

Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica

Primer avance de tesis

Modelado dinámico y estimación paramétrica de
un motor DC con inercia variante en el tiempo
usando algoritmos evolutivos

Ing. Isaac Tinoco Ramírez

Directora de tesis: Dra. Griselda Quiroz Compeán
Codirector de tesis: Dr. Juan Ángel Rodríguez Liñán

22 de noviembre de 2024

Contenido

1 Introducción

- Justificación
- Antecedentes
- Definición del problema
- Objetivos

2 Metodología

- Diagrama general de la propuesta
- Modelado de motores DC
- Ajuste paramétrico del modelo

3 Plan de trabajo

4 Avances de tesis

- Simulación de modelos reportados
- Caracterización de motor sin carga

5 Trabajo a futuro

6 Conclusiones parciales

7 Referencias

La importancia del modelado de motores DC



Figura 1: Aplicaciones de motores DC [1].

Antecedentes

Autor(es)	Año	Metodología	Resultados
M. F. Fazdi et al. [2]	2023	Revisión de técnicas para identificación de parámetros de motores DC.	Identificación precisa y tendencias actuales destacadas.
A. E. Said et al. [3]	2021	Comparación de sistemas AC y DC con momento de inercia variable.	Los sistemas DC superan en respuesta dinámica a los AC.

Tabla 1: Tabla comparativa del estado del arte de artículos relacionados con el tema de tesis.

Antecedentes

Autor(es)	Año	Metodología	Resultados
D. Puang-downreong et al. [4]	2017	Algoritmo de polinización de flores para identificar parámetros del modelo de motor DC.	Alta precisión y eficiencia en la identificación de parámetros.
A. E. Said [5]	2012	Modelado y simulación de motores DC con momento de inercia variable.	El momento variable afecta estabilidad y rendimiento.

Tabla 2: Continuación de estado actual del conocimiento.

Definición del problema

La inercia como parámetro variante en el tiempo puede ocasionar una serie de problemas en los motores DC:

- Vibraciones excesivas
- Ineficiencia energética
- Desgaste prematuro
- Fallos operativos

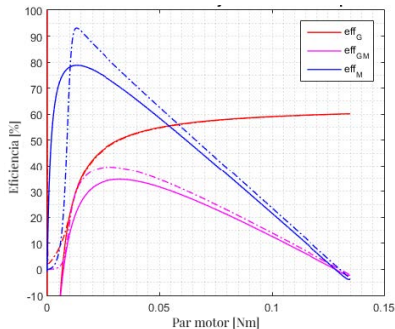


Figura 2: Eficiencia de un motor DC en función del par. eff_G es la eficiencia en la caja reductora; eff_M es la eficiencia en el motor; eff_{GM} es la eficiencia en el motor con la reducción [6].

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un modelo dinámico y realizar la estimación paramétrica de un motor de corriente directa con inercia variante en el tiempo en la carga externa utilizando algoritmos evolutivos.

Objetivos específicos

- Analizar el impacto de las cargas dinámicas en el funcionamiento de un motor de corriente directa.
- Realizar un estudio comparativo de algoritmos evolutivos para estimar parámetros del modelo matemático propuesto.

Propuesta general

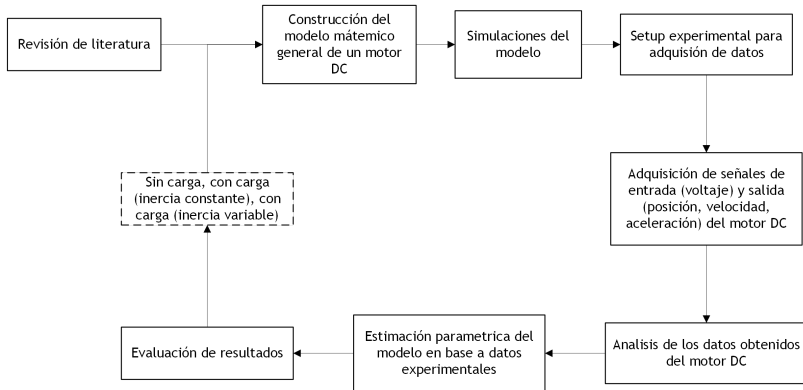


Figura 3: Diagrama general de la propuesta.

Representación física de un motor DC

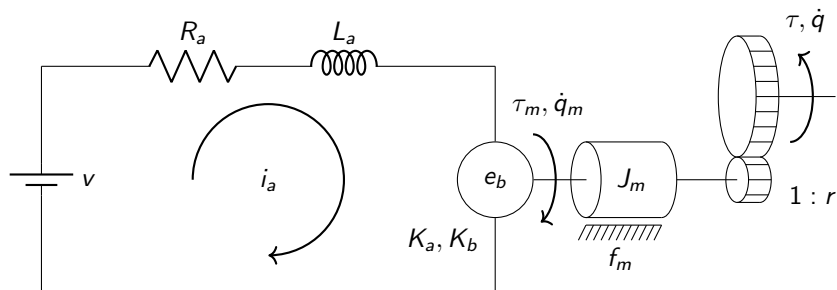


Figura 4: Diagrama de un motor DC [7].

