

SIMULACIÓN SOFTWARE-IN-THE-LOOP DEL CONVERTIDOR DEL LADO DE LA RED PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA

SOFTWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION OF THE GRID-SIDE CONVERTER FOR A WIND POWER GENERATION SYSTEM

Miguel Vázquez Carrillo

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México
mvazquezc1803@alumno.ipn.mx

Oscar Carranza Castillo

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Computo, México
ocarranzac@ipn.mx

Jaime José Rodríguez Rivas

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México
jrodriguez@ipn.mx

Rubén Ortega González

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Computo, México
rortegag@ipn.mx

Daniel Memije Garduño

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México
damemijeg@ipn.mx

Recepción: 22/enero/2026

Aceptación: 30/abril/2026

Resumen

En este artículo se presenta la implementación Software-in-the-Loop (SIL) del convertidor del lado de la red (GSC) de un sistema de conversión de energía eólica (SCEE) basado en un generador síncrono de imanes permanentes. La simulación se realizó en el simulador OP5650 utilizando la plataforma RT-Lab/Simulink™. El modelo considera la conexión trifásica a la red, el filtro RL y el capacitor del bus de CD. La ejecución en tiempo real integra un lazo de sincronización de fase en marco de referencia síncrono (SRF-PLL), controladores PI para regular corriente y tensión, y una estrategia anti-windup. Los resultados muestran las corrientes trifásicas balanceadas, control estable de la tensión del bus de Corriente Directa (CD) y

protección contra sobrecorrientes durante la carga del capacitor. SIL permite evaluar con precisión los algoritmos de control y la respuesta del sistema, siendo una etapa previa a la implementación Hardware-in-the-Loop (HIL) o la implementación física.

Palabras Clave: Anti-windup, convertidor del lado de la red, simulación en tiempo real, sistema de conversión de energía eólica, Software-in-the-Loop.

Abstract

This paper presents the Software-in-the-Loop (SIL) implementation of the grid-side converter (GSC) in a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator. The simulation was conducted on the OP5650 real-time simulator using the RT-Lab/Simulink platform. The model considers the dynamics of the three-phase grid connection, the RL filter, and the DC-link capacitor. The real-time execution and validation integrate a synchronous reference frame phase-locked loop (SRF-PLL), PI controllers for current and voltage regulation, and an anti-windup strategy. The results show balanced three-phase currents, stable control of the DC-link voltage, and protection against overcurrents during the capacitor charging stage. The SIL environment enables accurate evaluation of control algorithms and system response under real-time conditions, constituting an effective stage before Hardware-in-the-Loop (HIL) implementation or deployment on physical equipment.

Keywords: Anti-windup, grid-side converter, real-time simulation, Software-in-the-Loop, wind energy conversion system.

1. Introducción

La energía es esencial para el desarrollo social y económico, pues satisface necesidades básicas y promueve la innovación tecnológica. En los últimos años, su generación se ha orientado hacia fuentes alternativas para reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), alrededor del 80 % de la energía mundial proviene de combustibles fósiles que emiten CO_2 y contaminan el medio ambiente [International Energy Agency, 2023]. Para disminuir estos

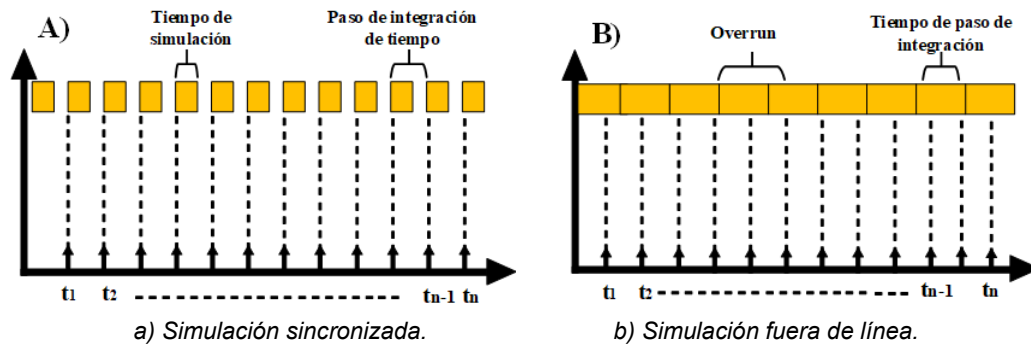
impactos, se impulsa el uso de fuentes renovables como la solar, eólica, geotérmica, hidráulica y biomasa [Boyle, 2012]. En particular, la energía eólica ha presentado avances significativos. De acuerdo con el Consejo Mundial de la Energía Eólica (GWEC), en 2022 la capacidad instalada alcanzó los 906 *GW* a nivel global, concentrados principalmente en China, Estados Unidos, Alemania, India y España, que en conjunto representan el 71% de la instalación mundial [Hutchinson, 2023]. En México, la energía eólica alcanzó en 2024 una capacidad total instalada de 7413 *MW*, equivalente al 5.98% de la generación eléctrica nacional y con una producción cercana a 20,000 *GWh*. Se estima que para 2033 el país podría alcanzar una capacidad instalada de 15 *GW* [Castilla, 2025]. Este crecimiento demanda estrategias de control e innovación, donde la electrónica de potencia desempeña un papel fundamental para transformar y sincronizar la energía del aerogenerador con la red eléctrica [Tang, 2022].

