inglés “*Inversion of Control*”).

El objetivo principal de este trabajo es implementar y comparar experimentalmente tres estrategias de control de velocidad para un sistema convertidor reductor con motor de CD: un controlador PI, un controlador con observador y un controlador adaptable por IOC. A lo largo del artículo se presentan comparaciones entre los tres controladores ante cambios en la referencia de velocidad, con el propósito de evaluar su desempeño bajo condiciones reales de operación.

Se hace especial énfasis en la implementación del controlador con observador propuesto en [Ardhenta, 2020], el cual, hasta el momento, no había sido validado experimentalmente.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe el modelo matemático del sistema, se presenta un resumen de los controladores utilizados y se detalla la plataforma experimental. En la Sección 3 se presentan los resultados experimentales obtenidos. La Sección 4 presenta una discusión donde se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones del estudio.

2. Métodos

Modelo del convertidor reductor

Por medio de las leyes de Kirchoff se obtiene el siguiente sistema de Ecuaciones 1 a 4, las cuales representan el comportamiento dinámico del convertidor reductor y el motor de corriente directa.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{-B}{J}\omega + \frac{k_m}{J}i_a - \frac{T_l}{J} \quad (1)$$

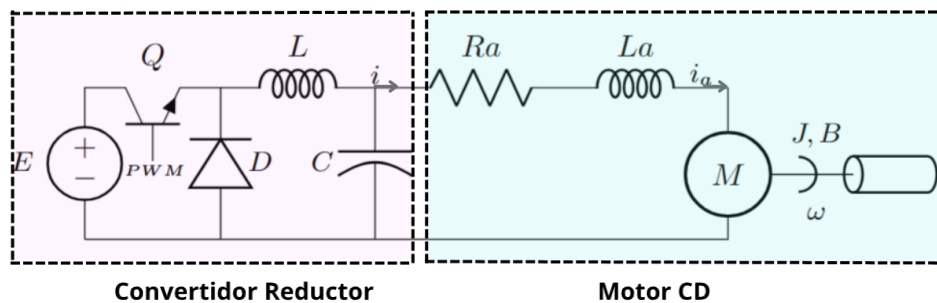
$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-k_t}{L_a}\omega - \frac{R_a}{L_a}i_a + \frac{v}{L_a} \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{i_a}{C} \quad (3)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{v}{L} + u \frac{E}{L} \quad (4)$$

Donde ω es la velocidad angular del motor, B es el coeficiente de fricción viscosa del motor, k_m es la constante del par de motor, J es la inercia del rotor, C es el valor del capacitor, T_l es el torque del motor, k_t la constante de fuerza contraelectromotriz, L_a es la inductancia del motor, i_a es la corriente del motor, E es el voltaje de entrada al convertidor, v es el voltaje de salida del convertidor, u es la entrada de control, i es la corriente del convertidor y L es la inductancia del convertidor.

Nótese que las Ecuaciones 1 y 2 representan el motor de CD [Guzmán, 2023], mientras que las Ecuaciones 3 y 4 representan el circuito del convertidor reductor [Silva, 2017]. La Figura 1 muestra el diagrama del sistema convertidor reductor más motor CD de las Ecuaciones 1 a 4.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama eléctrico del sistema convertidor reductor con motor CD.

Control proporcional integral

El primer controlador implementado corresponde a un control proporcional integral, comúnmente conocido como control PI clásico [Ahmed, 2015]. La ley de control se expresa Ecuación 5, donde k_p es la ganancia proporcional y k_i es la ganancia integral.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

La entrada al controlador corresponde al error de velocidad $e(t)$, Ecuación 6, donde, ω_{ref} es la velocidad deseada y ω velocidad angular medida del motor.

$$e(t) = \omega_{ref} - \omega \quad (6)$$

Control con observador

Se presenta una variación al controlador propuesto en [Ardhenta, 2020]. El controlador tiene una estructura de retroalimentación para el sistema convertidor reductor con motor CD, con el objetivo de reducir el error en la retroalimentación mediante la lectura de velocidad. El observador esta dado por las Ecuaciones 7 a 10. En estas ecuaciones, los términos $\hat{\omega}$, $\hat{i}_a$, $\hat{v}$, $\hat{i}$ corresponde a las variables estimadas del sistema, mientras que Γ es una matriz de ganancias y $\tilde{x}_1 = \omega - \hat{\omega}$ es la diferencia de la velocidad real y la velocidad del observador $\hat{\omega}$.

