X CONGRESO INTERNACIONAL | SISTEMAS BESS Y MINIGRANJAS SOLARES

10 ANIVERSARIO ExpoSolar® Colombia 2026
Energía renovable, futuro imparable

BESS hacia la próxima frontera: Tecnología Grid-Forming en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)

SUNGROW
Clean power for all

28 Octubre

11:00 a. m.

Juan Esteban Garavito

Application Engineer ESS · Sungrow

Auditorio Corferias



Hacemos parte de econexia ECOSISTEMA DIGITAL DE CONEXIONES & NEGOCIOS operado por corferias

Organiza: Centro de Ciencia y Sensibilización Ambiental | corferias Generadores de Oportunidades y Progreso | Empresa B Certificada

Seis preguntas para llevar grid-forming de la física al proyecto



01

¿Por qué ahora?

Más inversores, menos inercia y nodos débiles en el SIN



02

¿Cómo se sostiene la red?

Balance, inercia, frecuencia y fortaleza de red



03

¿Qué es grid-forming?

Fuente de tensión, respuesta, red débil y límites



04

¿Qué exige Colombia?

CREG 101 113, verificación de XM, dónde y cuándo



05

¿Qué habilita y qué exige?

Black start, microrredes, corriente y decisiones de ingeniería

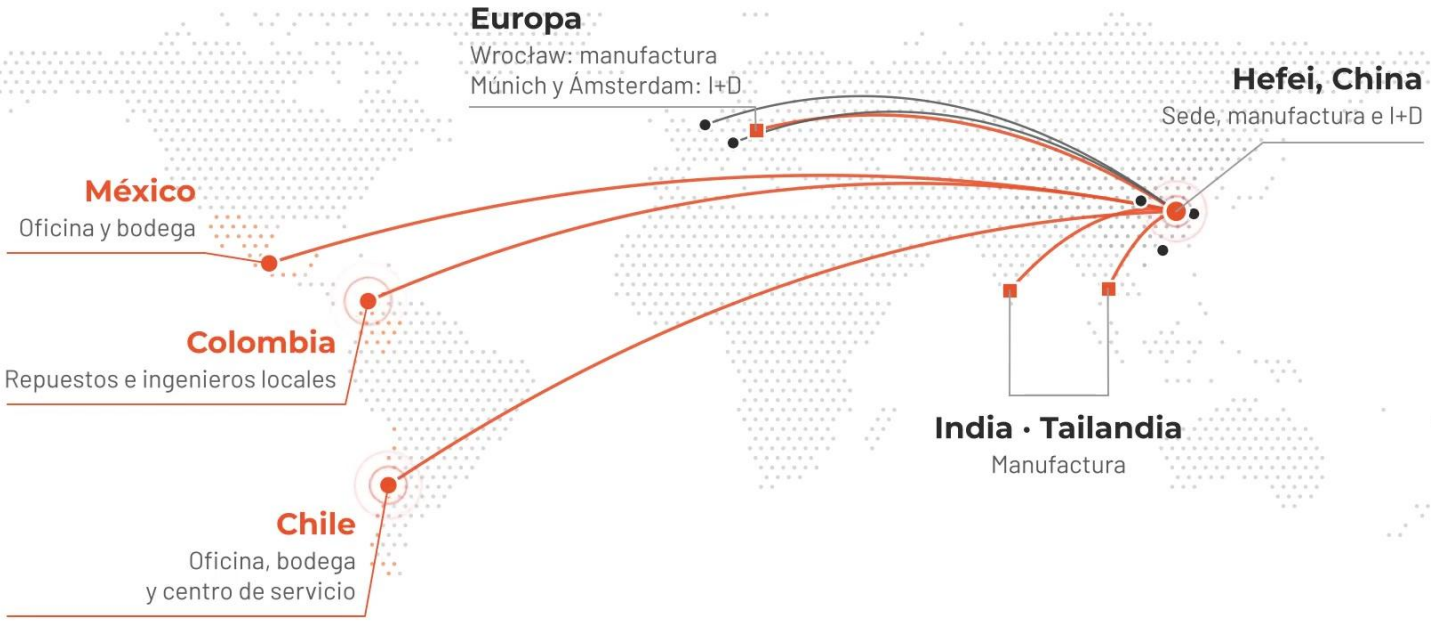


06

¿Cómo se implementa?