Construcción del modelo

De la **figura 4** se obtiene el siguiente modelo de un motor DC:

$$\frac{K_a}{rR_a} v = \frac{L_a J_m}{R_a} \frac{d}{dt} \ddot{q} + \left(J_m + \frac{L_a}{R_a} \frac{\partial f_m(r\dot{q})}{\partial (r\dot{q})} \right) \ddot{q} + \frac{1}{r} f_m(r\dot{q}) + \frac{K_a K_b}{R_a} \dot{q} + \frac{\tau}{r^2} + \frac{L_a}{r^2 R_a} \dot{i} \quad (1)$$

Fricción lineal y no lineal

Fricción lineal.

$$f_m(\dot{q}_m) = f_m \dot{q}_m \quad (2)$$

Fricción no lineal.

$$f_m(\dot{q}_m) = f_m \dot{q}_m + c_1 \text{sign}(\dot{q}_m) \quad (3)$$

Donde f_m y c_1 son constantes positivas y $\text{sign}(s)$ es una función signo, que está definida como:

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} -1 & \text{si } s < 0, \\ +1 & \text{si } s > 0, \end{cases} \quad (4)$$

En cero esta función es **discontinua**.

Tipos de modelos

- **Modelo completo.** Se considera la inductancia de armadura (L_a).
 - Modelo completo con fricción lineal.
 - Modelo completo con fricción no lineal.
- **Modelo reducido.** Se considera la inductancia de armadura $L_a \approx 0$.
 - Modelo reducido con fricción lineal.
 - Modelo reducido con fricción no lineal.

Propuestas de modelos para un motor DC

Modelo completo con fricción lineal

Aplicando la fricción lineal al modelo de la ecuación (1) se obtiene:

$$\frac{K_a}{rR_a}v = \frac{L_a J_m}{R_a} \frac{d}{dt} \ddot{q} + \left(J_m + \frac{L_a}{R_a} f_m \right) \ddot{q} + \left(f_m + \frac{K_a K_b}{R_a} \right) \dot{q} + \frac{\tau}{r^2} + \frac{L_a}{r^2 R_a} \dot{i} \quad (5)$$

Modelo completo con fricción no lineal

Aplicando la fricción no lineal al modelo de la ecuación (1) se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{K_a}{rR_a}v = & \frac{L_a J_m}{R_a} \frac{d}{dt} \ddot{q} + \left(J_m + \frac{L_a}{R_a} f_m \right) \ddot{q} + \left(f_m + \frac{K_a K_b}{R_a} \right) \dot{q} \\ & + \frac{c_1}{r} \text{sign}(r\dot{q}) + \frac{\tau}{r^2} + \frac{L_a}{r^2 R_a} \dot{i} \end{aligned} \quad (6)$$

Propuestas de modelos para un motor DC

Modelo reducido con fricción lineal

Aplicando la fricción lineal al modelo reducido por $L_a \approx 0$:

$$\frac{K_a}{rR_a}v = J_m\ddot{q} + \left(f_m + \frac{K_a K_b}{R_a}\right)\dot{q} + \frac{\tau}{r^2} \quad (7)$$

Modelo reducido con fricción no lineal

Aplicando la fricción no lineal al modelo reducido por $L_a \approx 0$:

$$\frac{K_a}{rR_a}v = J_m\ddot{q} + \left(f_m + \frac{K_a K_b}{R_a}\right)\dot{q} + \frac{c_1}{r}\text{sign}(r\dot{q}) + \frac{\tau}{r^2} \quad (8)$$

Algoritmos evolutivos y de inteligencia colectiva

Se usarán cuatro algoritmos para la estimación paramétrica de los modelos:

- GA (Genetic Algorithm) [8].
- Evonorm (EVOLutionary Algorithm of Random Variables with NORMAl Distributions) [9].
- PSO (Particle Swarm Optimization) [10].
- WOA (Whale Optimization Algorithm) [11].

Plan de trabajo

Objetivos	Actividades	Productividad
Objetivo específico 1	Investigación y desarrollo de modelos dinámicos de un motor DC con y sin inercia de carga	Reporte de avance de tesis
Objetivo específico 2	Implementación del algoritmo y validación por medio de experimentos	Artículo en congreso nacional o internacional
Tesis	Capítulos de la tesis redactados	Una tesis de maestría

Tabla 3: Desglose de la propuesta de trabajo

Simulaciones de modelos reducidos

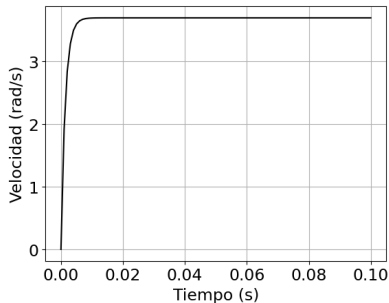
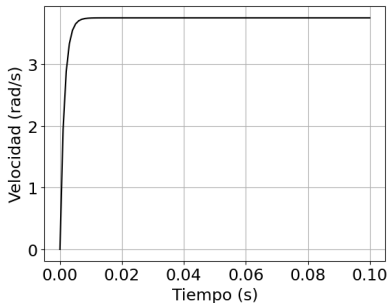


Figura 5: Respuestas de los modelos reducidos. Izquierda: Simulación de modelo reducido con fricción lineal. Derecha: Simulación de modelo reducido con fricción no lineal [12].