Sin embargo, para validar dichas estrategias no basta con simulaciones convencionales; se requiere un entorno que emule el comportamiento real de la planta. La simulación en tiempo real (SIL) cumple este propósito al ejecutar modelos sincronizados con el tiempo real, permitiendo evaluar el desempeño del sistema de manera segura y precisa, incluso bajo condiciones extremas [Vignati, 2021].

Un parámetro crítico en este entorno es el paso de integración, definido como el intervalo de tiempo para calcular el comportamiento del sistema en cada instante [Celanovic, 2009]. Una selección adecuada asegura cálculos precisos, secuenciales y sincronizados. En cambio, una elección incorrecta puede provocar un *overrun*, en el cual el sistema no finaliza los cálculos en el tiempo establecido, generando retrasos de ejecución, perturbaciones y posibles inestabilidades.

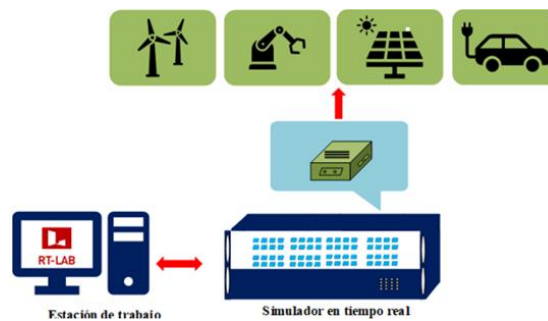
La Figura 1 presenta una comparación entre ambos escenarios. En 1a, la ejecución es estable con un paso de integración adecuado, mientras que en 1b, el tiempo de cálculo excede el intervalo asignado, acumulando tareas y afectando la estabilidad del sistema. Dado lo anterior, este trabajo emplea la simulación Software-in-the-Loop (SIL) para validar el desempeño del sistema de control bajo condiciones dinámicas reales. En esta técnica, el controlador se ejecuta en la PC y la planta en RT-LAB, permitiendo una evaluación segura y precisa sin requerir hardware

adicional. La Figura 2 muestra el esquema general de esta configuración, ampliamente utilizada en robótica, sistemas automotrices y electrónica por su capacidad de realizar pruebas precisas sin comprometer el equipo.



Fuente: [Faruque, 2015].

Figura 1 Desempeño del paso de integración en simulaciones en tiempo real.



Fuente: elaboración propia.

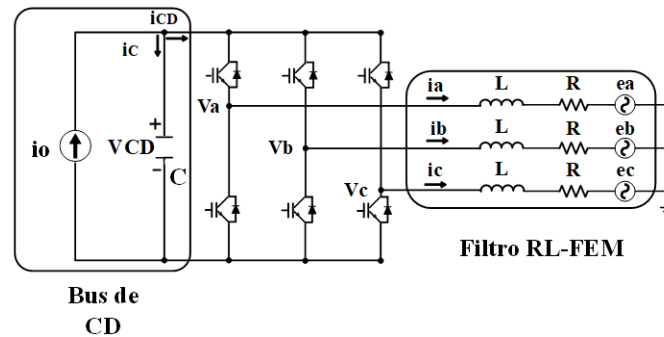
Figura 2 Esquema de funcionamiento del Software-in-the-Loop.

2. Métodos

Para la simulación en tiempo real del convertidor del lado de la red eléctrica en un sistema de generación eólica, se requiere un modelo matemático que describa su comportamiento dinámico. Con este propósito, el sistema se divide en dos subsistemas principales (Figura 3).

El primer subsistema corresponde a la dinámica del bus de CD, el cuál almacena energía en el capacitor y estabiliza la tensión, asegurando el intercambio entre el generador y la red eléctrica. El segundo subsistema es el sistema de corriente alterna (CA), el cual se presenta inicialmente en el dominio abc y conformado por un filtro trifásico RL-FEM. El filtro atenúa armónicos y limita la variación de la

corriente inyectada, posteriormente, el modelo se transforma al marco síncrono dq , para representar las variables como magnitudes continuas en el tiempo.

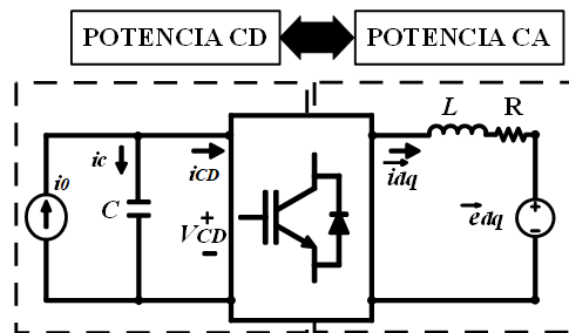


Fuente: [Memije, 2017].

Figura 3 Convertidor lado de la red eléctrica.

Modelo matemático del bus de tensión de CD

El bus de CD actúa como enlace para transferir energía entre los sistemas de corriente directa y alterna. Su función principal es almacenar energía y desacoplar la frecuencia del generador síncrono de imanes permanentes respecto a la red eléctrica [Memije, 2017]. La Figura 4 muestra la dinámica de este enlace, donde el bus de CD interactúa con el convertidor y el sistema de CA mediante un filtro RL.



