

1-1-2017

Control de potencia activa de un sistema de almacenamiento de energía “Flywheel” aplicado a generación no convencional

William Ricardo Alvarado Rodríguez
Universidad de La Salle, Bogotá

John Jairo Hoyos Bermúdez
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Alvarado Rodríguez, W. R., & Hoyos Bermúdez, J. J. (2017). Control de potencia activa de un sistema de almacenamiento de energía “Flywheel” aplicado a generación no convencional. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/125

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**CONTROL DE POTENCIA ACTIVA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
DE ENERGÍA “FLYWHEEL” APLICADO A GENERACIÓN NO
CONVENCIONAL**



**WILLIAM RICARDO ALVARADO RODRÍGUEZ
JOHN JAIRO HOYOS BERMÚDEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**CONTROL DE POTENCIA ACTIVA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
DE ENERGÍA “FLYWHEEL” APLICADO A GENERACIÓN NO
CONVENCIONAL**

**WILLIAM RICARDO ALVARADO RODRÍGUEZ
JOHN JAIRO HOYOS BERMÚDEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
Maximiliano Bueno López, PhD
Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Septiembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia a Dios, por guiarme durante el desarrollo de este proyecto, llenándome de salud y entendimiento para poder afrontar de manera victoriosa cada reto presentado en el día a día.

A mi familia y a mi novia, por brindarme siempre el apoyo económico y moral. Además, del constante acompañamiento lleno de amor, comprensión, paciencia y confianza.

John Jairo Hoyos Bermúdez

A Dios por darme la salud, el entendimiento, la fortaleza y la perseverancia. Gracias a él, por darme la capacidad de levantarme de la adversidad, de no rendirme y de alcanzar las metas propuestas.

A mis padres José y Elsa por su amor, su constante apoyo, su entrega, su dedicación, sus esfuerzos y sacrificios, por la responsabilidad y la paciencia, por apoyarme y creer en mí. Gracias a los dos por apoyar mi carrera y creer que lo podía lograr.

A mis hermanos, Carlos, José, Fabián, Diego y Laura por su constante apoyo, sus consejos, sus ánimos y por creer en mí.

A mis amigos, que me acompañaron en este largo viaje, especialmente a John, mi compañero de tesis, gracias por el apoyo, la amistad, por los momentos vividos y compartidos.

William Ricardo Alvarado Rodríguez

Al ingeniero Maximiliano Bueno, por su constante dedicación, compromiso, apoyo y orientación, durante el desarrollo de este trabajo de grado, compartiendo con nosotros parte de sus conocimientos, aportando a nuestra formación profesional y personal.

A la Universidad de la Salle, por brindarnos la oportunidad de desarrollar este trabajo de grado, bajo la asesoría y acompañamiento de excelentes docentes, inculcando siempre el compromiso y responsabilidad social, aportando a nuestro desarrollo como personas íntegras.

John Jairo y William Ricardo

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. Introducción	8
II. Marco teórico.....	9
III. Metodología	11
IV. Desarrollo de la metodología	11
V. Análisis de resultados.....	20
VI. Conclusiones	21
VII. Recomendaciones	22
VIII. Referencias	22
<i>ANEXO A</i>	23
<i>ANEXO B</i>	24
<i>ANEXO C</i>	26
<i>ANEXO D</i>	28
<i>ANEXO E</i>	29
<i>ANEXO F</i>	30
<i>ANEXO G</i>	31

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores asignados a los parámetros de la máquina.....	12
Tabla 2. Datos de referencia del sistema.....	13
Tabla 3. Datos obtenidos para un controlador P	14
Tabla 4. Datos obtenidos para un controlador PI.....	15
Tabla 5. Datos obtenidos para un controlador PD.	16
Tabla 6. Datos obtenidos para un controlador PID.....	17
Tabla 7. Acciones de control implementadas en las diferentes variables	18
Tabla 8 .Controladores implementados.....	18
Tabla 9. Comparación controladores	19
Tabla 10. Valores de constantes usados para controlador tipo P	24
Tabla 11. Valores de constantes usados para controlador tipo PI.....	26
Tabla 12. Valores de constantes usados para controlador tipo PD	28
Tabla 13. Valores de constantes usados para controlad PID	29

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes de un sistema de almacenamiento de energía flywheel.	10
Figura 2. Componentes del volante de inercia de flywheel.	10
Figura 3. Bloque de una máquina síncrona de imanes permanentes.	11
Figura 4. Modelo electro-mecánico de la máquina de imanes permanentes.....	11
Figura 5. Modelo implementado para la simulación del sistema de almacenamiento de energía Flywheel	12
Figura 6. Gráfica velocidad de referencia del sistema	13
Figura 7. Gráfica de energía almacenada por el sistema.....	13
Figura 8. Modelo implementado para la simulación del sistema con controlador tipo P. ...	14
Figura 9. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo P	14
Figura 10. Gráfica comparativa energía almacenada, implementando controlador tipo P..	14
Figura 11. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PI.....	15
Figura 12. Gráfica comparativa energía almacenada, implementando controlador tipo PI..	15
Figura 13. Modelo implementado para la simulación del sistema con controlador tipo PD..	16
Figura 14. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PD.....	16
Figura 15. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PD.....	16
Figura 16. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PID.	17
Figura 17. Gráfica comparativa energía almacenada, implementando controlador tipo PID..	17
Figura 18. Modelo implementado para la simulación del sistema con controlador tipo lógica difusa.	18
Figura 19. Ilustración de la ventana del Toolbox Fuzzy.....	18
Figura 20. Entrada error en la ventana del Toolbox Fuzzy.....	18
Figura 21. Entrada corriente Id en la ventana del Toolbox Fuzzy	18
Figura 22. Entrada corriente Iq en la ventana del Toolbox Fuzzy	19
Figura 23. Salida Vd en la ventana del Toolbox Fuzzy	19
Figura 24. Salida Vq en la ventana del Toolbox Fuzzy.	19
Figura 25 Salida 0 en la ventana del Toolbox Fuzzy	19
Figura 26. Gráfica de velocidad implementando controlador tipo lógica difusa.....	19
Figura 27. Gráfica de energía almacenada implementando controlador tipo lógica difusa..	19
Figura 28. Gráfica comparativa de velocidad	20
Figura 29. Gráfica comparativa energía almacenada.....	20
Figura 30. Gráfica comparativa de velocidad entre los diferentes controladores implementados	31
Figura 31. Gráfica comparativa de energía almacenada entre los diferentes controladores implementados	31

Control de potencia activa de un sistema de almacenamiento de energía “flywheel” aplicado a generación no convencional

William Ricardo Alvarado Rodríguez, John Jairo Hoyos Bermúdez

Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia

Resumen— El almacenamiento de energía eléctrica en grandes cantidades a través de los tiempos ha sido un campo de interés e investigación, ya que este puede utilizarse para acumular el exceso de electricidad generado en las horas de menor actividad y descargarla en las horas de máximo consumo, permitiendo crear una infraestructura más resistente y así permitir que un sistema eléctrico sea más eficiente, lo que se traduce en la disminución de costos, reducción de emisiones y una potencia más confiable. El trabajo presentado en este artículo tiene como objetivo modelar y simular diferentes tipos de controladores para un sistema de almacenamiento de energía mediante volantes de inercia “Flywheel” aplicado a generación no convencional. Los esquemas de control gestionan las corrientes eléctricas instantáneas a través del volante de inercia “flywheel”, para que pueda consumir o inyectar la energía eléctrica necesaria, funcionando así, como un amortiguador y soporte de energía dinámica que permiten satisfacer los requisitos de la red. Para este sistema de almacenamiento resulta conveniente un controlador tipo PD, ya que garantiza el menor tiempo de estabilización y la mayor cantidad de energía almacenada.

Palabras clave— potencia, volante de inercia, control, generación no convencional.

Abstract — The storage of electrical energy in large quantities over time has been a field of interest and research, since this can be used to accumulate the excess electricity generated in the hours of less activity and discharge it in the hours of maximum consumption, allowing to create a more resistant infrastructure and thus to allow an electrical system to be more efficient, which translates into the reduction of costs, reduction of emissions and a more reliable power. Therefore the work presented in this article aims to model and simulate different types of controllers for an energy storage system using flywheels applied to non-conventional generation. The control schemes manage the instantaneous electric currents through the flywheel, so that it can consume or inject the necessary electrical energy, thus functioning as a shock absorber and dynamic energy support that allow to satisfy the requirements of the network. For this storage system a PD-type controller is convenient, as it guarantees the shortest stabilization time and the greatest amount of energy stored.

Keywords—power, flywheel, control, Non-conventional generation

I. INTRODUCCIÓN

Las fuentes tradicionales de energía -como las centrales eléctricas de carbón y gas natural- tienen que encenderse y apagarse a medida que la demanda fluctúa y no funcionan a su máximo rendimiento, esto significa que la energía no sólo cuesta más, sino que contamina más de lo necesario para satisfacer las necesidades energéticas. Debido a que estas instalaciones de generación no pueden responder a la demanda máxima en tiempo real, puede conducir a caídas de tensión y a una mala calidad en el suministro de la energía. Para mitigar estos problemas, se han buscado diversos métodos para almacenar la energía con el fin de crear una infraestructura más resistente y así permitir que el sistema eléctrico sea más eficiente, disminuyendo costos, reduciendo emisiones y entregando una potencia más confiable [1].

El almacenamiento de energía eléctrica puede utilizarse para acumular el exceso de electricidad generada en horas de menor actividad y descargarla en las horas de máximo consumo. Esta aplicación podría aportar beneficios significativos, incluyendo una menor necesidad de generación pico y una reducción de la tensión en las redes de transmisión y distribución. También puede proporcionar servicios auxiliares de gran importancia, tales como la regulación de la frecuencia de la red, el soporte de voltaje y las reservas operativas, mejorando así la estabilidad y fiabilidad de la red [2]. Además de esto, aunque las tecnologías de almacenamiento de energía no producen energía neta, pueden proporcionar energía eléctrica durante períodos de tiempo limitados, su presencia en un sistema puede eliminar las oscilaciones de tensión causadas por cambios rápidos en la carga, grandes corrientes transitorias y disminuir los cargos por demanda [3].

Durante el último siglo, la industria del almacenamiento de energía ha ido evolucionando y adaptándose a los cambios en las necesidades energéticas y los avances tecnológicos. Aunque es difícil almacenar electricidad directamente, la energía eléctrica puede almacenarse en otras formas, tales como energía potencial, química o cinética. Las tecnologías avanzadas de almacenamiento basadas en estos principios están

emergiendo como un recurso potencial para apoyar un mercado eléctrico eficiente. La reestructuración de la industria eléctrica, junto con el aumento de las necesidades de fiabilidad y calidad de la energía, han hecho que estas tecnologías sean más atractivas, lo que ha estimulado la investigación y el desarrollo de una serie de nuevas tecnologías, entre las más representativas se tienen, baterías de flujo redox, baterías de sodio-azufre, supercondensadores, bobinas superconductoras, almacenamiento de energía de aire comprimido y volantes de inercia [3], esta última objeto de estudio e implementación en el presente artículo.

El almacenamiento mediante volantes de inercia almacena la energía eléctrica en forma de energía cinética de una masa rotatoria, denominada volante de inercia, el cual se instala de forma sólida al eje mecánico de una máquina eléctrica. Para guardar energía la máquina acelera el volante de inercia (aumentando su velocidad angular), mientras que para liberar energía la máquina lo desacelera (reduciendo su velocidad angular) [4].

Existen diversas aplicaciones de los volantes de inercia, por ejemplo: a nivel mundial se contabilizan 52 proyectos en funcionamiento, con capacidad de 972 MW, dedicados tanto como complemento en las redes eléctricas, como a ser base de micro redes que aseguran la capacidad para la generación con fuentes renovables. El salto cuantitativo en los avances lo representa el reciente proyecto Iris para la creación en Irlanda del primer centro de servicio híbrido-Flywheel conectado a la Red en Europa. [5]

Una aplicación importante de los volantes de inercia es la mostrada por González, Bianchi y Sumper [6], en la cual se muestra la validación experimental en bancos de pruebas a escala de laboratorio de un algoritmo de gestión de la energía basada en técnicas de control de realimentación para un dispositivo de almacenamiento de energía Flywheel con el objetivo de compensar las perturbaciones de energía producidas por las alteraciones del par de ciclo de las turbinas de viento, debido a la desviación del flujo de aire a través de su sección en la torre. Otra aplicación de gran importancia y relevancia, es la presentada por Seisdedos [7] en su trabajo de grado, donde se muestra un control PI de un sistema de almacenamiento de energía empleando volantes de inercia en regulación de frecuencia. Otro tipo de control realizado se presenta en el artículo de Hamzaoui, Bouchafaa, Talha y Bouklifa [8] en el cual se muestra la utilización de un controlador de lógica difusa con el fin de controlar la velocidad del sistema de almacenamiento de energía Flywheel, este control se valida mediante simulaciones y se comparan los resultados obtenidos frente a los resultados de un controlador PI, encontrando para este caso específico que el controlador de

lógica difusa permite al sistema tener un funcionamiento dinámico y así mismo, permite obtener una respuesta rápida.