Simulaciones de modelos completos

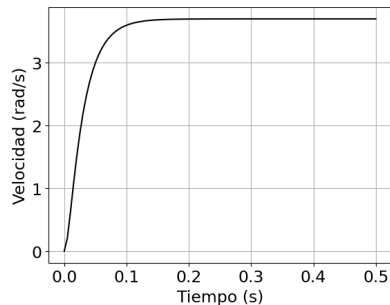
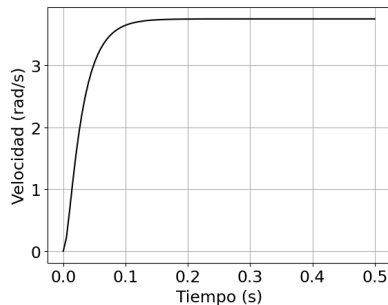


Figura 6: Respuestas de los modelos completos. Izquierda: Simulación de modelo completo con fricción lineal. Derecha: Simulación de modelo completo con fricción no lineal [12].

Setup experimental

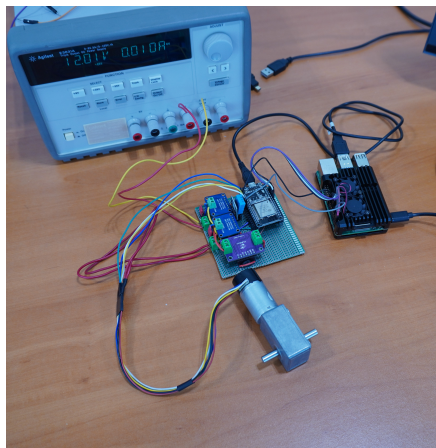


Figura 7: Setup experimental con motor DC de 10RPM, tarjeta de adquisición (centro) y Raspberry Pi Model 4 (derecha arriba).

Setup experimental

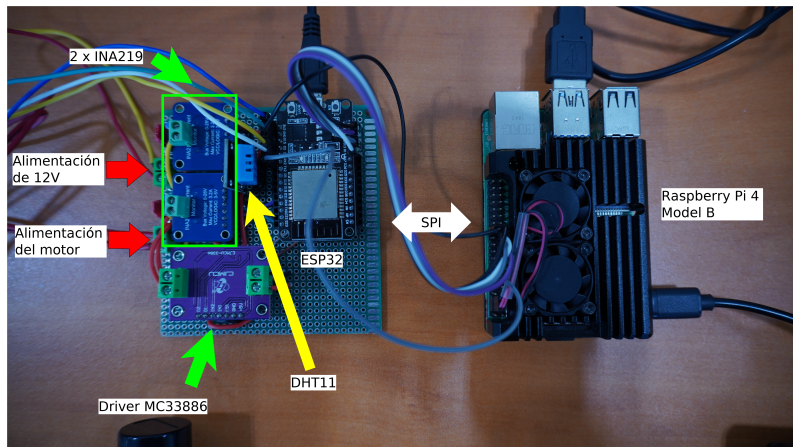


Figura 8: Componentes del banco de pruebas (sin el motor DC visible).

Respuestas del motor DC - 10RPM

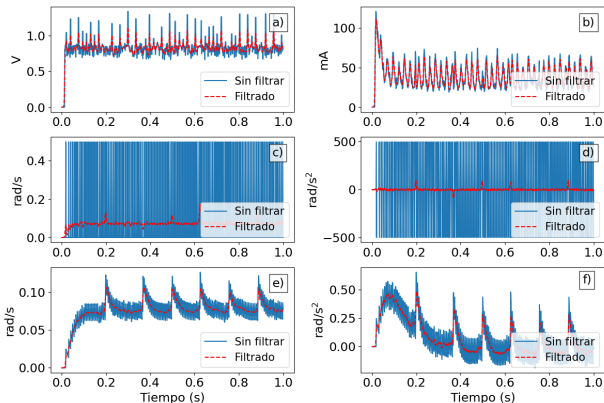


Figura 9: Señales obtenidas del setup experimental a 1V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

R respuestas del motor DC - 10RPM

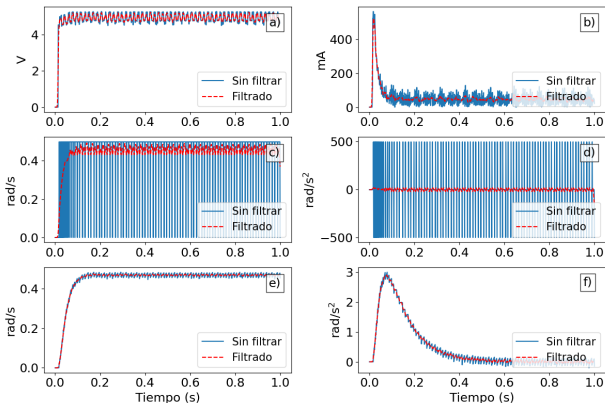


Figura 10: Señales obtenidas del setup experimental a 5V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

