



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

CONTROL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Práctica: Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA

Alumno:

Cerda Parra Luis Oscar

Díaz Bello Diego

Vázquez Galán José Emmanuel

Profesor:

Gastón Salazar Silva

5MM2

7 de junio de 2024

Índice

1. Introducción	4
2. Métodos	10
2.1. Configuración Inicial	10
2.2. Aplicación de la Señal de Referencia	10
2.3. Medición de las Señales	10
2.4. Modificación del Sistema	11
2.5. Análisis de Datos	11
3. Resultados	12
4. Discusión	26
Bibliografía	29

Índice de figuras

1.	Descripción simplificada de un sistema de control. Tomada de [1]	4
2.	Diagrama de bloques para el control de par motor CD	4
3.	Esquemático de control de velocidad a lazo abierto de un motor CA	7
4.	Formas de onda para el control de un motor un motor síncrono bifásico	7
5.	Circuito de un medio puente H tal como se implementa en un circuito integrado L298.	8
6.	Diagrama eléctrico de un medio puente H con una resistencia de carga (R_L) y una resistencia para la medición de corriente (R_{SENSE}).	9
7.	Inversor bifásico aplicado a los devanados de un motor síncrono bifásico.	10
8.	Diagrama de Control de velocidad con amplificador lineal y onda sinodal.	12
9.	Detalle del subsistema amplificador.	12
10.	Detalle del subsistema instalación eléctrica.	13
11.	Detalle del subsistema de instalación mecánica.	13
12.	Actividad Guiada	15
13.	Diagrama de Control de motor CA con ondas cuadradas para paso completo.	16
14.	Detalle de subsistema de controlador de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.	16
15.	Detalle de subsistema de amplificador lineal de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.	17
16.	Detalle de subsistema de instalación eléctrica de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.	17
17.	Detalle de subsistema de instalación mecánica de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.	18
18.	Paso completo	19
19.	Diagrama de Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA, sustituyendo las ondas sinusoidales de actividad guiada por ondas cuadradas para Semi Paso.	20
20.	Semi Paso	21
21.	Diagrama de Control de motor CA implementando etapa de potencia con inversor puente H.	22
22.	Detalle de subsistema de controlador de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H.	22
23.	Detalle de subsistema de amplificador de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H L298.	23
24.	Detalle del circuito de un medio puente H tal como se implementa en un circuito integrado L298	23
25.	Detalle de subsistema de instalación eléctrica de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H.	24
26.	Detalle de subsistema de instalación mecánica de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H.	24
27.	Inversor Puente H L298	25

color listings courier

1. Introducción

CONTROL

Se define como el arte y la ciencia de operar dispositivos de tal manera que satisfagan necesidades en específico, principalmente de precisión y velocidad.

Un sistema de control consiste en subsistemas y procesos (o plantas) ensamblados con el propósito de obtener una salida deseada con un rendimiento deseado, dado un ingreso específico.

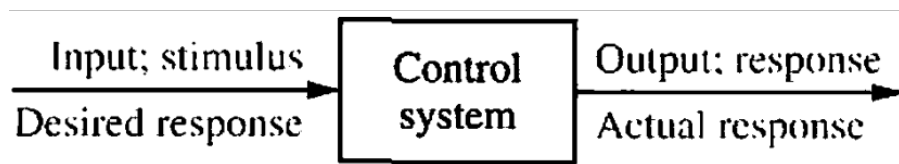


Figura 1: Descripción simplificada de un sistema de control. Tomada de [1]

CATEGORÍAS

CONTROL EN LAZO ABIERTO

Consiste en seleccionar componentes inherentemente precisos y lo suficientemente rápidos para el problema que se presente y pueda operar de manera eficiente.

Este sistema opera sin verificar si la salida ha alcanzado el estado deseado, lo que implica una menor complejidad y costos reducidos, pero con una menor adaptabilidad ante disturbios o cambios en las condiciones de operación [1].

CONTROL EN LAZO CERRADO

Basados en el principio de retroalimentación, en donde el cual, la magnitud por controlar se mide y se retroalimenta a una estación de entrada, en donde se compara con una magnitud de referencia para determinar si es del valor deseado (la magnitud controlada). Cualquier desviación del valor deseado es un error, el que generalmente se determina como resultado de esta comparación y el error se alimenta directamente al sistema, de tal manera que se tienda a reducir este error. Tal disposición es conceptualmente muy simple y tiene grandes posibilidades de precisión y rapidez de comportamiento. Se puede hacer que la señal de error produzca una señal correctora, la que, a su vez, haga el error tan pequeño como se desee, aún igual a cero [2].

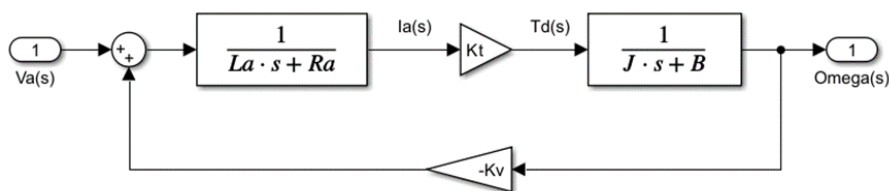


Figura 2: Diagrama de bloques para el control de par motor CD

- Las variables estan definidas en el dominio de la frecuencia (Laplace)
- $V_a(s)$ =Voltaje de la armadura
- $I_a(s)$ =Corriente de la armadura
- $T_d(s)$ =Par desarrollado por el motor
- $\Omega(s)$ =Velocidad angular del rotor

Parámetros del motor

- L_a =Inductancia de la armadura
- R_a =Resistencia de la armadura
- J =Momento de inercia del rotor
- B =Fricción viscosa de los rodamientos del motor
- K_t =Constante de par del motor
- K_v =Constante de voltaje del motor
- $T_d(s) = K_t I_a(s)$

CONTROL DE POSICIÓN

Consiste en mover algún objeto mecánico hasta que quede situado exactamente en una posición específica; o moverlo de tal manera que su posición mecánica esté controlada con precisión mientras está en movimiento. En ambos casos el sistema debe mantener (regulada) la posición deseada cuando la salida sea perturbada por fuerzas o pares externos

Problemas que enfrenta este tipo de control

1. Posicionamiento remoto con servoinstrumentos, como en el ajuste de los potenciómetros de los cofecientes en una computadora analógica.
2. Posición de una cabeza magnética de lectura sobre la pista deseada en un archivo de memoria de disco magnético.
3. Posición de una antena de radar para seguir un satélite.
4. Posición de un cañón antiaéreo para disparar a un blanco móvil

MOTOR DE CA: Hace referencia a aquel motor que funciona a través de corriente alterna, su clase cuenta con la particularidad de que transforman la energía eléctrica en energía mecánica.

VENTAJAS:

- No necesitan conmutación para funcionar
- No necesitan una fuente de suministro rectificada

DESVENTAJAS:

- Necesitan conmutación para el arranque
- Su velocidad no se ajusta con facilidad

Control de velocidad a lazo abierto de un motor CA

El control de velocidad a lazo abierto de un motor CA es un método simple y económico para regular la velocidad de un motor de inducción trifásico. En este sistema, la velocidad del motor se controla ajustando la frecuencia y/o el voltaje del suministro de CA, sin utilizar retroalimentación de la velocidad real del motor.

Principio de funcionamiento

La velocidad síncrona (N_s) de un motor de inducción trifásico está directamente relacionada con la frecuencia (f) del suministro de CA y el número de polos (P) del motor, según la siguiente ecuación:

$$N_s = 120 * \frac{f}{p} \quad (1)$$

Por lo tanto, al ajustar la frecuencia del suministro de CA, se puede controlar la velocidad síncrona del motor y, por consiguiente, su velocidad real. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la velocidad real del motor también se ve afectada por la carga mecánica que se le aplica. A mayor carga, la velocidad del motor disminuirá ligeramente.

TÉCNICAS DE CONTROL DE VELOCIDAD A LAZO ABIERTO

1. **Control de frecuencia:** En este método, la frecuencia del suministro de CA se ajusta utilizando un variador de frecuencia (VFD). Los VFD son dispositivos electrónicos que generan una señal de CA de frecuencia variable a partir de una fuente de CA de frecuencia fija. La frecuencia de salida del VFD se puede ajustar manualmente o mediante un controlador externo.
2. **Control de voltaje:** En este método, el voltaje del suministro de CA se ajusta utilizando un transformador variable o un autotransformador. Al ajustar el voltaje, se modifica el par del motor, lo que a su vez afecta su velocidad. Sin embargo, este método no es tan preciso como el control de frecuencia, ya que la velocidad del motor también se ve afectada por la impedancia de la carga.