Fuente: [Memije, 2017]

Figura 4 Transferencia de energía entre el sistema de CD y CA de la red eléctrica.

Para mantener estable la tensión del bus, se relacionan las corrientes en el marco de referencia síncrono dq con el voltaje del capacitor, igualando la potencia activa del sistema de CD, indicada en la Ecuación 1, con la del sistema de CA mediante la Ecuación 2.

$$P_{CD} = v_{CD}(t) \left(i_0(t) - C \frac{d}{dt} v_{CD}(t) \right) \quad (1)$$

$$P_{CA} = e_d(t)i_d(t) + e_q(t)i_q(t) \quad (2)$$

Donde v_{CD} es la tensión del bus de CD, i_0 es la corriente de carga, y C la capacitancia del bus. Las variables e_d, e_q, i_d, i_q corresponden a las tensiones y corrientes en el marco síncrono bifásico. Para linealizar la Ecuación 1, se realiza un análisis a pequeña señal [Carriveau, 2011], al sustituir en la Ecuación 1 y en la Ecuación 2 sus componentes de pequeña y gran señal, se obtiene la Ecuación 3.

$$(\hat{v}_{CD} + V_{CD}) \left[(I_0 + \hat{i}_0) - C \frac{d}{dt} (V_{CD} + \hat{v}_{CD}) \right] = (E_d + \hat{e}_d)(I_d + \hat{i}_d) + (E_q + \hat{e}_q)(I_q + \hat{i}_q) \quad (3)$$

Donde $V_{CD}, I_0, I_d, I_q, E_d$ y E_q son términos a gran señal. Por otra parte, $\hat{v}_{CD}, \hat{i}_0, \hat{i}_d, \hat{i}_q, \hat{e}_d$ y $\hat{e}_q$ son variables a pequeña señal. Reduciendo y agrupando las operaciones mostradas en la Ecuación 3, en las Ecuaciones 4 y 5 se describe el modelo matemático de la transferencia de potencia entre los sistemas de CD y CA.

$$\hat{i}_0 V_{CD} + \hat{v}_{CD} I_0 - V_{CD} C \frac{d}{dt} \hat{v}_{CD} = I_d \hat{e}_d + \hat{e}_q I_q + E_q \hat{i}_q + E_d \hat{i}_d \quad (4)$$

$$V_{CD} I_0 = E_d I_d + E_q I_q \quad (5)$$

Modelo matemático de la red eléctrica

A continuación, se analizan las ecuaciones dinámicas de la transformación al sistema de corriente alterna en el marco de referencia trifásico abc al marco de referencia ortogonal $\alpha\beta$, y al marco de referencia síncrono dq .

El modelo matemático del sistema trifásico conectado a la red, en el marco abc , se presenta en la Ecuación 6 con base en la ley de voltajes de Kirchhoff [Sadiku, 2017], donde R y L representan la resistencia e inductancia por fase del filtro, $\vec{e}_{abc}$ corresponde al vector de voltaje de un sistema trifásico balanceado y $\vec{i}_{abc}$ es el vector de corrientes. Aplicando la transformada de Clarke de potencia constante [Carmona, 2024], el modelo matemático de la red en el marco de referencia estacionario $\alpha\beta$ se expresa en la Ecuación 7, (donde $\vec{e}_{\alpha\beta}$ y $\vec{i}_{\alpha\beta}$ son los vectores de tensión y corriente en el marco de referencia estacionario $\alpha\beta$), permitiendo analizar su comportamiento dinámico en un sistema bifásico ortogonal.

$$\vec{v}_{abc} = R\vec{i}_{abc} + L \frac{d}{dt}\vec{i}_{abc} + \vec{e}_{abc} \quad (6)$$

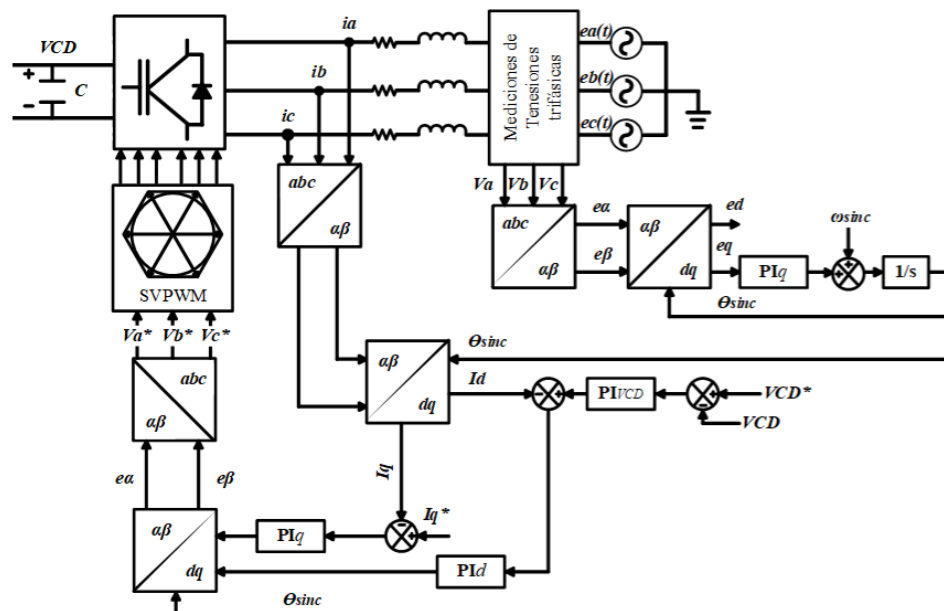
$$\vec{v}_{\alpha\beta} = R\vec{i}_{\alpha\beta} + L \frac{d}{dt}\vec{i}_{\alpha\beta} + \vec{e}_{\alpha\beta} \quad (7)$$