El trabajo presentado en este artículo tiene como objetivo modelar y simular diferentes tipos de controladores para un sistema de almacenamiento de energía mediante volantes de inercia “Flywheel” aplicado a generación no convencional. Los esquemas de control gestionan las corrientes eléctricas instantáneas a través del volante de inercia “flywheel”, para que pueda consumir o inyectar la energía eléctrica necesaria, funcionando así, como un amortiguador y soporte de energía dinámica que permiten satisfacer los requisitos de la red.

II. MARCO TEÓRICO

Almacenamiento mediante volantes de inercia (Flywheel Energy Storage System, FESS)

La energía almacenada puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2}J(w_{max}^2 - w_{min}^2), \quad (1)$$

donde J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] es el momento de inercia del volante de inercia y w_{max} y w_{min} [rad/s], las velocidades angulares máxima y mínima de rotación, respectivamente.

El momento de inercia de la Flywheel depende de la masa y la distancia al eje de giro es decir el radio del volante. La velocidad angular máxima de giro está determinada por la capacidad del material para resistir las fuerzas centrífugas que afectan a la rueda volante, es decir, la resistencia a la tracción del material. Los materiales más empleados en la construcción de los Flywheel son: Aluminio, acero, vidrio entre otros [9].

Según lo mostrado por Su, Jin, Wang [10], Itani, Bernardinis, Jammal [11] y Lopes [12], el momento de inercia para una flywheel se puede calcular de la siguiente manera:

$$J = \frac{1}{2}\pi h\rho(r_0^4 - r_i^4), \quad (2)$$

donde h [m] es la altura del cilindro, ρ es la densidad del material [kg/m^3] y r_0, r_i representan el radio externo e interno del cilindro respectivamente. Por tanto:

$$E = \frac{1}{2}\pi h\rho(r_0^4 - r_i^4) * (w_{max}^2 - w_{min}^2) \quad (3)$$

Componentes de los sistemas de almacenamiento de energía a base de flywheel

Los sistemas de almacenamiento energético que utilizan los volantes de inercia se encuentran clasificados en el grupo de sistemas de almacenamiento mecánicos [13].

Los principales componentes de este sistema son: Volante de inercia, máquina eléctrica, rodamientos, contenedor y elementos adicionales (electrónica de potencia, transformador, filtro, sistemas de refrigeración, entre otros), como se observa en la figura 1.

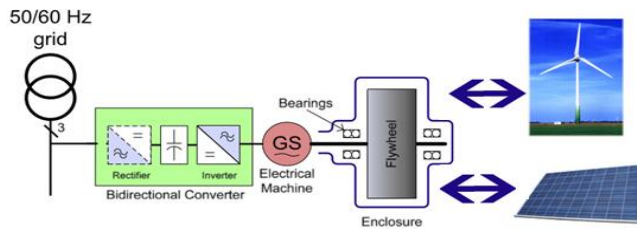


Figura 1. Componentes de un sistema de almacenamiento de energía flywheel. Fuente: Adaptado de Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system R. Sebastian R. Peña Alzola.

Máquina eléctrica: Es la responsable de transformar la energía eléctrica en cinética y viceversa. Se evita usar máquinas en las que se deba tener alguna conexión al rotor, pues las grandes velocidades desgastan estas conexiones limitando su vida útil y haciendo necesarios mantenimientos periódicos [14]. Se evita usar entonces las máquinas de corriente continua y se prefiere las máquinas sincrónicas con imanes permanentes y las de inducción con jaula de ardilla. La elección del tipo de máquina depende de las condiciones de operación y la cantidad de pérdidas que se esté dispuesto a tolerar.

Rodamientos (Bearings): Son partes fundamentales de los FESS dado que permiten el movimiento rotatorio del eje de la máquina. Como es difícil coincidir el centro de giro del rodamiento con en el eje de rotación del centro de masa del volante de inercia, generalmente se usan rodamientos que permiten libertad radial de movimiento al eje, de manera que disminuyen las fuerzas en estas piezas.

Recipiente (Enclosure): El conjunto está encerrado en un recipiente de protección que evita el acceso a los elementos móviles. En algunos casos, se efectúa el vacío para eliminar el rozamiento aerodinámico. Además de las partes mecánicas, incorpora un equipo de regulación de la potencia eléctrica que gestiona el flujo de energía (bidireccional) con el exterior. [7]

Volante de inercia: Los volantes de inercia son usualmente máquinas sincrónicas de imanes permanentes diseñadas con una inercia superior a la de las maquinas convencionales. La máquina es operada a alta frecuencia de rotación con el fin de almacenar gran cantidad de energía cinética. Las pérdidas son minimizadas mediante la creación de una presión de vacío en el entre-hierro y el uso de cojinetes magnéticos para eliminar la fricción. [7]

Su diseño es clave para alcanzar la mayor cantidad de energía almacenada posible. Como se observa en la Figura 2 este se

compone de: rotor, rodamientos, carcasa, bomba de vacío, entre otros [9].

Según la ecuación (1), la energía almacenada es proporcional al momento de inercia y al cuadrado de la velocidad angular del volante. Esto quiere decir que el parámetro más influyente en la energía de la máquina es la velocidad. La energía se almacena en forma de energía cinética en un disco que es girado por un motor (masa rotante), para extraer la energía, la máquina eléctrica actúa como un generador donde la energía es entregada por la masa rotante que empieza a desacelerar.

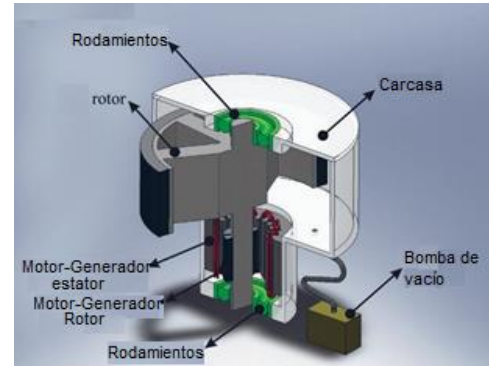


Figura 2. Componentes del volante de inercia de flywheel. Fuente: Adaptado de Oliveira [9]

Se pueden distinguir dos tipos de volantes de inercia según la magnitud de velocidad de giro. Los volantes de inercia de baja velocidad LFESS (por sus siglas en inglés: Low Flywheel Energy Storage System) que tienen un límite máximo de velocidad que ronda los miles de revoluciones por minuto, mientras que los de alta velocidad HFESS (por sus siglas en inglés: High Flywheel Energy Storage System) pueden tener velocidades máximas que rondan varias decenas de miles de revoluciones por minutos [15]. Ambos tienen similares tiempos de respuesta eléctrica dado que se conectan de la misma forma a la red. Los LFESS son utilizados cuando se necesita almacenamiento de corto plazo y bajo costo, donde el peso no es una variable importante, mientras que los HFESS son utilizados para almacenar la energía por mayor cantidad de tiempo en un dispositivo más compacto y de menor peso.

La máquina de imanes permanentes se puede modelar mediante las siguientes ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$v_d = r_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q \quad (4)$$

$$v_q = r_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - w_e (L_d i_d + \varphi_f) \quad (5)$$

$$T_e = J \frac{dw_r}{dt} + F w_r + T_M \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3}{2}p(\varphi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (7)$$

$$w_e = p w_r \quad (8)$$

donde:

- p : Número de pares de polos
- φ_f : Flujo permanente
- v_d : Voltaje en eje directo
- v_q : Voltaje en eje en cuadratura
- i_d : Corriente en eje directo
- i_q : Corriente en eje de cuadratura
- r_s : Resistencia de los enrollados
- L_d : inductancia de eje directo
- L_q : Inductancia de eje en cuadratura
- w_e : Frecuencia eléctrica de la máquina
- w_r : Velocidad del rotor de la máquina
- J : Coeficiente de inercia
- F : Coeficiente fricción
- T_e : Torque eléctrico
- T_M : Torque mecánico

III. METODOLOGÍA

Fase de investigación- En esta fase se realizó la consulta de la información sobre el sistema de almacenamiento de energía flywheel, sus componentes, su funcionamiento, sus aplicaciones y su representación. Dicha consulta se realizó en fuentes primarias y secundarias, tales como: Tesis de grado, artículos, libros, revistas y páginas web, con el fin de contextualizarse en el tema.

Fase de diseño y realización- En esta etapa se obtuvieron las diferentes ecuaciones matemáticas involucradas en el sistema de almacenamiento, con las cuales se realizó el respectivo modelo en el software Matlab-Simulink. Luego, se diseñaron los diferentes controladores a implementar (P, PI, PD, PID, Lógica difusa)

Simulación- Se implementaron los diferentes controladores en la simulación del sistema de almacenamiento. Asignando los valores de las constantes para cada tipo de control, los cuales se determinaron de manera empírica a ensayo y error, verificando que estos valores no lleven a que el sistema supere los valores límites de diseño.

Comparación de resultados- A partir de la fase anterior, se realizó un comparativo entre los controladores simulados, para obtener de esta manera el controlador más adecuado para este sistema de almacenamiento, a partir de la observación de las variables de velocidad y energía del sistema.

Análisis de resultados- Con la comparación realizada en la fase anterior, se determinó la mejor estrategia de control a implementar en este sistema.

IV. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

A partir de la investigación realizada, se identificó que el volante de inercia o flywheel se puede representar por medio de una máquina síncrona de imanes permanentes. En la figura 3 se muestra la representación de la máquina en el software Simulink. Este bloque tiene como entrada el torque mecánico y los puntos de conexión a la red trifásica. Como salida posee un vector denominado “m” el cual incluye las corrientes y voltajes de las fases a, b, c; las corrientes y voltajes de los ejes de cuadratura q y d, así como la velocidad del rotor y el torque electromecánico.

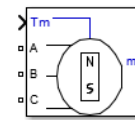


Figura 3. Bloque de una máquina síncrona de imanes permanentes. Fuente: Tomado de Matlab®.

En la figura 4 se muestran los componentes internos de la máquina síncrona de imanes permanentes, los cuales conforman el modelo electro-mecánico de la máquina. En dicho modelo, las ecuaciones se desarrollan internamente en cada uno de los bloques mostrados.

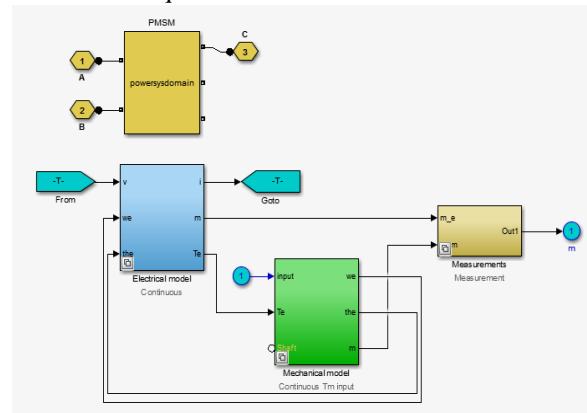


Figura 4. Modelo electro-mecánico de la máquina de imanes permanentes. Fuente: Matlab®.

Las ecuaciones de este modelo coinciden con las ecuaciones encontradas en la literatura consultada [7] [16], por lo cual es válido la implementación de dicho bloque para la simulación de este sistema de almacenamiento.

La máquina se configuró con 3 fases, con forma de onda senoidal y rotor tipo de polos salientes, teniendo como entrada el torque mecánico (T_m), el cual es nulo ya que no se aplican fuerzas externas a esta máquina. Los valores de los parámetros utilizados en la simulación son los mostrados en la tabla 1, los cuales son asignados de manera predeterminada por Matlab.

TABLA 1. VALORES ASIGNADOS A LOS PARÁMETROS DE LA MÁQUINA

Parámetro	Valor
Resistencia fase del estator [Ohm]	0.0485
Inductancias Ld [H], Lq [H]	[8.5e-3, 8.0e-3]
Flujo establecido por imanes [V.s]	0.1194
Inercia: J [Kg.m ²]	2.7
Amortiguamiento: F [N.m.s]	0.0004924
Polos	4
Fricción estática: Tf [N.m]	0
Condiciones iniciales, Velocidad [rad/s], ángulo [deg], ia, ib [A]	[0,0,0,0]

Fuente Propia

El coeficiente de inercia se modificó para obtener un modelo más preciso y cercano al real. Teniendo en cuenta que para este caso de estudio se implementará un volante de inercia de baja velocidad (LFESS), se tiene que la velocidad máxima es de 10000 rpm y según criterios de diseño la velocidad mínima es de 3000 rpm. Además, el material seleccionado es el acero el cual tiene una densidad (ρ) de 7800 [kg/m³] y una tensión de ruptura (σ) de 400 a 550 [MPa] [17]. Para σ se utilizó la mitad del valor máximo como factor de seguridad. $\sigma = 480/2 = 240$ MPa

De acuerdo con la ecuación (3) y lo desarrollado en [11] y [12], se tiene que la energía máxima y el radio externo, se pueden calcular como:

$$Emax = \frac{3}{8} \pi * r_o^3 * \sigma \quad (9)$$

$$r_o = \sqrt[3]{\frac{8 * Emax}{\pi * \sigma}} \quad (10)$$

Usando los datos mencionados anteriormente, se obtiene: $r_o=0.168$ m y $Emax = 1.34$ MJ, por tanto, mediante la ecuación (1) se tiene que el momento de inercia se puede calcular como:

$$J = \frac{2Emax}{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2} \quad (11)$$

obteniéndose un valor de inercia de 2.7 kg*m². El desarrollo matemático de las ecuaciones se muestra en el anexo A.