Un caso industrial: integración, pruebas y campo

Sungrow fabrica electrónica de potencia desde 1997: el grid-forming nace en el convertidor que diseña



4 bases de manufactura

7 centros de I+D

100+ países y regiones

520+ puntos de servicio

1997	Fundada en Hefei, China; en bolsa (Shenzhen) desde 2011
1.100 GW+	convertidores de potencia instalados en el mundo
USD 585 M	En I+D en 2025 (+32 %); 41 % del personal en I+D
100 GWh	De capacidad anual de ESS; 270 GW de inversores FV
12.000+	Solicitudes de patente presentadas

01

¿Por qué ahora?

Un SIN con más inversores (IBR), menos inercia, nodos débiles y una red que ya opera al límite.



Hams Hall · Reino Unido · 400 MW / 1.200 MWh

Hacia 2033, la capacidad solar del SIN superará su demanda máxima proyectada

13,24 GW

Demanda máxima proyectada del SIN en 2033

37,7 GW

Capacidad instalada estimada en 2033

13,7 GW

Provendrían de generación solar fotovoltaica

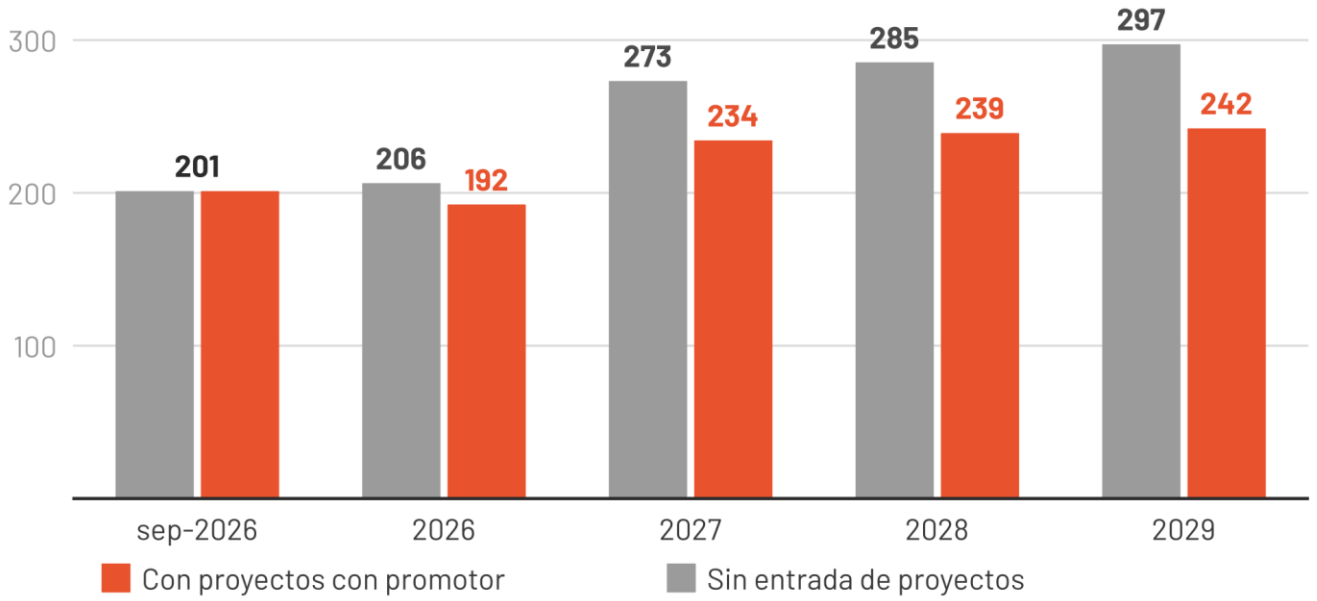
En algunas franjas del día la demanda podría atenderse casi solo con inversores: **menos máquinas síncronas en línea significa menos inercia, menos corriente de falla y menos amortiguamiento.**



BESS Estela (Zelestra) · Chile

Fuente: XM.