Para el diseño del controlador PI, los ejes de referencia deben transformarse del marco de referencia estacionario $\alpha\beta$ al marco de referencia síncrono dq mediante la transformada de Park [Sul, 2011]. El modelo matricial resultante del convertidor de la red eléctrica en el marco dq , se muestra en la Ecuación 8. Donde i_d y i_q son las corrientes, y e_d y e_q son las tensiones de la red eléctrica, en el marco de referencia síncrono dq , respectivamente.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_{sinc} L \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

Diseño del sistema de control

La Figura 5 muestra el diagrama de control del convertidor del lado de la red (GSC), que incluye la implementación del lazo interno de control de corriente en el marco síncrono dq , junto con el lazo externo de control para la regulación de la tensión del bus de CD [Memije, 2017].



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Sistema de control para el convertidor del lado de la red.

El método de sincronización con la red eléctrica se basa en el SRF-PLL [Memije, 2017], utilizando la componente del eje q como variable para el GSC. Para generar las señales de compuerta de los IGBTs se emplea la técnica SVPWM [Imtiyaz, 2022].

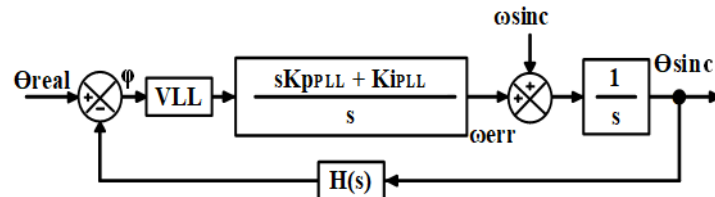
El diseño de los controladores se fundamenta en el criterio de Nyquist [Ogata, 2010], que permite determinar las ganancias K_p y K_i . Para ello, se analiza la función de transferencia en lazo abierto $G(s)$ junto con el controlador $C(s)$, verificando que el sistema cumpla los márgenes de fase y ganancia en la frecuencia de cruce (ω_c). Así mismo, se busca que el ángulo de fase satisfaga el margen de fase especificado (PM), de acuerdo con la Ecuación 9 y la Ecuación 10, garantizando así la estabilidad del sistema y un desempeño adecuado frente a posibles perturbaciones.

$$\|C(s)G(s)\|_{s=j\omega_c} = 1 \quad (9)$$

$$\angle C(s)G(s)|_{s=j\omega_c} = PM - \pi \quad (10)$$

Lazo de Localización de Fase

Para diseñar el control del SRF-PLL, las tensiones deben ser de secuencia positiva y estar balanceadas. La Figura 6 muestra el diagrama en lazo cerrado del SRF-PLL, donde la tensión trifásica de la red se transforma al marco síncrono dq y la componente del eje q se usa como variable de control. Además, la tensión de línea a línea (V_{LL}) se emplea para normalizar la señal de error (ω_{err}), que representa la desviación entre el ángulo real de la red (θ_{real}) y el ángulo estimado (θ_{sinc}).



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Diagrama de bloques del SRF-PLL.

El controlador PI obtiene la frecuencia angular sincronizada (ω_{sinc}), utilizada para calcular la señal de error (ω_{err}). El objetivo es mantener esta señal en cero, garantizando la sincronización precisa del SRF-PLL con la red. La Ecuación 11

presenta la función de transferencia del lazo abierto del SRF-PLL, considerando ω_{sinc} como una perturbación y se fija en cero. Donde K_{pPLL} es la ganancia proporcional y K_{iPLL} es la ganancia integral del SRF-PLL. Estas ganancias se determinan mediante los criterios de Nyquist [Ogata, 2010] (Ecuaciones 12 y 13).

$$G_{LA}(s) = \left(K_{pPLL} + \frac{K_{iPLL}}{s} \right) \left(\frac{V_{LL}}{s} \right) \quad (11)$$

$$K_{iPLL} = \frac{\omega^2}{V_{LL} \sqrt{(PM) + 1}} \quad (12)$$

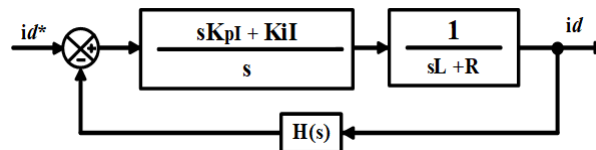
$$K_{pPLL} = \frac{K_{iPLL}}{\omega_c} \tan (PM) \quad (13)$$

Lazo de Control de Corriente

Para diseñar el lazo de control de corriente del GSC, el sistema debe orientarse en el marco dq . Debido a que las funciones de transferencia que relacionan las corrientes i_d e i_q con las tensiones de control v_d y v_q presentan una dinámica prácticamente idéntica, se emplea una única función de transferencia para representar la planta del lazo de control de corriente (Ecuación 14). La función de transferencia del lazo abierto del control de corriente se determina mediante la Ecuación 13, a partir de la Figura 7, y se expresa en la Ecuación 15.

$$\frac{i_{dq}(s)}{v_{dq}(s)} = \frac{1}{sL + R} \quad (14)$$

$$G_{LA}(s) = \left(K_{pI} + \frac{K_{iI}}{s} \right) \left(\frac{1}{sL + R} \right) \quad (15)$$



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Diagrama de bloques del lazo interno de control de corriente.