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{-B}{J} \hat{\omega} + \frac{k_m}{J} \hat{i}_a - \frac{T_l}{J} + \Gamma \tilde{x}_1 + (\gamma\alpha) \quad (7)$$

$$\frac{d\hat{i}_a}{dt} = \frac{-k_t}{L_a} \hat{\omega} - \frac{R_a}{L_a} \hat{i}_a + \frac{\hat{v}}{L_a} + \Gamma \tilde{x}_1 + (\gamma\alpha) \quad (8)$$

$$\frac{d\hat{v}}{dt} = \frac{\hat{i}}{C} - \frac{\hat{i}_a}{C} + \Gamma \tilde{x}_1 + (\gamma\alpha) \quad (9)$$

$$\frac{d\hat{i}}{dt} = -\frac{\hat{v}}{L} + u \frac{E}{L} + \Gamma \tilde{x}_1 + (\gamma\alpha) \quad (10)$$

Nótese que, al controlador, con respecto al de [Ardhenta, 2020], en el observador propuesto, se agregó una ganancia γ y α , donde α esta dada por la Ecuación 11, la cual permite al observador comportarse de manera más parecida al comportamiento del sistema real.

$$\alpha = \int \tilde{x}_1 \quad (11)$$

La ley de control expresada en la Ecuación 12 no tuvo ninguna modificación, en esta u es la entrada de control, G la ganancia del error, K matriz de ganancias y $\hat{x}$ matriz de estimación del observador.

$$u = -G \int_0^t e(t)dt - K\hat{x} \quad (12)$$

Control adaptativo por IOC

El tercer controlador a implementar en experimentos para el control de velocidad corresponde a un control adaptable con el enfoque de control IOC reportado en [Montoya, 2024]. Este método garantiza una convergencia asintótica óptima, combinada con un estimador adaptable para el torque del motor.

El enfoque IOC tiene como objetivo identificar tanto la ley de control como la función de rendimiento implícita que respalda esa ley como optima. El enfoque IOC se centra en derivar una ley de control que reduce una función de rendimiento, asegurando al mismo tiempo la estabilidad y el rendimiento óptimo del sistema dinámico. Se presenta el siguiente sistema conformado por las Ecuaciones 13 a 15 para el estimador de voltaje.

$$ia_{ref} = i_{ref} \quad (13)$$

$$i_{ref} = \frac{B(\omega_{ref}) + \tau}{nk_m} \quad (14)$$

$$v_{ref} = R(i_{ref}) + nk_e(\omega_{ref}) \quad (15)$$

Donde n es la relación del tren de engranes y el Encoder. El motor utilizado en la plataforma experimental no cuenta con caja reductora, por lo que la relación es 1: 1. Además, k_e es la constante de fuerza electromotriz y B es el coeficiente de fricción viscosa. Las entradas son la velocidad de referencia ω_{ref} y la estimación del torque τ y las salidas son la referencia de voltaje v_{ref} , la estimación de corriente de armadura ia_{ref} y la estimación de la corriente del inductor i_{ref} .