La red ya opera al límite: las restricciones del SIN pasarían de 201 hoy a 239–285 en 2028



73 %

de las restricciones en alerta o emergencia están en el Caribe

47

barras superarían su capacidad de cortocircuito hacia 2032; 25 están en el Caribe

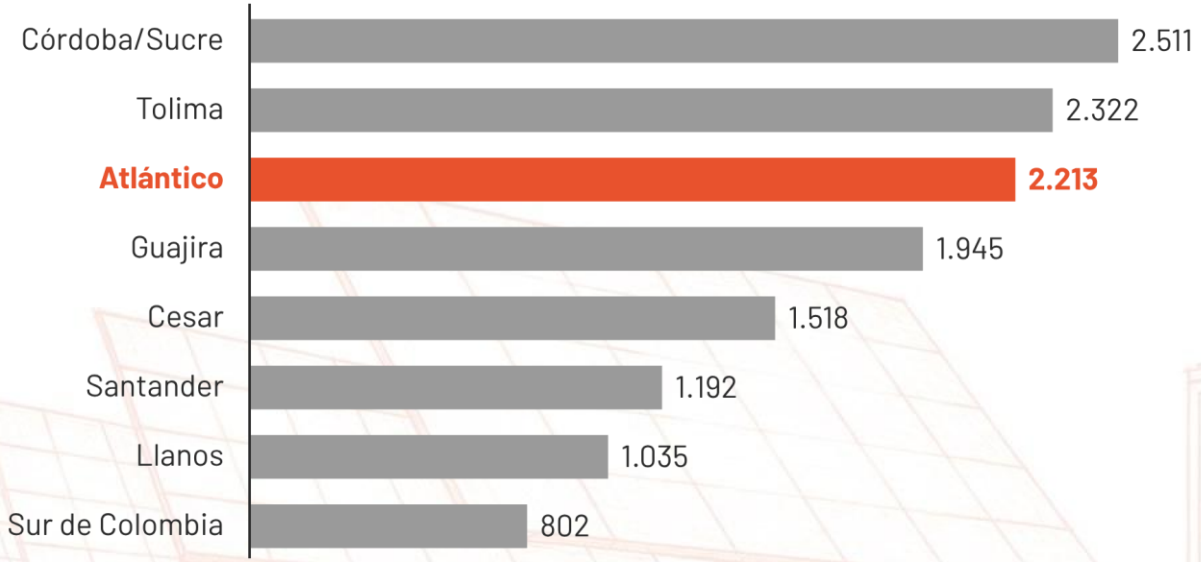
≈ 1.400 MW

de solar por debajo de lo programado en un solo día (3-ago-2026); el sol ya supera el 30 % de la demanda

Fuente: XM.

Convección profunda: en el clúster Atlántico pueden caer entre 1.400 y 1.850 MW solares en minutos

Capacidad efectiva neta por clúster expuesto [MW] - 8 clústeres - 13,5 GW



Clúster Atlántico (55 plantas - 2.213 MW)

63–84 %

de la producción del clúster puede perderse rápidamente

–1.394 a –1.847 MW

con rampas de 46 a 62 MW/min

Un SAEB grid-forming responde en milisegundos. La reserva térmica e hidráulica, en segundos a minutos.

Fuente: XM.

En 2029, 45 subestaciones del SIN operarían con fortaleza de red crítica: SCRIF promedio de 1,2

Indicador	SCRIF	X/R
Mínimo	0,82	2,4
Promedio	1,2	11,4
Máximo	2,0	29,2

45 subestaciones de 110 kV a 500 kV, horizonte 2029. Un GFL convencional suele requerir SCR ≥ 3; por debajo necesita control especial y estudios EMT.

La CREG exige operar con SCR desde 1,2 y X/R de 2,4 a 30.

SIMULACIÓN EMT
Guajira–Cesar–Magdalena

≈86 %

de la potencia inyectada por inversores **(>4.500 MW)** se desconectaría ante una falla en el circuito **Copey–La Loma 500 kV**, en escenarios con más de 60 % de despacho GFL.

Fuentes: XM.

Los grandes eventos recientes comparten un patrón: poca inercia, red débil y oscilaciones

28 sep 2016

Australia del Sur

Clima extremo, desconexión masiva de renovables y fuertes variaciones de tensión terminan en apagón del sistema.

Fuente: AEMO, 2017

9 ago 2019

Reino Unido

Salen el parque eólico Hornsea y una CCGT; la frecuencia cae hasta 48,8 Hz y se activa el deslastre de carga.

