



20 años
Hechos por Colombia

***Propuesta de uso del control formador
de red (Grid Forming - GFM) para
recursos basados en inversores con
énfasis en Sistemas de
Almacenamiento de Energía con
Baterías - SAEB***

8 de abril de 2026

Contenido

- Introducción
- ¿Qué es Grid-Forming (GFM)?
- Requisitos generales
- Bancos de prueba



20 años
Hechos por Colombia



01 | Introducción

xm | 20 años
Hechos por Colombia

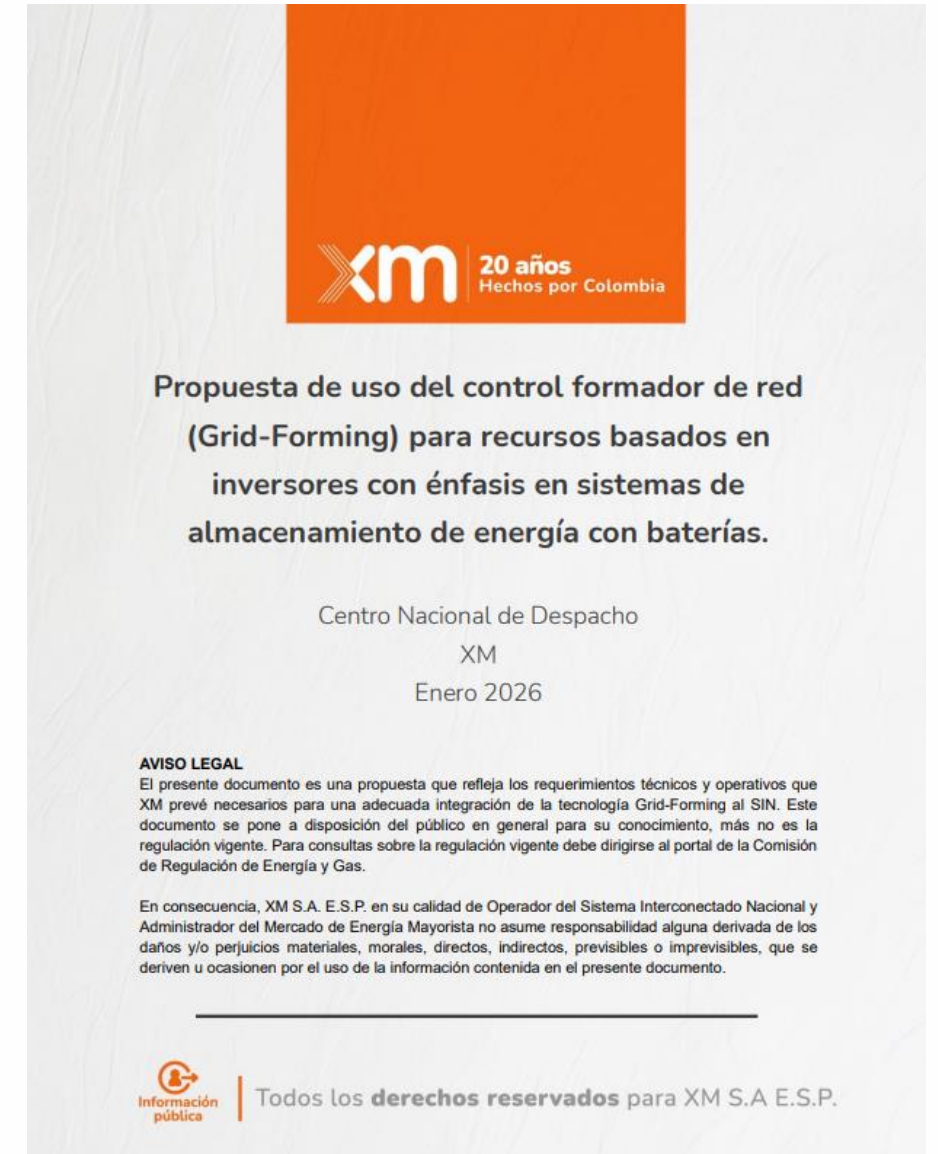
Alcance de la propuesta

El documento es

Una **propuesta** que plantea los requerimientos técnicos esperados para una adecuada integración de la tecnología Grid-Forming en sistemas de almacenamiento (SAEB), basada en el estado actual de la tecnología, las mejores prácticas internacionales y los requerimientos del SIN.

El documento:

- No es la **regulación vigente o aplicable**.
- No es una **norma técnica** definitiva frente al desempeño de la tecnología GridForming.
- No aborda aspectos asociados a la **remuneración** ni integración a nivel de mercado.
- No involucra plantas de generación **solares o eólicas**.



Entidades que comentaron el documento propuesto



60
Comentarios recibidos

Principales ejes de los comentarios recibidos

Volumen de las pruebas y lugar donde se verifican los requisitos	Medición de tiempos de respuesta y establecimiento	Capacidad de sobrecorriente	Reserva necesaria para el servicio de inercia sintética
--	--	-----------------------------	---

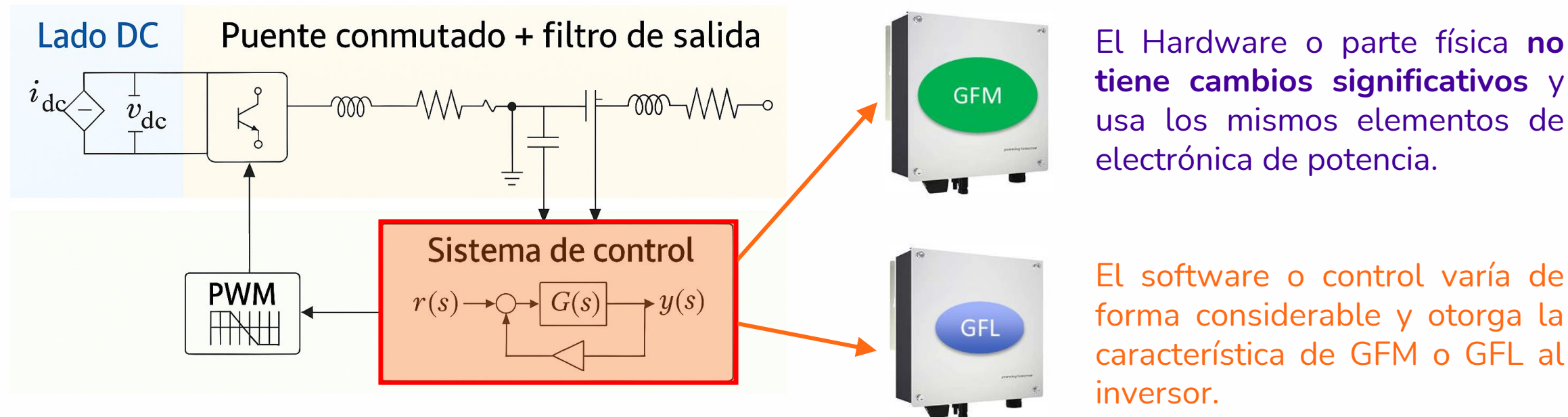
Tener en cuenta:

- La tecnología **GFM no cuenta con un estándar** completamente definido sobre el desempeño e integración a gran escala en los sistemas de potencia.
- La propuesta de XM abarca aspectos asociados a la **respuesta esperada** de la tecnología y las capacidades de soporte **requeridas para Colombia**
- El cumplimiento de los bancos de pruebas y demás requisitos propuestos, **no garantiza la operación estable de estos dispositivos**. Verificaciones adicionales a nivel sistémico pueden ser requeridas durante el proceso de conexión.
- La experiencia mundial en la integración de este tipo de dispositivos sigue aumentando, por lo que **se esperan actualizaciones frecuentes del documento**, así como la posibilidad de criterios más exigentes para condiciones particulares del sistema.

02 | ¿Que es Grid-Forming (GFM)?