R respuestas del motor DC - 10RPM

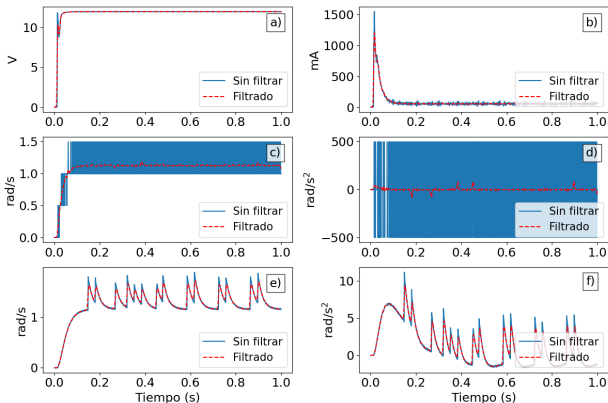


Figura 11: Señales obtenidas del setup experimental a 12V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Región de trabajo del motor DC - 10RPM

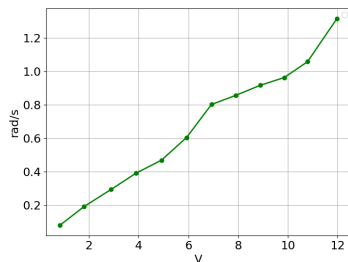
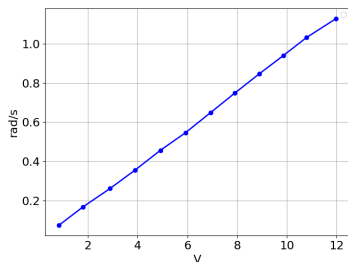


Figura 12: Voltaje vs velocidad promedio del motor DC. Izquierda: Velocidad promedio por Euler. Derecha: Velocidad promedio estimada por filtro pasabajos.

Región de trabajo driver MC33886

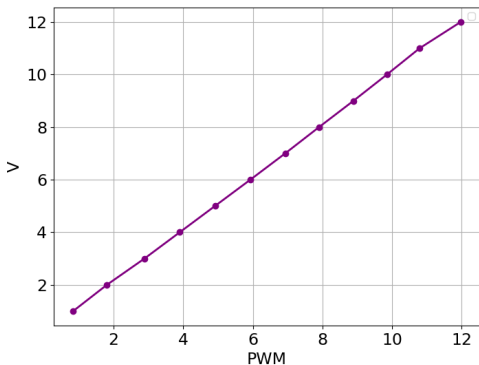


Figura 13: Señal de PWM (V) vs Voltaje promedio medido en la salida del driver.

Identificación de planta por medio de función de transferencia

Función de transferencia del motor DC de 10RPM obtenida en MATLAB con la toolbox System Identification:

$$FT = \frac{580,2173}{s^2 + 138,4152s + 6146,2} \quad (9)$$

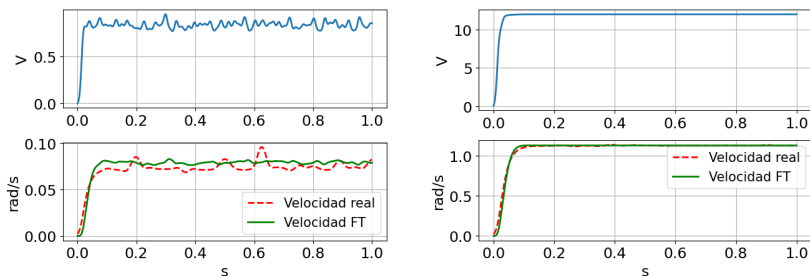


Figura 14: Respuesta de la función de transferencia a entradas de voltaje reales. Izquierda: Respuesta a 1V. Derecha: Respuesta a 12V.

Respuesta en frecuencia

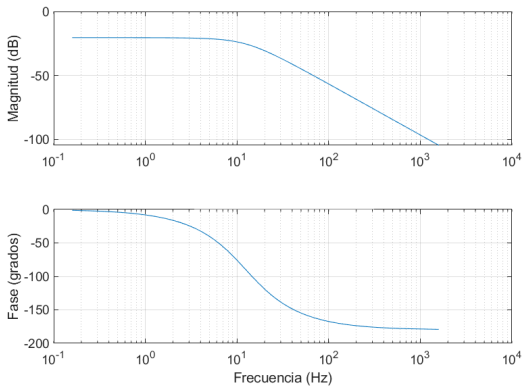


Figura 15: Diagrama de Bode en base a la función de transferencia del motor DC de 10RPM.