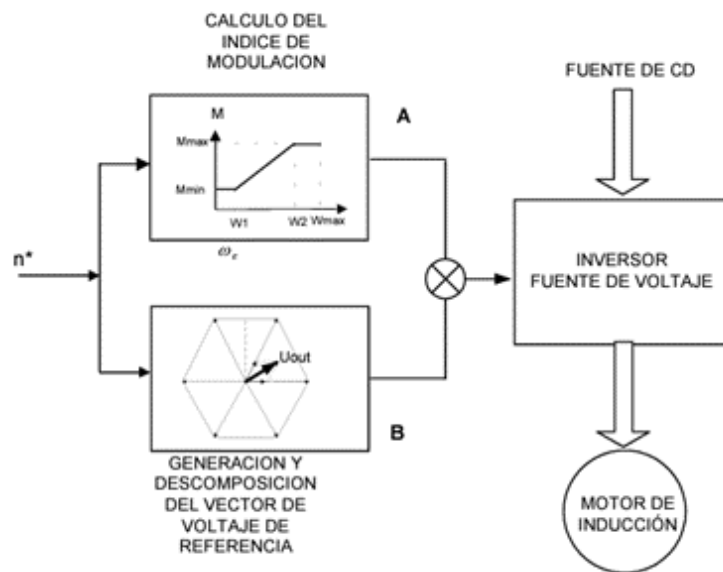


Figura 3: Esquemático de control de velocidad a lazo abierto de un motor CA

ETAPA DE POTENCIA

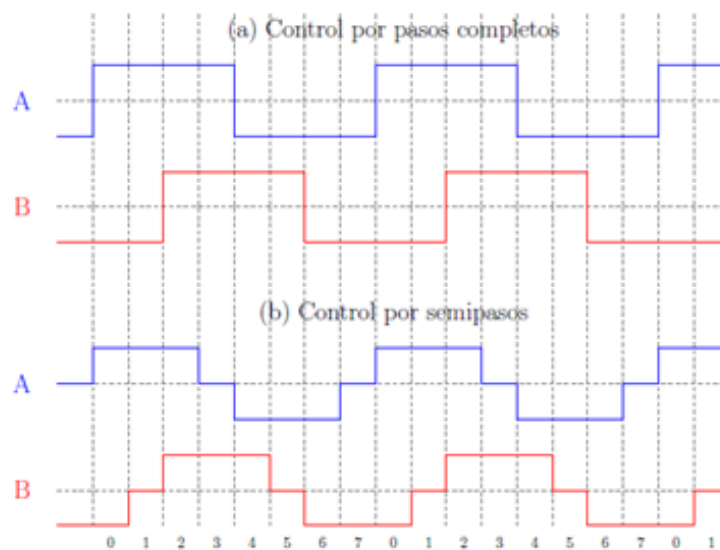


Figura 4: Formas de onda para el control de un motor un motor síncrono bifásico

Una alternativa es aproximar una onda sinusoidal por medio de señales compuestas de ondas cuadradas. Existen muchas formas de realizar esta aproximación, pero nosotros solo veremos dos por ahora. Es importante notar que el usar ondas cuadradas impactan en el desempeño del motor de CA al introducir componentes armónicas.

Una primera forma es alimentar los devanados A y B con dos voltaje con forma de ondas cuadradas con un desfase de 90° eléctricos (fig. 1 (a)). Este método se utiliza para obtener pasos completos por parte del motor, y proporciona más par en cada paso.

Una segunda forma de onda la podemos ver en fig. 1 (b), donde los voltajes de alimentación se acercan más a una onda sinusoidal. Esto permite una mayor resolución en el movimiento, pero reduce en ciertos momentos el par recibido por el motor.

Circuito Medio Puente H

1. Circuito integrado L298

El circuito integrado L298 contiene cuatro bloques idénticos que contienen cada uno un medio puente H. Cada medio puente tiene su par de transistores y componentes de lógica digital que indican cuando se enciende cada transistor. La terminal de habilitación (enable) selecciona el par de transistores que se encenderá y la terminal de entrada (input) indica el transistor específico que se encenderá. La carga se conecta de la salida a tierra (fig. 3), en caso de ser usado como medio puente, o de una salida a otra si es usado con dos medios puentes, formando un puente H completo. Finalmente, la terminal de medición (sense) se puede utilizar para medir la corriente que consume la carga, con ayuda de una resistencia. Un circuito integrado L298 tiene en total 4 medios puentes H. Por lo mismo, se debe utilizar todo el circuito para alimentar un motor a pasos.

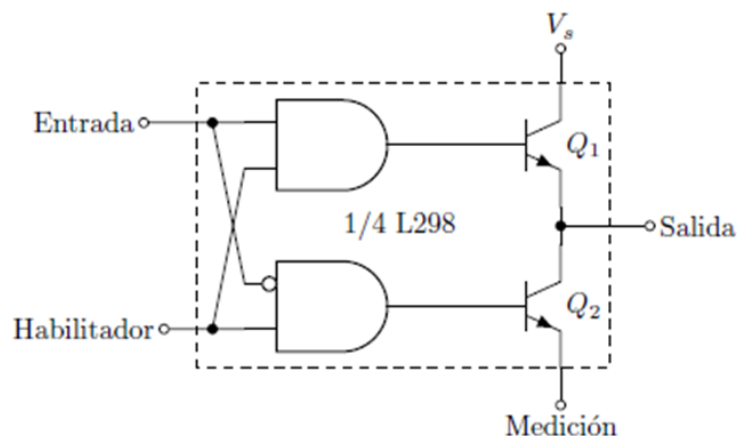


Figura 5: Circuito de un medio puente H tal como se implementa en un circuito integrado L298.

2. Circuito inversor La etapa de potencia para alimentar una carga de CA se conoce como inversor. En nuestro caso usaremos un inversor bifásico. Dicho inversor se puede extender para aplicaciones más fases.

Cabe mencionar que, la línea punteada representa la conexión interna de la señal de habilitación dentro del circuito integrado.

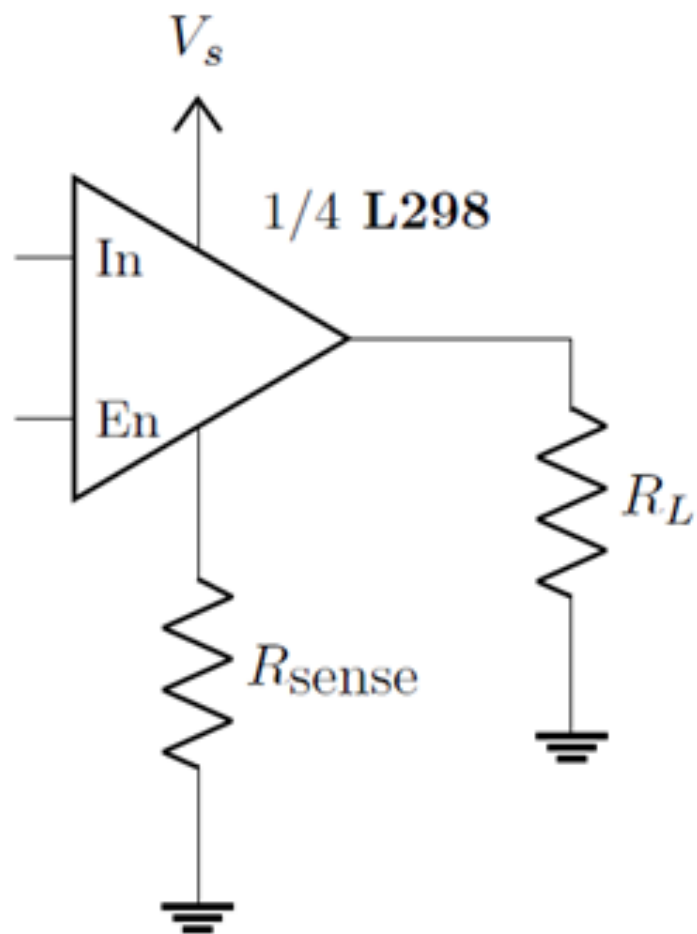


Figura 6: Diagrama eléctrico de un medio puente H con una resistencia de carga (R_L) y una resistencia para la medición de corriente (R_{SENSE}).