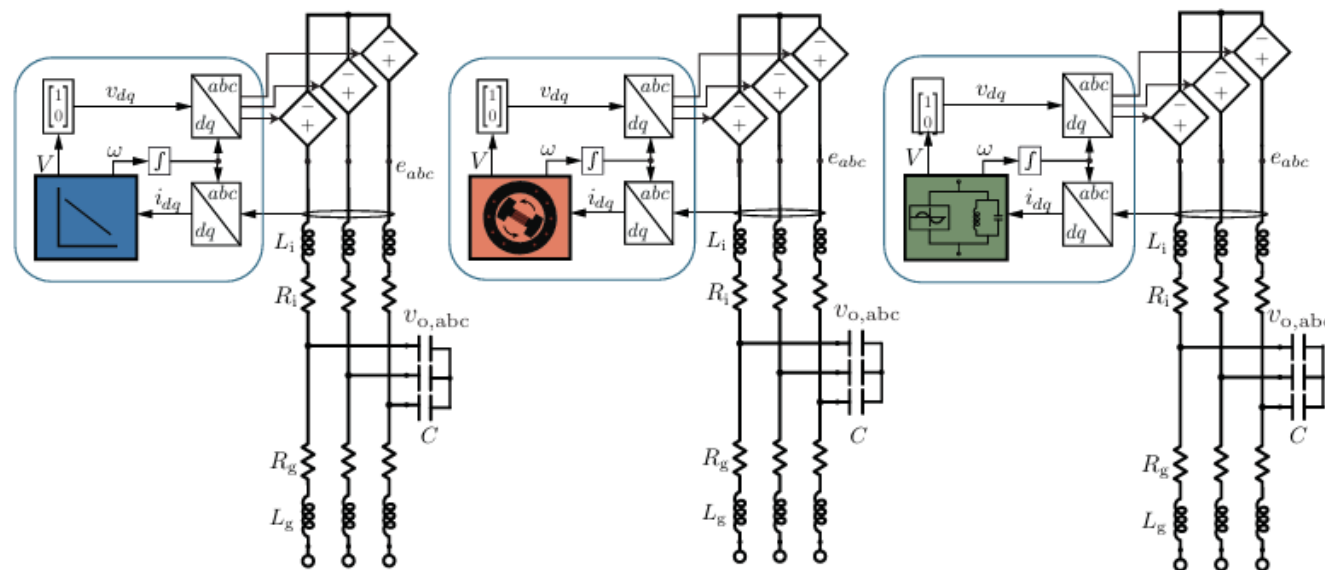
¿Qué es Grid-Forming (GFM)?

Es el diseño del control para un inversor, que **permite actuar como una fuente de tensión** detrás de una **impedancia** (genera y mantiene tensión y frecuencia constantes sin depender de otros recursos). Pueden **auto-sincronizarse con la red**, e **inyectar rápidamente** componentes de corriente, soportar perturbaciones en tensión sin desconectarse, operar en **redes muy débiles** (SCR bajo), **energizar una red** y **emular la inercia y corriente de cortocircuito** que tendría una máquina síncrona.



No hay estándar para la definición de los lazos de control del GFM, solo se conoce un comportamiento esperado como fuente de tensión y que debe cumplir los requisitos de conexión que disponga el operador de red respectivo.

¿Cómo se implementa un control GFM?



$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 - m_p(P - P^*) \\ V^* &= V_0 - n_q(Q - Q^*) \end{aligned}$$

Control Droop

Intenta replicar la relación de variables P-f y Q-V a la salida de la generación síncrona.

$$\begin{aligned} M\dot{\omega} &= \omega_0 - \omega + D(\omega_0 - \omega) - m_p(P - P^*) \\ V^* &= V_0 - n_q(Q - Q^*), \end{aligned}$$

Control VSM

Incluye efectos de amortiguamiento e inercia para asemejarse más al comportamiento de una máquina síncrona.

$$\begin{aligned} \dot{V}^* &= \mu V^* (V_0^2 - (V^*)^2) - \frac{2\eta}{3V^*} (Q - Q^*) \\ \dot{\theta} = \omega &= \omega_0 - \frac{2\eta}{3(V^*)^2} (P - P^*), \end{aligned}$$

Control dVOC

Trata de imitar el comportamiento dinámico de osciladores que se auto-sincronizan, como el oscilador de banda muerta y el oscilador de VanDer Pol.

- Se debe generar una referencia propia de tensión y frecuencia.
- De manera general, existen 3 estrategias básicas de control primario: Droop, Virtual Synchronous Machine – VSM, dispatchable Virtual Oscillator Control – dVOC.
- Además, se agregan lazos de repuesta primaria, soporte en tensión, limitación de corriente, entre otros.

Grid Forming vs Grid Following

GFM provee respuesta inercial y virtualmente instantánea.



El GFM puede operar con valores adecuados en tensión y frecuencia ante casos con muy baja fortaleza de red e incluso casos aislados.

Los GFM no requieren de otros GFM o recursos síncronos en el sistema (siempre que se tenga energía almacenada).

GFM presenta ventajas frente a los GFL en operación estable en redes débiles, soporte rápido, pérdida de la última máquina síncrona y capacidad de arranque autónomo