Para este sistema, en el caso del controlador IOC, la corriente del circuito y la corriente de armadura son iguales, como se muestra en la Ecuación 13. La ley se define en la Ecuación 16, donde k_p y k_i son ganancias proporcional e integral, respectivamente.

$$u = \frac{v_{ref}}{E} - k_p E(i - i_{ref}) - k_i \int_0^t e(t)k_p E(i - i_{ref})dt, \quad (16)$$

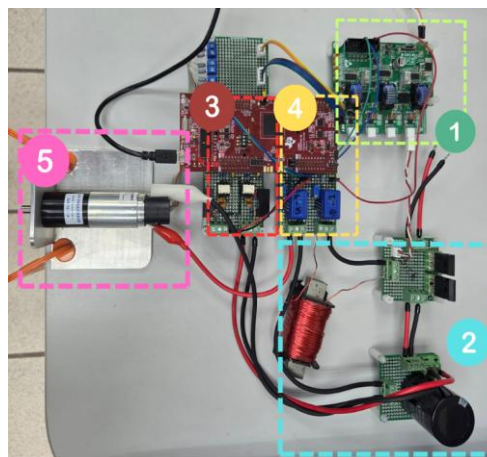
La ley de control, la cual está representada por la Ecuación 16 tiene como retroalimentación principal la corriente y cuenta con la estimación de voltaje deseado v_{ref} . Las Ecuaciones 17 y 18 representan el funcionamiento del estimador de torque propuesto basado en parámetros adaptativos y el comportamiento del sistema. Donde τ es la estimación del torque, γ es la ganancia del estimador y donde $\beta'(\omega) = -J(\omega)$, $\beta(\omega) = J$.

$$\tau = \alpha + \gamma\beta(\omega), \quad (17)$$

$$\dot{\alpha} = \gamma\beta'(\omega)(nk_mi - D(\omega) - (\alpha + \gamma J\omega)), \quad (18)$$

Para la validación experimental de los controladores, se diseñó una plataforma experimental mostrada en la Figura 2 la cual está conformada por:

- (1) Generador de señal PWM.
- (2) Convertidor reductor [2].
- (3) Módulo de medición de voltaje [3].
- (4) Módulo de medición de corriente [4].
- (5) Motor CD [5].



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Plataforma experimental.

Los valores de los componentes se presentan en la Tabla 1. El motor de CD utilizado es de la marca FULLHABER modelo 2642912CXR, con el voltaje nominal de 12 V. Esta plataforma cuenta con dos sensores de corriente y un sensor de voltaje. Para la medición de la velocidad del motor, se utiliza el encoder incorporado al motor.

Tabla 1 Valores de componentes de la plataforma.

Parámetros	Símbolo	Valor
Inductancia de circuito	L	$10 \times 10^{-3} H$
Voltaje de entrada	E	$12 V$
Inductancia de la armadura	La	$135 \times 10^{-6} H$
Resistencia de armadura	Ra	1.46Ω
Capacitor	C	$1000 \times 10^{-6} F$
Fuerza contra electromotriz	kt	$0.046 V s/rad$
Par nominal	Tl	$0.005 Nm$
Constante de par del motor	km	$18.57 Nm/A$
Coeficiente de fricción	B	$2.5 \times 10^{-6} Nm/(rad/s)$
Inercia del rotor	J	$1.2 \times 10^{-6} kg m^2$

Fuente: elaboración propia

Al convertidor reductor, se le aplica un voltaje de entrada cuya salida es modulada mediante una señal PWM, cuyo ciclo de trabajo está determinado por la señal de control u . Los controladores se implementan en el microcontrolador, C2000 F28379D mejor conocido como “Delfino”, el cual cuenta con entradas y salidas digitales configurables y con conexiones habilitadas para el encoder. La programación del microcontrolador se hace usando el entorno de MATLAB/Simulink.

En el caso de la medición de corriente, se utilizó el sensor LXS6-NP junto con el amplificador operacional MCP601. Para la medición de voltaje, se implementó un circuito con el TLP7920 y también un MCP601

A la entrada del circuito de medición de voltaje se incorporó un puente divisor resistivo que reduce el voltaje a un rango seguro de medición, permitiendo una lectura máxima de 60 V.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados experimentales de la implementación de los tres controladores:

- Control PI (Ecuación 5) se muestra con la etiqueta *PI*.
- Control con observador (Ecuación 12) se muestra con la etiqueta *Observador*.
- Control por IOC (Ecuación 16) se presenta con la etiqueta *IOC*.