Modelo implementado

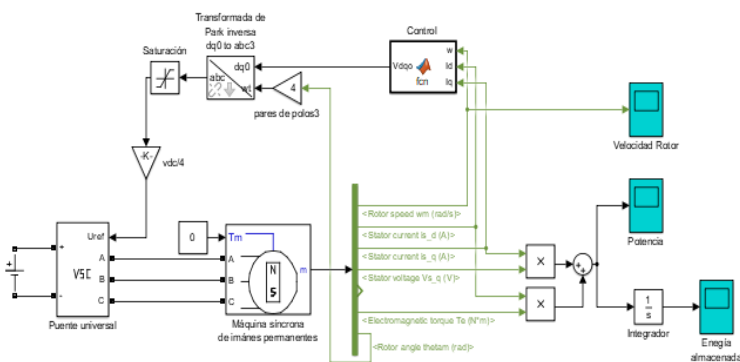


Figura 5. Modelo implementado para la simulación del sistema de almacenamiento de energía Flywheel. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 5, por simplicidad en la simulación del sistema no se tuvo en cuenta la modulación y los componentes asociados al lado de la red se representaron mediante un puente universal DC/AC, asumiendo para este caso un nivel de tensión constante que alimenta la máquina síncrona de imanes permanentes, la cual actúa como elemento almacenador de energía. Luego de esto, se observa el bloque de control, el cual contiene los códigos desarrollados para cada tipo de controlador. Este bloque tiene como entradas la velocidad del rotor y las corrientes de ejes de cuadratura y directo [wm, iq, id], como salida tiene un vector vdq0, el cual contiene los valores de los voltajes de ejes de cuadratura y directo, además de un valor 0. [Vq, Vd, 0]. Estos valores se utilizan para realizar la transformada de Park inversa, con el fin de convertir un marco de referencia giratorio a una señal trifásica, la cual está sujeta a los límites establecidos por el bloque de saturación que impide que el sistema opere en condiciones que no se puedan presentar de manera física.

El bloque de saturación junto con el bloque vdc/4 que se incluyen, busca mantener el índice de modulación en sus valores de operación (-1 y 1). Estos valores han sido determinados con base en pruebas realizadas en máquinas reales y en la simulación se considera una estrategia válida para acercarnos a condiciones de operación.

Los valores obtenidos después de realizar la transformada inversa de Park, son utilizados como señal de referencia de entrada en el puente universal, la cual representa los voltajes promedios generados en los terminales ABC del puente, finalizando de esta manera el lazo cerrado de este sistema.

Para verificar el comportamiento del sistema, se utilizaron 3 visualizadores que permiten observar las señales asociadas a la velocidad del rotor, potencia y energía almacenada, las cuales fueron obtenidas mediante las operaciones de las variables de salida de la máquina síncrona.

Diseño de controladores: debido a la fuerte dinámica presente en el sistema, por sus múltiples entradas y salidas, no es posible obtener una función de transferencia que incluya toda la información del sistema completo, por tal motivo, el ajuste de los valores de las constantes para cada tipo de controlador a implementar, no se pueden determinar por medio de los métodos convencionales tales como: fórmulas de sintonía de Ziegler y Nichols, fórmulas con criterios integrales o fórmulas de Aström y Hågglund, entre otros. Por esto, el ajuste de las ganancias para las estrategias de control implementadas en este sistema se realizó de manera empírica.

Como punto de partida se diseñó un controlador tipo Proporcional. Teniendo en cuenta, que en la máquina se tienen dos voltajes correspondientes a los ejes de cuadratura y directa,

se hace necesario implementar dos constantes proporcionales KP1 y KP2, aplicados a cada uno de estos voltajes.

Para el desarrollo de la estructura de los controladores se tiene en cuenta los errores asociados a la velocidad y a la corriente id.

Debido al modelo implementado y asumiendo condición balanceada en dq como aparece en las ecuaciones 4-8, las variables de control son Vd y Vq. Con la implementación de este modelo (máquina de rotor liso (Ld = Lq)), el objetivo es que id sea cero y que la velocidad ws sea la deseada para el caso de estudio. Con base en lo anterior, se tiene que Idref=0, razón por la cual, no se identifica este valor en la ecuación de Vd mostrada en lo controladores desarrollados.

Criterios de comparación

Como se mencionó anteriormente el parámetro más influyente en el almacenamiento de energía es la velocidad, por lo cual al sistema se le asignó una velocidad de referencia de 3000 rpm (314.159 rad/s), la cual es tomada como caso de estudio del presente trabajo, ya que se realizaron algunas pruebas con mayores velocidades pero el tiempo computacional aumentaba de manera significativa dificultando así la obtención de datos debido a las limitantes de hardware presentes en los equipos utilizados para la simulación. Por lo cual, se presentaron los resultados con la velocidad mencionada.

Se estableció como primer criterio de comparación el tiempo que el sistema tarda en alcanzar esta velocidad, teniendo una tolerancia del 1% para el tiempo de estabilización de esta señal.

Para determinar este primer criterio al sistema se le implementó el control proporcional con las constantes KP1 y KP2 igual a 1 y se simuló el sistema en lazo cerrado, obteniendo la siguiente gráfica de velocidad mostrada en la figura 6

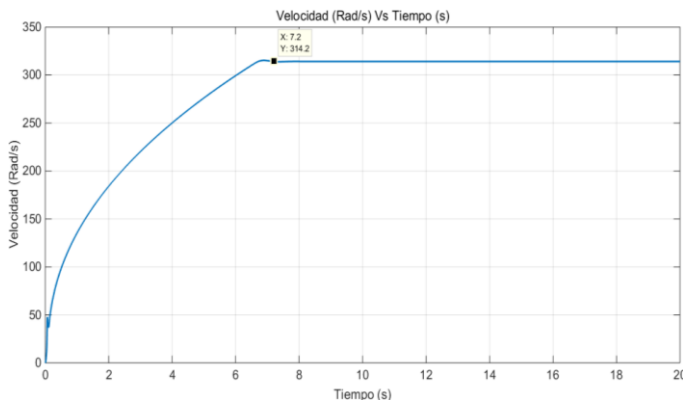


Figura 6. Gráfica velocidad de referencia del sistema. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

La energía almacenada por el sistema con estos valores de constantes es igual a $3.53 \cdot 10^5$ W·s, como se muestra en la figura 7

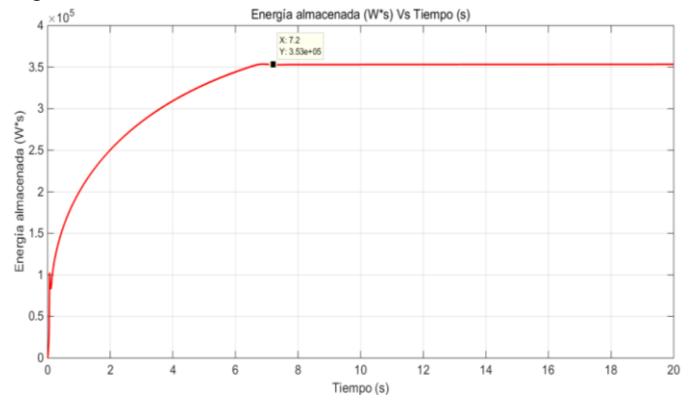


Figura 7. Gráfica de energía almacenada por el sistema. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

De acuerdo con la investigación realizada, se encontró que la eficiencia para un sistema de almacenamiento de energía flywheel es de aproximadamente 90% [7], por lo cual, teniendo en cuenta el valor de energía máxima calculado mediante la ecuación (9), se tiene que:

$$E_{lim} = (0.9)(1.34 \cdot 10^6) = 1.2MJ$$

Por lo tanto, el máximo almacenamiento de energía que se puede presentar para este sistema es de $1.2 \cdot 10^6$ W·s. Estableciendo esta energía como el segundo criterio de selección.

Los datos de comparación obtenidos anteriormente se relacionan en la tabla 2.

TABLA 2. DATOS DE REFERENCIA DEL SISTEMA

Tiempo (s) para llegar a la velocidad de referencia (314,159 rad/s)	Capacidad máxima de almacenamiento (W·s)
7,2 segundos	$3,53 \cdot 10^5$

Fuente Propia

CONTROL P

Para determinar el valor de las dos constantes, se varió cada una de éstas de forma independiente, aumentando su valor gradualmente, iniciando desde un valor igual a 0.05, además de esto, se le asignó en varias pruebas el mismo valor para las dos constantes como se puede observar en el ANEXO B.

En la tabla 3, se presentan 5 casos diferentes, en los que se muestran las variaciones más relevantes para los valores de las constantes, donde TE es el tiempo que tarda en alcanzar la velocidad de referencia y se estabiliza en este valor.

En la figura 8 se presenta el modelo utilizado, donde el bloque control contiene el código implementado, el cual se muestra en el ANEXO B. En las figuras 9 y 10 se observa de forma gráfica el tiempo en que el sistema tarda en alcanzar la velocidad de referencia establecida y la cantidad de energía almacenada por éste.

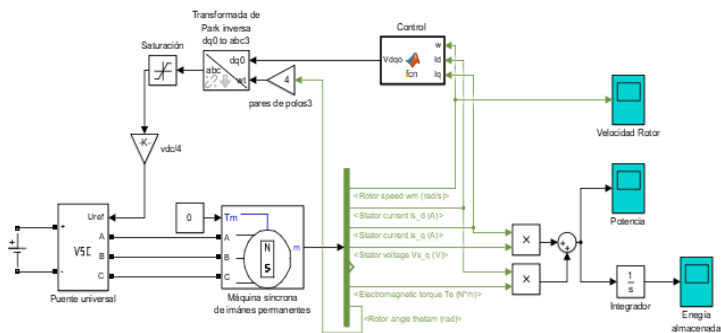


Figura 8. Modelo implementado para la simulación del sistema con controlador tipo P. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

TABLA 3. DATOS OBTENIDOS PARA UN CONTROLADOR P

Caso	Valores constantes		TE (s)	Energía almacenada (W·s)
	Kp1	Kp2		
1	15	15	6	$6,487 \cdot 10^5$
2	0,05	0,06	8,4	$1,921 \cdot 10^5$
3	0,05	15	145	$8,5 \cdot 10^5$
4	15	0,05	7	$1,647 \cdot 10^5$
5	1	9	10.02	$7,684 \cdot 10^5$

Fuente Propia

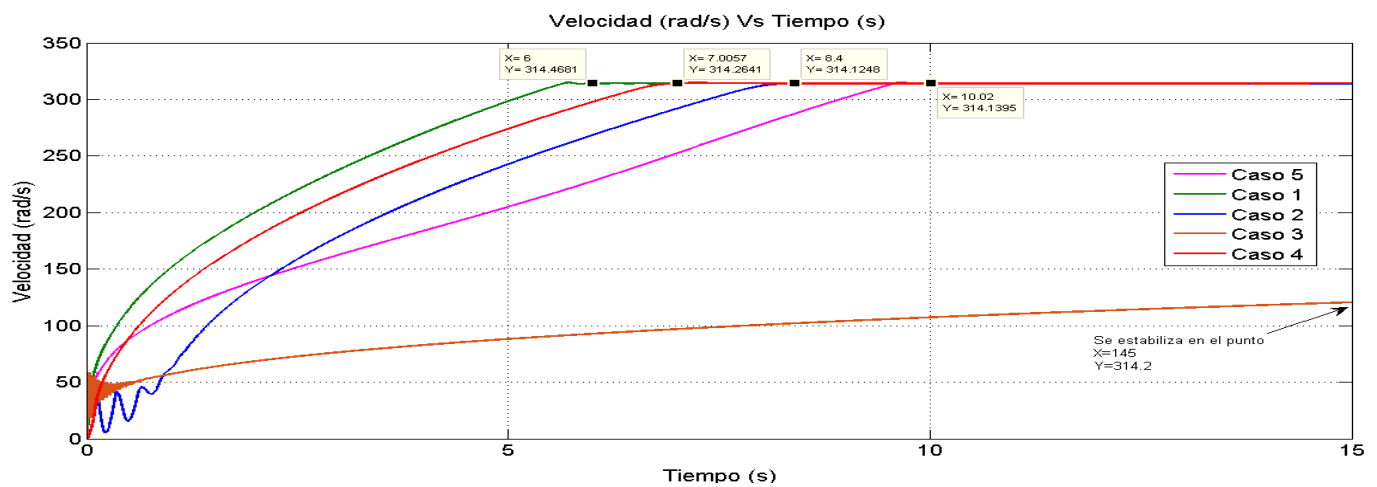


Figura 9. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo P. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