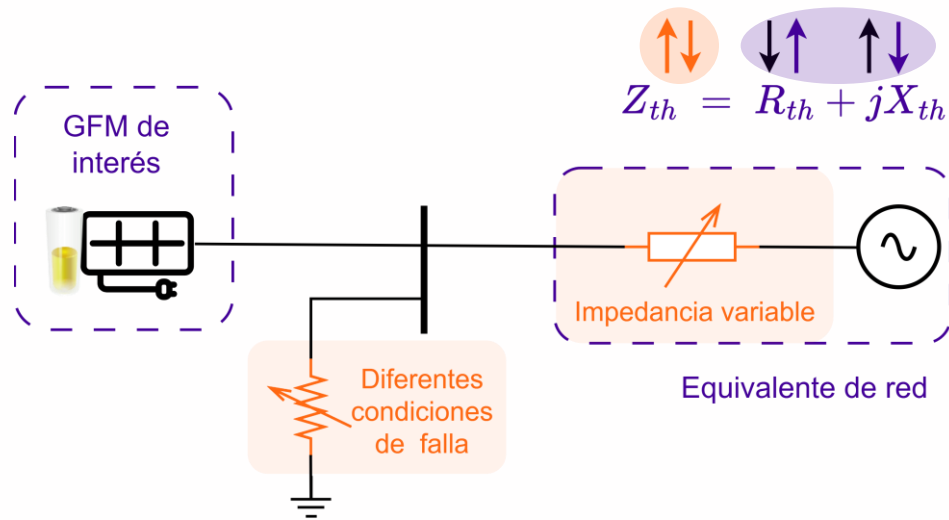
03

Requisitos Generales



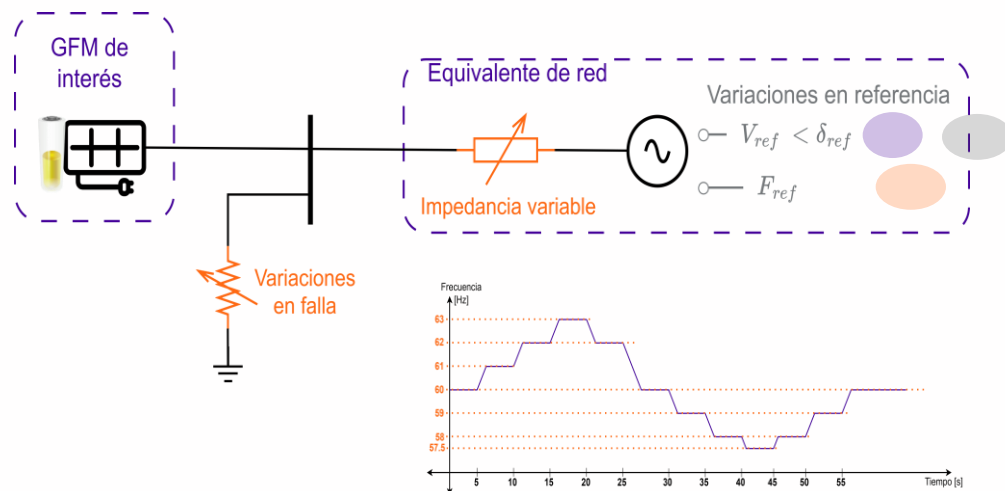
20 años
Hechos por Colombia

Propuesta de Requisitos



Debe operar de forma estable para SCR entre 1.2 y 20

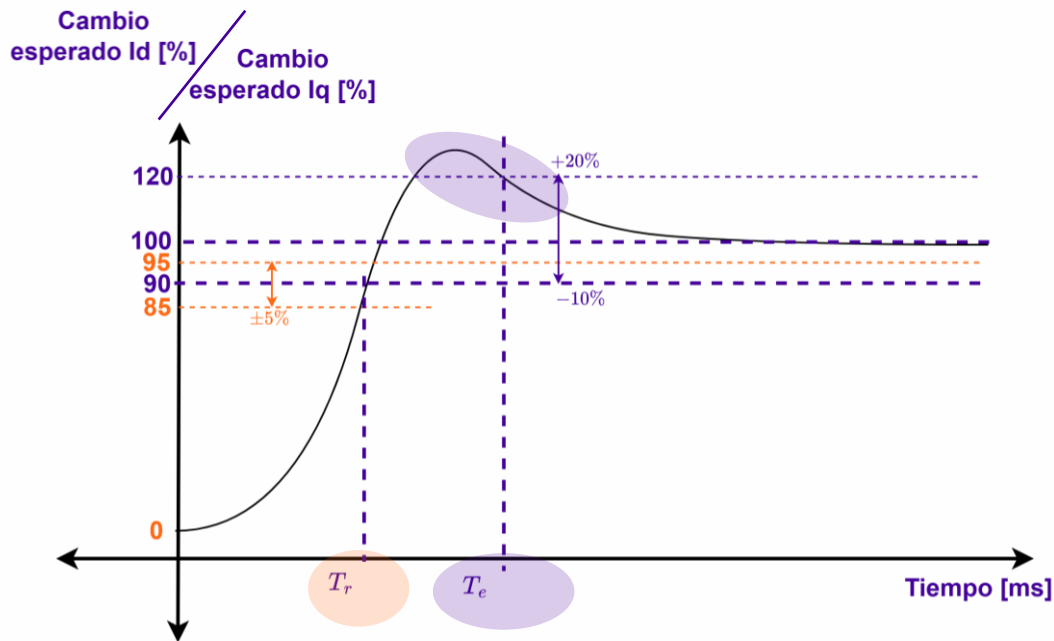
Debe operar de forma estable para X/R entre 30 y 2.4



Cambios en la red no deben causar inestabilidad en el GFM:

- Operar de forma estable para frecuencias entre 57.5 y 63 Hz y ROCOF de hasta 5 Hz/s.
- Deber soportar cambios de ángulo de hasta 60°
- Debe soportar desviaciones en el voltaje y operar de forma estable dentro de las curvas de FRT.

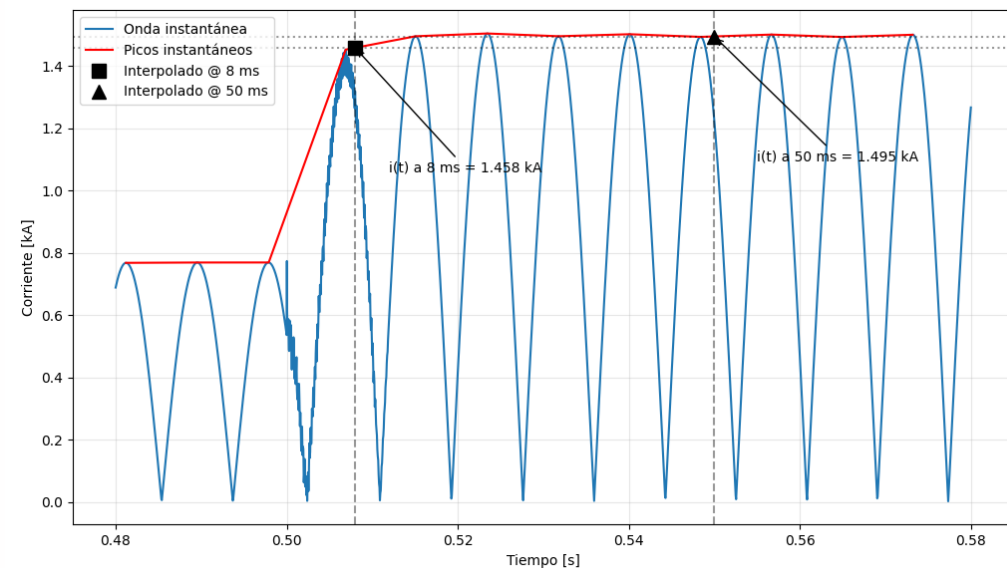
Propuesta de Requisitos



- T_r : El cambio esperado en las componentes instantáneas de la corriente, debe ejecutarse al 90 % en menos de 8 ms. Si se consideran componentes RMS, debe ser de 25 ms.
- T_e : El valor esperado debe alcanzarse en menos de 50 ms (tiempo de establecimiento) y debe ser amortiguado. Si se consideran valores RMS, debe ser 67 ms.

La medida en valores instantáneos considera el **valor pico de la señal de interés**, obteniendo una envolvente que se interpola para identificar el valor alcanzado en 8 ms y en 50 ms. Ejemplo:

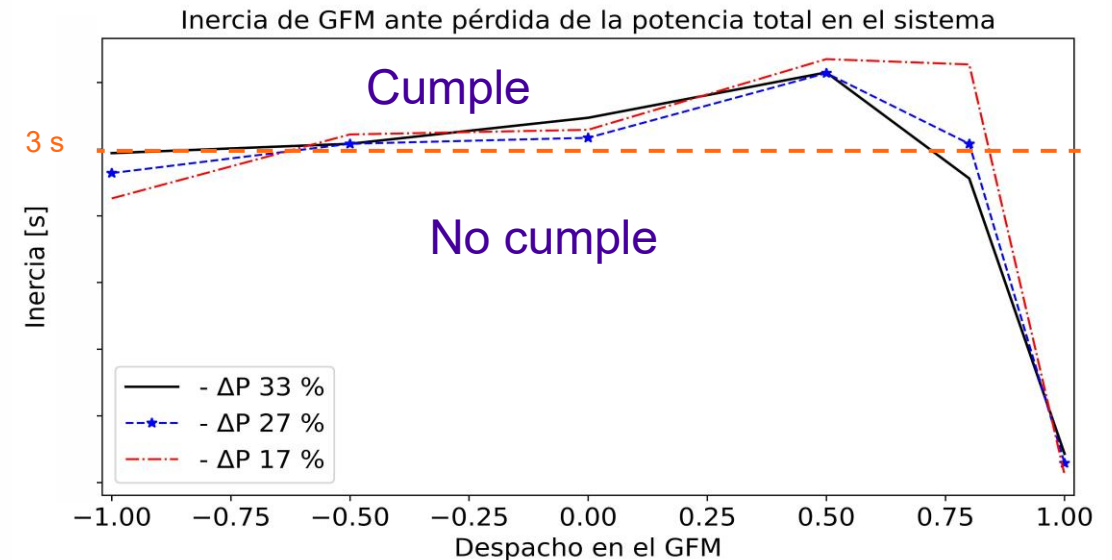
- Corriente previo a la falla = 0.768 kA
- Delta de corriente esperado = 0.768 kA
- Corriente a los 8 ms = 1.458 kA vs 1.459 kA esperados (90 % del delta de cambio esperado).
- Corriente a los 50 ms = 1.495 kA vs 1.536 kA esperados



Propuesta de Requisitos

Eventos en frecuencia

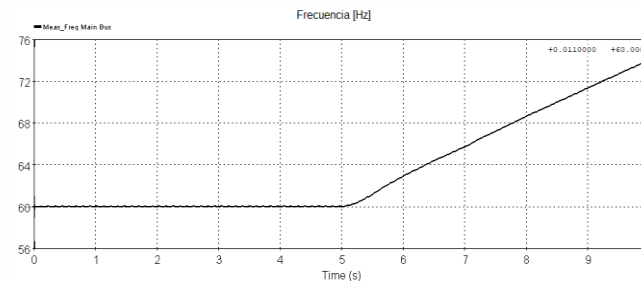
- Ante una perturbación en **frecuencia**, el cambio en la componente de corriente **activa** debe concordar con los requisitos de tiempo de respuesta y establecimiento.
- La componente activa respalda aspectos **de inercia (3 s)**, soporte de frecuencia, RoCoF y saltos de ángulo.
- La inercia de al menos 3 s debe ser garantizada para estados de carga y descarga a la capacidad nominal del equipo.



El cumplimiento se evalúa para desbalances (ΔP) que exijan el aporte total de la inercia mínima requerida.