Entrada senoidal

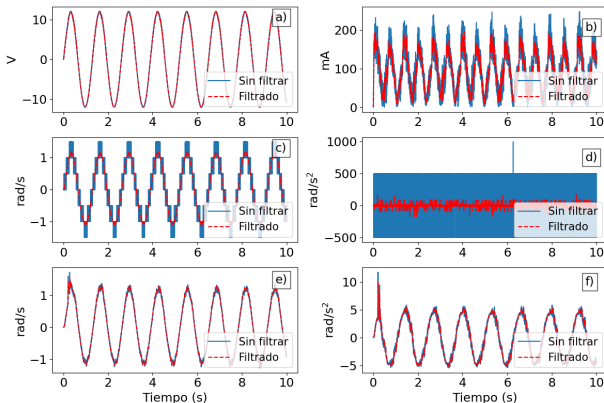


Figura 16: Señales obtenidas del setup experimental a 0.7Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Setup para experimentos con carga

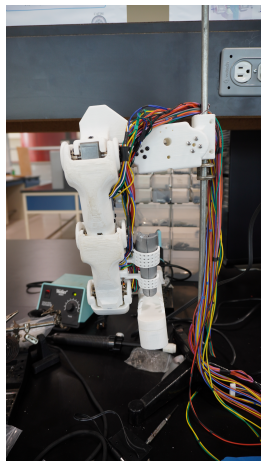
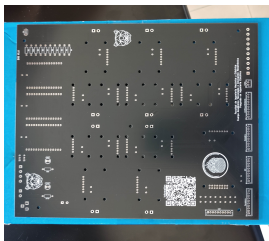
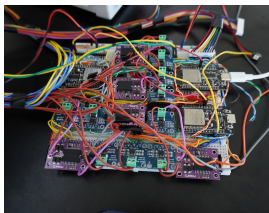


Figura 17: Izquierda: Exoesqueleto de miembro inferior con 5DOF. Derecha arriba: Sistema de adquisición para el exoesqueleto en protoboard. Derecha abajo: Tarjeta fabricada para la adquisición, diseñada en KiCAD.

Trabajo a futuro

- Realizar experimentos con carga.
- Estimar parámetros con algoritmos evolutivos.

Conclusiones parciales

- Con las simulaciones sin carga, la diferencia en el tiempo de asentamiento de la respuesta del motor DC no es significativa.
- Se debe mejorar el calculo de la velocidad y aceleración en línea, ya que presenta errores de cuantificación.
- La respuesta del driver MC33886 es prácticamente lineal.
- El motor DC de 10RPM mantiene una ganancia constante en el rango de 0.1Hz a 10Hz, sin embargo, a partir de 0.1Hz comienza a existir un desfase de la señal.

Referencias I

- [1] J. Alamelu y M. Asaithambi, “Review of Medical Cyber Physical System based Infusion Pump-perception on control strategy,” *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 8, pág. 169 427, abr. de 2021. DOI: 10.4108/eai.29-4-2021.169427.
- [2] M. F. Fazdi y P.-W. Hsueh, “Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor: A Review,” *Electronics*, vol. 12, n.º 12, 2023, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics12122559.
- [3] E. Addasi y A. Awwad, “A comparative study of performance of AC and DC electric drive control systems with variable moment of inertia,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, págs. 588-597, abr. de 2021. DOI: 10.11591/eei.v10i2.2768.

Referencias II

- [4] D. Puangdownreong, S. Hlungnamtip, C. Thammarat y A. Nawikavatan, “Application of flower pollination algorithm to parameter identification of DC motor model,” , págs. 1-4, 2017. DOI: [10.1109/IEECON.2017.8075889](https://doi.org/10.1109/IEECON.2017.8075889).
- [5] E. Addasi, “Modelling and simulation of dc electric drive control system with variable moment of inertia,” *International journal of electrical and power engineering*, vol. 4, ene. de 2013. DOI: [10.5013/IJSSST.a.13.05.03](https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.13.05.03).
- [6] I. Kecskés, E. Burkus y P. Odry, “Gear efficiency modeling in a simulation model of a DC gearmotor,” , págs. 000 065-000 070, 2018. DOI: [10.1109/CINTI.2018.8928193](https://doi.org/10.1109/CINTI.2018.8928193).
- [7] R. Kelly, V. Santibanez y A. Loria, *Control of robot manipulators in joint space*, en, 2005.^a ed. London, England: Springer, 2005.

Referencias III

- [8] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975, Revised edition published in 1992 by MIT Press, ISBN: 978-0472084609.
- [9] H.-P. Schwefel, *Evolution and Optimum Seeking*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1995, ISBN: 978-0471922681.
- [10] J. Kennedy y R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," en *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)*, vol. 4, Perth, Australia, 1995, págs. 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [11] S. Mirjalili y A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, págs. 51-67, 2016. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.

Referencias IV

- [12] M. Rashidifar, A. Rashidifar y H. Ahmadi, "Modeling and Control of 5DOF Robot Arm Using Fuzzy Logic Supervisory Control," *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, vol. 2, ene. de 2013. DOI: [10.11591/ijra.v2i2.2974](https://doi.org/10.11591/ijra.v2i2.2974).

