

Modelado de un Acumulador de Energía Dinámico Mediante Volante de Inercia en Simulink

Torres, Juan Carlos ^a, Douairi, Hamza ^a, González, Jaime ^b, Carta, José Antonio ^a, Cabrera, Pedro ^a

^a Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, España.

^b Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, España

To cite this article: Torres, Juan C., Douairi, Hamza, González, Jaime, Carta, José A., Cabrera, Pedro. 2024. Modelado de un Acumulador de Energía Dinámico Mediante Volante de Inercia en Simulink. XIX Simposio CEA de Control Inteligente (2024)

Resumen

El artículo presenta un modelo de acumulador de energía dinámico mediante un volante de inercia usando Simulink, diseñado para optimizar el uso de energía renovable en plantas desaladoras. El sistema se adapta a condiciones variables de presión y caudal. Incluye la simulación de una fuente de alimentación trifásica, la medición de potencia activa y reactiva, la medición de tensión de línea y la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de la tensión (RMS, por sus siglas en inglés), y una máquina de inducción tipo jaula de ardilla. Se detalla la inercia del sistema y los parámetros de operación, enfatizando la validación del modelo y la importancia de la parametrización debido a la no linealidad y la necesidad de ajustes específicos para diferentes aplicaciones.

Palabras clave: Modelado e integración de sistemas de energía renovable, Operación y planificación del almacenamiento de energía, Modelado y simulación de sistemas de energía, Control inteligente de sistemas de energía, Sistema de tiempo continuo

Modeling of a Dynamic Energy Accumulator Using a Flywheel in Simulink

Abstract

The article presents a dynamic energy storage model using a flywheel with Simulink, designed to optimize the use of renewable energy in desalination plants. The system adapts to variable pressure and flow conditions. It includes the simulation of a three-phase power supply, the measurement of active and reactive power, the measurement of line voltage and the root mean square (RMS) of the voltage, and a squirrel-cage induction machine. The system's inertia and operating parameters are detailed, emphasizing model validation and the importance of parameterization due to the non-linear nature of these systems and the need for specific adjustments for different applications.

Keywords: Renewable Energy System Modeling and Integration, Energy Storage Operation and Planning, Modeling and simulation of power systems, Intelligent control of power systems, Continuous time system.

1. Introducción

Este proyecto busca optimizar el uso de energía renovable en plantas desaladoras operando bajo condiciones variables de presión y caudal. Para ello, se propone un sistema de control innovador basado en almacenamiento dinámico de energía, utilizando volantes de inercia con gestión inteligente para ajustar las variaciones instantáneas de energía renovable.

La función del volante de inercia como regulador, se basa en que este vaya compensando las desviaciones instantáneas entre la generación y la demanda de energía en plantas desaladoras alimentadas por energía eólica. Estos volantes permiten que las plantas operen de manera aislada de la red

eléctrica convencional, adaptando su consumo a la oferta de generación variable (Matos et al., 2024).

El proyecto incluye el estudio de un prototipo de sistema mecatrónico modular, utilizando técnicas de Machine Learning para gestionar la velocidad angular del volante de inercia. Este enfoque innovador permite que el sistema aprenda a operar de manera óptima, diferenciándose de los sistemas de control tradicionales.

Del objetivo general de este proyecto, se derivan objetivos específicos, el modelado y parametrizado de cada uno de los elementos que lo componen. Por ende, se ha realizado un modelo en Simulink para representar el comportamiento del

volante con respecto a la potencia que este consuma o genere frente a las consignas de velocidad que se le den a la entrada.

2. Descripción de los elementos del modelo

A continuación, se describen los elementos principales del modelo de Simulink 2024, explicando su función y su contribución al sistema propuesto, representados en la Figura 1.