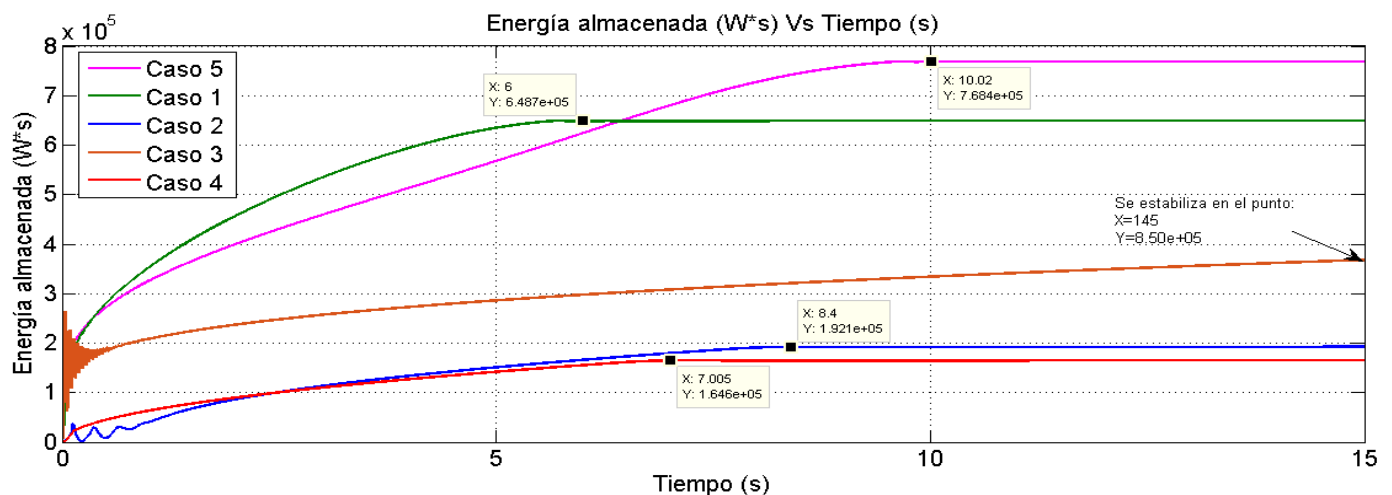


Figura 10. Gráfica comparativa energía almacenada, implementando controlador tipo P. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

CONTROL PI

Para este control se tienen las dos constantes proporcionales relacionadas en el anterior controlador aplicadas a cada uno de los voltajes y solo una constante K_i aplicada al voltaje de eje de cuadratura, esto debido a que durante la simulación de este controlador, se observó que para cualquier valor en la constante K_i aplicada al voltaje de eje directo el sistema se hacía inestable, por lo cual, para éste voltaje solo se tiene en cuenta la constante proporcional, despreciando de esta manera la acción integral.

Para determinar el valor de las constantes, se varió la constante K_{p2} con el fin de observar la influencia de esta en el sistema, dejando K_{p1} y K_i en un valor fijo. Una vez determinado el valor idóneo para esta constante K_{p2} se procedió de manera similar con las otras dos constantes. Las combinaciones realizadas para este controlador se muestran en el ANEXO C.

En la tabla 4, se presentan 4 casos diferentes, en los que se muestran las variaciones más relevantes para los valores de

las constantes, donde TE es el tiempo que tarda en alcanzar la velocidad de referencia y en el caso 2 el símbolo -, representa que la velocidad supera la de referencia. El modelo utilizado para este controlador es igual al del controlador P, con la diferencia en el código implementado en el bloque de control, el cual se muestra en el ANEXO C.

En las figuras 11 y 12 se pueden observar las respuestas del sistema para el conjunto de valores de constantes especificados en la tabla 4.

TABLA 4. DATOS OBTENIDOS PARA UN CONTROLADOR PI.

Casos	Valores constantes			TE (s)	Energía almacenada (W*s)
	K_i	K_{p1}	K_{p2}		
1	0,0403	0.5	0,0785	7,4	$1,72 \cdot 10^5$
2	0,5	5	5	-	-
3	10	5	1	120	$5,78 \cdot 10^5$
4	0,05	10	0.05	-	-

Fuente Propia

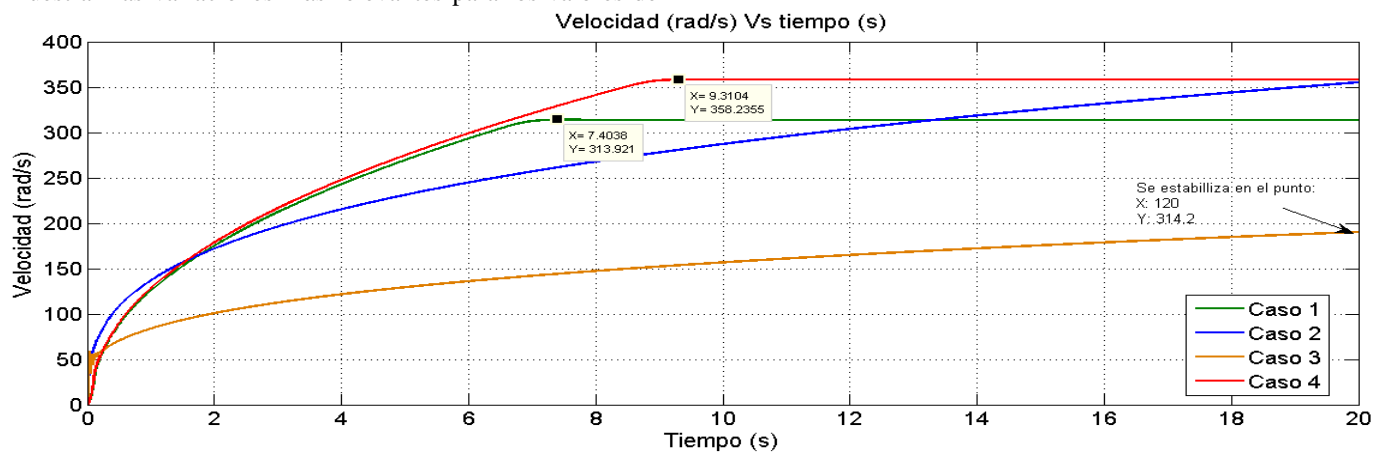


Figura 11. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PI. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

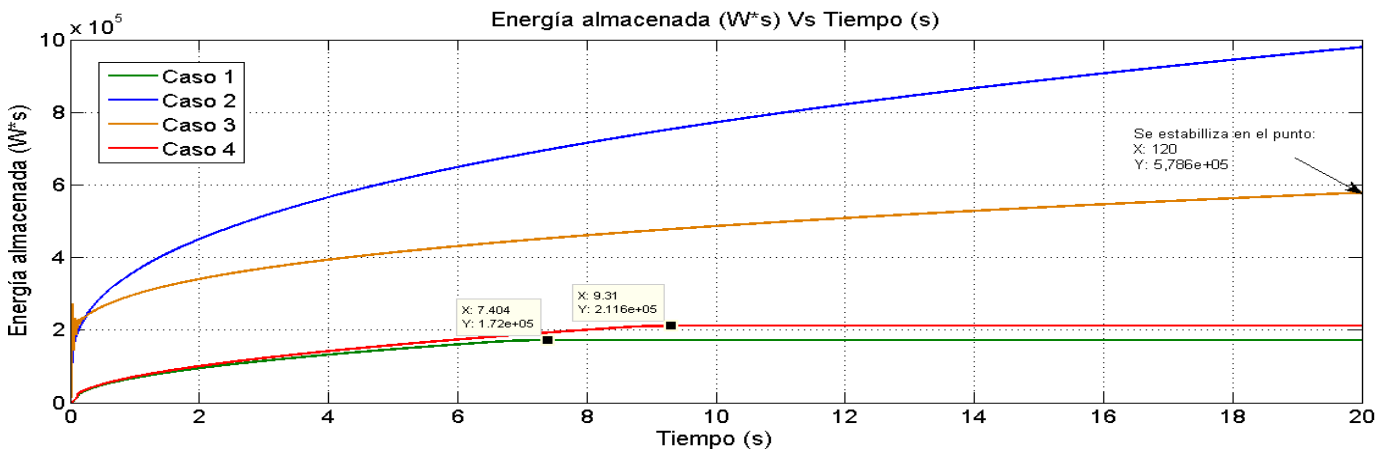


Figura 12. Gráfica comparativa energía almacenada, implementando controlador tipo PI. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

CONTROL PD

En la figura 13 se presenta el modelo implementado para este controlador y en las figuras 14 y 15 se pueden observar las respuestas del sistema para el conjunto de valores de constantes especificados en la tabla 5

Para este controlador se tienen las dos constantes proporcionales relacionadas en el controlador P y una constante Kd asociada a la acción derivativa. Esta acción derivativa se implementó mediante los bloques de Simulink, donde por medio de la constante (Velocidad Referencia) se determina el error de la velocidad, el cual es posteriormente derivado, aplicándole un valor de constante Kd. Esta acción derivativa junto con la constante igual a 0, forman un vector que es sumado con el vector proveniente de la acción proporcional que sale del bloque de control [Vd Vq 0], como se observa en la figura 13.

Para determinar el valor de las constantes se procedió de manera similar que en el controlador PI. Las combinaciones realizadas para este controlador se muestran en el ANEXO D.

En la tabla 5, se presentan 5 casos diferentes, en los que se muestran las variaciones más relevantes para los valores de las constantes, donde TE es el tiempo que tarda en alcanzar la velocidad de referencia.

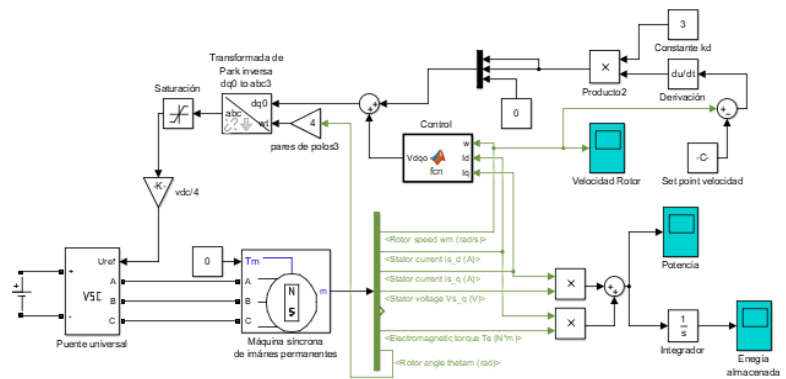


Figura 13. Modelo implementado para la simulación del sistema con controlador tipo PD. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

TABLA 5. DATOS OBTENIDOS PARA UN CONTROLADOR PD.

Casos	Valores constantes Kd Kp1 Kp2	TE (s)	Energía almacenada (W·s)
1	0,1 15 15	6	6,51*10 ⁵
2	0,1 0,1 0,1	68,4	2,24 *10 ⁵
3	6 3 3	18	6,95*10 ⁵
4	1 5 0,1	10,2	3,42*10 ⁵
5	3 3 8	8,6	7,6*10 ⁵

Fuente Propia

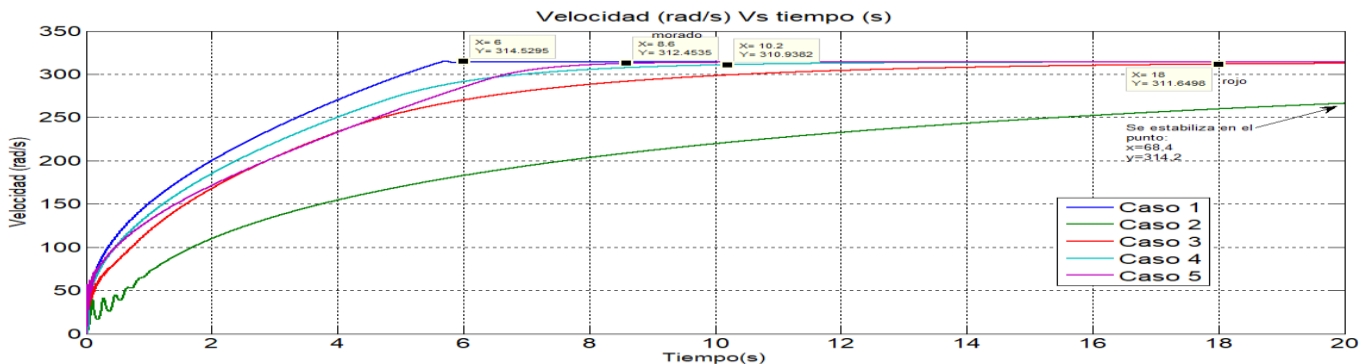


Figura 14. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PD. Fuente: Elaboración propia en Matlab®

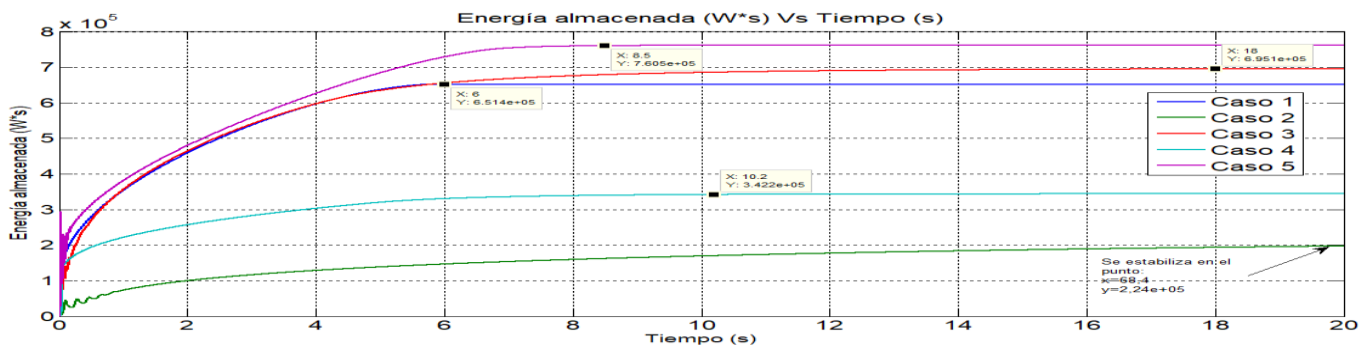


Figura 15. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PD. Fuente: Elaboración propia en Matlab®

CONTROL PID

Para este controlador se tienen las dos constantes proporcionales relacionadas con el controlador P, una constante Kd asociada a la acción derivativa y una constante Ki asociada a la parte integral. El modelo utilizado es igual al del controlador PD mostrado en la figura 13, donde la acción derivativa se implementó mediante los bloques de Simulink y la acción proporcional e integral se implementaron por código en el bloque de control, el cual posee la misma estructura del controlador PI.