Apéndice B

Propuestas de modelos de un motor DC

Modelo reducido con fricción no lineal

Se utiliza la ecuación (23) de la fricción no lineal en (26) y resulta en el modelo reducido con fricción no lineal de un motor DC:

$$\frac{K_a}{rR_a} v = J_m \ddot{q} + \left(f_m + \frac{K_a K_b}{R_a} \right) \dot{q} + \frac{c_1}{r} \text{sign}(r\dot{q}) + \frac{\tau}{r^2} \quad (28)$$

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

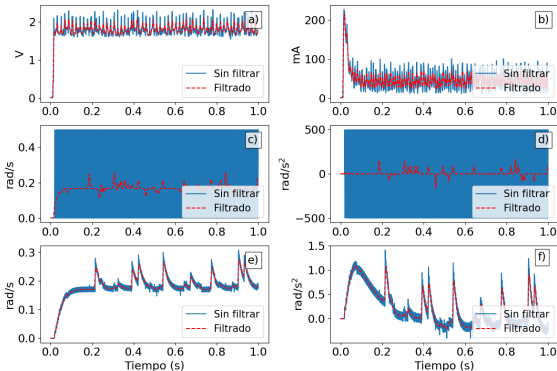


Figura 18: Señales obtenidas del setup experimental a 2V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

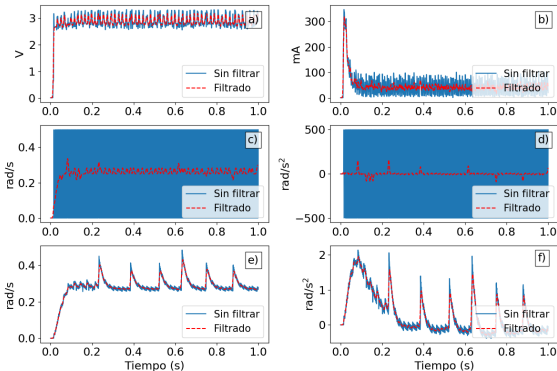


Figura 19: Señales obtenidas del setup experimental a 3V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

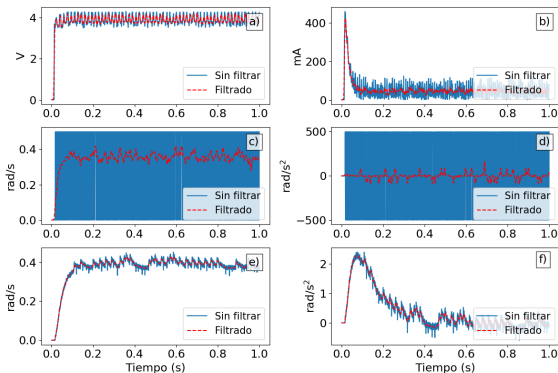


Figura 20: Señales obtenidas del setup experimental a 4V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

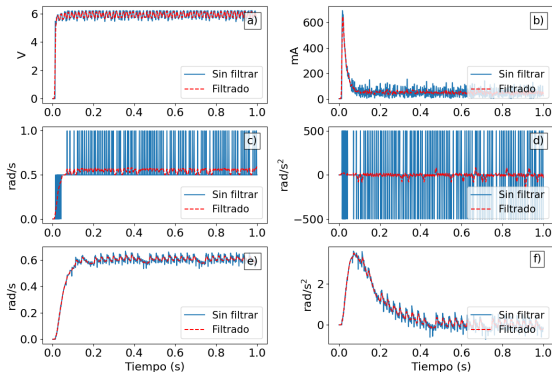


Figura 21: Señales obtenidas del setup experimental a 6V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

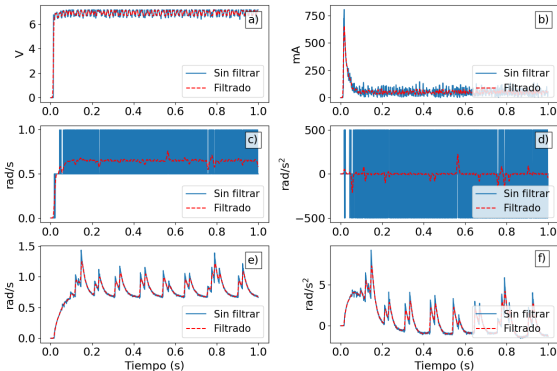


Figura 22: Señales obtenidas del setup experimental a 7V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

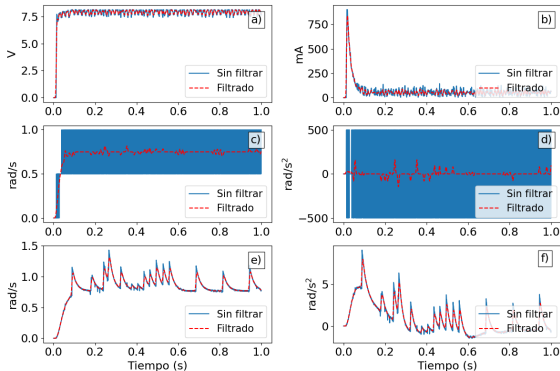


Figura 23: Señales obtenidas del setup experimental a 8V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