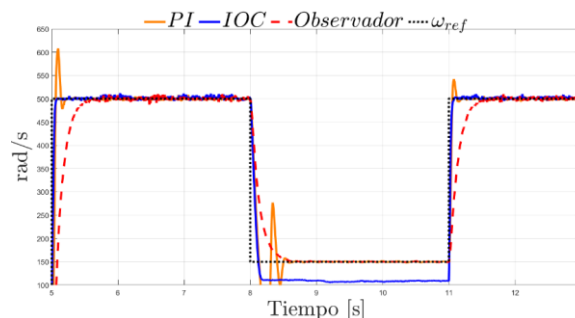
En la Tabla 2 se presentan las ganancias utilizadas para cada controlador durante el experimento. Dichas ganancias fueron seleccionadas buscando el mejor desempeño de cada controlador. Las condiciones iniciales para cada controlador son: $\omega(0) = 0$, y las variables estimadas para el control con observador y el IOC son inicializadas en cero.

Tabla 2 Ganancias utilizadas en los tres controladores evaluados.

PI		Observador		IOC	
Variable	Valor	Variable	Valor	Variable	Valor
k_p	0.0001	K	$[-0.001 \ -0.0001 \ -0.001 \ -0.0001]$	k_p	0.0001
k_i	0.06	G	0.019	k_i	1.2
		Γ	$[0.2 \ 0.02 \ 0.02 \ 0.02]$	γ	0.003