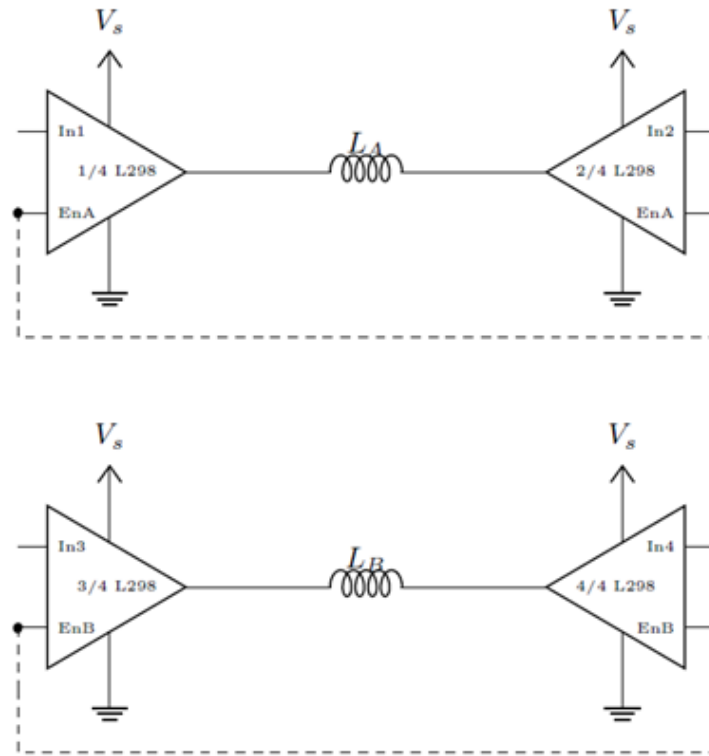


Figura 7: Inversor bifásico aplicado a los devanados de un motor síncrono bifásico.

2. Métodos

2.1. Configuración Inicial

Se inició implementando la actividad guiada mostrada en clase utilizando el software de simulación Simulink. Se configuró un sistema de control de par motor en un puente H como se muestra en la Figura 13 del reporte.

2.2. Aplicación de la Señal de Referencia

Se aplicó una señal de referencia de escalón con un tiempo de escalón de 0.05 s, valor inicial de 0 y valor final de 1, para evaluar la respuesta del sistema. Los parámetros de control PI utilizados fueron $K_p = \frac{1}{12}$ y $K_i = 0$, como se detalla en la Figura 17.

2.3. Medición de las Señales

Durante el experimento, se midieron las siguientes señales:

- **Referencia:** La señal de entrada al sistema.
- **Error:** La diferencia entre la señal de referencia y la salida medida.
- **Señal de Control:** La salida del controlador que ajusta la actuación del sistema.
- **Voltaje de Armadura:** El voltaje aplicado al motor.

- **Salida:** Respuesta del sistema ante la entrada aplicada.

Se utilizaron herramientas de captura de datos en Simulink para registrar estas señales.

2.4. Modificación del Sistema

Posteriormente, se modificó el diagrama en Simulink para reemplazar el amplificador por un puente H, como se documenta en la Figura 13. Se repitió la aplicación de la señal de referencia de escalón y se midieron las mismas señales bajo esta nueva configuración.

2.5. Análisis de Datos

Todas las señales medidas fueron graficadas para su análisis visual. Las gráficas permiten comparar el comportamiento del sistema bajo las configuraciones de amplificador y puente H. Las figuras desde la 18 hasta la 24 en el reporte muestran las gráficas de referencia, error, señal de control, voltaje de armadura, corriente de armadura, torque y velocidad angular, proporcionando una comprensión clara de la dinámica del sistema bajo estudio.

3. Resultados

1.-Implementación de actividades.

3.1.1. Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA con onda sinodal y amplificador lineal.

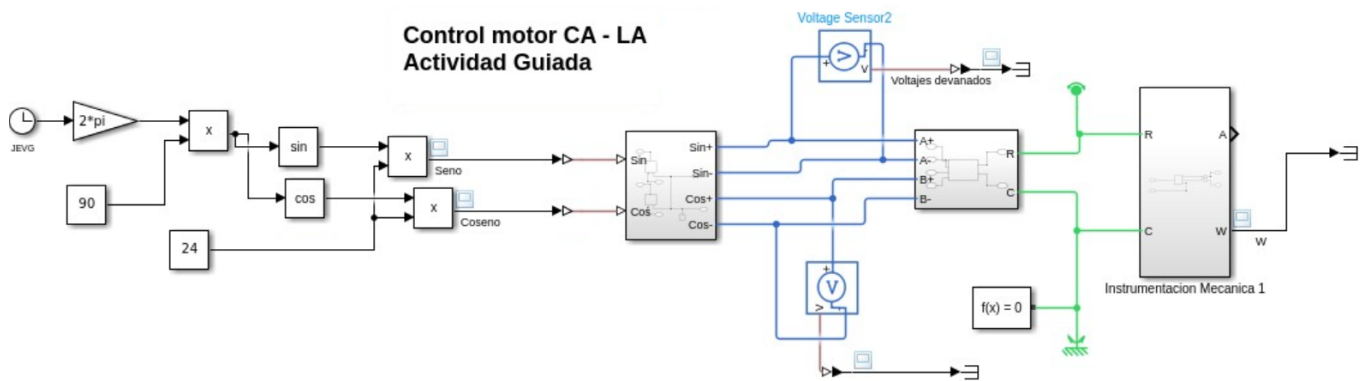


Figura 8: Diagrama de Control de velocidad con amplificador lineal y onda sinodal.

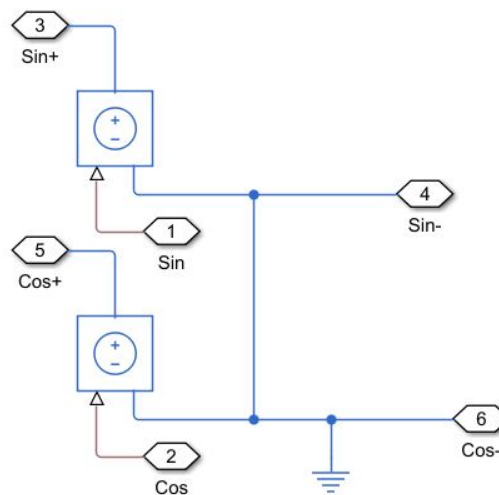


Figura 9: Detalle del subsistema amplificador.

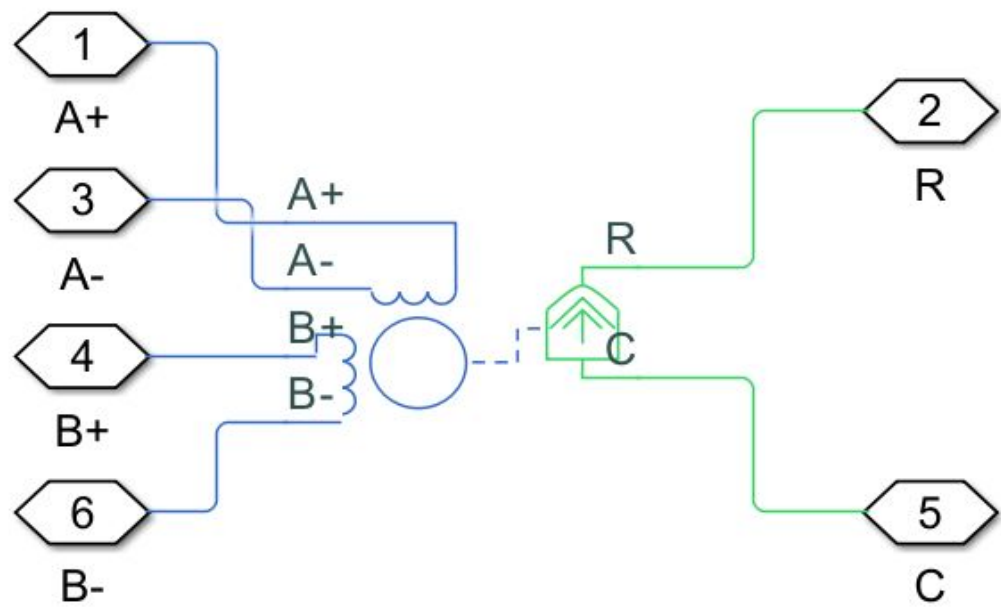


Figura 10: Detalle del subsistema instalación eléctrica.

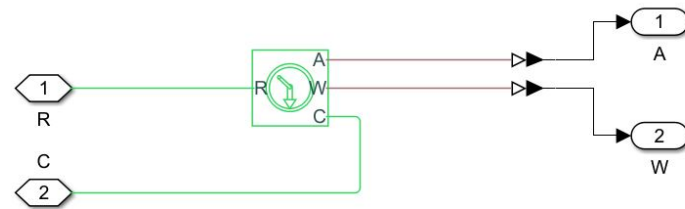


Figura 11: Detalle del subsistema de instalación mecánica.