Para determinar el valor de las constantes, se procedió de manera similar que en el controlador PD. Las combinaciones realizadas para este controlador se muestran en el ANEXO E. En la tabla 6 se presentan 5 casos diferentes, en los que se muestran las variaciones más relevantes para los valores de las constantes, donde TE es el tiempo que tarda en alcanzar la velocidad de referencia.

En las figuras 16 y 17 se pueden observar las respuestas del sistema para el conjunto de valores de constantes especificados en la tabla 6.

TABLA 6. DATOS OBTENIDOS PARA UN CONTROLADOR PID

Casos	Valores constantes				TE(s)	Energía almacenada (W·s)
	Kp1	Kp2	Ki	Kd		
1	9	0,0785	0,0403	1	8,7	3,08*10 ⁵
2	5	0,0785	0,0403	1	14	3,3*10 ⁵
3	9	0,0785	0,0403	3	10.14	4,27*10 ⁵
4	5	0,0785	0,0403	0,01	8	1,73*10 ⁵
5	0,01	0,0785	0,0403	0,01	150	1,87*10 ⁵

Fuente Propia

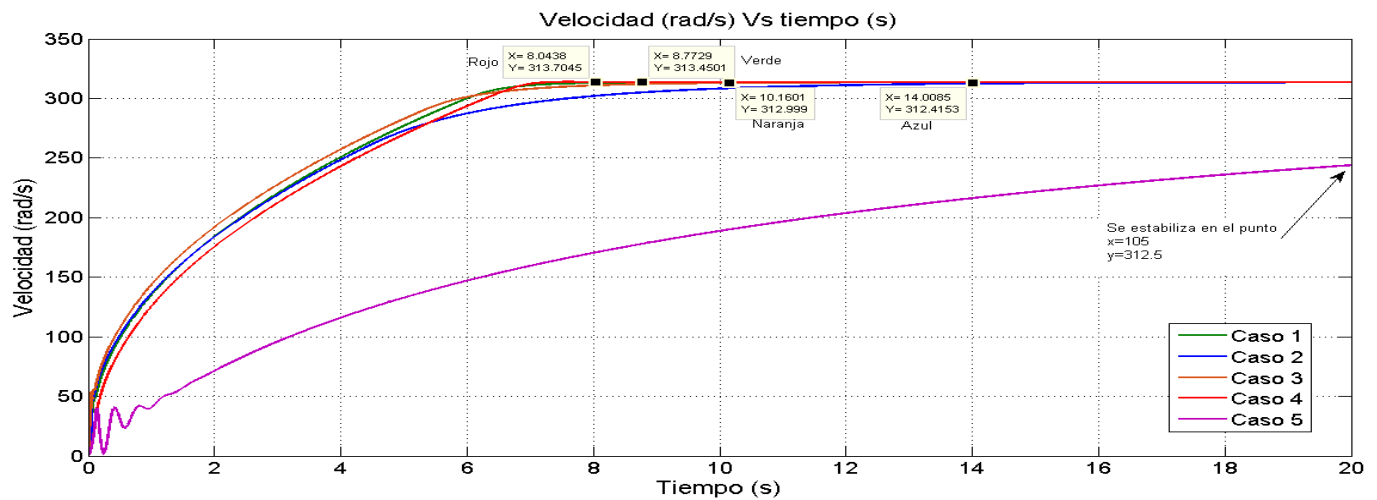


Figura 16. Gráfica comparativa de velocidad implementando controlador tipo PID. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

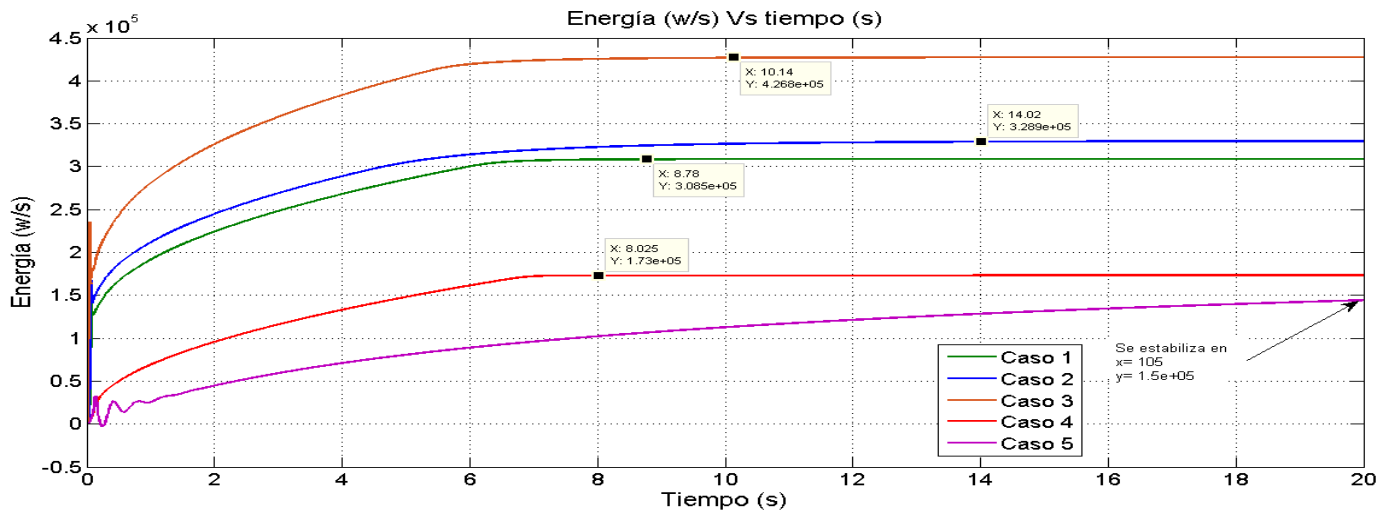


Figura 17. Gráfica comparativa energía almacenada, implementando controlador tipo PID. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

En la tabla 7 se observa las acciones implementadas a cada una de las variables de control. Mientras que en la tabla 8, se observa los controladores y las acciones conjuntas que se aplican a cada una de las variables.

TABLA 7. ACCIONES DE CONTROL IMPLEMENTADAS EN LAS DIFERENTES VARIABLES

Variable \ Acción	Vd	Vq
P	X	x
I		x
D	X	x

Fuente Propia

TABLA 8 .CONTROLADORES IMPLEMENTADOS

Controlador \ Acción	P	PI	PD	PID
P	Vd, Vq	-	-	-
PI	Vd	Vq	-	-
PD	-	-	Vq, Vd	-
PID	-	-	Vd	Vq

Fuente Propia.

CONTROL POR LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa se encuentra en las denominadas técnicas de inteligencia artificial y básicamente pretende emular el razonamiento que un experto tiene en la toma de decisiones. Esta técnica adquiere gran utilidad cuando se trabaja con sistemas cuyo modelo es de alta complejidad y llegar a una representación matemática de estos no es tarea fácil. A continuación, se presenta el diseño del control difuso empleado en este trabajo, el cual será comparado con las técnicas tradicionales, mostradas anteriormente.

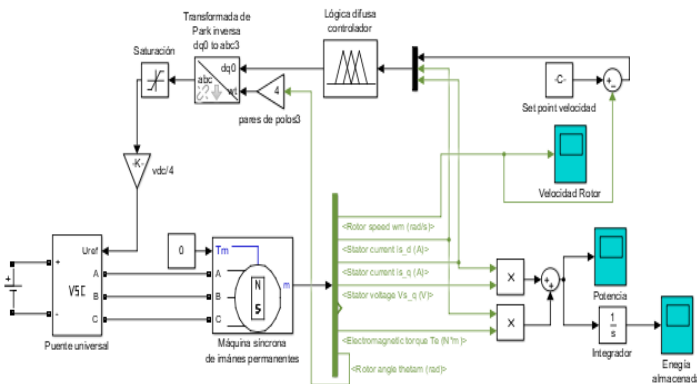


Figura 18. Modelo implementado para la simulación del sistema con controlador tipo lógica difusa. Fuente: Elaboración propia.

Estructura del controlador: el control posee 3 entradas y 3 salidas como se observa en la Figura 21. Estas han sido seleccionadas con base en la información disponible de la

simulación.

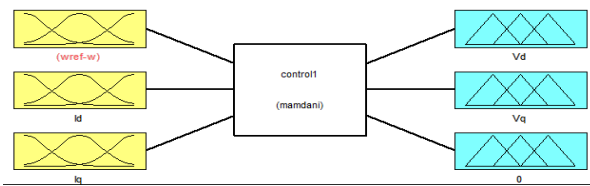


Figura 19. Ilustración de la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab

Selección de las funciones de pertenencias: En las figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27 se muestran las funciones de pertenencia designadas para cada entrada y salida del controlador con sus respectivos rangos.

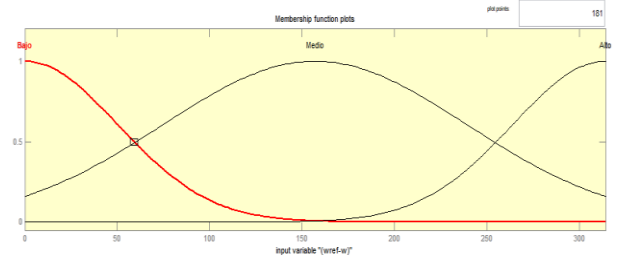


Figura 20. Entrada error en la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab. Elaboración propia

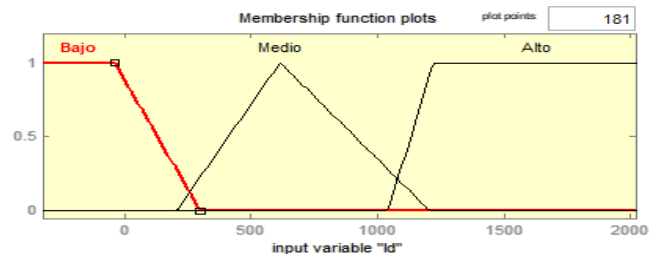


Figura 21. Entrada corriente Id en la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab. Elaboración propia

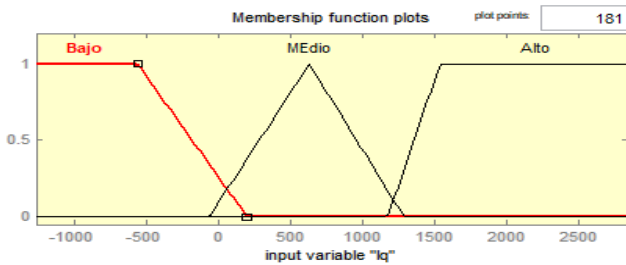


Figura 22. Entrada corriente I_q en la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab. Elaboración propia

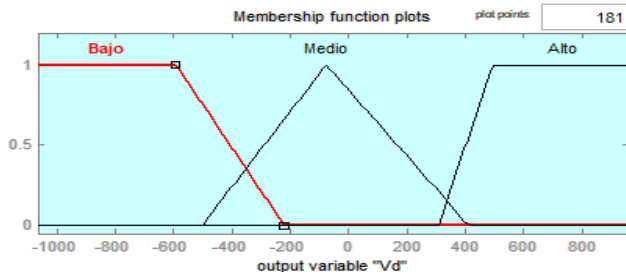


Figura 23. Salida V_d en la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab. Elaboración propia

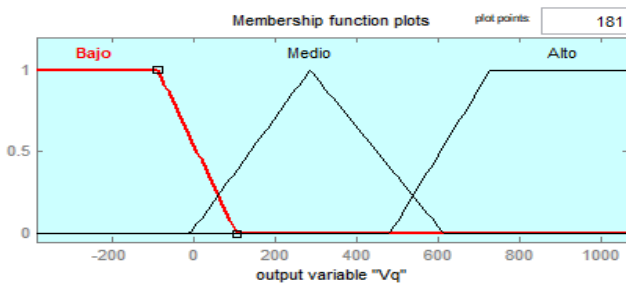


Figura 24. Salida V_q en la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab. Elaboración propia

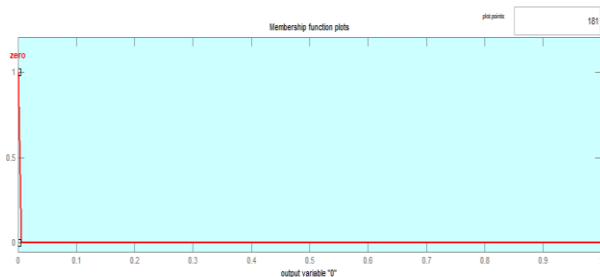


Figura 25. Salida 0 en la ventana del Toolbox Fuzzy. Fuente: Tomado de Matlab. Elaboración propia

Diseño de reglas: Se requirió un total de 15 funciones de pertenencia (9 funciones de entrada y 6 funciones de salida). Haciendo la combinación de estas funciones de pertenencia, se establecieron 27 reglas para este sistema, las cuales se muestran en el ANEXO F. Una vez implementadas las reglas y simulado el sistema se obtiene que, por medio de este tipo de controlador, no se logra llevar la máquina a valores de velocidad que permitan un nivel de

almacenamiento de energía aceptable, ya que se encuentra por debajo de los valores de referencia del sistema. Esto teniendo en cuenta que se realizaron todas las posibles combinaciones de las funciones de pertenencia variando su forma de onda y no se evidenció en ningún caso una buena respuesta del sistema comparados con los datos de referencia. En la figura 28 y 29 se pueden observar las respuestas del sistema, para las funciones de pertenencia con tipo de onda triangular.