Con base en los criterios de Nyquist [Ogata, 2010], las ganancias integral (K_{iI}) y proporcional (K_{pI}) del controlador PI de corriente se obtienen a partir de las Ecuaciones 16 y 17.

$$KiI = \omega_c \sqrt{\frac{R^2 + (L\omega_c)^2}{\tan^2 \left(PM - \frac{\pi}{2} + \left(\frac{L\omega_c}{R} \right) \right) + 1}} \quad (16)$$

$$KpI = \frac{KiI}{\omega_c} \tan \tan \left(PM - \frac{\pi}{2} + \left(\frac{L\omega_c}{R} \right) \right) \quad (17)$$

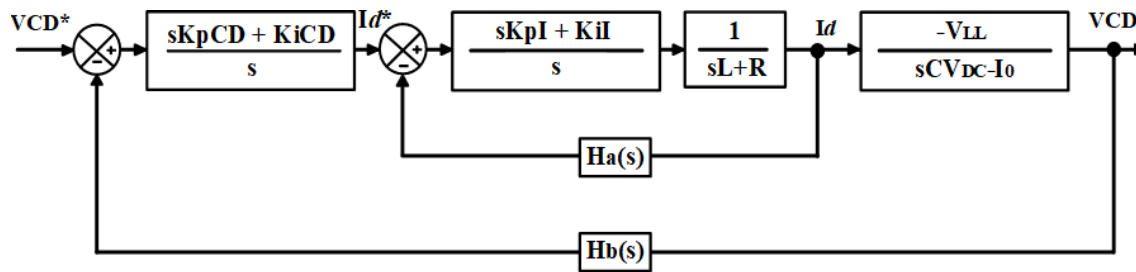
Lazo de control del bus de CD

En cuanto al control de tensión, el modelo asociado a la componente del eje d se expresa en Ecuación 18, donde I_0 representa la corriente de carga del convertidor. A partir del bloque de control del bus de CD (Figura 8), la función de transferencia del lazo abierto del control del bus de CD se define mediante Ecuaciones 19 y 20.

$$\frac{\hat{v}_{CD}(s)}{\hat{i}_d(s)} = -\frac{V_{LL}}{sV_{CD}C - I_0} \quad (18)$$

$$T = \left(\frac{-V_{LL}}{sV_{CD}C - I_0} \right) \quad (19)$$

$$G_{LA}(s) = \left(KpCD + \frac{KiCD}{s} \right) \left[\left(KpI + \frac{KiI}{s} \right) \left(\frac{1}{sL + R} \right) \right] * T \quad (20)$$



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Diagrama de bloques del lazo de tensión del bus de CD.

Aplicando los criterios de estabilidad de Nyquist [Ogata, 2010], las Ecuaciones 21 a 25 se emplean para el diseño de la ganancia proporcional “ $KpCD$ ” y la ganancia integral “ $KiCD$ ” del control del bus de CD.

$$A = \frac{\omega_c(KpI + R)}{KiI - \omega_c^2 L}; \quad B = \frac{\omega_c(KpI + R)}{KiI - \omega_c^2 L}; \quad C = \frac{\omega_c KpI}{KiI}; \quad (21)$$

$$T_1 = \tan \tan \left[PM - \frac{\pi}{2} + (A) + (B) - (C) \right] \quad (22)$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{[(KiI - \omega_c^2 L)^2 + \omega_c^2 (KpI + R)^2][(\omega_c V_{CD} C)^2 + I_0^2]}{[KiI^2 + (\omega_c KpI)^2][T_1^2 + 1]}} \quad (23)$$

$$KiCD = -\frac{\omega_c}{V_{LL}} * T_2 \quad (24)$$

$$KpCD = (T_1) \left(\frac{KiCD}{\omega_c} \right) \quad (25)$$

La Tabla 1 presenta las condiciones de diseño y las ganancias de los controladores PI empleadas en este trabajo. Estos parámetros, tomados de Memije [2017], fueron seleccionados para cumplir los márgenes de fase y las frecuencias de cruce de cada lazo de control. Su desempeño fue validado mediante simulaciones, confirmando la estabilidad del sistema y una respuesta dinámica adecuada.

Tabla 1 Controladores PI propuestos.