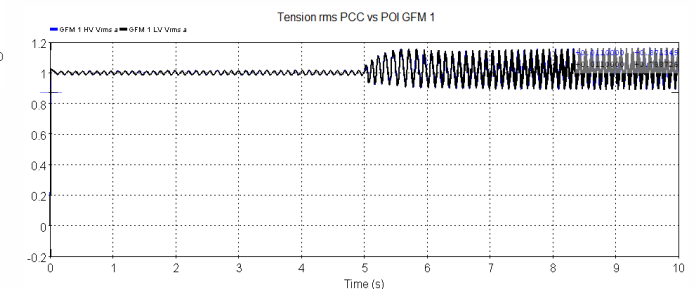
Amortiguamiento de oscilaciones

- No se deben generar ni amplificar oscilaciones.
- Debe **amortiguar oscilaciones** en rangos subsíncronos y super-síncronos. El amortiguamiento (*damping*) debe ser por lo menos 10 %.



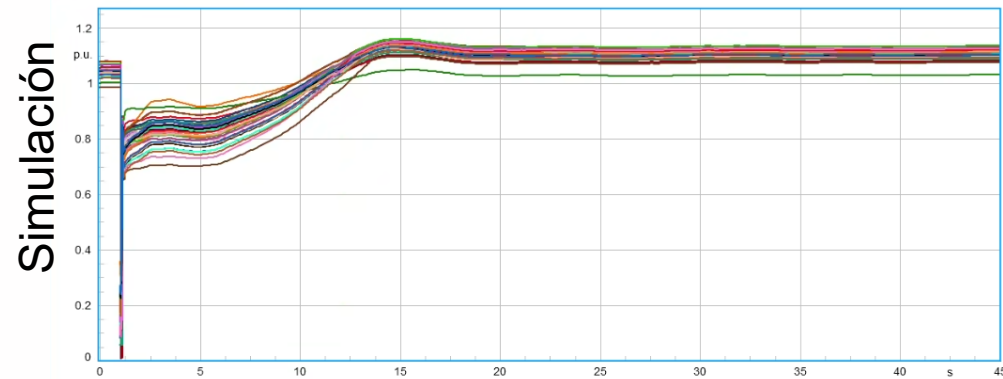
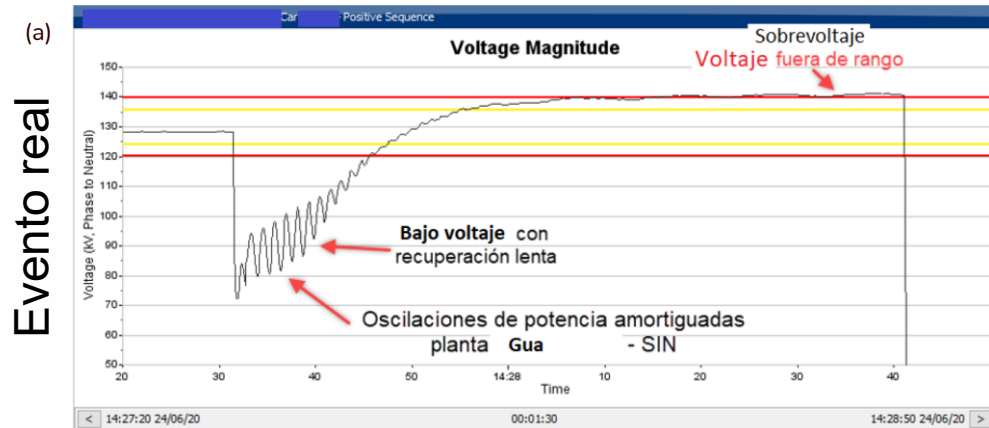
Oscilación en tensión

Perturbación en frecuencia



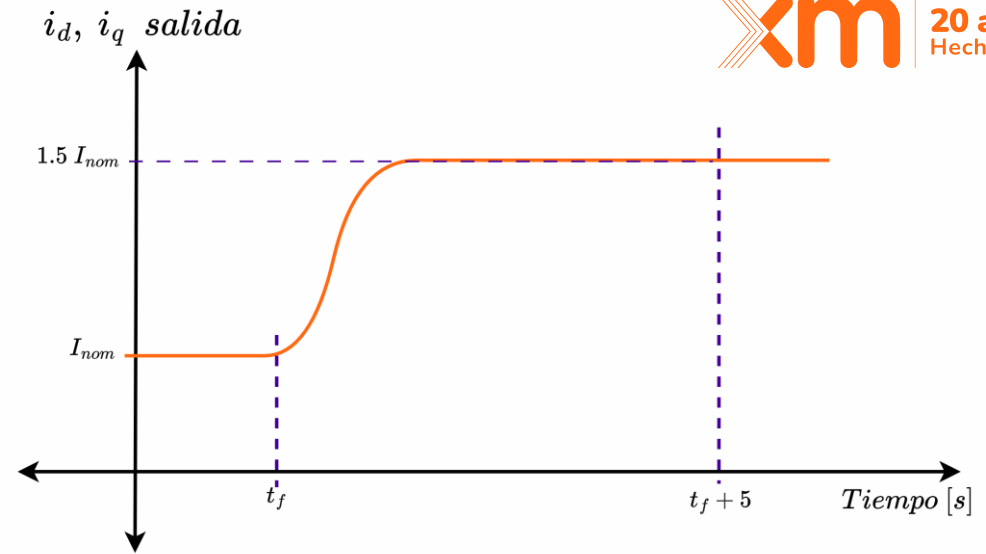
Propuesta de Requisitos

FIDVR – Fault Induced Delayed Voltage Recovery

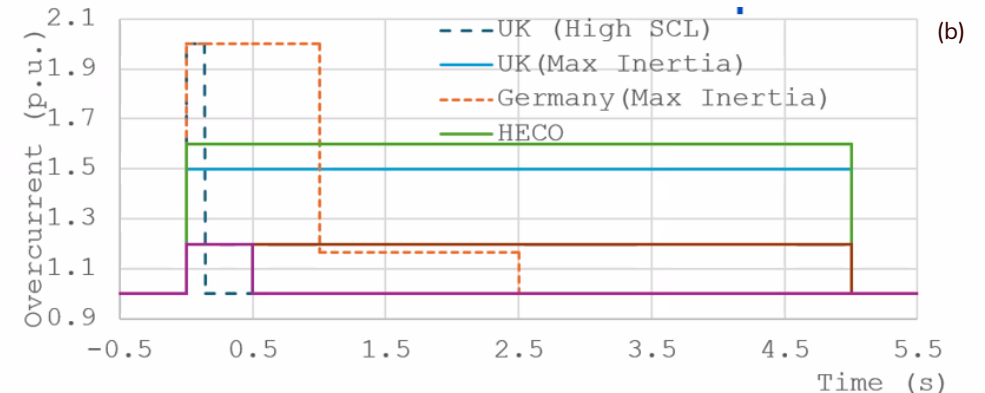


Las dinámicas del sistema Colombiano implican el requerimiento de **capacidades ampliadas de soporte en tensión** y aporte de **corriente reactiva**.

(a) Evento registrado en el año 2020.