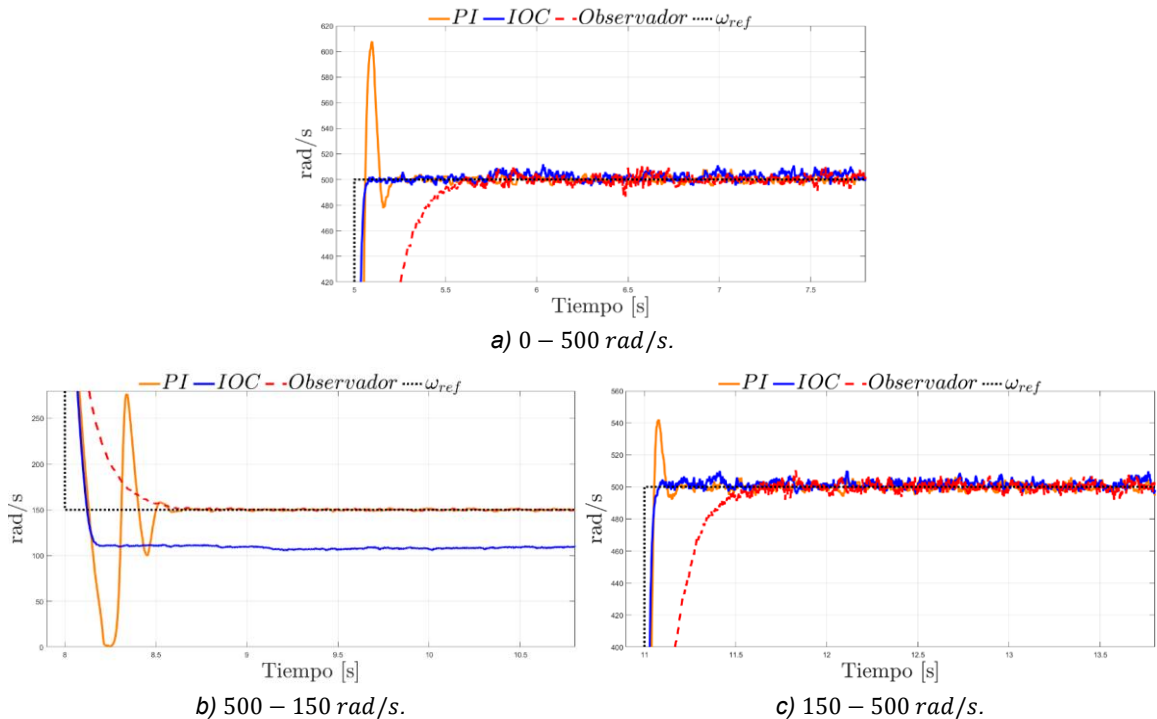
Fuente: elaboración propia

El experimento consiste en lo siguiente: los primeros 5 s la referencia inicial es 0 posteriormente, se aplica un primer cambio en la referencia de velocidad a 500 rad/s . Posteriormente a los 8 s se realiza un segundo cambio de 500 rad/s a 150 rad/s , con el fin de analizar el comportamiento ante el cambio de una velocidad muy alta del motor a una muy baja según sus especificaciones. Finalmente, a los 11 s hay un tercer cambio de referencia de 150 rad/s a 500 rad/s que se trata de un cambio de velocidad muy baja a una velocidad alta. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos del experimento y en la Figuras 4 se presenta un acercamiento de cada cambio de referencia, con el fin de analizar a detalle la respuesta transitoria. Por último, la Tabla 3 muestra una comparación de los tres controladores considerando los parámetros de tiempo de asentamiento y sobreimpulso.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Experimento de cambios de referencia de velocidad.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Comparación de velocidad referencia inicial.

Tabla 3 Desempeño de los controladores ante tres cambios de referencia.

Controlador	Velocidad de referencia		
	0 – 500 rad/s	500 – 150 rad/s	150 – 500 rad/s
Tiempo de asentamiento T_s [s]			
PI	0.25	0.59	0.53
Observador	0.73	0.86	0.65
IOC	0.11	0.20	0.46
Sobreimpulso M_p [%]			
PI	21.6	36.29	8.42
Observador	1.80	1.60	1.80
IOC	2.20	11.43	1.80

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados experimentales demuestran diferencias claras entre los controladores evaluados. El PI clásico mostro una respuesta más rápida en los cambios de referencia, pero con altos sobreimpulsos. Su estructura sencilla lo hace atractivo por su facilidad de implementación, pero inadecuado cuando se requiere una respuesta amortiguada. Por otro lado, el control con observador mostró el menor sobreimpulso (1.8%) y buen comportamiento en estado estable, aunque con

mayores tiempos de asentamiento. Esto sugiere que su diseño prioriza estabilidad sobre rapidez. Finalmente, el control IOC fue el más rápido en todos los escenarios, alcanzando tiempos de asentamiento significativamente bajos. Sin embargo, mostró errores en estado estable a los cambios de referencia.

5. Conclusión

Este trabajo comparó tres estrategias de control aplicadas a un sistema compuesto por un convertidor reductor y un motor de corriente directa. Las pruebas experimentales permitieron validar los diseños bajo condiciones reales.

El control PI mostró rapidez, pero un sobreimpulso elevado, el control adaptativo IOC fue el más rápido, pero muy sensible a las condiciones del sistema y el control con observador presentó el mejor comportamiento en cuanto a precisión y estabilidad, aunque fue el más lento, pero en general fue el que tuvo mejor desempeño. Finalmente, se concluye que el tipo de retroalimentación utilizada es crítica, especialmente en sistemas con ruido significativo. Esto es evidente en el caso del controlador IOC, que depende de la lectura de corriente para estimaciones dinámicas. Su aplicabilidad depende del entorno físico y la calidad de las mediciones disponibles.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Aguilar Martinez, J. L. and Kucuk, F., (2025). Design and implementation of a sic mosfet-based syn-chronous bidirectional dc-dc converter for light electric vehicle applications. In 2025 5th International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computing Technology (EECT), 1–6. doi:10.1109/EECT64505.2025.10966941.
- [2] Ahmed, A. M., Ali-Eldin, A., Elksasy, M. S., and Areed, F. F., (2015). Brushless dc motor speed control using both pi controller and fuzzy pi controller. *International Journal of Computer Applications*, 109(10), pp. 29–35.
- [3] Ardhenta, L. and Subroto, R. K., (2020). Feedbackcontrol for buck converter - dc motor using observer. In 2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), pp. 30–33. doi:10.1109/ICEENG45378.2020.9171693.