- Voltaje de bobina 1 = -24V a 24V
- Voltaje de bonina 2 = -24V a 24V

2.-Resultados Obtenidos

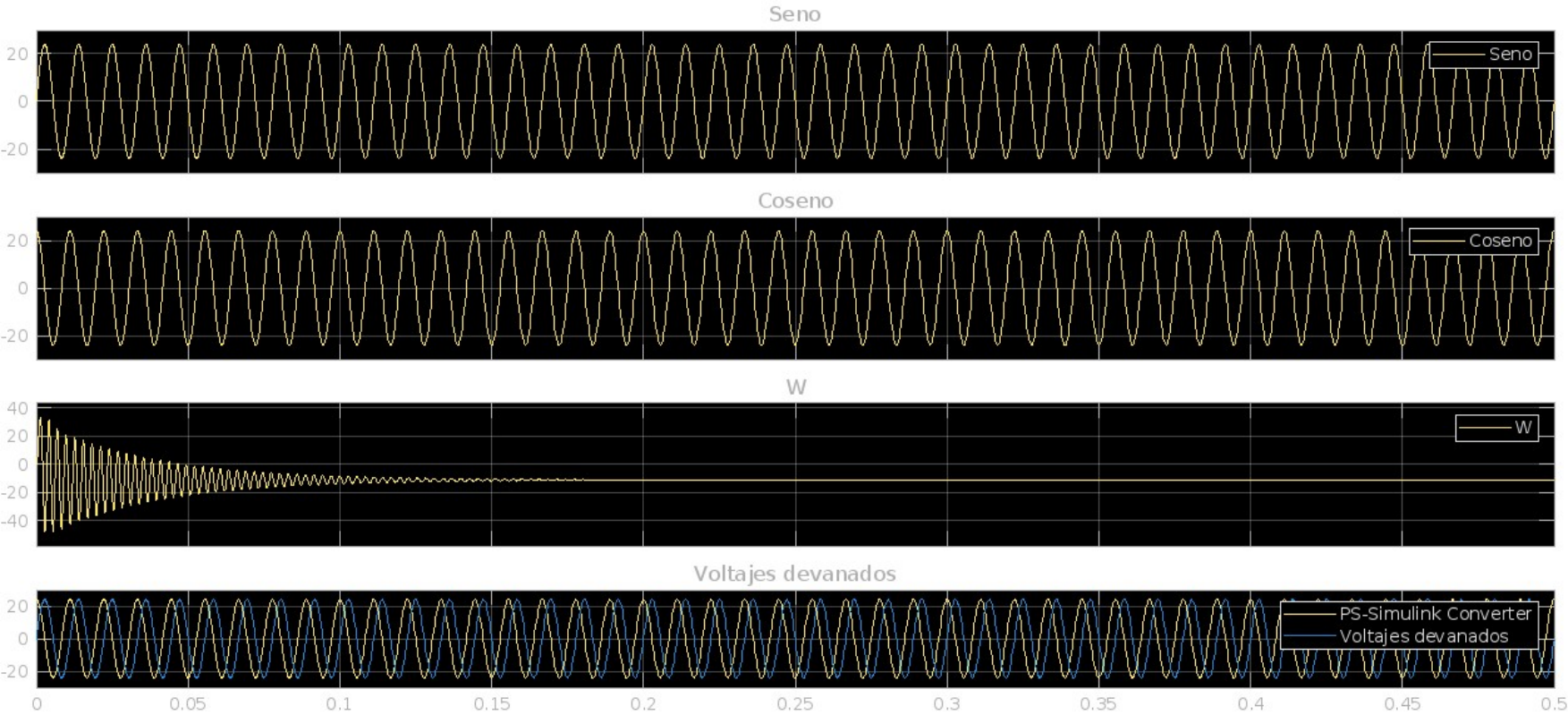


Figura 12: Actividad Guiada

Gráfica de Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA con onda sinodal y amplificador lineal donde se observa el voltaje de las bobinas y la salida.

3.1.2. Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA con onda cuadrada para paso completo.

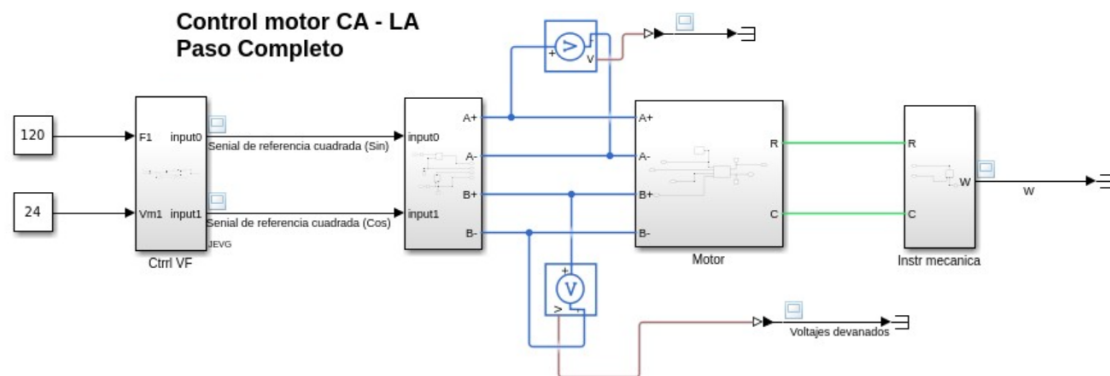


Figura 13: Diagrama de Control de motor CA con ondas cuadradas para paso completo.

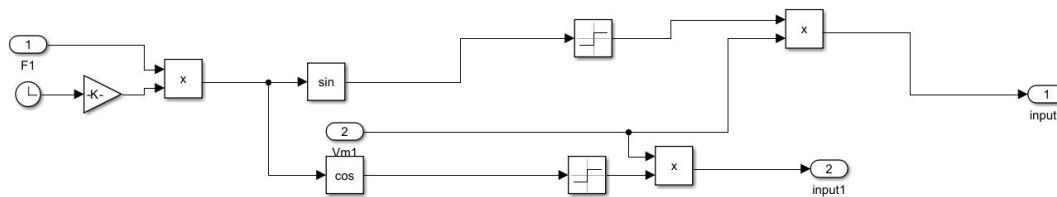


Figura 14: Detalle de subsistema de controlador de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.

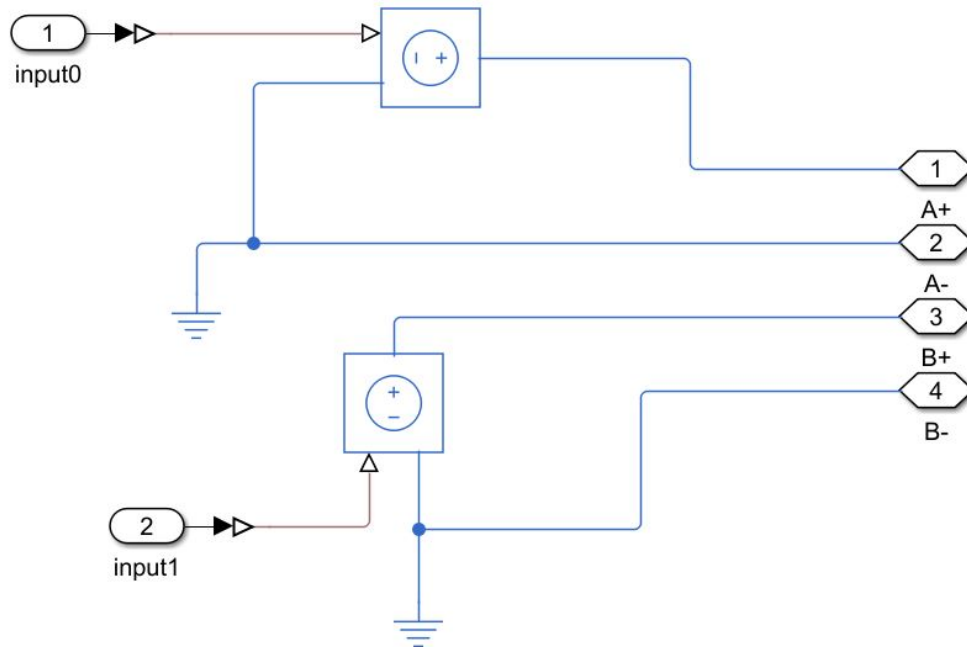


Figura 15: Detalle de subsistema de amplificador lineal de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.