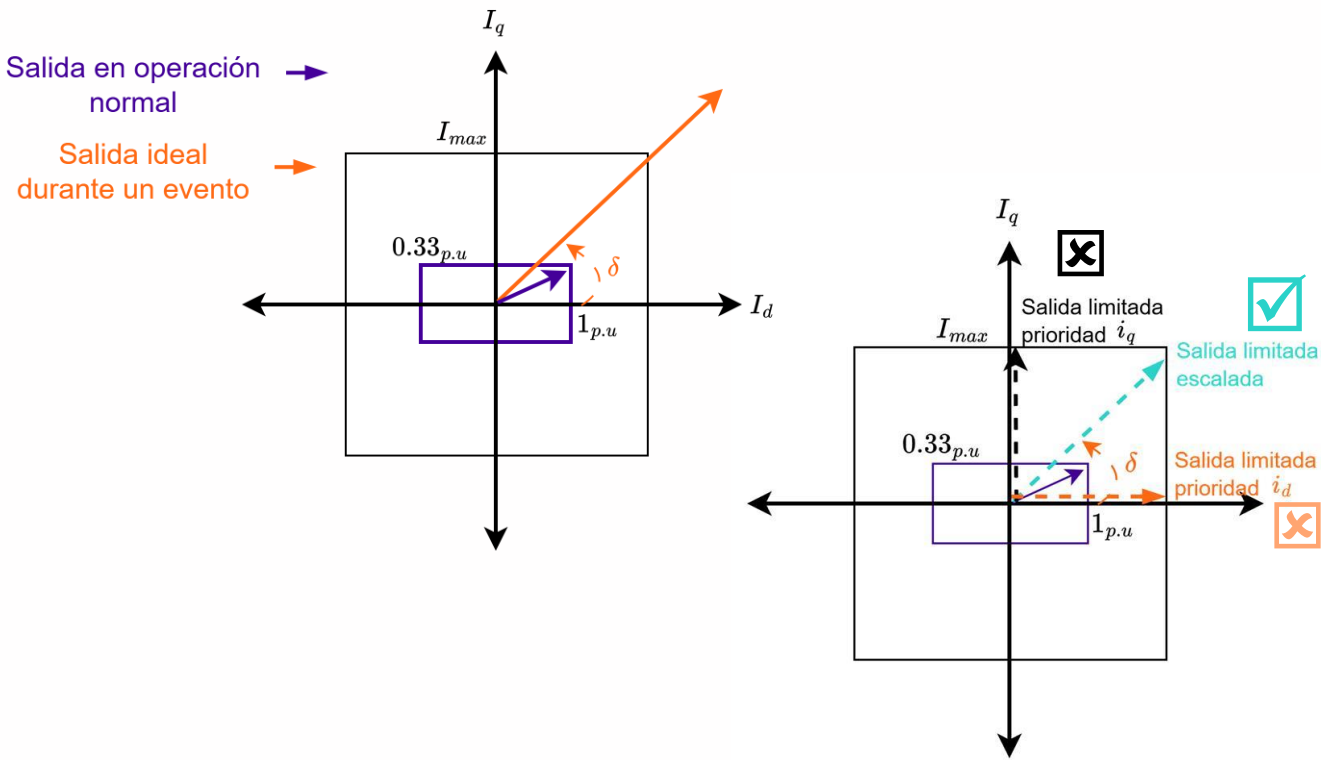


Las componentes de corriente que aportará el GFM deben alcanzar **mínimo 1.5 p.u** y durante **5 s o más de forma continua**, y sin empeorar o causar efectos adversos en el sistema. **Valores superiores podrían requerirse en casos particulares** y deben ser considerados en las especificaciones del equipo.



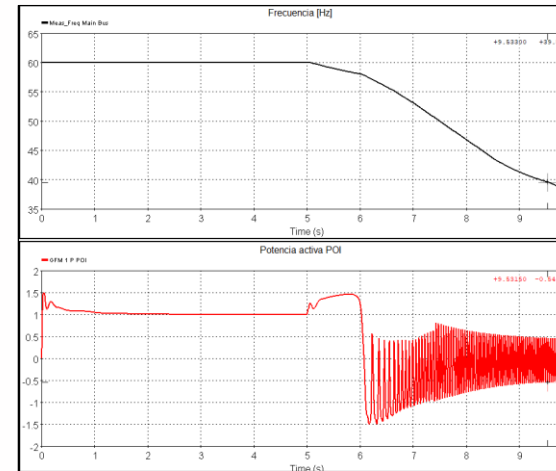
(b) Fluence Energy LLC, "GFM Experiences", DOE i2X FIRST Grid-Forming Workshop, 16 de marzo de 2026.

Propuesta de Requisitos



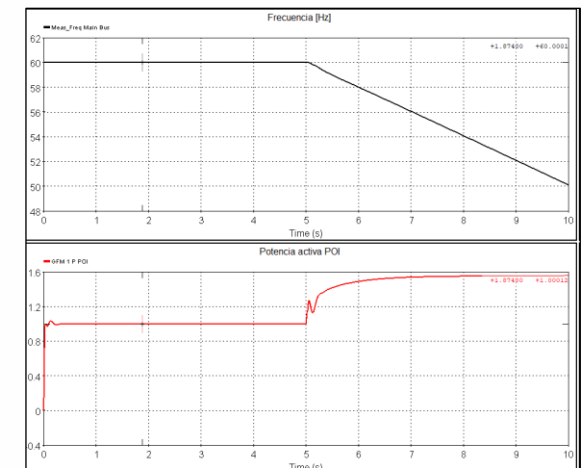
El soporte ante contingencia no debe priorizar la inyección de componente activa o reactiva, se tiene que aplicar una técnica de limitación por escalamiento en magnitud y sin afectar el ángulo.

El GFM debe ser estable cuando se alcanza el estado de saturación de corriente (límite de corriente), este comportamiento debe verificarse y reportarse.

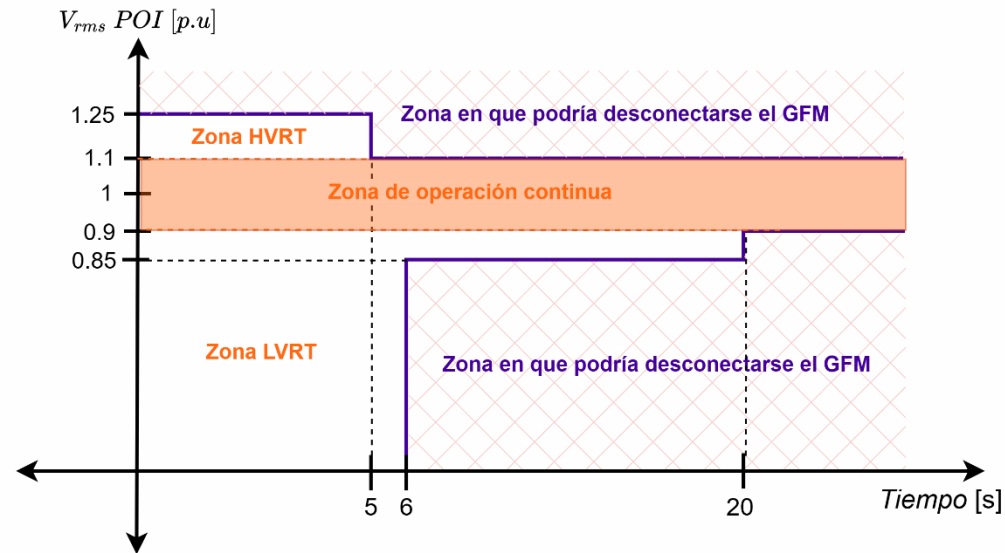


GFM inestable en punto de saturación

GFM estable →



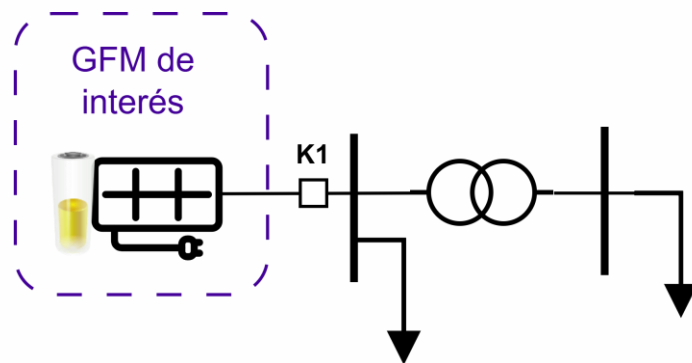
Propuesta de Requisitos



Voltaje en el POI	Tiempo mínimo [ms]	Observaciones
$1.7 < V \leq 1.8$	0.2	TOVRT: Tensión instantánea a la frecuencia fundamental, tiempo acumulado sobre una ventana de 1 minuto, de acuerdo con lo establecido en la norma IEEE 2800 de 2022.
$V > 1.6$	1	
$V > 1.4$	3	
$V > 1.25$	15	

El GFM debe permanecer conectado a la red durante contingencias de acuerdo con límites que se definen en:

- Curva HVRT y LVRT.
- Límites TOVRT.
- Frecuencia fuera del rango 57.5 - 63 Hz.



Arranque Autónomo: Los GFM pueden operar en isla siempre que las cargas a suplir se puedan alimentar con la energía almacenada. Esta capacidad permite contribuir a energizar de manera secuencial aquellos sistemas que se han apagado en su totalidad.