Fuente: NGESO, 2019

28 abr 2025

Península Ibérica

Oscilaciones previas en Europa continental; las medidas de mitigación llevan al sistema al límite de estabilidad antes del apagón.

Fuente: ENTSO-E, 2025

Lo que faltó en los tres casos: tensión y frecuencia firmes en los primeros milisegundos.

02

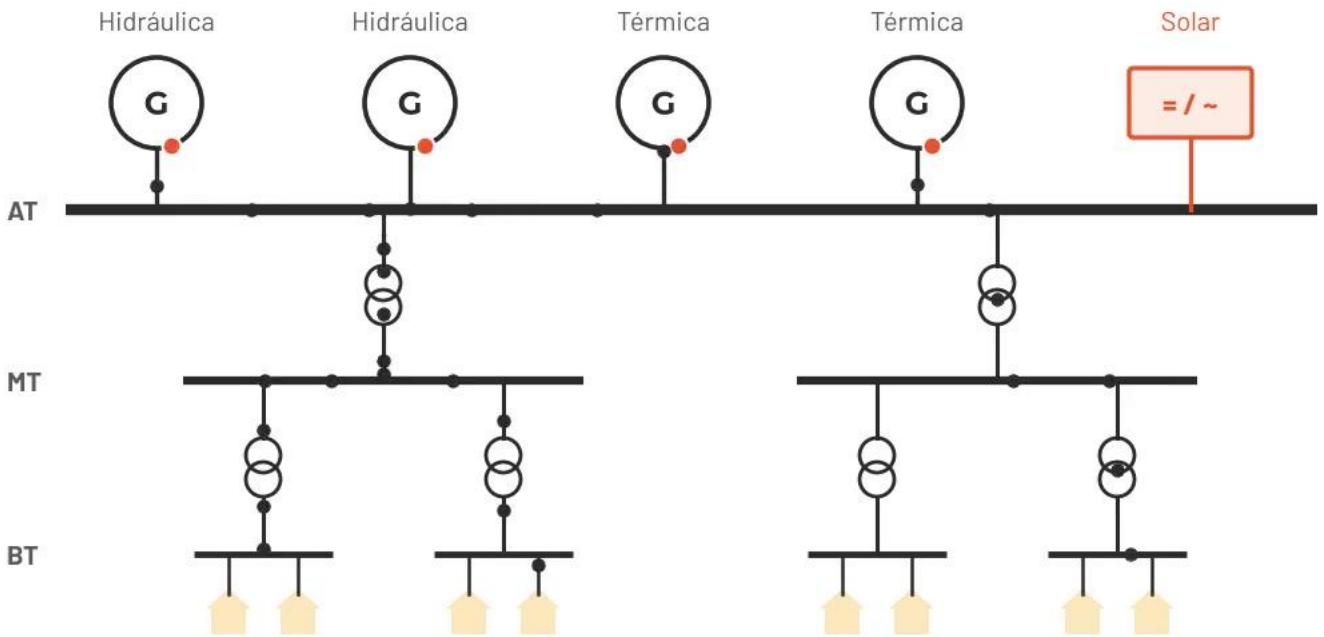
Cómo se sostiene la red

Balance, inercia y regulación: lo que las máquinas síncronas aportan sin que nadie lo pida.



Khamis Mushayt · Arabia Saudita · 500 MW / 2.600 MWh

El sistema convencional: máquinas síncronas forman la red



3 · La solar mide esa tensión con un PLL y la sigue

SIN · capacidad conectada (sep-2026)