2.1 Fuente de alimentación y configuración del solucionador

En la Figura 2 se puede contemplar el “Configurador del Solucionador” define los parámetros de solución del modelo de Simulink, asegurando que el sistema de ecuaciones diferenciales que describe el modelo se resuelva correctamente durante la simulación. Por otra parte, la “Fuente de Voltaje Programable Trifásica” representa una fuente de voltaje programable trifásica, que simula el control realizado al motor a través del variador de frecuencia, utilizando la energía eólica para alimentar de forma controlada el motor. Esta fuente suministra la energía necesaria al sistema, proporcionando una entrada que alimenta al motor de inducción y otros componentes del modelo. En esta fuente se configurarán los parámetros en régimen constante y posteriormente un salto proporcional de tensión y frecuencia, simulando la operación del variador y observando la respuesta del volante frente a diversos cambios en la red.

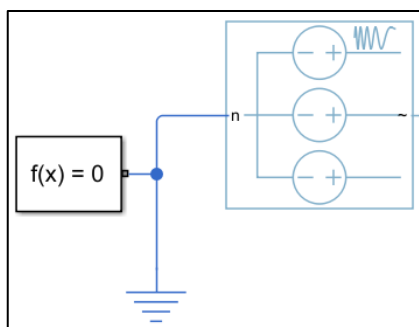


Figura 1. Bloque fuente de alimentación y configuración del solucionador.

2.2 Medición de potencia activa y reactiva

La Figura 3 representa el bloque crucial para el control y la regulación del sistema de energía renovable en la planta desaladora. Está compuesto por sensores que capturan los

valores de potencia activa (P) y reactiva (Q) del sistema (Willems, 2010). Estos sensores están conectados a la fuente de voltaje programable trifásica, permitiendo la monitorización en tiempo real de los parámetros eléctricos. Los datos obtenidos son esenciales para el sistema de control, proporcionando información precisa para ajustar y optimizar el uso de la energía generada por la fuente eólica. Esto asegura una operación eficiente y equilibrada de la planta desaladora.

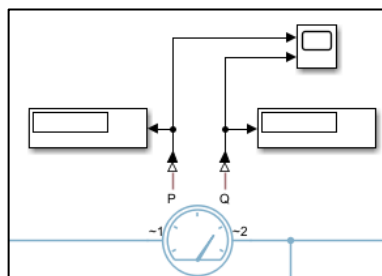


Figura 3. Bloque de medición de potencia activa y reactiva.

2.3 Medición de tensión de línea y RMS

En esta sección del modelo (Figura 4), se realiza la medición de la tensión de línea trifásica y el cálculo del valor RMS. El bloque de “Voltaje de Línea Trifásica” mide las tensiones de las tres fases del sistema. Estos valores de tensión se utilizan para obtener información sobre el estado de la red y son esenciales para el control preciso del sistema de energía.

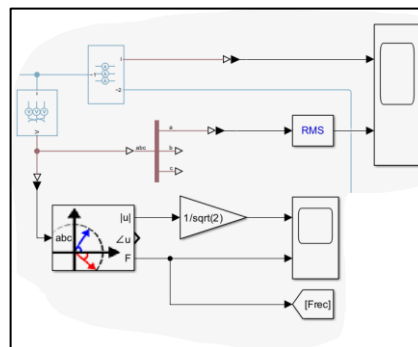


Figura 4. Bloque de medición de tensión de línea y RMS.