Propuesta de Requisitos

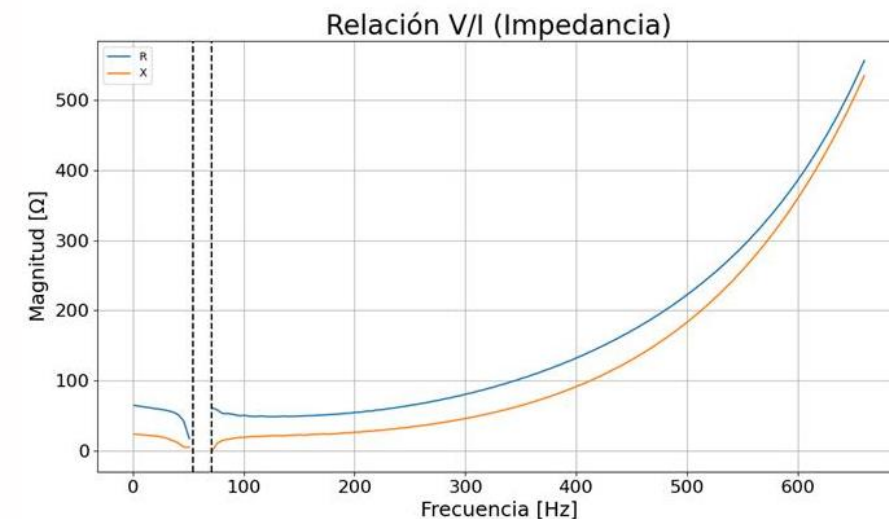
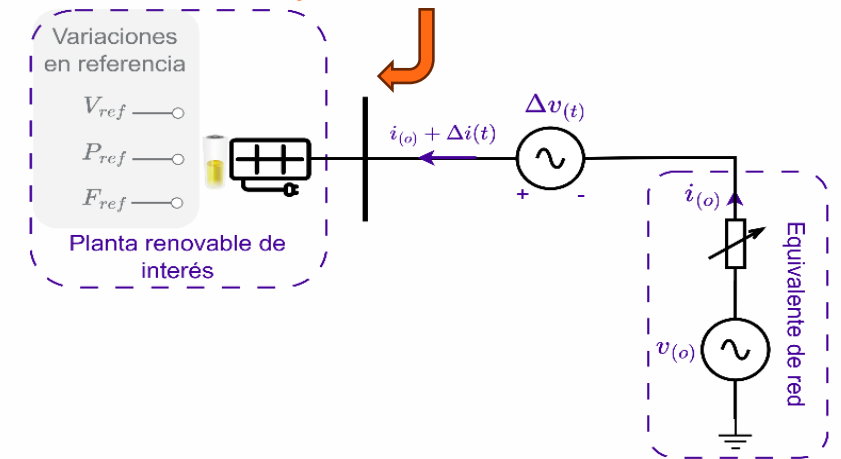
Respuesta en barrido V/I: Impedancia

- Los GFM deben tener una **resistencia e inductancia positiva** para el rango de frecuencias de interés (Pasividad)
- La impedancia debe ser como mínimo de 0.83 p.u.
- El rango de frecuencia de interés es $f_1 \pm 40 \text{ Hz}$, exceptuando $f_1 \pm 4 \text{ Hz}$. ($f_1 = 60 \text{ Hz}$).

Respuesta en barrido Q/V y barrido P/ θ

- La magnitud Q/V y P/ θ en el rango $f_1 - 40 \text{ Hz}$, exceptuando $f_1 - 4 \text{ Hz}$, debe ser horizontal y uniforme, cercana a una constante. Interacciones y resonancias serán desviaciones de este comportamiento.
- El ángulo debe ser ± 180 grados entre $f_1 - 40 \text{ Hz}$, exceptuando $f_1 - 4 \text{ Hz}$.
- La magnitud Q/V y P/ θ en el rango $f_1 + 40 \text{ Hz}$, exceptuando $f_1 + 4 \text{ Hz}$, debe tener una pendiente negativa. Interacciones y resonancias serán desviaciones de este comportamiento.

Impedancia del GFM vista desde el punto de conexión.





04 Bancos de Pruebas



20 años
Hechos por Colombia

Banco de pruebas preliminar

Los bancos de prueba ponen al límite las capacidades de los inversores, consideran escenarios de operación severos, validan si el inversor opera adecuadamente e identifican anomalías en la operación del inversor, sea por su control, parametrización o interacción entre equipos.

Banco de Pruebas preliminar para validar la respuesta de recursos integrados por inversor GFL/GFM

1. Perder recurso síncrono al descargar BESS	11. Conexión de carga desbalanceada sin recurso síncrono
2. Perder recurso síncrono al cargar BESS	12. Cambios en la magnitud de tensión
3. Perder recurso síncrono al cargar BESS y un GFM adicional despachado al 100 %	13. FRT
4. Perder recurso síncrono en balance de carga – GFM	14. FRT sin recurso síncrono
5. Cambios en frecuencia (RoCoF)	15. Arranque en negro
6. Perturbación ante diferente SCR	16. Impedancia de la planta ante diferentes frecuencias – V/I, Q/V P/delta
7. Cambio en la relación X/R	17. Evaluación de amortiguamiento
8. Cambios en el ángulo de la tensión	18. Cuantificación de la inercia sintética
9. Conectar carga con recurso síncrono	19. Casos críticos en modo on-grid
10. Conectar carga sin recurso síncrono	20. Variar R falla, verificar umbrales de desconexión

Escenarios de prueba se reducen en:
Despacho: -1 p.u, 0 p.u y 1 p.u
SCR: 1.2 y 20
XR: 2.4, 9 y 30

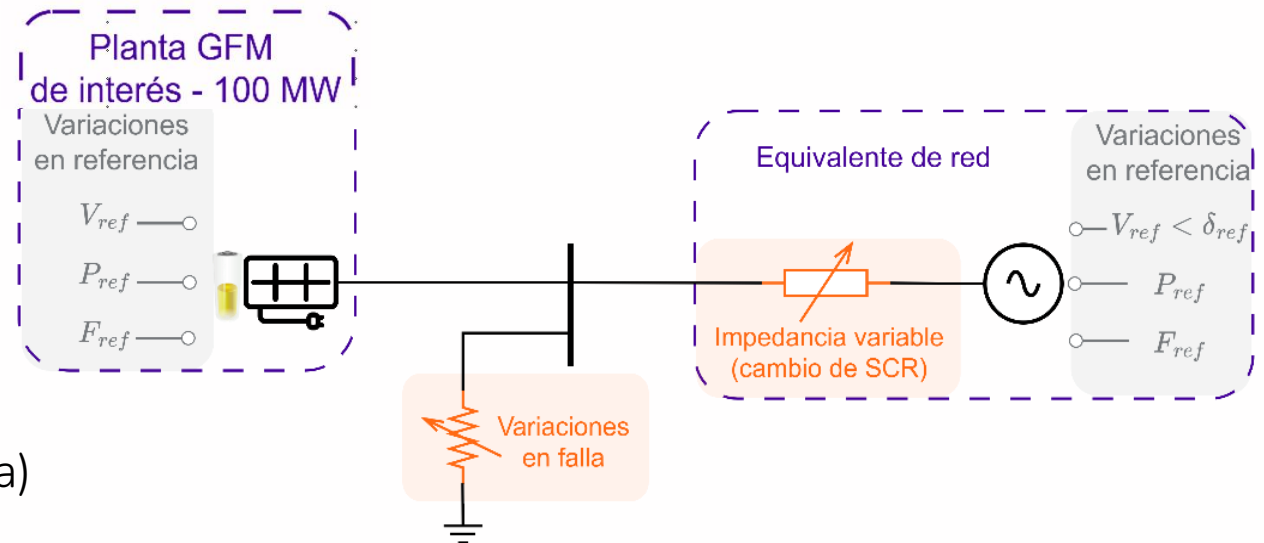
+8 pruebas de inicialización y operación en estado estable del modelo

Banco de pruebas GFM

Pruebas de funcionalidad y parametrización del modelo

Pruebas generales en un IBR.

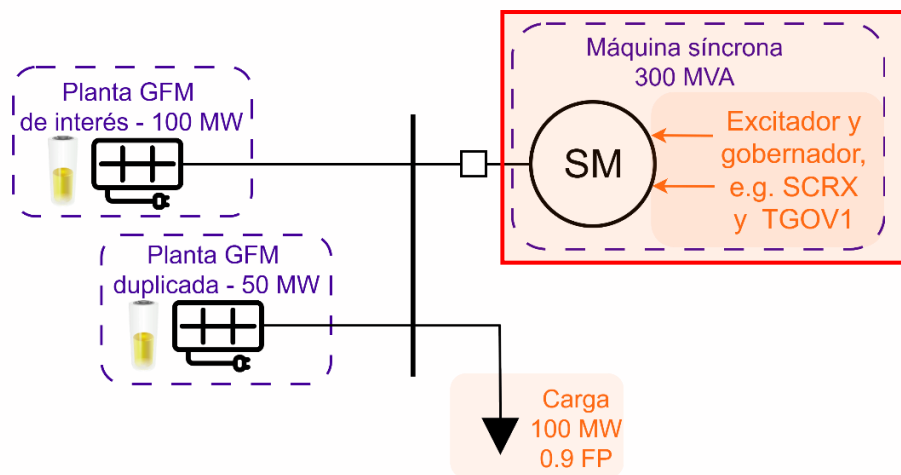
1. **Verificar** la inicialización del modelo
2. **Recepción** de referencias
3. **Soporte** y banda muerta en frecuencia
4. **Tiempos** de respuesta y establecimiento
5. **Soporte** y banda muerta en tensión
6. **Curva** de carga - capacidad PQ
7. **Rampas** de entrada (carga) y salida (descarga)
8. **Tolerancia** ante huecos sucesivos de tensión



Busca identificar si tanto el modelo como sus parámetros ajustados son consistentes con los resultados, sin indicios de errores significativos en estado estable.