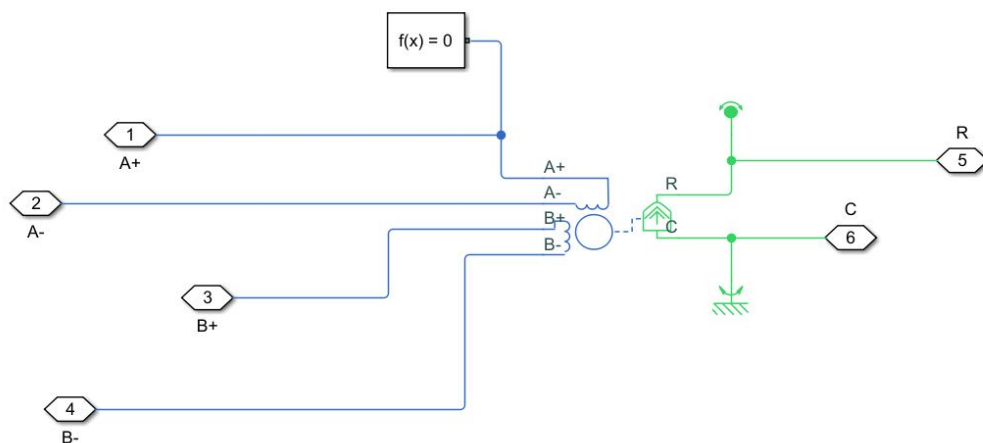


Figura 16: Detalle de subsistema de instalación eléctrica de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.

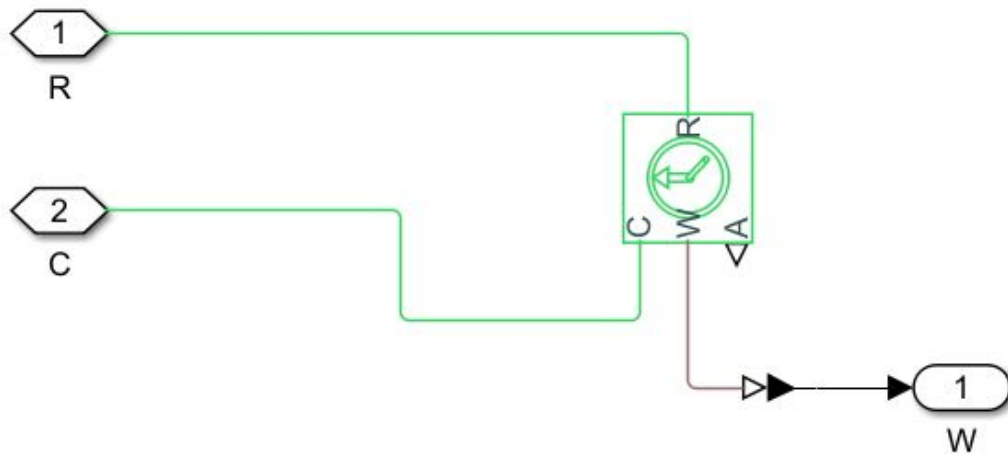


Figura 17: Detalle de subsistema de instalación mecánica de motor CA con implementación de ondas cuadradas para paso completo.

2.-Resultados Obtenidos

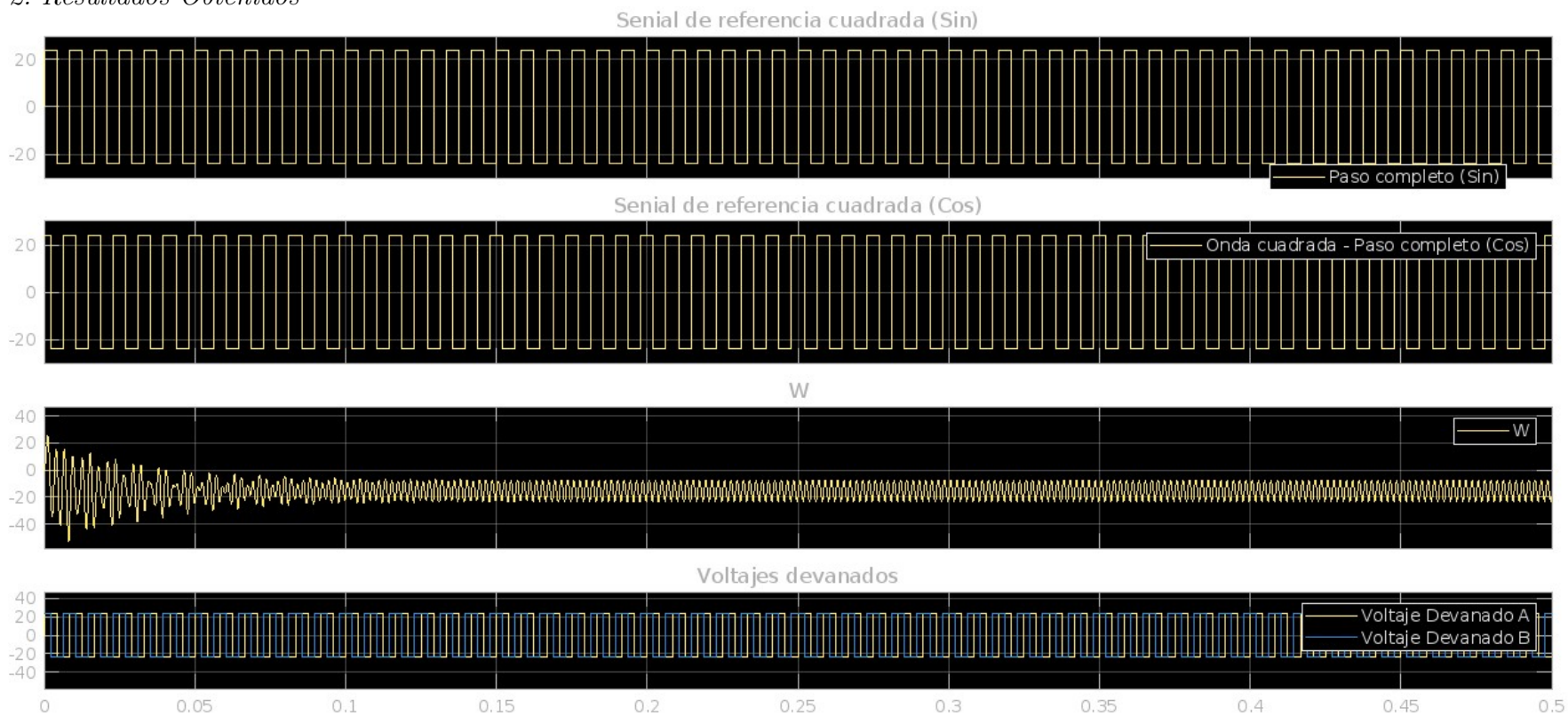


Figura 18: Paso completo

Gráfica de Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA, sustituyendo las ondas sinusoidales de actividad guiada por ondas cuadradas para paso completo.

3.1.3. Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA, sustituyendo las ondas sinusoidales de actividad guiada por ondas cuadradas para Semi Paso.

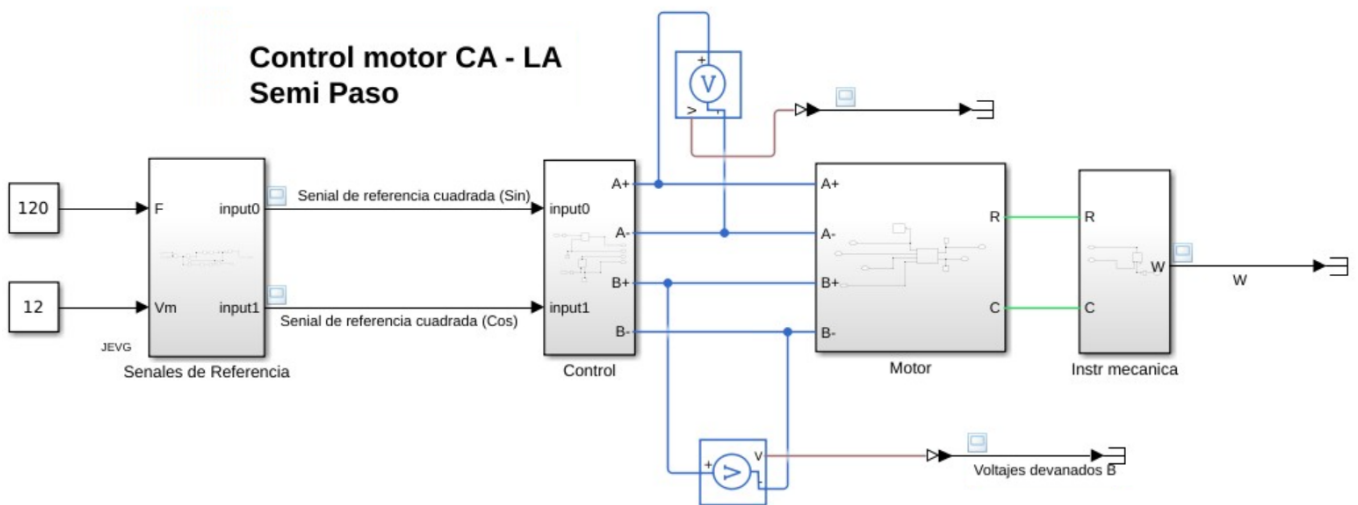


Figura 19: Diagrama de Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA, sustituyendo las ondas sinusoidales de actividad guiada por ondas cuadradas para Semi Paso.