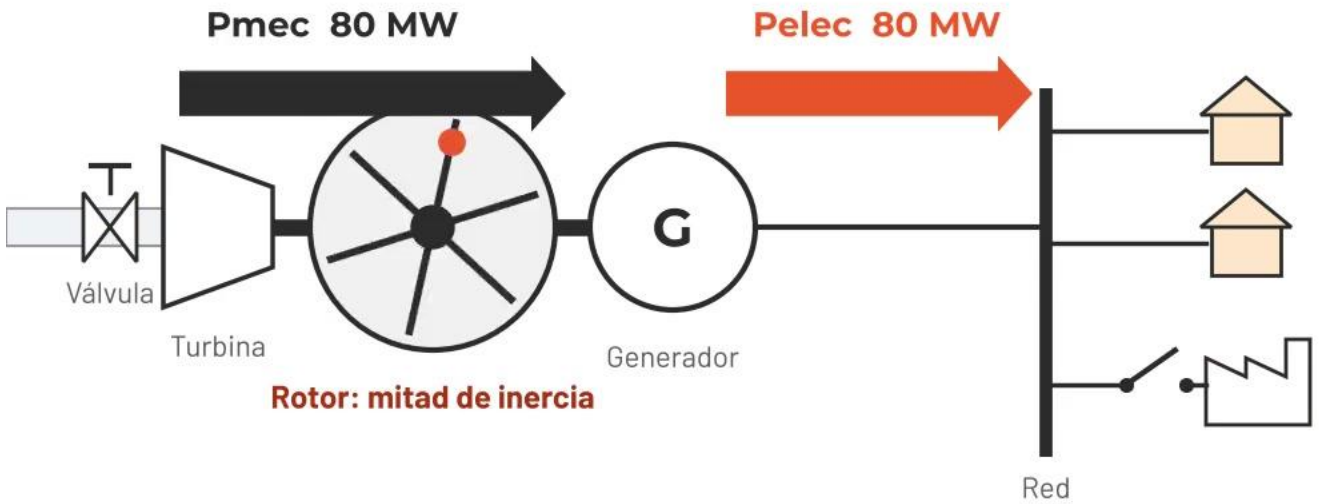
23.099 MW

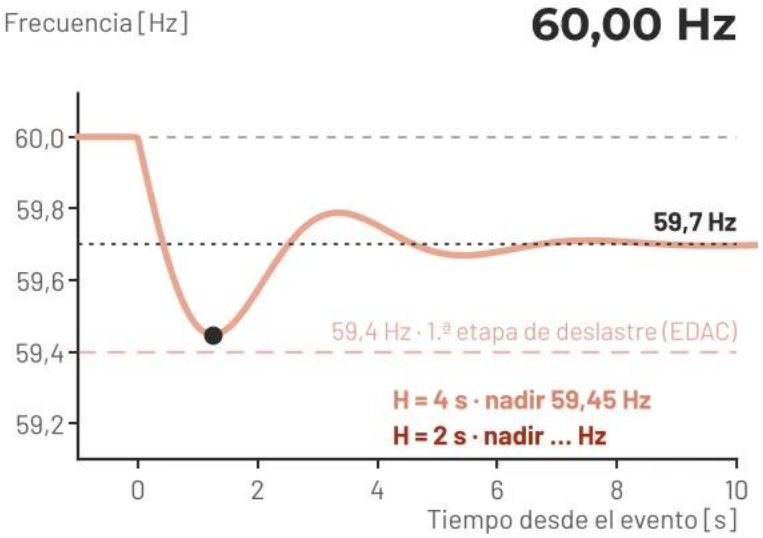
- Hidráulica · **13.231 MW** · 57 %
- Térmica · **6.309 MW** · 27 %
- Solar · **3.518 MW** · 15 %
- Eólica · **41 MW**

≈ 85 % aún es síncrono: hoy las máquinas forman la red; la solar la sigue aumentando

Datos: XM (oct-2026)

La carga se toma al instante y la turbina no: la inercia cubre la diferencia y la regulación primaria la corrige





1 Equilibrio | 2 Escalón de carga | 3 La inercia frena | 4 Regulación primaria | **5 Con la mitad de inercia**

Mismo evento, mitad de masa rotante: cae el doble de rápido (1,5 Hz/s) y cruza 59,4 Hz → deslastre de carga.