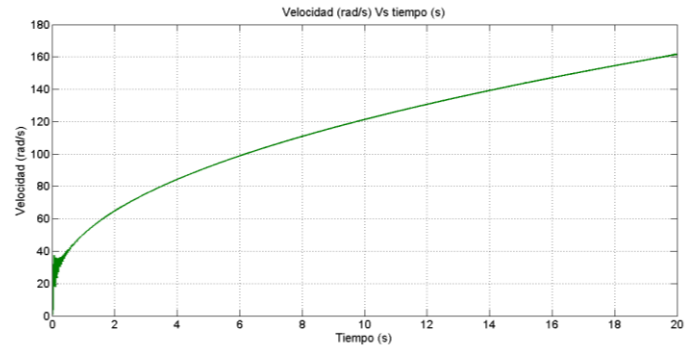


Figura 26. Gráfica de velocidad implementando controlador tipo lógica difusa. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

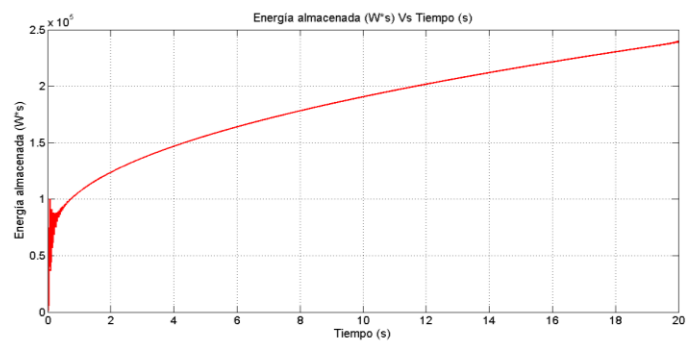


Figura 27. Gráfica de energía almacenada implementando controlador tipo lógica difusa. Fuente: Elaboración propia

Luego de esto, se seleccionó para cada tipo de control los valores de constantes para los cuales el sistema respondía de la mejor manera, de acuerdo con los valores de energía límite ($1,2 \cdot 10^6$ W·s) y tiempo para alcanzar la velocidad de referencia (7,2 segundos) y con esto se realizó la respectiva comparación mostrada en la tabla 7.

TABLA 9. COMPARACIÓN CONTROLADORES

Tipo de control	Tiempo de estabilización al llegar a velocidad de referencia (s)	Energía almacenada (W·s)
Sin control	7,2	$3,53 \cdot 10^5$
P	10,02	$7,68 \cdot 10^5$
PI	7,4	$1,72 \cdot 10^5$
PD	6	$6,51 \cdot 10^5$
PID	10,14	$4,27 \cdot 10^5$
Fuzzy	-	$2,4 \cdot 10^4$

Para el controlador Fuzzy no se tiene un tiempo registrado en la tabla debido a que el sistema se desestabiliza después de 20 segundos y la energía establecida en la tabla es la almacenada hasta el tiempo mencionado anteriormente. En las figuras 28 y 29 se pueden observar las respuestas del sistema para los mejores casos de cada estrategia de control simulada.

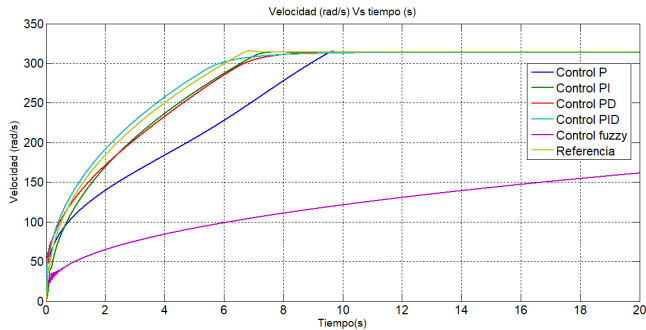


Figura 28. Gráfica comparativa de velocidad. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

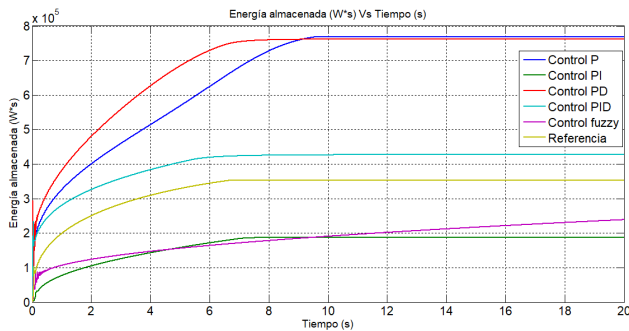


Figura 29. Gráfica comparativa energía almacenada. Fuente: Elaboración propia en Matlab®.

En el ANEXO G, se encuentran para una mejor visualización las gráficas comparativas de energía y velocidad para los controladores implementados en la tabla 7.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la implementación de los controladores como se mencionó anteriormente, las variables tratadas son V_d y V_q , cabe resaltar que estas variables están definidas de acuerdo con las señales del sistema que se desearon medir, con base al análisis y a la interpretación realizada al modelo desarrollado. Las estructuras de los controladores fueron definidas en cada caso de manera que V_d y V_q , que son las salidas del bloque de control, utilizaran las acciones proporcionales, integrales y derivativas en el momento que se requerían. En donde, la acción Proporcional-Integral se definió mediante código y la acción derivativa por medio de bloques, se debe tener en cuenta que las estructuras presentadas no tienen la forma clásica, pero si se garantiza que en cada uno de los casos presentados actúan las acciones mencionadas.

De acuerdo con el resultado obtenido en la ecuación 4, este sistema no puede almacenar un valor de energía mayor a $1,2 \cdot 10^6 \text{ W}\cdot\text{s}$, por consiguiente, valores mayores a este son descartados, ya que se podrían presentar eficiencias superiores al 100%, lo cual es imposible de obtener físicamente. Debido a que este sistema está limitado para operar a una velocidad máxima de 3000 rpm, los valores de energía obtenidos serán inferiores a la energía límite, por lo cual, los casos seleccionados para la comparación entre controladores fueron los valores de energía más próximos a dicho límite, estableciendo esta medida como un criterio de selección en los controladores. El otro criterio implementado para la selección del controlador es el tiempo que tarda el sistema en estabilizarse en el valor de la velocidad de referencia (7,2 segundos), considerándose como valores aceptables tiempos cercanos a éste.

Como se observa en la tabla 3 y en el anexo B, para valores de constantes K_{p1} y K_{p2} menores a 1, aunque el tiempo de estabilización es cercano al de referencia, la energía almacenada es inferior a la energía obtenida sin control. En el caso en el que la constante K_{p2} es mayor que K_{p1} , a medida que la diferencia entre estos dos valores aumenta se observa que el tiempo de estabilización es mayor y la energía almacenada también aumenta. Pero, a medida que la diferencia entre estos dos valores disminuye, el tiempo de estabilización tiende a mantenerse constante en un valor fijo y la energía disminuye.

En el caso en el cual la constante K_{p2} es menor que K_{p1} se observa que el tiempo de estabilización es cercano al de referencia y la energía almacenada aumenta a medida que la diferencia entre los dos disminuye. Por otro lado, cuando los valores de las constantes son iguales, se presenta un comportamiento lineal, ya que a medida que aumentan dichos valores, también aumenta el valor de energía almacenada. Para valores mayores o iguales a 10, se observa que el tiempo para llegar a la velocidad de referencia no se ve afectado por la acción proporcional, sin embargo, se presenta un aumento en la energía almacenada, siendo el caso 5 de la tabla 3, el seleccionado como mejor controlador tipo P para este sistema, teniendo en cuenta los criterios de selección mencionados anteriormente.

Para el controlador tipo PI, relacionado en la tabla 4 y anexo C, se encontró que al disminuir el valor de la constante K_{p2} manteniendo K_{p1} y K_i en valores fijos, se obtiene una mayor energía almacenada, pero la velocidad presentada es superior al límite establecido. Para la constante K_i se observa que, al aumentar este valor, la energía almacenada disminuye y el sistema tarda menos tiempo en estabilizarse, aunque esta estabilización no se presenta en la velocidad de referencia. Por otro lado, al

realizar variaciones sobre la constante K_p2 , se observa que esta solo influye en la energía almacenada y que en el rango entre 0 y 0.5, las variaciones del valor de la energía son mínimas. Teniendo en cuenta lo anterior se estableció que el caso 1 de la tabla 4, es el mejor controlador tipo PI para este sistema. Aunque este tipo de control disminuye el error en estado estacionario debido a la acción integral, el almacenamiento de energía no es el adecuado, ya que este valor se encuentra por debajo del valor de referencia.

Para el controlador tipo PD, relacionado en la tabla 5 y anexo D, se encontró que para valores de K_p1 y K_p2 menores o iguales a 1, con cualquier valor de K_d , el sistema se hace inestable o los tiempos de estabilización son muy grandes. Para valores de K_p1 y K_d menores a 1, a medida que K_p2 aumenta el sistema se hace inestable. En el caso en que las constantes K_p1 y K_p2 no varíen y K_d aumente, el tiempo de estabilización y la energía aumentan, y dependiendo el valor de K_d el sistema se puede hacer inestable. Para valores de K_p1 y K_p2 iguales, menores a 5, a medida que se aumenta el valor de K_d , el sistema se demora menos tiempo en estabilizarse, pero presenta oscilaciones, que llevan al sistema ser inestable. Por el contrario, para valores de K_p1 y K_p2 iguales, mayores a 5, la variación del valor de K_d , no afecta el sistema de manera significativa, presentando variaciones mínimas en los valores de energía almacenada y tiempo de estabilización.

Para obtener una respuesta aceptable para esta estrategia de control, el valor de las constantes K_p1 y K_p2 se establecieron en valores mayores a 5 y el valor de K_d menor o igual a 3, por tal motivo, el caso 5 fue el seleccionado como mejor controlador tipo PD. Según el comportamiento verificado del sistema, la acción derivativa ocasiona un aumento en la rapidez de la respuesta del sistema, pero a su vez introduce amortiguamiento en este para valores de constante K_d mayores a 3.

Para el controlador tipo PID mostrado en la tabla 6 y anexo E, se observa que en todos los casos el tiempo de estabilización es mayor al de referencia, a excepción del caso 1 de la tabla 6, el cual es seleccionado como el mejor de este controlador. Al implementar este tipo de control se debe tener en cuenta que al realizar variaciones mínimas en los valores de las constantes se puede presentar inestabilidad en el sistema, haciendo este tipo de control el más sensible para este caso de estudio.

Como se observa en todas las gráficas de velocidad y energía presentadas, en el intervalo de tiempo entre 0 y 1 segundos, se presentan algunas perturbaciones que son asociadas con el arranque del sistema, las cuales no afectan de manera significativa el estudio realizado, ya que estas son

de corta duración y se presentan a velocidades muy bajas. Aunque estas perturbaciones se podrían eliminar con ciertos valores de constantes en los controladores, esto no se realizó porque afectaría directamente la energía almacenada llevándola a superar los límites establecidos.

Para el control Fuzzy, aunque las reglas establecidas abarcan todos los posibles escenarios que se pueden presentar en el sistema. Se tiene que los valores de energía y velocidad están por debajo de los de referencia del sistema, esto debido a que no se logró determinar el tipo de onda adecuado para las funciones de pertenencia establecidas.

En la tabla 7, donde se relacionan los casos seleccionados, se observa que el mejor tipo de control para este sistema de almacenamiento es el control P, en este, aunque el tiempo de estabilización es mayor que el de referencia, este tiempo es aceptable, ya que la diferencia entre estos dos no supera los 5 segundos y la energía almacenada es la más cercana al límite establecido.