2.-Resultados Obtenidos

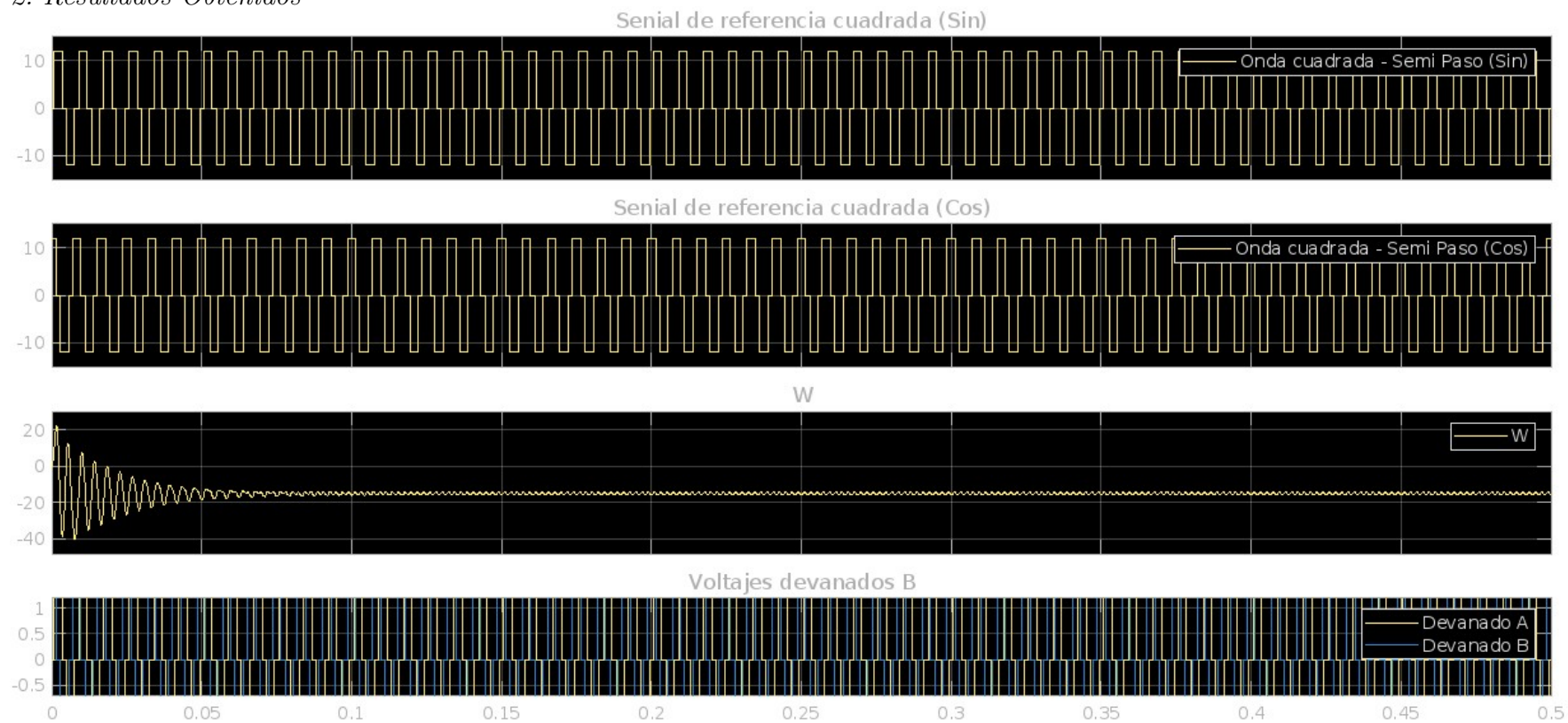


Figura 20: Semi Paso

Gráfica de Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA, sustituyendo las ondas sinusoidales de actividad guiada por ondas cuadradas para Semi Paso

3.1.4. Control de motor CA implementando etapa de potencia con inversor puente H.

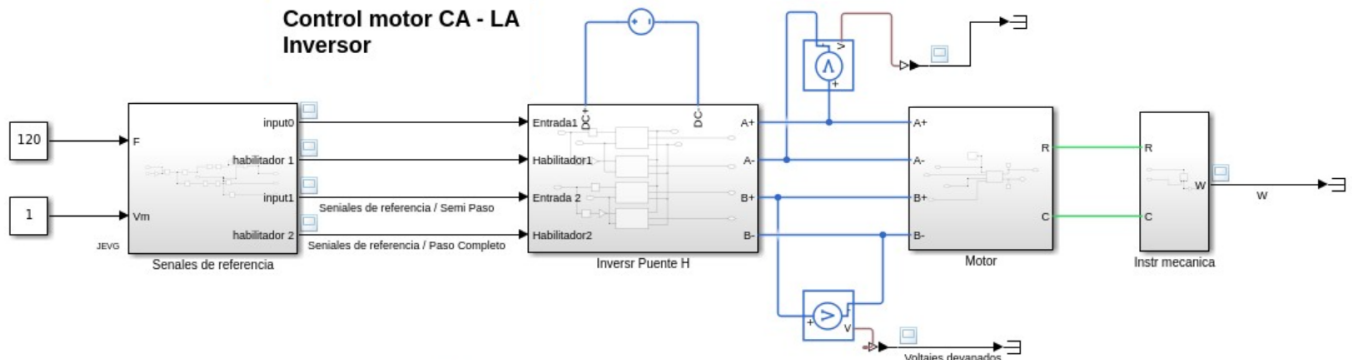


Figura 21: Diagrama de Control de motor CA implementando etapa de potencia con inversor puente H.

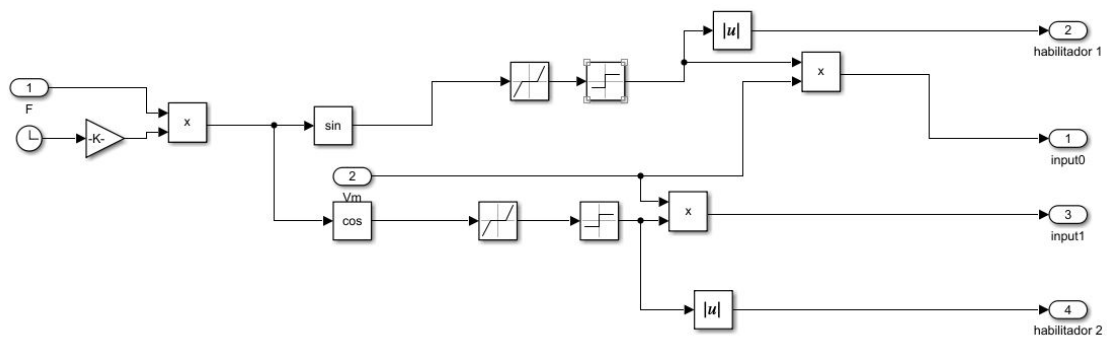


Figura 22: Detalle de subsistema de controlador de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H.