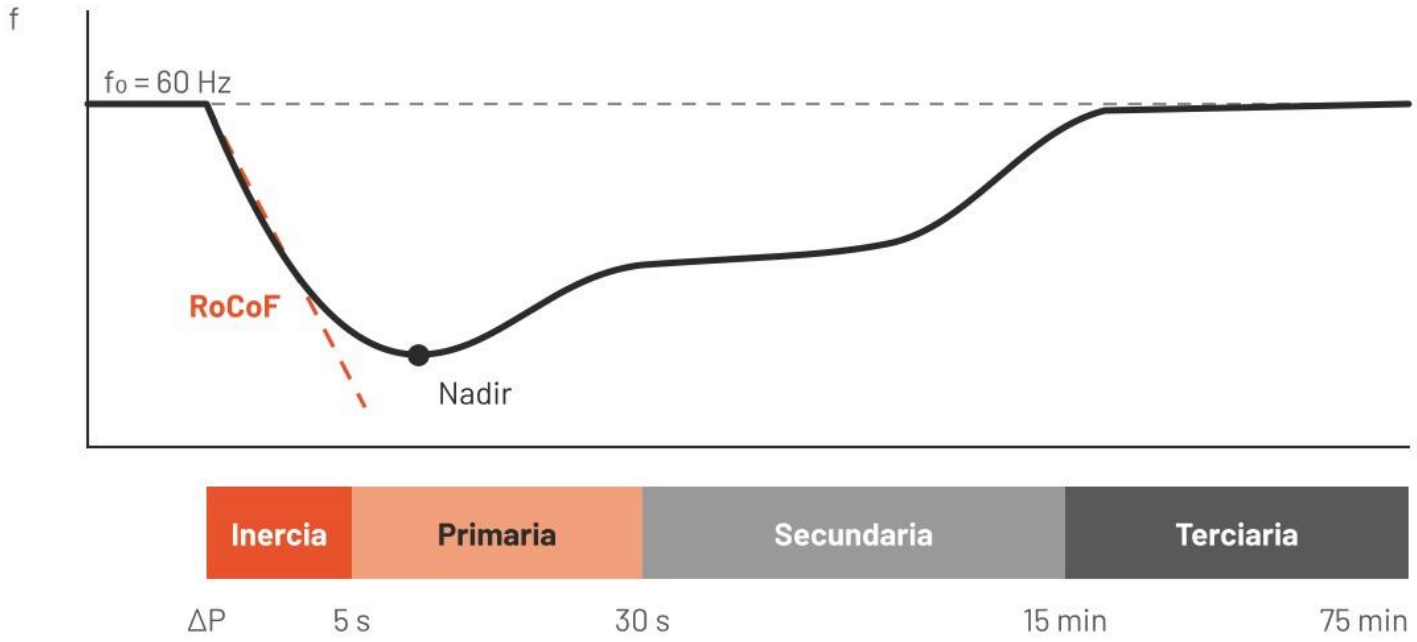
Ilustrativo · máquina equivalente 100 MW

ECUACIÓN DE OSCILACIÓN (p.u.)
$\Delta P = 2H \cdot d(\Delta f / f_0) / dt$

PENDIENTE INICIAL (RoCoF)
$\Delta P \cdot f_0 / 2H = 0{,}75$ Hz/s · con H/2: 1,5 Hz/s

ERROR FINAL DE LA PRIMARIA
$\Delta f = R \cdot \Delta P \cdot f_0 = 0{,}3$ Hz: no depende de H

La frecuencia se controla en capas: inercia, regulación primaria, secundaria y terciaria