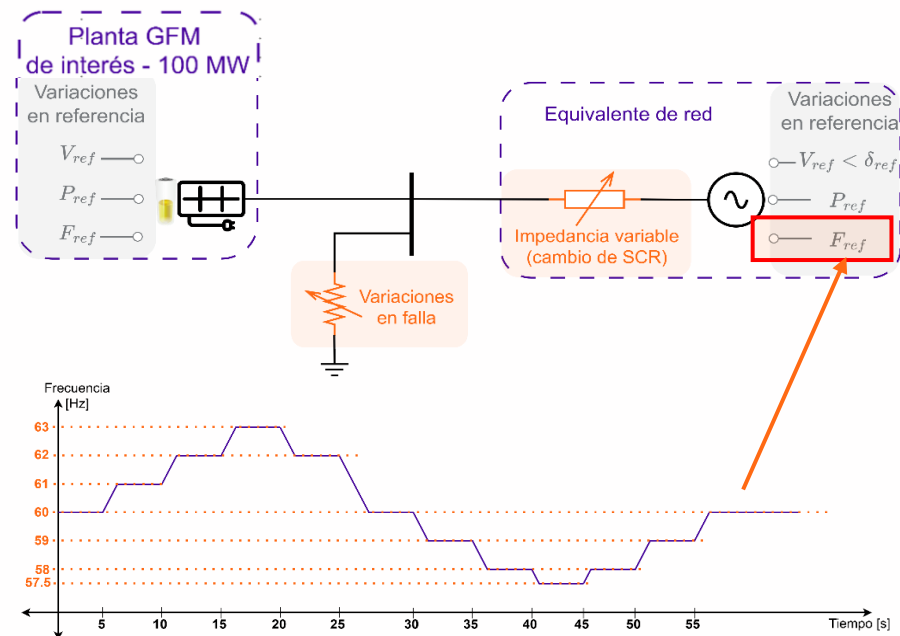
Banco de pruebas GFM

Pruebas 1-4: Pérdida de recurso síncrono



- Verifica que el GFM puede controlar la tensión y frecuencia ante la ausencia de máquinas síncronas.
- Se evalúa la condición de carga (4.4.1), descarga (4.4.2), un GFM al límite (4.4.3) y balance entre GFM y la carga (4.4.4).

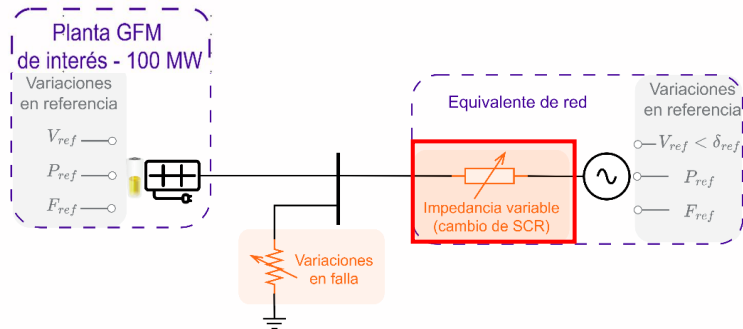
Prueba 5: Rampas en frecuencia (RoCoF) (4.4.5)



- Se verifica el soporte a la frecuencia considerando variación en despacho, SCR y tasa de cambio de la frecuencia.
- Se verifica que el GFM pueda operar sin inconvenientes en el rango de frecuencia de 57.5 a 63 Hz.

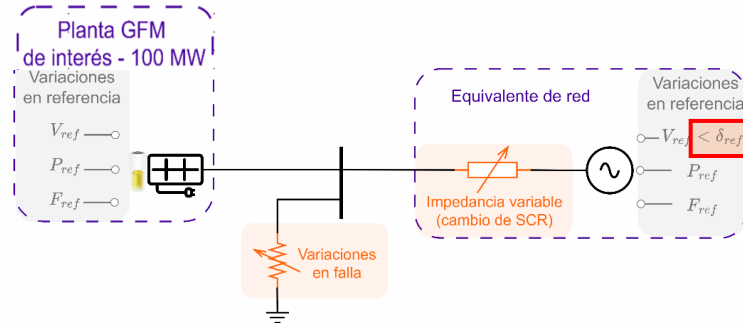
Banco de pruebas GFM

Prueba 6-7: Cambios decrecientes en SCR y X/R con falla



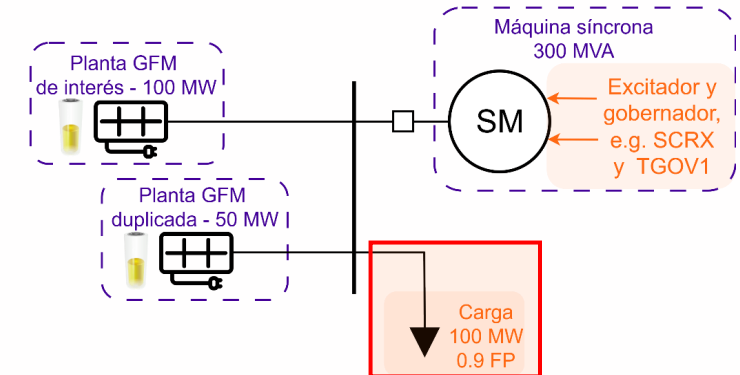
- Verifica el soporte del GFM ante fallas y ante diferentes condiciones del punto de conexión.
- La prueba 6 modifica la fortaleza de red o SCR (4.4.6) y la prueba 7 modifica la relación X/R (4.4.7).
- Luego de cada modificación, se efectúa una falla y se evalúa el comportamiento del GFM.

Prueba 8: Respuesta ante cambios en ángulo (4.4.8)



- Se verifica la capacidad del GFM para soportar cambios de ángulo en la tensión, debiendo responder rápidamente en su componente activa.
- Se verifica la respuesta considerando variación en despacho y SCR.

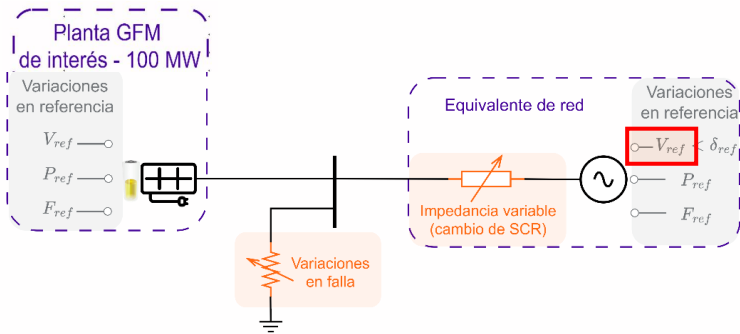
Prueba 9-11: Conexión de cargas



- Verifica el comportamiento del GFM ante cambios de carga y su interacción con máquinas síncronas.
- La prueba 9 no desconecta el recurso síncrono (4.4.9), la prueba 10 desconecta el recurso síncrono (4.4.10) y la prueba 11 considera carga desbalanceada desconectando el recurso síncrono (4.4.11).