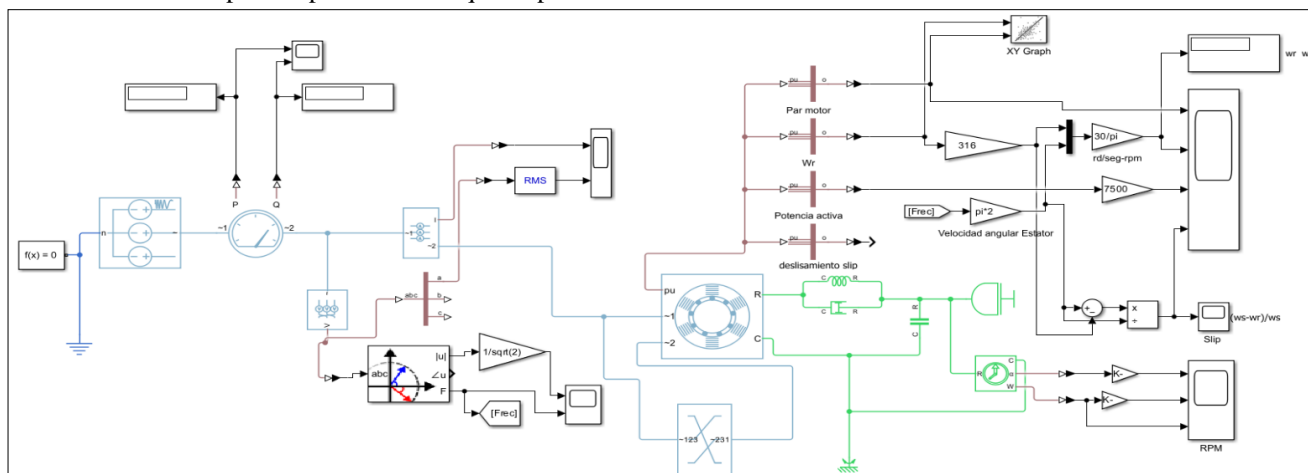


Figura 2. Diagrama de Bloques de Simulink.

El bloque de medición RMS calcula el valor cuadrático medio (RMS) de las señales de tensión. Esta se utiliza para la representación de la energía efectiva del sistema.

El Medidor de Fase de Positiva (PMU) basado en PLL es utilizado para calcular la secuencia positiva de las tensiones. Su principal función es sincronizar las fases y garantizar una operación estable y eficiente del motor de inducción. El PMU también calcula la magnitud y el ángulo de las tensiones, lo que permite un análisis detallado del estado de la red. La salida del PMU se normaliza usando un bloque que divide por la raíz cuadrada de dos, lo cual es necesario para convertir las mediciones a una base de referencia adecuada. Adicionalmente, se incluye un bloque que ajusta la frecuencia de la red, asegurando que las mediciones y el control sean precisos y reflejen las condiciones actuales de operación.

2.4 Máquina de inducción y permutación de fases

La Máquina de Inducción tipo Jaula de Ardilla es uno de los componentes principales del sistema. Este bloque simula el comportamiento de un motor de inducción (Kundur, 1993; Lyshevski, 1999; Ojo et al., 1990). La máquina de inducción es accionada por la fuente de voltaje trifásica y su modelo incluye parámetros como la resistencia y la inductancia del rotor y el estator, para configurar estos parámetros fue necesaria la utilización de datos estimados a través de la metodología (Cetin et al., 2020).

El bloque de Permutación de Fases, Figura 5, ubicado debajo del motor de inducción, se utiliza para cambiar el orden de las fases de la señal trifásica. Esta permutación de fases es necesaria para realizar la conexión en trifásica.

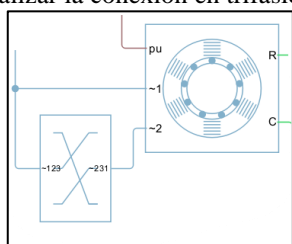


Figura 5. Bloque del motor de inducción y permutación de fases.

2.5 Inercia del sistema

En esta sección del modelo (Figura 6) se representa la inercia del sistema, un componente para la regulación dinámica de energía en la planta desaladora. El bloque de la “Máquina de Inducción tipo Jaula de Ardilla” está conectado a un circuito de inercia que simula diversos aspectos del comportamiento mecánico del sistema (Katsuhiko Ogata, 1990).

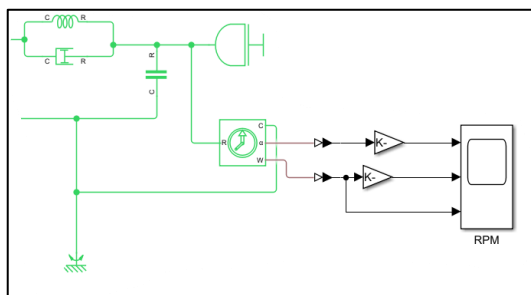


Figura 6. Bloque de inercia del sistema.