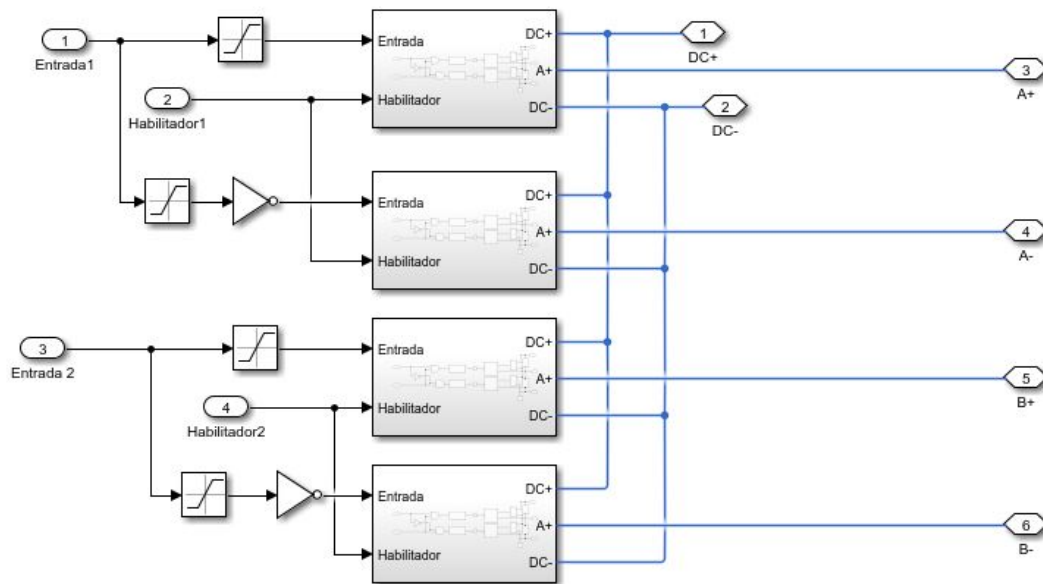


Figura 23: Detalle de subsistema de amplificador de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H L298.

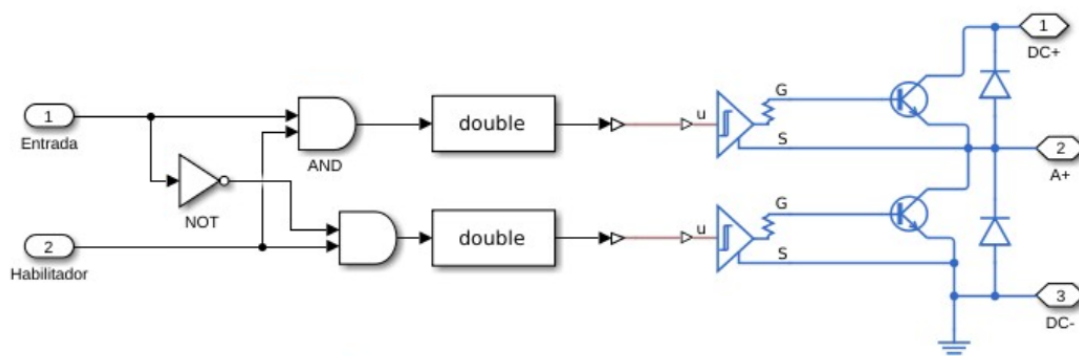


Figura 24: Detalle del circuito de un medio puente H tal como se implementa en un circuito integrado L298

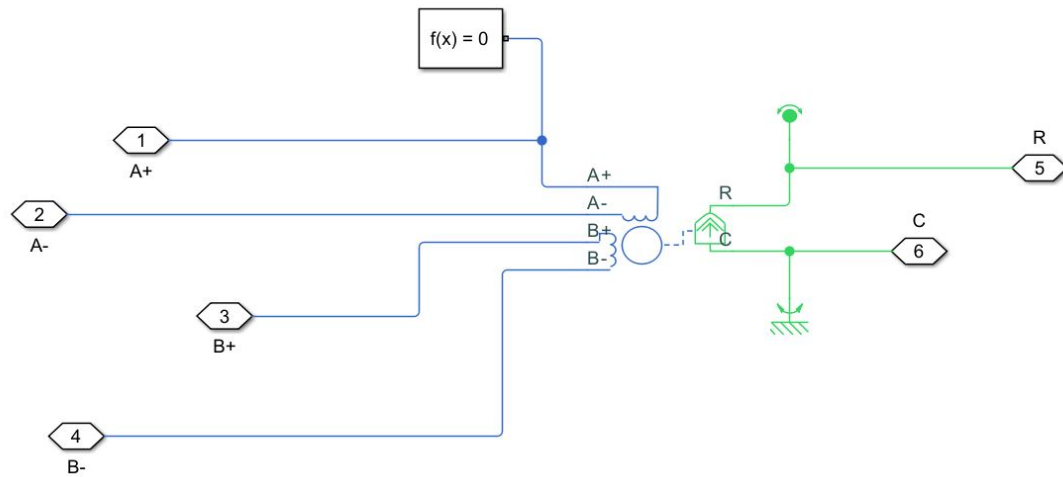


Figura 25: Detalle de subsistema de instalación eléctrica de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H.

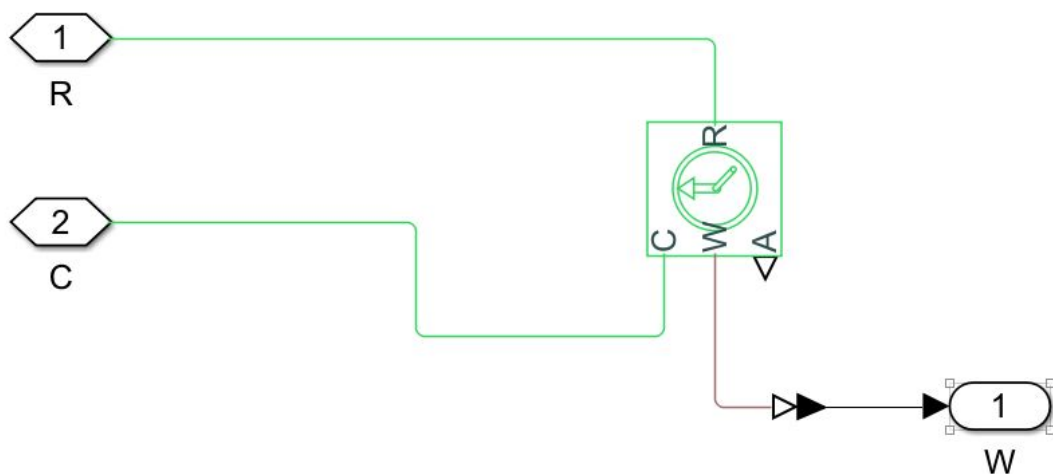


Figura 26: Detalle de subsistema de instalación mecánica de motor CA con implementación de etapa de potencia con puente H.