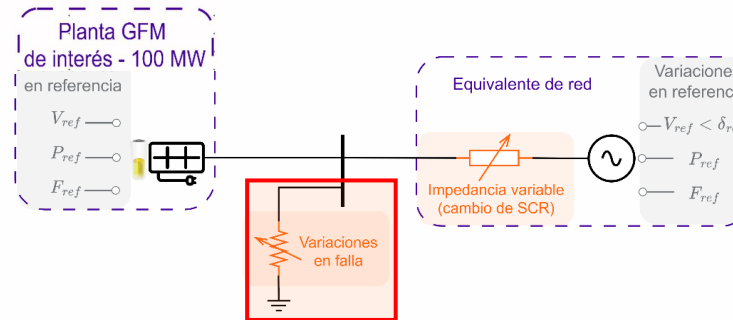
Banco de pruebas GFM

Prueba 12: Cambios en la magnitud de tensión (4.4.12)



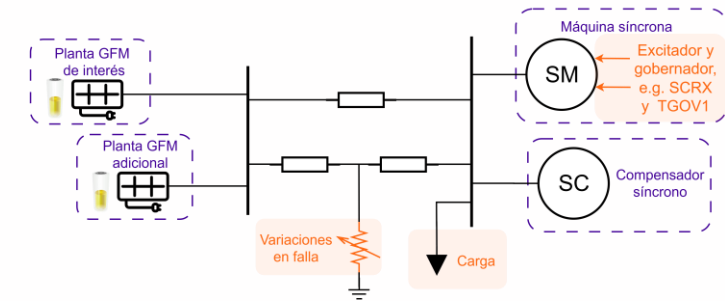
- Verifica la capacidad del GFM para brindar soporte de tensión ante diferentes condiciones en la fortaleza de red, inyectando o absorbiendo potencia reactiva rápidamente.
- Se verifica sobre tensión y baja tensión.

Prueba 13: Característica Fault Ride Through – FRT (4.4.13)



- Verifica la capacidad del GFM para tolerar diferentes condiciones de falla, brindando soporte durante el evento y operando adecuadamente luego del despeje de la falla.
- Se verifican fallas de distinta duración, bajo diferentes condiciones de despacho.

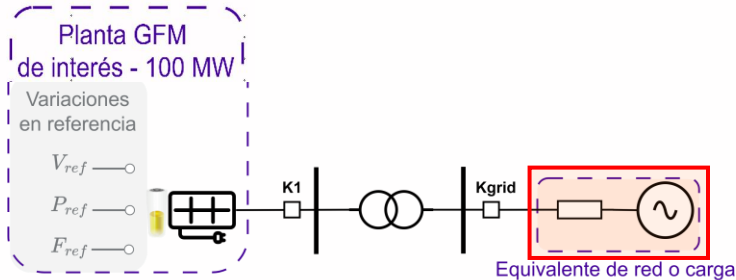
Prueba 14: Característica Fault Ride Through – FRT (4.4.14)



- Verifica la capacidad del GFM para tolerar y dar soporte a la red ante distintas condiciones de falla, así como las interacciones con diferentes elementos.
- Se verifican diferentes fallas luego de desconectar los elementos síncronos.

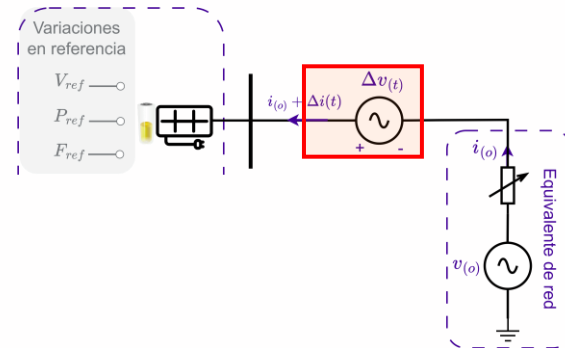
Banco de pruebas GFM

Prueba 15: Arranque en negro - Blackstart (4.4.15)



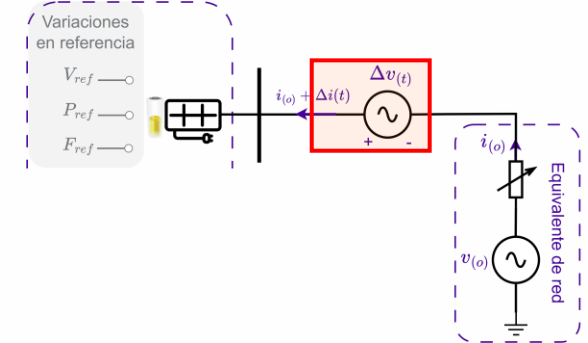
- Verifica si el GFM puede mantener tensión y frecuencia mientras supe corrientes de energización del transformador y conexión de cargas.
- Es una prueba indicativa, pues los procesos Blackstart son secuenciales e involucran esquemas de reinicio definidos.

Prueba 16: Barridos en frecuencia (4.4.16)



- Verifica resonancias red-inversor ante diferentes condiciones de red, despacho y frecuencias.
- Se analizan posibles interacciones entre 1 Hz y 660 Hz.
- Relaciones: $\frac{V(f)}{I(f)}, \frac{Q(f)}{V(f)}, \frac{P(f)}{\theta(f)}$
- Perturbaciones: $|\Delta v_{(f)}|, < \Delta v_{(f)}$

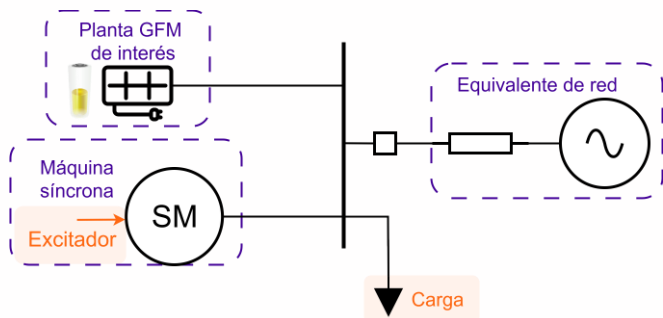
Prueba 17: Evaluación de amortiguamiento ante oscilaciones (4.4.17)



- Verifica la capacidad del GFM para amortiguar oscilaciones ante diferentes condiciones en el sistema de potencia y ante diferentes despachos.
- El GFM debe contar con amortiguamiento positivo para el rango de frecuencia entre 1 Hz y 660 Hz.

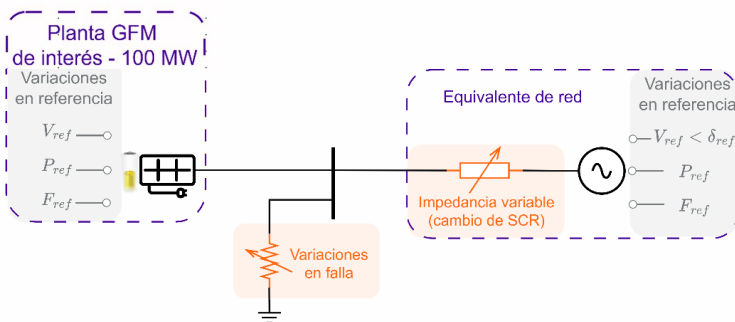
Banco de pruebas GFM

Prueba 18: Cuantificación de inercia sintética (4.4.18)



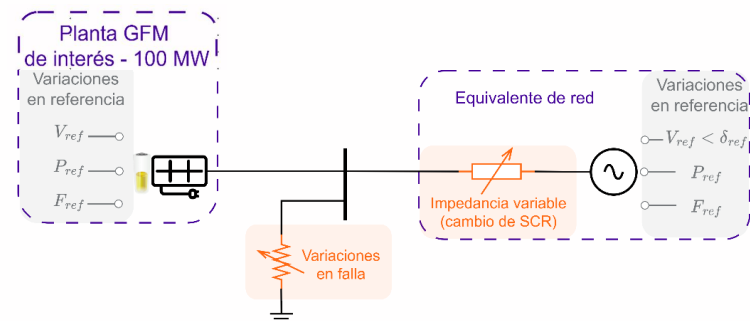
- Verifica la inercia efectiva del GFM, aislando la respuesta inercial de cualquier otro lazo de control que pueda dar soporte a la frecuencia.
- Se consideran diferentes condiciones de red y despacho.

Prueba 19: Casos críticos de operación (4.4.19)



- Se verifica la capacidad del GFM para operar adecuadamente ante las condiciones más desafiantes en la red.
- Permite identificar límites de operación y soporte del GFM, bajo diferentes condiciones de red, despacho del GFM y de eventos.

Prueba 20: Verificación de umbrales de desconexión y resistencia de falla (4.4.20)



- Verifica el cumplimiento de umbrales de desconexión LVRT, LFRT, HVRT, HFRT y la soportabilidad durante falla ante diferentes resistencias de falla.

¿Qué sigue?

- XM publicará el **Viernes 17 de Abril de 2026** una **nueva versión del documento y el análisis de los inquietudes al mismo**, para consulta y referencia del público en general.
- XM **continuará realizando monitoreo de la tecnología**, con el fin de generar actualizaciones según corresponda.



20 años
Hechos por Colombia