- [4] Garcia-Chavez, R. E., Silva-Ortigoza, R., Hernández-Guzman, V. M., Marciano-Melchor, M., Orta-Quintana, A. A., Garcia-Sanchez, J. R., and Taud, H., (2023). A robust sliding mode and pi-based tracking control for the mimo dc/dc buck converter-inverter-dc motor system. *IEEE Access*, 11, pp. 119396 – 119408. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3327425.
- [5] Guerrero, E., Guzmán, E., Linares, J., Martínez, A., and Guerrero, G., (2020). Fpga-based active disturbance rejection velocity control for a parallel dc/dc Buck converter-dc motor system. *IET Power Electronics*, 13(2), pp. 356 – 367. doi:10.1049/iet-pel.2019.0832.
- [6] Guzmán, J. L., Costa-Castelló, R., Berenguel, M., & Dormido, S. (2023). *Automatic control with interactive tools*. Springer, Cham.
- [7] Hasanpour, S., Siwakoti, Y. P., and Blaabjerg, F., (2023). A new high efficiency high step-up dc/dc converter for renewable energy applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(2), pp. 1489–1500. doi:10.1109/TIE.2022.3161798.
- [8] Karthikeyan, P., and Prakash, S., (2024). A review of high efficiency power converters for electric vehicles applications. In *2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, pp. 26–29. IEEE.
- [9] Lomada, B. R. and Reddy, V. N. B., (2024). Design and evaluation of bidirectional dual-input dc-dc converter for integration with electric vehicles. In *2024 2nd International Conference on Cyber Physical Systems, Power Electronics and Electric Vehicles (ICPEEV)*, pp. 1–5. doi:10.1109/ICPEEV63032.2024.10931877.
- [10] Mohd Tumari, M., Saealal, M., Ghazali, M., and Abdul Wahab, Y., (2012). H-infinity with pole placement constraint in lmi region for a buck-converter driven dc motor. *PECon 2012 - 2012 IEEE International Conference on Power and Energy*, pp. 530 – 535. doi: 10.1109/PECon.2012.6450271.
- [11] Montoya-Acevedo, D., Gil-González, W., Montoya, O. D., Restrepo, C., and González-Castaño, C., (2024). Adaptive speed control for a dc motor using

- dc/dc converters: An inverse optimal control approach. *IEEE Access*, 12, pp. 154503–154513. doi:10.1109/ACCESS.2024.3482982.
- [12] Park, D., Zadeh, M. K., and Skjetne, R., (2020). Dc-dc converter control for peak-shaving in shipboard dc power system via hybrid control. In 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 681–686. doi:10.1109/ICIEA48937.2020.9248194.
- [13] Rakin, F. I., Saha, U., and Rashid, A. H. U., (2024). Enhanced isolated bidirectional resonant dc-dc converter with artificial neural network control for electric vehicle onboard chargers. In 2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), pp. 864–869. doi:10.1109/ICEEICT62016.2024.10534449.
- [14] Silva-Ortigoza, R., Alba-Martínez, J., Marciano-Melchor, M., Hernández-Guzman, V., and Marcelino-Aranda, M., (2012). Flatness based control of a buck-converter/dc-motor combination. *Proceedings - 2012 9th Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, CERMA 2012*, pp. 294 – 299. doi:10.1109/CERMA.2012.55.
- [15] Silva Ortigoza, R., Alba Juarez, J.N., Garcia Sanchez, J. R., Antonio Cruz, M., Hernandez Guzman, V. M., and Taud, H., (2017). Modeling and experimental validation of a bidirectional dc/dc Buck power electronic converter-dc motor system. *IEEE Latin America Transactions*, 15(6), pp. 1043–1051. doi: 10.1109/TLA.2017.7932691.
- [16] Talooki, M. F., Rezanejad, M., Khosravi, R., and Samadaei, E., (2021). A novel high step-up switched-capacitor multilevel inverter with self-voltage balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(4), pp. 4352– 4359. doi:10.1109/TPEL.2020.3019223.
- [17] Zhou, C., Qin, G., Wang, Y., Liu, W., and Luo, X., (2017). Sensorless control of brushless dc motor based on buck converter. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 32(12), pp. 197 – 204.