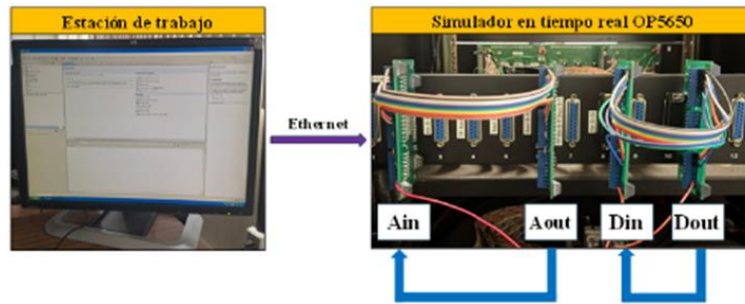
Controlador	PM	ω_c	K_p	K_i
<i>SRF-PLL</i>	67°	30 Hz	1.239	99.163
<i>Corriente</i>	65°	250 Hz	9.327	7698.363
<i>Bus de CD</i>	67°	30 Hz	-2.00	-152.173

Fuente: elaboración propia

Implementación

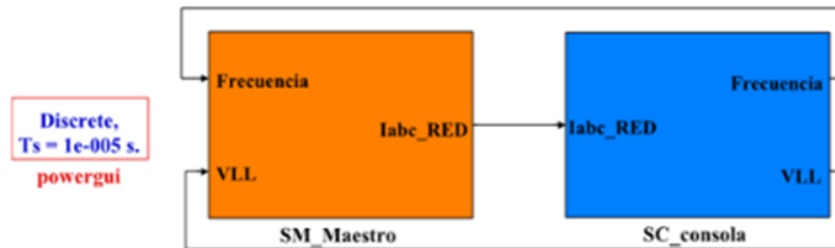
La Figura 9 muestra la implementación SIL del GSC en una configuración back-to-back y su conexión experimental. El lazo cerrado intercambia corrientes trifásicas, voltajes de línea, la tensión del bus de CD y seis pulsos PWM generados por SVPWM. Para ello se utilizan tarjetas en paralelo, que permiten la comunicación entre RT-LAB/Simulink™ y el simulador OP5650 vía Ethernet, asegurando la realimentación en tiempo real. En la plataforma RT-LAB/Simulink™ para la simulación SIL del convertidor del lado de la red, se emplean dos subsistemas: *SM_Maestro*, encargado del control, y *SC_Consola*, responsable de definir y enviar las referencias. La Figura 10 muestra esta organización, donde ambos subsistemas intercambian señales con un paso de integración de 10 μ s. Esta estructura separa la ejecución del control de la gestión de referencias y la supervisión, facilitando el análisis del sistema en tiempo real. En el subsistema *SC_Consola* (Figura 11) se incorpora el bloque OpComm de la librería RT-EVENTS, enlazado con RT-LAB, el

cual intercambia señales con el *SM_Maestro* y permite ajustar y visualizar en tiempo real las variables del convertidor del lado de la red durante la simulación.



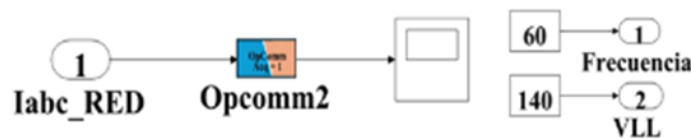
Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Implementación SIL del convertidor del lado de la red de un SGE.



Fuente: elaboración propia.

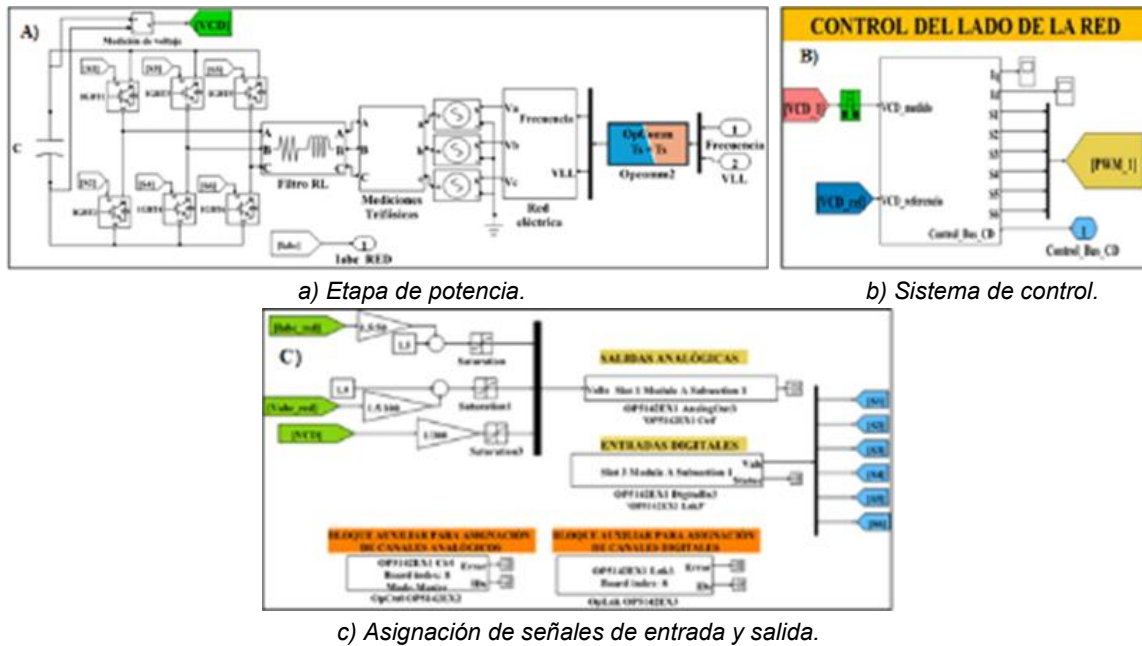
Figura 10 Subsistemas dentro de la plataforma experimental RT-LAB/Simulink™.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Estructura interna del subsistema SC_Consola.