El circuito de inercia incluye una bobina, un condensador y un amortiguador. Cada uno de estos componentes tiene un papel específico en la simulación del comportamiento del sistema:

- **Bobina (L):** La bobina en el circuito representa la rigidez del eje del motor. La rigidez del eje es un parámetro importante que afecta la capacidad del motor para resistir deformaciones bajo carga. En el contexto del modelo, esta rigidez se simula mediante la inductancia de la bobina, que almacena energía en el campo magnético durante la operación. Para ello se toma el momento de inercia polar a través de la ecuación (1) y posteriormente se sustituye en la ecuación (2) para obtener la deformación y así sustituir en la (3) y tener la rigidez.

$$I = \frac{\pi}{2} * D^4 \tag{1}$$

$$\theta = \frac{M * L}{G * I_o} \tag{2}$$

$$k = \frac{M}{\theta} \tag{3}$$

- **Condensador (C):** El condensador en el circuito representa los parámetros de fricción rotacional del motor. La fricción rotacional es la resistencia que encuentra el rotor al girar, y está relacionada con las pérdidas mecánicas internas del motor y el coeficiente de fricción calculado durante los ensayos (Douairi et al., n.d.) Este coeficiente de fricción se refiere a la resistencia al movimiento del rotor debido a la interacción con el medio ambiente y otros componentes mecánicos. También se consideran parámetros de entrada en este bloque las fricciones estáticas y la de Coulomb y la velocidad para la fricción de Stribeck, los cuales vienen determinados intrínsecamente en los parámetros del motor.
- **Amortiguador rotacional (R):** este representa las pérdidas producidas por la deformación del eje, que a su vez está también relacionado con la rigidez del mismo. Para la obtención de este parámetro se parte de la ecuación diferencial de un movimiento rotacional.

$$I\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + k\theta = T \tag{4}$$

En esta ecuación 4, I representa el momento de inercia del sistema, $\ddot{\theta}$ es la aceleración angular, B es el coeficiente de amortiguamiento rotacional, $\dot{\theta}$ es la velocidad angular, k es la rigidez rotacional del eje, θ es el desplazamiento angular, y T es el par aplicado al sistema. Considerando que el término de la rigidez es tan elevado que la deformación angular será tan baja que se podrá despreciar. De esta forma quedaría como la ecuación 5:

$$B = \frac{T}{\omega} \tag{5}$$

El volante de inercia, representado en el diagrama, actúa como regulador dinámico que almacena y libera energía cinética para equilibrar las variaciones instantáneas entre la generación y la demanda de energía. Durante los periodos de exceso de generación de energía eólica, el volante de inercia almacena energía girando a altas velocidades. Cuando la demanda de energía supera la generación, el volante reduce su velocidad, liberando la energía almacenada para mantener la estabilidad del sistema. También se han colocado equipos de medida para obtener, velocidad, aceleración y torque generado por el volante de inercia.

2.6 Parámetros de operación y cálculo de deslizamiento

En la figura 7 se convierten los datos de salida del bloque de motor de unidades en tanto por uno a magnitudes reales y posteriormente se grafican. Estos datos son el Par Motor, la Velocidad del Rotor, La Potencia Activa, la Velocidad Angular del Estator (esta velocidad se compara con la velocidad del rotor para calcular el deslizamiento del motor) y el deslizamiento. Este se calcula utilizando la siguiente ecuación 6.

$$\frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (6)$$

Donde ω_s es la velocidad angular del estator y ω_r es la velocidad angular del rotor.