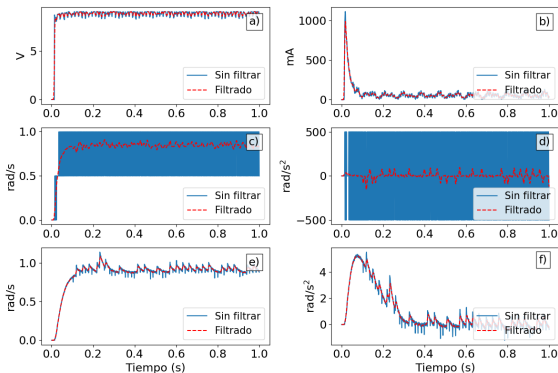


Figura 24: Señales obtenidas del setup experimental a 9V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

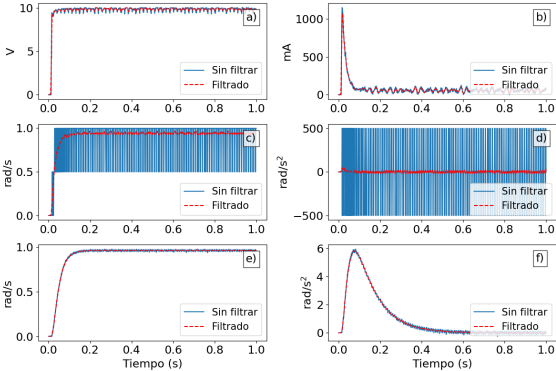


Figura 25: Señales obtenidas del setup experimental a 10V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice C

Respuestas del motor DC - 10RPM

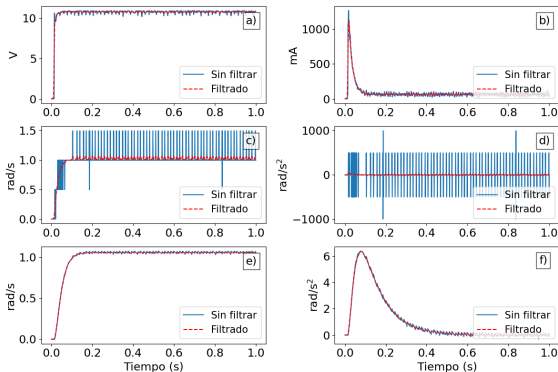


Figura 26: Señales obtenidas del setup experimental a 11V, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

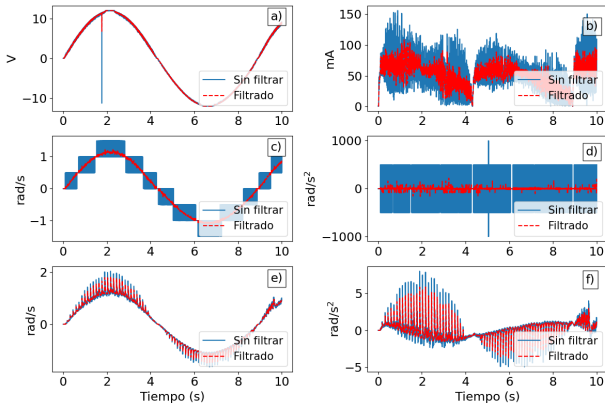


Figura 27: Señales obtenidas del setup experimental a 0.1Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

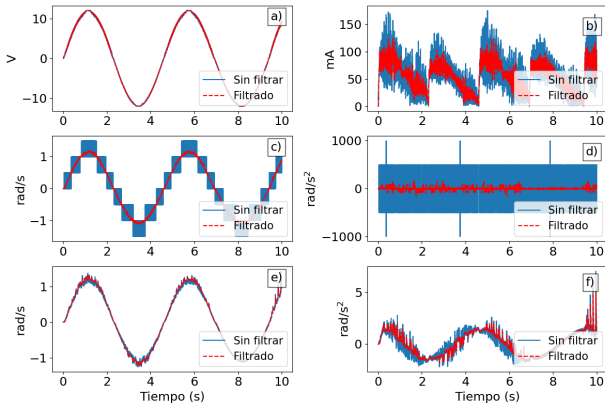


Figura 28: Señales obtenidas del setup experimental a 0.2Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

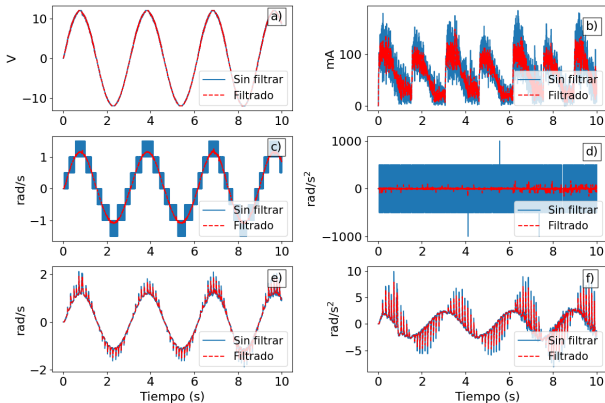


Figura 29: Señales obtenidas del setup experimental a 0.3Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