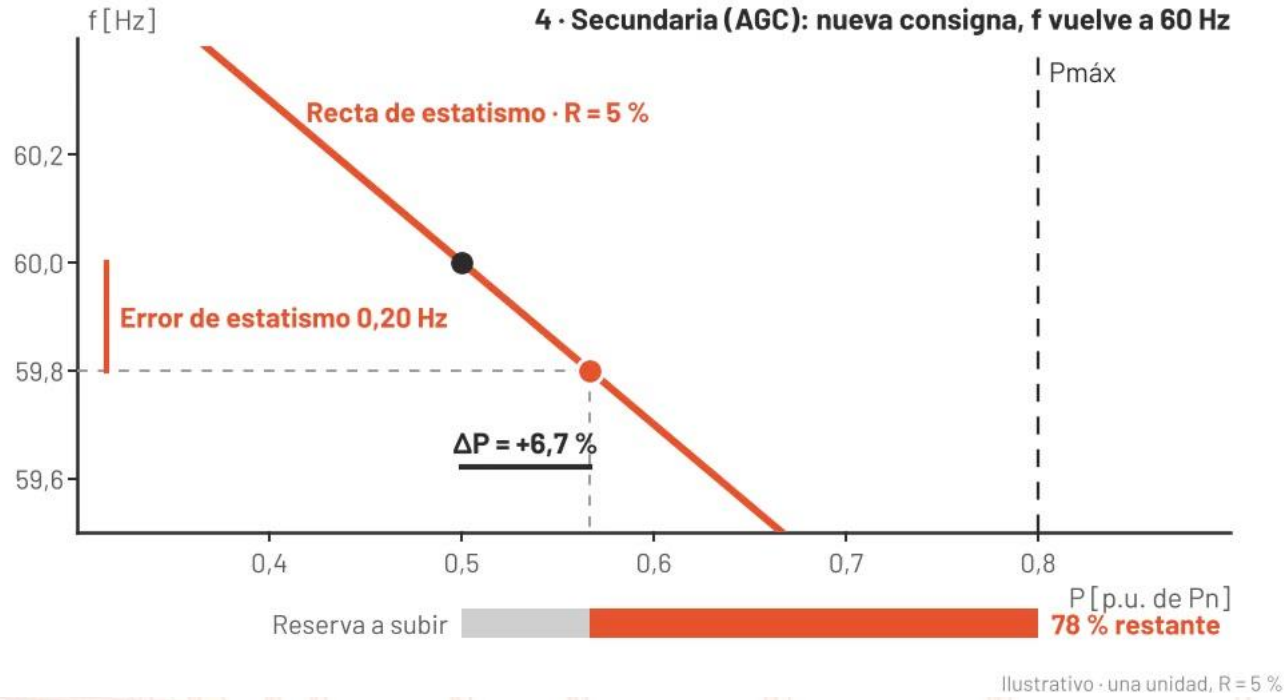
Respuesta inercial · 0–5 s
Física (masas rotantes) o sintética: GFM ≥ 3 s

Primaria · 5–30 s
Local, por estatismo; SAEB ≥ 3 % Pn por 1 min

Secundaria · 30 s–15 min
Centralizada: AGC del CND (XM)

Terciaria · 15–75 min
Reprogramación del despacho

La regulación primaria frena la caída con estatismo, pero deja un error y consume reserva



Control proporcional local (estatismo R)