La Figura 12 muestra la estructura interna del subsistema *SM_Maestro*. En 12a se presenta la etapa de potencia, donde un capacitor modela la dinámica del bus de CD en la configuración back-to-back; en 12b la etapa de control del GSC, operando con un paso de integración " T_m " de $50 \mu s$ y sincronizada con el paso general de $10 \mu s$ mediante un bloque *Rate Transition* para evitar aliasing [Zamiri, 2017], y en 12c el acondicionamiento de entradas y salidas en RT-LAB/Simulink™, donde las señales analógicas y digitales del lazo cerrado se organizan para su intercambio con el hardware.

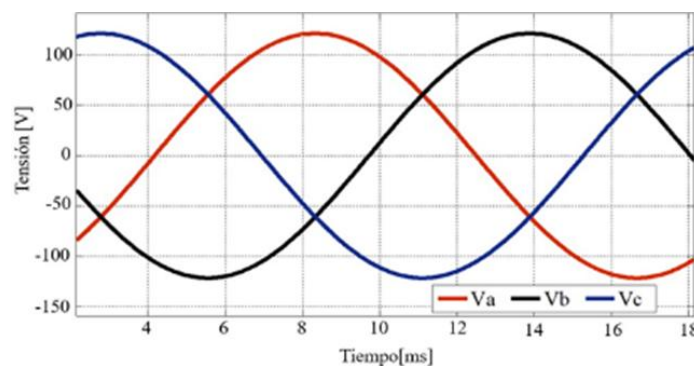


Fuente: elaboración propia.

Figura 12 Estructura interna del subsistema SM_Maestro.

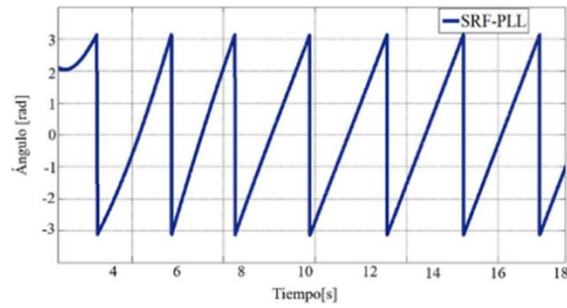
3. Resultados

La Figura 13 muestra las tensiones trifásicas simuladas, con ondas senoidales desfasadas de 120° y una amplitud 121.25 V , la Figura 14 el SRF-PLL [Memije, 2017], donde el ángulo estimado aumenta hasta π y se reinicia periódicamente en $-\pi$. Por su parte, la Figura 15 ilustra la carga del capacitor del bus de CD en un entorno SIL. El proceso inicia en 137 V y, al aplicar la estrategia anti-windup, la referencia se incrementa de 0 a 250 V , bloqueando la acción integral hasta superar los 225 V .



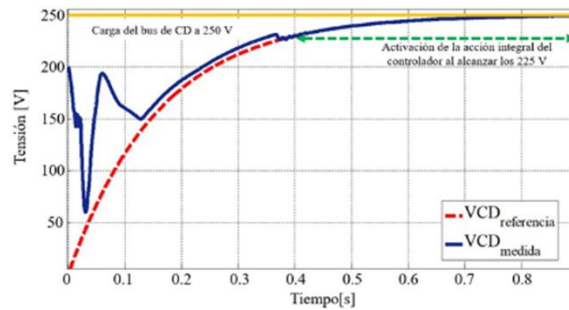
Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Tensiones trifásicas durante la simulación SIL.



Fuente: elaboración propia.

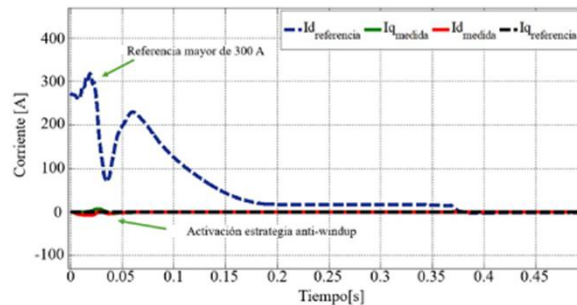
Figura 14 SRF-PLL durante la simulación SIL.



Fuente: elaboración propia.

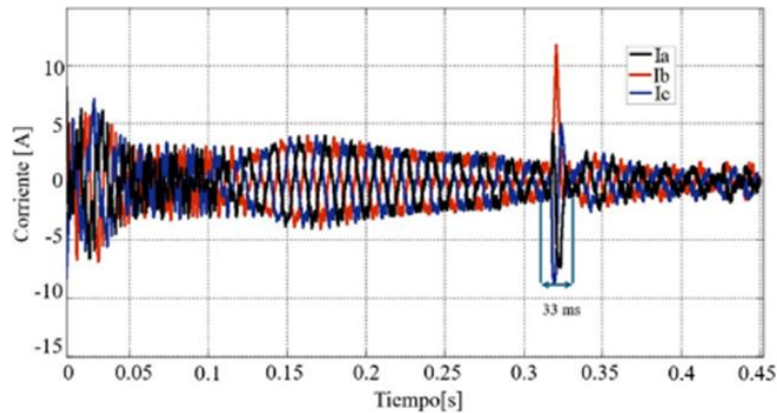
Figura 15 Carga del bus de CD en un entorno SIL.