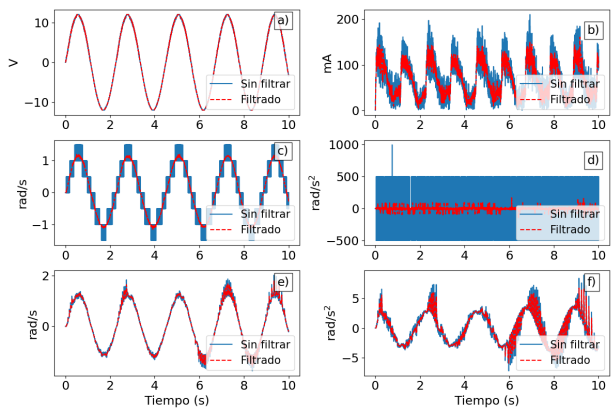


Figura 30: Señales obtenidas del setup experimental a 0.4Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

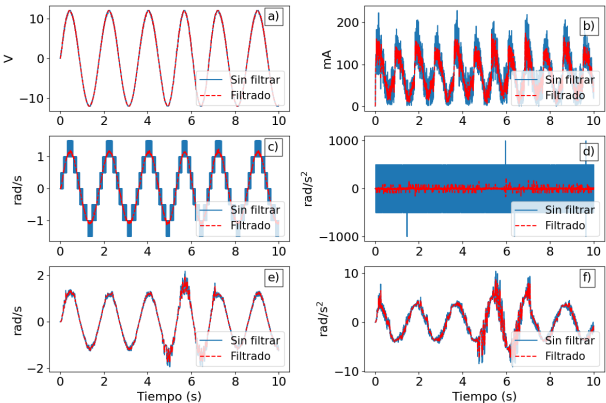


Figura 31: Señales obtenidas del setup experimental a 0.5Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

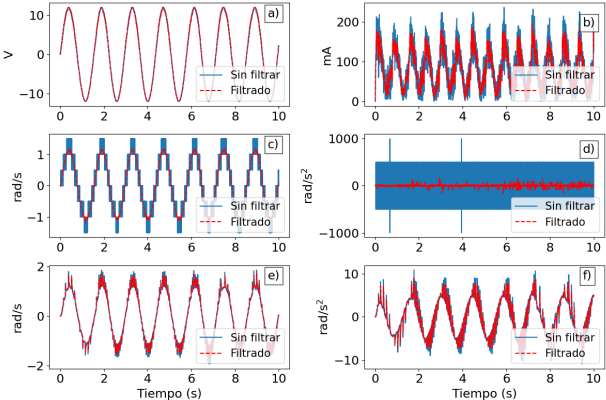


Figura 32: Señales obtenidas del setup experimental a 0.6Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

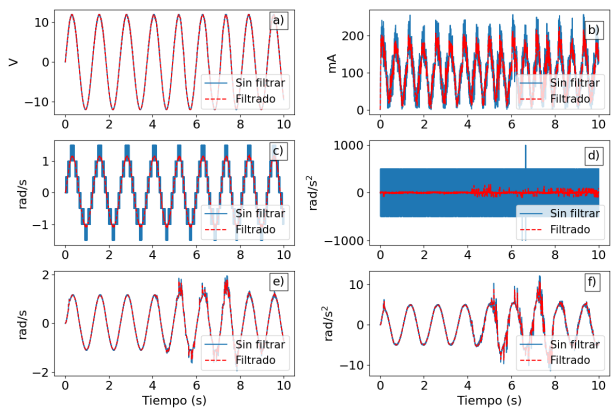


Figura 33: Señales obtenidas del setup experimental a 0.8Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.

Apéndice D

Entrada senoidal

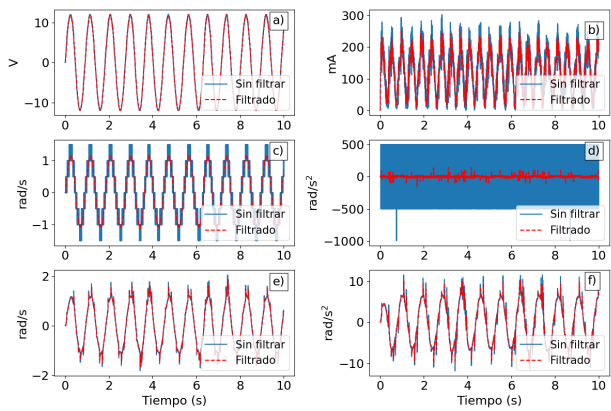


Figura 35: Señales obtenidas del setup experimental a 1Hz, filtradas y sin filtrar. a) Voltaje; b) Corriente; c) Velocidad calculada con Euler; d) Aceleración calculada con Euler; e) Velocidad estimada por filtro pasabajos; f) Aceleración estimada por filtro pasabajos.