2.-Resultados Obtenidos

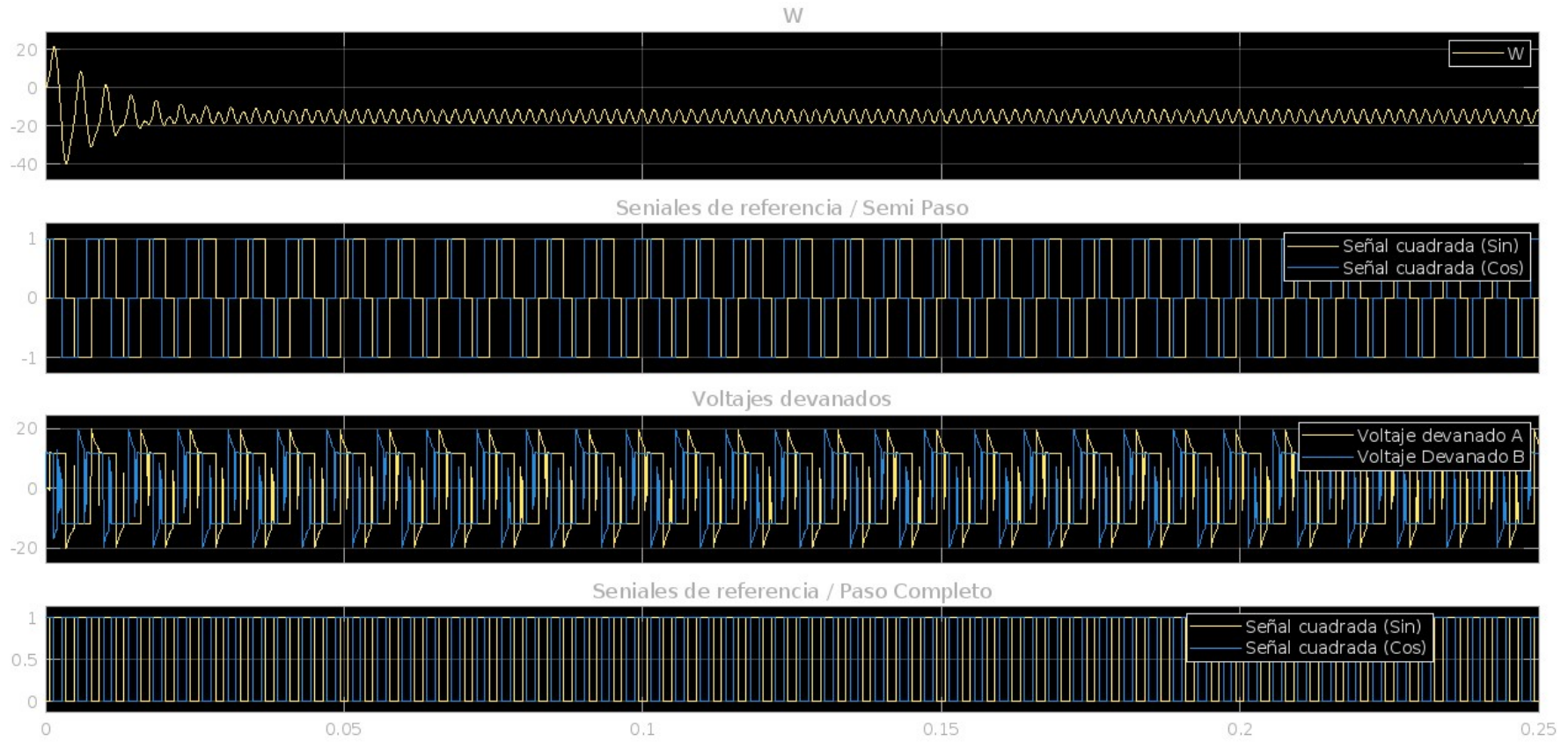


Figura 27: Inversor Puente H L298

Gráfica de Control de velocidad en lazo abierto para un motor de CA, sustituyendo las ondas sinusoidales de actividad guiada por ondas cuadradas Semi Paso y Paso Completo

4. Discusión

Los resultados obtenidos durante las diferentes etapas del experimento proporcionan una visión clara de cómo cada configuración de señal de entrada afecta el rendimiento del sistema de control de velocidad en lazo abierto para un motor AC.

Implementación con Ondas Sinusoidales La implementación inicial utilizando ondas sinusoidales mostró un control de velocidad suave y continuo. La forma de onda sinusoidal, debido a su naturaleza continua y suave, permitió que el motor operara con transiciones graduales en la velocidad. Esto minimizó el estrés mecánico y las vibraciones en el sistema, lo cual es crucial para aplicaciones que requieren un funcionamiento silencioso y estable. Además, se observó una menor generación de ruido eléctrico y una menor cantidad de calor, lo que sugiere una mayor eficiencia energética y una reducción del desgaste del motor a lo largo del tiempo.

Sin embargo, esta configuración también presentó algunos desafíos. La suavidad de la respuesta puede ser insuficiente en aplicaciones donde se requiere una respuesta extremadamente rápida a los cambios en la señal de control. En estos casos, la inercia del sistema puede limitar la capacidad de respuesta inmediata del motor.

Implementaciones con Ondas Cuadradas En las implementaciones con ondas cuadradas, se observaron respuestas rápidas del motor a los cambios en la señal de entrada. La naturaleza discontinua y abrupta de las ondas cuadradas permite que el motor acelere o desacelere rápidamente, lo que es ventajoso en aplicaciones donde se necesita una respuesta dinámica rápida. Esta característica puede ser particularmente útil en sistemas de transporte o maquinaria que requieren cambios rápidos en la velocidad.

No obstante, la rapidez en la respuesta tuvo un costo. Las ondas cuadradas introdujeron cambios bruscos en la corriente y el voltaje, lo que resultó en un mayor estrés mecánico y eléctrico en el motor. Se observaron incrementos en el ruido eléctrico y en el calentamiento del motor, lo que podría reducir la vida útil del sistema debido a un mayor desgaste. Además, la eficiencia energética fue menor en comparación con las ondas sinusoidales, debido a las pérdidas asociadas con las conmutaciones bruscas.

Comparación General y Análisis Comparando todas las configuraciones, se observa que el uso de ondas sinusoidales proporciona una ventaja significativa en términos de suavidad y eficiencia energética. Las ondas sinusoidales permitieron un funcionamiento más estable y eficiente, reduciendo el ruido y el calentamiento del motor. Por otro lado, las ondas cuadradas ofrecieron una respuesta más rápida, pero a costa de una mayor generación de ruido, calentamiento y estrés en el motor.

Cada configuración presenta sus propias ventajas y desafíos. La elección de la señal de entrada dependerá de las necesidades específicas de la aplicación. Para aplicaciones que requieren una operación suave y eficiente, las ondas sinusoidales son preferibles. En contraste, para aplicaciones que requieren una respuesta rápida y dinámica, las ondas cuadradas pueden ser más adecuadas.

Implicaciones y Sugerencias Futuras Los hallazgos de este experimento tienen importantes implicaciones para el diseño de sistemas de control de motores AC en aplicaciones industriales. Se sugiere que futuros trabajos exploren la optimización de los parámetros del sistema utilizando técnicas avanzadas de control y simulación. La implementación de algoritmos de control más sofisticados, como control adaptativo o inteligencia artificial, podría mejorar aún más el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

Además, la integración de sensores más precisos y técnicas de estimación del estado podría

proporcionar un control más robusto y preciso. La exploración de nuevos métodos de control que combinen las ventajas de ambas señales, como técnicas híbridas que utilicen tanto ondas sinusoidales como cuadradas, podría ofrecer un equilibrio óptimo entre respuesta rápida, estabilidad y eficiencia energética.

Conclusiones

- Cerda Parra Luis Oscar:

En la práctica de control de velocidad en lazo abierto para un motor AC, se realizaron simulaciones en Simulink con tres configuraciones diferentes de señal de entrada: una implementación con ondas sinusoidales y dos con ondas cuadradas. A partir de estos ejercicios, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

Implementación con Ondas Sinusoidales:

Desempeño Suave: La implementación con ondas sinusoidales mostró un control de velocidad suave y continuo. Las transiciones y cambios en la velocidad del motor fueron graduales, lo que minimiza el estrés mecánico en el sistema y reduce la probabilidad de resonancias y vibraciones. Menor Ruido y Calentamiento: Las ondas sinusoidales son más eficientes en términos de generación de ruido y calentamiento. La forma de onda continua y suave reduce las pérdidas de energía y la generación de calor en el motor, lo que puede prolongar la vida útil del motor.

- Diaz Bello Diego:

En la práctica, la simulación de bucle abierto del control de velocidad del motor de CA en Simulink utiliza tres configuraciones de señal de entrada diferentes: una implementada mediante ondas sinusoidales y dos implementadas mediante ondas cuadradas. De estos ejercicios se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Empleo de ondas sinusoidales para lograr:

Rendimiento fluido: la implementación de onda sinusoidal muestra un control de velocidad fluido y continuo. Los cambios y la velocidad del motor son graduales, lo que minimiza la tensión mecánica en el sistema y reduce el potencial de resonancia y vibración. Menor generación de ruido y calor: Las ondas sinusoidales son más eficientes en términos de generación de ruido y calor. La forma de onda suave y continua reduce la pérdida de potencia del motor y la generación de calor y, por lo tanto, extiende la vida útil del motor.

- Vázquez Galán Josá Emmanuel:

Durante esta actividad se logró implementar y modificar diversas configuraciones de control de un motor de CD utilizando MATLAB Simulink. Inicialmente, se siguió la actividad guiada que consistió en configurar un sistema de control de par motor en un puente H. Posteriormente, se realizaron modificaciones para sustituir las ondas sinusoidales por ondas cuadradas para paso completo y semipaso, implementando así una etapa de potencia con inversor.

Los resultados obtenidos permitieron comparar el comportamiento del sistema bajo diferentes configuraciones de control y tipos de señal. Las gráficas de referencia, voltaje de devanado y salida de velocidad angular muestran claramente las diferencias en la dinámica del sistema.

Se concluye que el uso de ondas cuadradas y la implementación de un inversor bifásico mejoran la precisión y estabilidad del sistema de control de posición. Además, estas configuraciones permiten un control más eficiente del motor, destacando su potencial para aplicaciones industriales donde la precisión y la eficiencia energética son cruciales.

Bibliografía

- [1] N. S. Nise, Control Systems Engineering, 6th ed. Pomona, CA: California State Polytechnic University, John Wiley Sons, Inc., 2011.
- [2] G. H. Salazar Silva, Control de par en lazo cerrado para un motor de CD,”Trabajo en clase, ciclo escolar 2024/2.
- [3] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5ta ed. BAE Systems Australia, 2024. Revisión técnica por C. Rodríguez Pérez, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México y A. Santana Díaz, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca.
- [4] “Motor AC — ¿Qué es y cuando se usan? — SDI”. SDI. Accedido el 8 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://sdindustrial.com.mx/blog/ac-motor-que-es-cuando-se-usa/>
- [5] T. J. Maloney, Electrónica Industrial Moderna, 5a ed. Monroe, Michigan: PEARSON, 2006.