VI. CONCLUSIONES

A partir de la investigación realizada se identificó que el volante de inercia se puede representar por medio de una máquina síncrona de imanes permanentes. La cual se implementó mediante un bloque de simulación, que contiene las ecuaciones que representan el modelo eléctrico y mecánico del volante de inercia.

Se logró establecer que por medio del diseño y simulación de diferentes controladores se pueden gestionar los voltajes y corrientes a través del volante de inercia, modificando de esta manera la capacidad de almacenamiento de energía y la velocidad del sistema. Funcionando así, como un amortiguador y sistema de soporte que puede inyectar la energía eléctrica en caso de ser necesaria. Para este sistema de almacenamiento resulta conveniente un controlador tipo P, ya que garantiza un tiempo corto de estabilización y almacena la mayor cantidad de energía posible. Sin embargo, un control tipo PD resulta ser también conveniente ya que presenta un menor tiempo de estabilización que el control P, pero almacena una cantidad de energía menor, la cual es aceptable. Por tanto, de acuerdo con la necesidad y aplicación requerida se opta por la implementación de un control P o un control PD.

Se puede hacer que la energía almacenada sea mayor al 90% si se aumenta la velocidad de referencia, pero este aumento puede llevar a que la máquina reduzca su vida útil y se presenten problemas mecánicos.

VII. RECOMENDACIONES

Como la tensión de entrada en el sistema de almacenamiento se asume de manera constante, se recomienda para próximos estudios, implementar las variaciones producidas en esta tensión, presentadas por la condición de intermitencia innata de la generación de energía no convencional, para así obtener un estudio más realista de este tipo de sistema de almacenamiento.

El control difuso puede mejorarse al incluir un sistema del tipo Takago-Sugeno en donde se considere en el consecuente de las reglas las ecuaciones dinámicas del sistema.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Energy Storage Association, «*Applications of Energy Storage Technology*» [En línea]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/applications-energy-storage-technology>.
- [2] P. Chauveau, «*Tecnologías de almacenamiento de energía y factibilidad en Chile,*» Universidad Católica de Chile. Trabajo mercados eléctricos, 2013.
- [3] R. Walawalkar, J. Apt, «*Market Analysis of Emerging Electric Energy Storage,*»Carnegie Mellon University, 2008
- [4] P. Riberiro, B. Johnson, «*Energy storage system for advanced power applications,* » IEEE, invited paper, p:1744-1759, 2001.
- [5] J. Alcolado, «*Revolución en la integración de las renovables con Sistemas Flywheel para almacenar energía,*» [En línea]. Available: <http://www.suelosolar.com/newsolares/newsol.asp?id=10847>
- [6] F. González, F. Bianchi y A Somper A, «*Control of a Flywheel Energy Storage System for Power Smoothing in Wind Power Plants,* » IEEE transactions on energy conversion, Vol.29, No. 1, 2014.
- [7] A. Seisdodos, «*Control de un sistema de almacenamiento de energía empleando volantes de inercia en regulación de frecuencia,*» Universidad de Chile, Santiago de Chile. Trabajo de grado en ingeniería eléctrica-civil, 2012.
- [8] I. Hamzaoui, F. Bouchafaa, A. Talha, «*Fuzzy logic control for a speed of a flywheel energy storage system associateed the wind generator,* » International journal renewable energy research, Vol.2, No. 4, 2012.
- [9] J. Oliveira, «*Power control systems in a flywheel based all-electrical driveline*» Digital comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the faculty of science and technology 844. 102 pp. Uppsala. Sweden, 2011.
- [10] W. Su, T. Jin, S. Wang, «*Modeling and simulation off short-term Energy Storage: Flywheel*» International Conference on Advances in Energy Engineering. 2010.
- [11] K. Itani, A. Bernardinis, A. Jammal, «*Energy Management of a Battery-Flywheel Storage System used for Regenerative Braking Recuperation of an Electric Vehicle*» IEEE, p: 2034-2039, 2016.
- [12] M. Lopes, «*Desing and control of an Electrical Machine for Flywheel Energy-Storage System,*» Instituto superior Técnico, Universidad técnica de Lisboa, 2008.
- [13] Liu H. Liu, J. Jiang, «*Flywheel energy storage - an upswing technology for energy sustainability*» *Energy and Buildings*, 39(5):599–604, 2007.
- [14] H. Hoimoja, «*Flywheel energy storage: principles and possibilities*» Tallin University of Technology, 3rd International Symposium, Actual Problems in Energy and Geotechnology, Kuressaare, p: 89-92, 2006.
- [15] S. López, *Mitigación de Resonancia subsíncrona mediante el uso de unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción integradas con un PWM-CSC*, Universidad tecnológica de Pereira. Colombia: Trabajo de grado en ingeniería eléctrica, 2016.
- [16] A. Sixtega, *Control directo de par del motor síncrono de imanes permanentes*, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica sección de estudios de posgrado e investigación. México: Trabajo de grado en ingeniería eléctrica. 2011.
- [17] Cutler J. Cleveland and Christopher Morris, "Handbook of Energy. Volume I: Diagrams, Charts, and Tables", Elsevier, 2013.

ANEXO A

Para determinar r_o se tiene q:

$$r_o = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho * \omega_{max}^2}}$$
$$r_o = \sqrt{\frac{240MPa}{7800 \frac{kg}{m^3} * \left(1047.19 \frac{rad}{s}\right)^2}}$$
$$r_o = 0.168m$$

La energía máxima para este sistema es:

$$Emax = \frac{3}{8} \pi * r_o^3 * \sigma$$
$$Emax = \frac{3}{8} \pi * (0.168m)^3 * 240 * 10^6 Pa$$
$$Emax = 1.34MJ = 1340000 W * s$$

Estableciendo la energía máxima, se tiene que el momento de inercia correspondiente para este sistema es:

$$J = \frac{2Emax}{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}$$
$$J = \frac{2 * 1.34MJ}{\left(1047.19 \frac{rad}{s}\right)^2 - \left(314.159 \frac{rad}{s}\right)^2}$$
$$J = 2.685 \approx 2.7 \frac{kg}{m^2}$$

ANEXO B

TABLA DE DATOS CONTROLADOR TIPO P

TABLA 10. VALORES DE CONSTANTES USADOS PARA CONTROLADOR TIPO P

Kp1	Kp2	Tiempo (s)	Energía(W·s)
0,05	0,06	8,4	1,921*10 ⁵
0,1	0,1	9	2,4*10 ⁵
0,1	2	8	4,7*10 ⁵
0,2	1	8	3,52*10 ⁵
0,2	1,5	8	4,14*10 ⁵
0,2	2	8	4,68*10 ⁵
0,2	2,5	8,5	5,15*10 ⁵
0,2	3	8,5	5,57*10 ⁵
0,2	3,5	8,5	5,94*10 ⁵
0,2	4	8,5	6,27*10 ⁵
0,5	1	9	3,55*10 ⁵
0,5	2	9	4,65*10 ⁵
0,5	3	9	5,5*10 ⁵
0,5	4	9,5	6,16*10 ⁵
0,05	15	145	8,5*10 ⁵
1	1	7,2	3,53*10 ⁵
1	2	7,2	4,65*10 ⁵
1	3	7,2	5,43*10 ⁵
1	4	7,2	6,05*10 ⁵
1	9	10.02	7,68*10 ⁵
3	1	7	3,33*10 ⁵
3	2	7	4,4*10 ⁵
3	3	7	5,1*10 ⁵
5	1	7	3,18*10 ⁵
5	3	7	4,84*10 ⁵
5	5	7	5,66*10 ⁵
5	9	7	6,73*10 ⁵
5	12	7	7,25*10 ⁵
7	1	6,8	3,07*10 ⁵
7	3	6,8	4,64*10 ⁵
7	9	6,8	6,42*10 ⁵
10	1	6,7	2,93*10 ⁵
10	5	6,7	5,15*10 ⁵
10	10	6,7	6,25*10 ⁵
10	15	6,7	6,93*10 ⁵

CONTINUACIÓN ANEXO B (TABLA 8)

Kp1	Kp2	Tiempo (s)	Energía (W·s)
5	0,05	7	1,647*10 ⁵
15	1	6,7	2,78*10
15	5	6,5	4,81*10 ⁵
15	10	6,5	5,84*10 ⁵
15	15	6,2	6,48*10 ⁵
15	20	6,2	6,95*10 ⁵
20	1	6,5	2,66*10 ⁵
20	5	6,2	4,56*10 ⁵
20	10	6,2	5,52*10 ⁵
20	15	6,2	6,15*10 ⁵
20	20	6,2	6,62*10 ⁵

Fuente Propia

CÓDIGO CONTROL P

```

function Vdq0 = fcn(w, Id, Iq)                                %%% Función vector Vdq0

%% Parámetros de la maquina
wref = 3000*2*pi/60;                                       %%% Velocidad de referencia
Fm = 0.1194;                                               %%% Flujo establecido por imanes
Ld = 8.5E-3;                                               %%% Inductancia de eje directo
Lq = 8.0E-3;                                               %%% Inductancia de eje cuadratura
Rs = 0.0485;                                               %%% Resistencia del estator
n = 4;                                                     %%% Número de polos
Torque = 3/2*n*(Fm*Iq+(Ld-Lq)*Id*Iq)                       %%% Torque
ws = n*w;                                                  %%% Velocidad de entrada
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Control P
KP1 = 15;                                                  %%% Constante Kp1
KP2 = 15;                                                  %%% Constante Kp2
Vd = (-KP1)*(Id) + Rs*Id - Lq*ws*Iq;                       %%% Voltaje de eje directo
Vq = Fm*n*wref + KP2*(wref-w);                             %%% Voltaje de eje cuadratura
Vdq0 = [Vd;Vq;0];                                         %%% Vector Salida Vdq0
    
```

ANEXO C

TABLA DE DATOS CONTROLADOR TIPO PI

TABLA 11. VALORES DE CONSTANTES USADOS PARA CONTROLADOR TIPO PI

Kp1	Kp2	Ki	Velocidad (rad/s)	Tiempo (s)	Energía (W·s)
5	5	0.5	355	-	9.79*10 ⁵
5	1	0.5	416	-	1.093*10 ⁶
5	0.5	0.5	429	-	1.11*10 ⁶
5	0.1	0.5	440	-	1.13*10 ⁶
5	1	1	378	-	9.46*10 ⁵
5	1	5	339	-	8.3*10 ⁵
5	1	10	190	-	5.7*10 ⁵
5	0.05	0.05	358,7	-	2.26*10 ⁵
10	0.05	0.05	358,5	8	2.12*10 ⁵
2	0.05	0.05	358,3	8	2.3*10 ⁵
0.5	0.05	0.05	358,3	8	2.41*10 ⁵
0.5	0.05	0.04	358,1	8,2	1.64*10 ⁵
0.5	0.04	0.05	351	9	2.33*10 ⁵
0.5	0.03	0.05	354	9	2.25*10 ⁵
0.5	0.08	0.04	312,6	6	1.85*10 ⁵
0.5	0.0785	0.0403	314,1	7,4	1.85*10 ⁵

Fuente Propia

Los valores mostrados y referenciados como “-” ocurren cuando la velocidad no se estabiliza, por lo cual la energía almacenada sigue aumentando y es imposible obtener un valor. Además, se tiene en cuenta que muchos de estos valores de energía ya superan el valor de energía máxima por lo cual son descartados.

Cabe resaltar que algunos valores de constantes seleccionados pueden ser adecuados, pero el software no permite la simulación debido a sus limitaciones de recursos, lo cual genera errores computacionales por falta de memoria y capacidad de procesamiento.