En la Figura 16 se muestran las corrientes síncronas d y q durante la carga del bus de CD en el entorno SIL. En donde a pesar de que la referencia de i_d supera los 300 A, la estrategia anti-windup [Åström, 2006], bloquea la acción integral hasta que la tensión de referencia del bus de CD supera los 225 V, evitando sobrecorrientes y garantizando un arranque seguro del convertidor, mientras que en la Figura 17 se ilustran las corrientes trifásicas durante la carga del bus de CD, con un transitorio alrededor de los 33 ms que no afecta la dinámica de carga.



Fuente: elaboración propia.

Figura 16 Corrientes síncronas durante la carga del bus de CD en un entorno SIL.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17 Corrientes trifásicas durante la carga del bus de CD.

4. Discusión

La simulación SIL validó el control de corriente y la regulación del bus de CD en tiempo real, manteniendo corrientes trifásicas balanceadas y evitando sobrecorrientes superiores a 300 A. Esto se logró gracias a los controladores y a la estrategia anti-windup, que bloquea la acción integral hasta que la referencia supera los 225 V, garantizando una carga controlada del bus.

5. Conclusiones

El sistema de control fue implementado y validado en un entorno SIL en tiempo real con el simulador OP5650, permitiendo evaluar de forma segura los controladores de corriente y de la tensión del bus de CD. Los controladores PI y el SRF-PLL aseguraron una operación estable, mientras que la estrategia anti-windup fue clave durante la carga del bus de CD. La simulación en tiempo real evidenció el efecto de usar o no el anti-windup: ante referencias excesivas no se produjo daño, y durante la carga del bus de CD la acción integral se bloqueó hasta 225 V, garantizando una transición estable. Asimismo, ante una referencia de 300 A en el eje d , el anti-windup protegió al convertidor y las corrientes trifásicas se mantuvieron balanceadas, validando la efectividad del control y de la modulación SVPWM. Estos resultados demuestran que la simulación SIL permite verificar el desempeño del control y prevenir fallas, consolidándose como una herramienta esencial antes de su implementación física o en pruebas HIL.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Åström K. J., & Hägglund, T., Advanced PID Control. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [2] Boyle, G., Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [3] Carmona, F., Desarrollo de un Emulador de un Sistema de Tracción para un Vehículo Eléctrico. Instituto Politécnico Nacional, 2024.
- [4] Carriveau, R., Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, InTechOpen, 2011.
- [5] Castilla, U., Mohamed, E. Z., Mohamed, G., Rehman, S., Current Status and Sustainable Utilization of Wind Energy Resources in Mexico: A Systematic Review. *Wind*, 5 (4), 22, 2025.
- [6] Celanovic, I., Haessig, P., Carroll, E., Katic V. A., Celanovic N., Real-Time Digital Simulation: Enabling Rapid Development of Power Electronics. XV Međunarodni simpozijum Energetska elektronika – Ee 2009, Novi Sad, Republic of Serbia, October 28th - 30th, 2009.
- [7] Faruque, M. D., Strasser, T., Lauss, G., Jalili-Marandi, V., Forsyth, P., Dufour C., Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2 (2), pp. 63–73, 2015.
- [8] Hutchinson, M., Global Wind Report 2023. Belgica: GWEC, 2023.
- [9] Imtiyaz, T., Ilahi, F., Jain, A. Modelling and Analysis of Vector Controlled Doubly Fed Induction Generator (DFIG). *Power Electronics and High Voltage in Smart Grid*, 817, pp. 255-268, 2022.
- [10] International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency, 2023.
- [11] Memije, D., Desarrollo de Estrategias De Control Para Máximo Aprovechamiento de la Energía Eólica. Instituto Politécnico Nacional, 2017.
- [12] Ogata, K., Modern Control Engineering. New Jersey: Pearson, 2010.
- [13] Sadiku, C. K., Fundamentals of Electric Circuits. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2017.

- [14] Sul, S. K., Control of Electric Machine Drive Systems. IEEE Press/Wiley, 2011.
- [15] Tang, Z., Yang, Y., Blaabjerg, F., Power Electronics: The Enabling Technology for Renewable Energy Integration. *Journal of Power and Energy Systems*, 8 (1), pp. 39-52, 2022.
- [16] Vignati, M., Debattisti, N., Bacci, M. L., Tarsitano, D., A Software-in-the-Loop Simulation of Vehicle Control Unit Algorithms for a Driverless Railway Vehicle. *Applied Sciences*, 11 (15), 2021.
- [17] Zamiri, E., Sanchez, A., Martínez-García, M. S., Castro, A., Analysis of the Aliasing Effect Caused in Hardware-in-the-Loop When Reading PWM Inputs of Power Converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 2017.