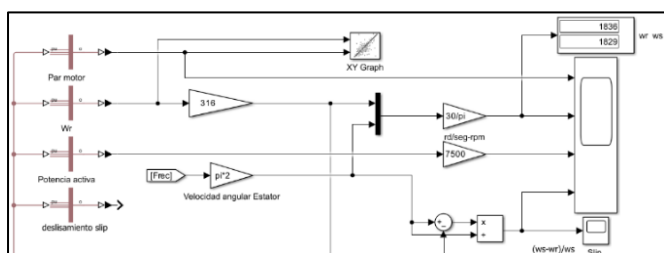


Figura 7. Bloque paso de parámetros en tanto por uno a magnitudes.

El bloque “XY Graph” permite visualizar la relación entre el par motor y la velocidad angular del rotor, facilitando el análisis del comportamiento del motor bajo diversas condiciones de operación. Este tipo de visualización es útil para identificar patrones y ajustar el control del sistema de manera efectiva.

Finalmente, los resultados del cálculo de deslizamiento y otros parámetros se utilizan para ajustar el control del sistema de almacenamiento de energía. Esta integración de mediciones y cálculos es fundamental para el éxito del proyecto, permitiendo una gestión inteligente y adaptable del sistema.

3. Validación del modelo

Para la validación del modelo se han realizado ensayos experimentales, obteniendo valores de potencia según diferentes consignas dadas al variador de frecuencia que controla el motor. Conocida la relación tensión frecuencia (V) (7) y pudiendo calcular la frecuencia (F) (8).

$$V = 8 * F \quad (7)$$

$$F = \frac{\omega_r}{60} \quad (8)$$

Para los tres saltos seleccionados para realizar la validación los resultados obtenidos han sido. Las gráficas que relacionan la potencia-velocidad-consigna para el tramo de aceleración han sido:

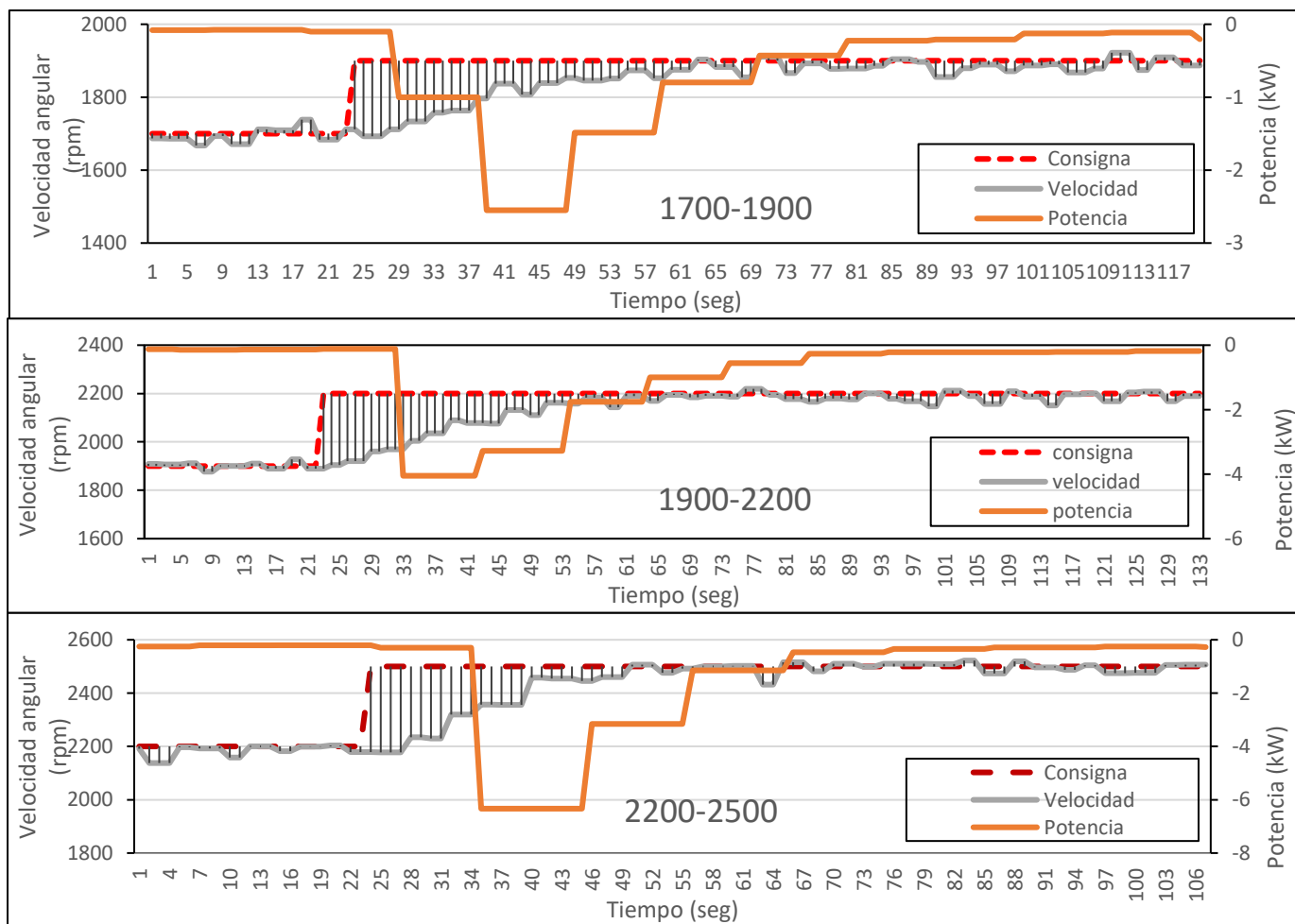


Figura 8. Relación potencia-velocidad-consigna para tramo de aceleración de: a)1700-1900, b)1900-2200, c)2200-2500.

Para el tramo de desaceleración se han obtenido:

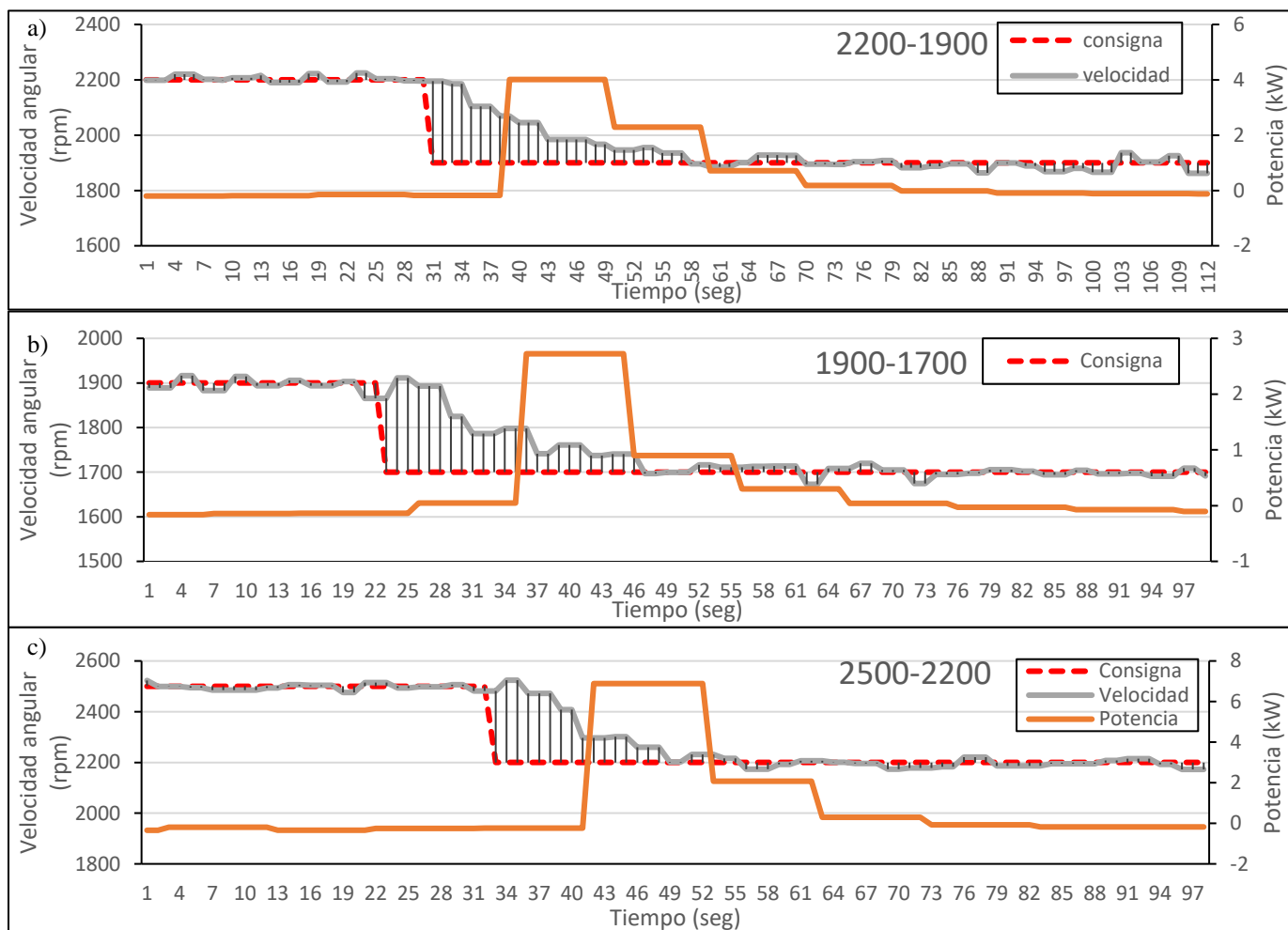


Figura 9. Relación potencia-velocidad-consigna para tramo de desaceleración de: a)2200-1900, b)1900-1700, c)2500-2200.

Trasladando los datos en forma de frecuencia y tensión a la fuente de alimentación del sistema de bloques de Simulink. Al introducirlos en el bloque de fuente de tensión y alimentar al resto del sistema se obtiene una simulación del modelo desarrollado donde se podrá ver como el volante genera o absorbe la energía frente a las variaciones de la frecuencia de la red, estimando así su capacidad como acumulador de energía dinámico. La parametrización de este tipo de sistema es muy valiosa, dado que no es un sistema lineal que, al escalarse para implementarlo en distintos tipos de sistemas vaya a tener una respuesta genérica fácil de estimar.

A continuación, se muestran los resultados del salto energético absorbido por el volante en la Figura 10, caso que se daría cuando el consumo de la planta desaladora sea inferior a la generada por la eólica.

Absorbiendo Energía					
w1 (rpm)	w2 (rpm)	Pmáx Real (kW)	Pmáx Modelo	Error Absoluto	Error Relativo
1700	1900	2,54	2,51	0,03	1,181102
1900	2200	4,05	4,09	-0,04	-0,98765
2200	2500	6,33	6,72	-0,39	-6,16114

Figura 10. Resultados del salto energético absorbido por el volante.

Por otro lado, en la Figura 11 se tiene los resultados del salto energético cedido por el volante, lo cual sucedería en caso de que la planta desaladora requiera de mayor cantidad de energía de la que está siendo generada por el parque eólico.

Cediendo Energía					
w1 (rpm)	w2 (rpm)	Pmáx Real (kW)	Pmáx Modelo	Error Absoluto	Error Relativo
2500	2200	6,88	6,77	0,11	1,598837
2200	1900	4,01	3,91	0,1	2,493766
1900	1700	2,72	2,88	-0,16	-5,88235

Figura 11. Resultados del salto energético cedido por el volante.