CONTINUACIÓN ANEXO C

CÓDIGO CONTROL PI

```
function Vdq0 = fcn(w, Id, Iq)           %%% Función vector Vdq0

%% Parámetros de la maquina

wref = 3000*2*pi/60;                   %%% Velocidad de referencia
Fm = 0.1194;                            %%% Flujo establecido por imanes
Ld = 8.5E-3;                             %%% Inductancia de eje directo
Lq = 8.0E-3;                             %%% Inductancia de eje cuadratura
Rs = 0.0485;                             %%% Resistencia del estator
n = 4;                                   %%% Número de polos
Torque = 3/2*n*(Fm*Iq+(Ld-Lq)*Id*Iq);    %%% Torque
ws = n*w;                                %%% Velocidad de entrada

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

t0 = 0; tfinal = 10; dt = 0.1;          %%% Parámetros de tiempo
m = 450;                                 %%% Masa del flywheel
b = 0;                                   %%% Coeficiente de fricción
yp = zeros(tfinal/dt,1); t = yp;        %%% Inicio vel y matriz de tiempo
Ki = 0.0403;                             %%% Constante integral Ki
Kp2 = 0.0785;                             %%% Constante Proporcional Kp2
Kp1 = 0.5;                                %%% Constante Proporcional Kp1
int = 0;                                  %%% Inicio error int

% CONTROL (El integrador Forward-Euler se utiliza para resolver la Ecuación
diferencial Ordinaria)

for i=t0+2:tfinal/dt
    err = wref-yp(i-1);                   %%% Error
    int = int+err;                        %%% Integral
    Vq = (Kp2*err)+(Ki*int*dt);           %%% Acción de control Vq
    yp(i) = yp(i-1)+((-b*yp(i)/m) + (Vq/m))*dt; %%% Resolver EDO
    t(i) = t(i)+dt*i;
end

Vd = (-Kp1)*(Id) + Rs*Id - Lq*ws*Iq;     %%% Acción de control Vd

Vdq0 = [Vd;Vq;0];                        %%% Vector Salida Vdq0
```

ANEXO D

TABLA DE DATOS CONTROLADOR TIPO PD

TABLA 12. VALORES DE CONSTANTES USADOS PARA CONTROLADOR TIPO PD

Kp1	Kp2	Kd	Tiempo (s)	Energía (W·s)
0,1	0,1	0,1	68,4	2,24*10 ⁵
0,1	0,1	1	-	-
0,1	0,1	5	-	-
0,1	1	0,1	27,4	3,7*10 ⁵
0,1	5	0,1	16,9	7,04*10 ⁵
0,1	9	0,1	47,2	7,9
0,1	1	1	-	-
0,1	1	5	-	-
1	0,1	1	60	3,58*10 ⁵
1	0,1	5	-	-
1	0,1	9	-	-
5	0,1	1	10,2	3,4*10 ⁵
5	0,1	3	21	4,3*10 ⁵
5	0,1	9	-	-
10	0,1	3	7,46	4,3*10 ⁵
15	0,1	3	-	-
3	3	3	12,4	6,1*10 ⁵
3	3	6	18	6,95*10 ⁵
3	3	9	-	-
3	8	10	-	-
3	8	5	-	-
3	8	3	6,5	7,6*10 ⁵
3	8	1	7,2	7,4*10 ⁵
3	8	0,1	6,6	6,9*10 ⁵
8	3	10	8	6,8*10 ⁵
8	3	3	6,4	5,7*10 ⁵
8	3	1	6	5,1*10 ⁵
8	8	0,1	6,2	6,1*10 ⁵
8	8	1	6	6,5*10 ⁵
15	15	1	6	6,75*10 ⁵
15	15	0,1	6	6,51*10 ⁵

Fuente propia

Los valores mostrados y referenciados como “-” ocurren cuando la velocidad no se estabiliza, por lo cual la energía almacenada sigue aumentando y es imposible obtener un valor. Además, se tiene en cuenta que muchos de estos valores de energía ya superan el valor de energía máxima por lo cual son descartados.

Cabe resaltar que algunos valores de constantes seleccionados pueden ser adecuados, pero el software no permite la simulación debido a sus limitaciones de recursos, lo cual genera errores computacionales por falta de memoria y capacidad de procesamiento.

ANEXO E

TABLA DE DATOS CONTROLADOR TIPO PID

TABLA 13. VALORES DE CONSTANTES USADOS PARA CONTROLAD PID

Valores constantes					
Kp1	Kp2	Ki	Kd	TE(s)	Energía almacenada (W·s)
9	0.0785	5	1	-	-
9	0.0785	1	1	10,5	-
9	0.0785	1	0.5	-	-
9	0.0785	0.1	1	-	-
9	0.0785	0.0403	1	8,7	3.08*10 ⁵
5	0.0785	0.0403	1	14	3.3*10 ⁵
3	0.0785	0.0403	1	32	3.46*10 ⁵
3	0.1	0.0403	1	-	-
5	0.1	0.0403	1	-	-
5	1	0.0403	1	-	-
5	1	0.05	1	-	-
5	5	0.0403	1	-	-
5	0.0785	0.0403	3	55	9.24*10 ⁵ *
5	0.0785	0.0403	5	-	-
9	0.0785	0.0403	2	10	3.84*10 ⁵
9	0.0785	0.0403	3	10,14	4.27*10 ⁵
9	0.0785	0.0403	5	-	-
9	0.0785	0.0403	0.01	7,5	1.66*10 ⁵
5	0.0785	0.0403	0.01	8	1.73*10 ⁵
1	0.0785	0.0403	0.01	8,5	1.86*10 ⁵
0.01	0.0785	0.0403	0.01	150	1.87*10 ⁵
1	0.0785	0.0403	1	-	-
1	0.0785	0.0403	3	-	-
0.01	0.0785	0.0403	3	-	-
0.01	0.0785	0.0403	1	-	-
0.05	0.0785	0.0403	0.2	-	-
0.05	0.0785	0.0403	0.3	-	-

Fuente propia

*Presenta grandes oscilaciones al arrancar.

Los valores mostrados y referenciados como “-” ocurren cuando la velocidad no se estabiliza, por lo cual la energía almacenada sigue aumentando y es imposible obtener un valor. Además, se tiene en cuenta que muchos de estos valores de energía ya superan el valor de energía máxima por lo cual son descartados.

Cabe resaltar que algunos valores de constantes seleccionados pueden ser adecuados, pero el software no permite la simulación debido a sus limitaciones de recursos, lo cual genera errores computacionales por falta de memoria y capacidad de procesamiento.

ANEXO F

Reglas de activación para el Toolbox Fuzzy

1. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Bajo) and (Iq is Bajo) then (Vd is Bajo)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
2. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Bajo) and (Iq is MEdio) then (Vd is Bajo)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
3. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Bajo) and (Iq is Alto) then (Vd is Bajo)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
4. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Medio) and (Iq is Bajo) then (Vd is Medio)(Vq is Bajo) (0 is zero) (1)
5. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Medio) and (Iq is MEdio) then (Vd is Medio)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
6. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Medio) and (Iq is Alto) then (Vd is Medio)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
7. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Alto) and (Iq is Bajo) then (Vd is Alto)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
8. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Alto) and (Iq is MEdio) then (Vd is Alto)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
9. If ((wref-w) is Bajo) and (Id is Alto) and (Iq is Alto) then (Vd is Alto)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
10. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Bajo) and (Iq is Bajo) then (Vd is Bajo)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
11. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Bajo) and (Iq is MEdio) then (Vd is Bajo)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
12. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Bajo) and (Iq is Alto) then (Vd is Bajo)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
13. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Medio) and (Iq is Bajo) then (Vd is Medio)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
14. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Medio) and (Iq is MEdio) then (Vd is Medio)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
15. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Medio) and (Iq is Alto) then (Vd is Medio)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
16. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Alto) and (Iq is Bajo) then (Vd is Alto)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
17. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Alto) and (Iq is MEdio) then (Vd is Alto)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
18. If ((wref-w) is Medio) and (Id is Alto) and (Iq is Alto) then (Vd is Alto)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
19. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Bajo) and (Iq is Bajo) then (Vd is Bajo)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
20. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Bajo) and (Iq is MEdio) then (Vd is Bajo)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
21. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Bajo) and (Iq is Alto) then (Vd is Bajo)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
22. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Medio) and (Iq is Bajo) then (Vd is Medio)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
23. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Medio) and (Iq is MEdio) then (Vd is Medio)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
24. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Medio) and (Iq is Alto) then (Vd is Medio)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)
25. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Alto) and (Iq is Bajo) then (Vd is Alto)(Vq is Bajo)(0 is zero) (1)
26. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Alto) and (Iq is MEdio) then (Vd is Alto)(Vq is Medio)(0 is zero) (1)
27. If ((wref-w) is Alto) and (Id is Alto) and (Iq is Alto) then (Vd is Alto)(Vq is Alto)(0 is zero) (1)

ANEXO G

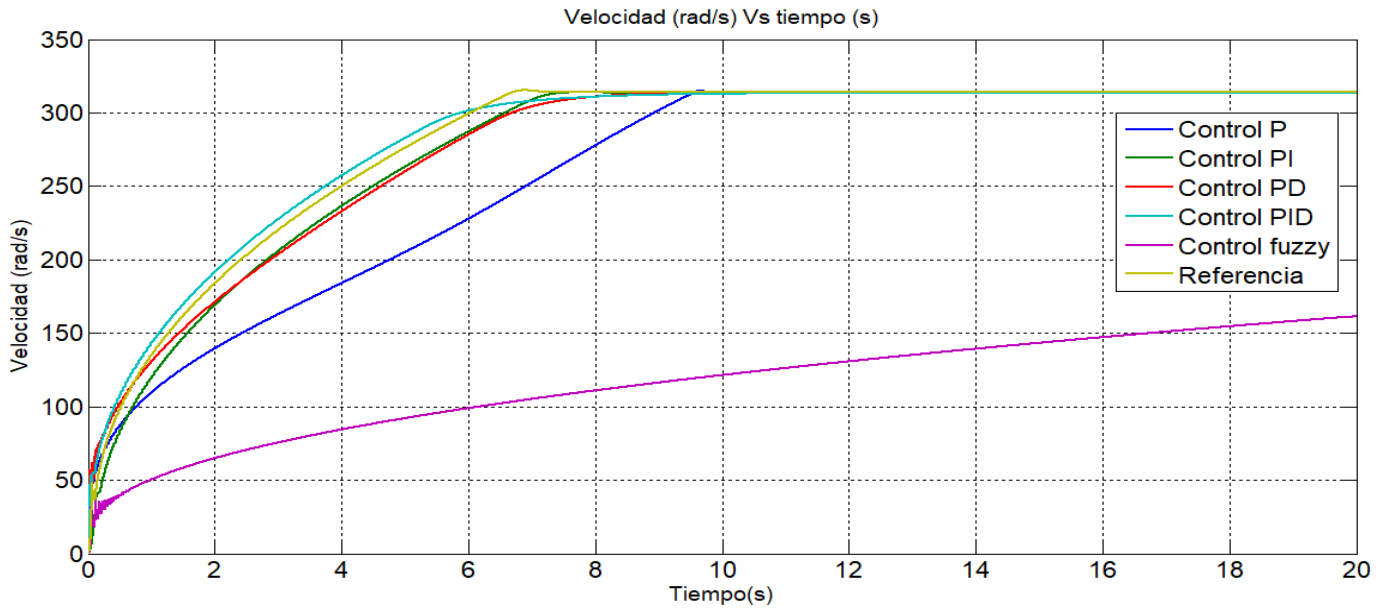


Figura 30. Gráfica comparativa de velocidad entre los diferentes controladores implementados. Fuente: Elaboración propia en Matlab®

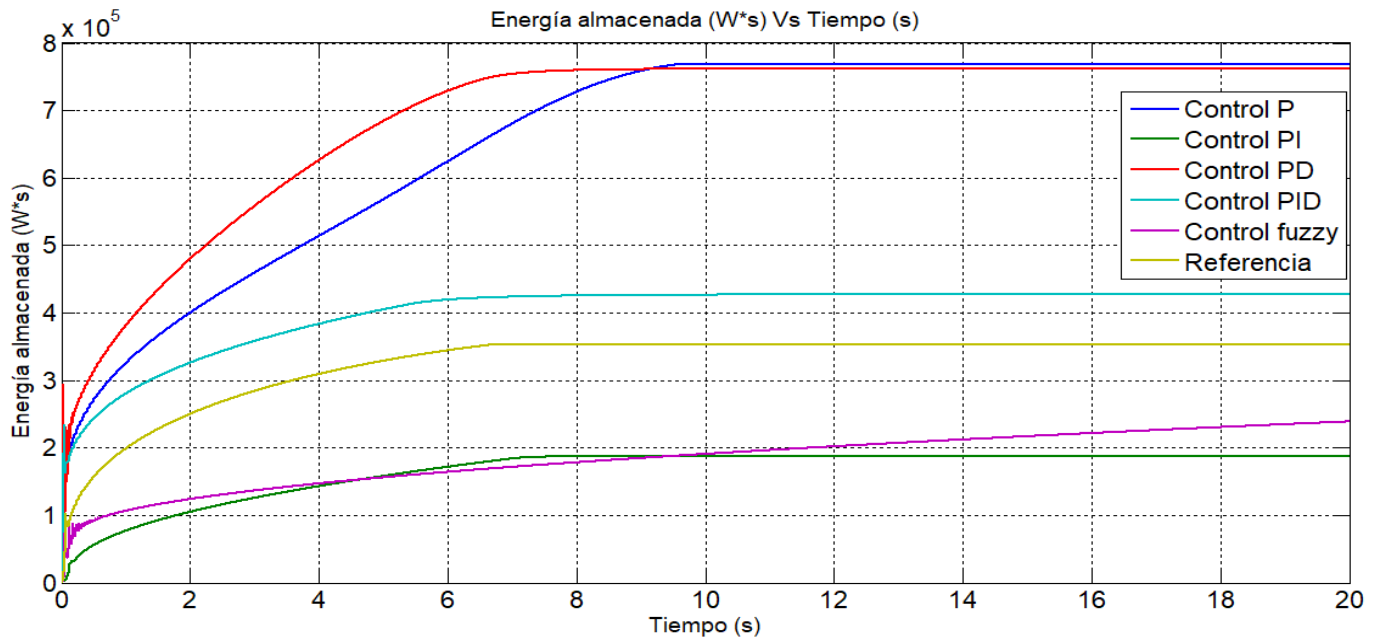


Figura 31. Gráfica comparativa de energía almacenada entre los diferentes controladores implementados. Fuente: Elaboración propia en Matlab®