Como se puede observar, el sistema produce unos resultados bastante semejantes a los obtenidos en el banco de ensayo, las principales diferencias se deben, muy probablemente a errores debido a los grandes intervalos de muestreo que tienen los sensores que se han usado para la adquisición de los datos, obteniendo de esta forma la medida de la potencia desfasada de las velocidades. Al representar la entrada de un escalón unitario en la subida de velocidad por ejemplo de 1900-2200 (Figura 8. b), se pueden observar las siguientes gráficas en las Figuras 12,13,14 y 15.



Figura 12. Gráfica de par del motor frente al escalón de 1900-2200.

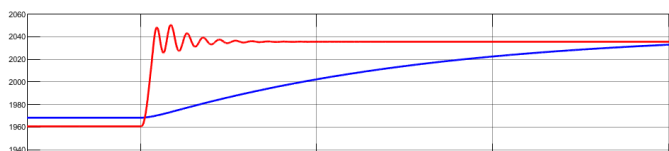


Figura 13. Gráfica de velocidad frente al escalón de 1900-2200.

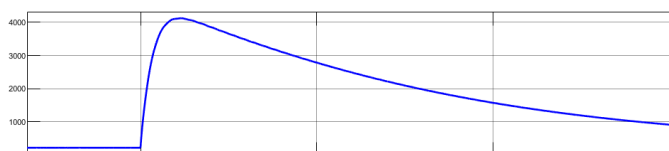


Figura 14. Gráfica de potencia frente al escalón de 1900-2200.

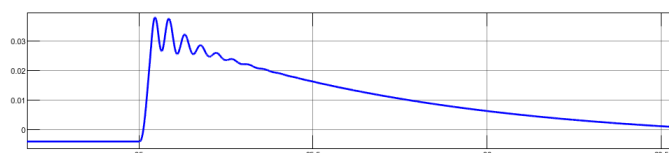


Figura 15. Gráfica de deslizamiento frente al escalón de 1900-2200.

4. Resultados

El modelo desarrollado en Simulink demostró ser efectivo para simular la operación de un sistema de acumulación de energía mediante volante de inercia. Se lograron los siguientes resultados clave:

- El sistema modelado fue capaz de simular con poco error los ciclos de absorción y descarga de energía con un margen pequeño de error.
- Se producen ciertos desfases en las medidas tomadas respecto a potencia y cambios de velocidad, lo cual genera la necesidad de implementar mejores equipos electrónicos para la toma de datos y posterior procesamiento de los mismos.
- Se ha puede observar como en los momentos de mayor demanda energética, el volante de inercia liberó la energía almacenada, manteniendo la estabilidad del sistema.

Estos resultados confirman la viabilidad de la línea en investigación de cara a mejorar el modelo para obtener resultados más precisos y ampliarlo de cara a poder usarlo con señales de entrada variables ya sean programables u otros bloques de Simulink con el objetivo de simular tanto la generación de un aerogenerador como el consumo de una desaladora cerrando el ciclo así de una microrred.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación es parte del proyecto PID2022-142148OA-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE.



Esta contribución ha sido co-financiada por la Ayuda RED2022-134588-T financiada por MICIU/AEI /10.13039/501100011033.

Referencias

- Cetin, O., Dalcali, A., & Temurtas, F. (2020). A comparative study on parameters estimation of squirrel cage induction motors using neural networks with unmemorized training. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.011>
- Douairi, H., Torres, J. C., Cabrera, P., & Carta, J. A. (n.d.). *Modelo lineal de pérdidas de un volante de inercia*. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.7133>
- Katsuhiko Ogata. (1990). *Ingeniería de Control Moderna* (3a. Ed).
- Kundur, P. (1993). *Power System Stability and Control*.
- Lyshevski, S. E. (1999). *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*.
- Matos, C., Cabrera, P., Carta, J. A., & Melián-Martel, N. (2024). Wind-Powered Desalination on Islands: A Review of Energy–Water Pathways. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 12, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jmse12030464>
- Ojo, J. O., Consoli, A., & Lipo, T. A. (1990). *An improved Model of Saturated Induction Machine*.
- Willems, J. (2010). *The IEEE standard 1459: what and why*.