$\Delta P = -(\Delta f / f_0) \cdot Pn / R$

R = 5 %, Δf = −0,2 Hz → +6,7 % de Pn

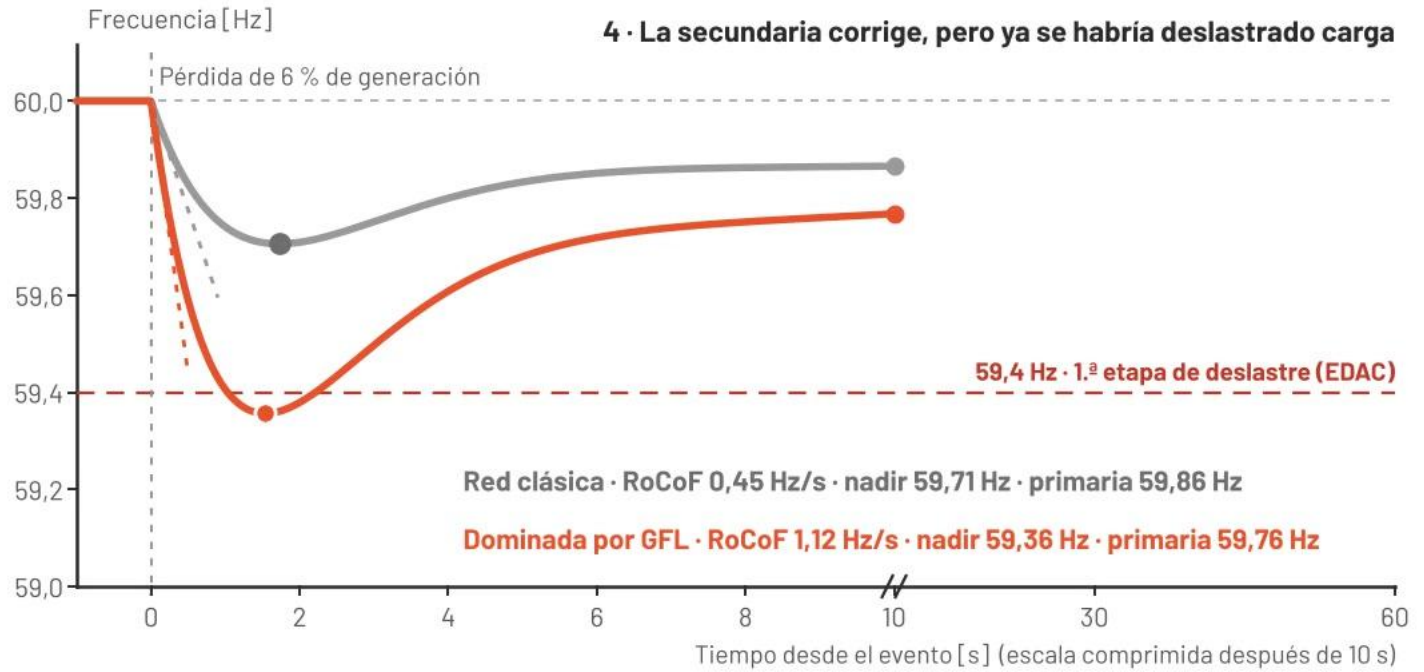
Error y reserva

La frecuencia se queda en $f_1 < f_0$ y la reserva a subir se consume; la secundaria (AGC) la restituye.

SAEB · CREG 101 113

Estatismo 2–6 % · banda muerta 0–120 mHz, ajuste inicial ≤ 30 mHz · ≥ 3 % de Pn durante ≥ 1 min.

¿Puede operar el SIN solo con convertidores grid-following? No: pierde inercia, reserva y reparto de carga



Ilustrativo · barra equivalente: clásica H = 4 s, todas regulan · GFL H = 1,6 s, regula el 40 %

Red clásica (máquinas)

Dominada por convertidores GFL

Sin inercia
La FV no tiene masa rotante; la de la eólica queda desacoplada por el convertidor.

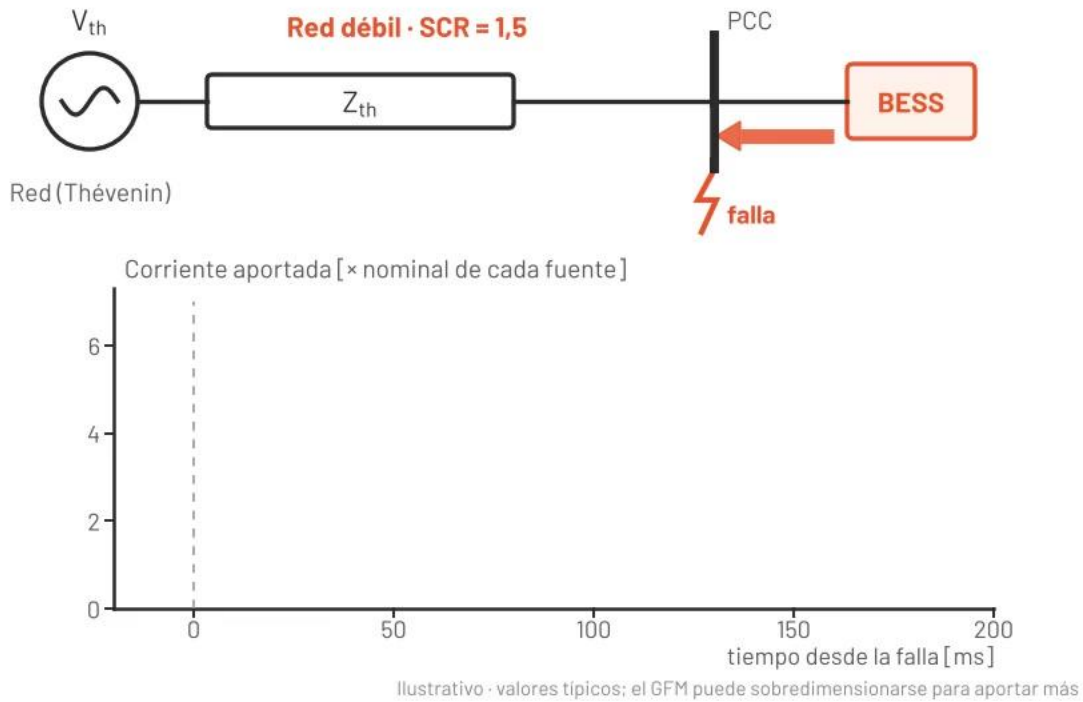
Sin regulación primaria
Con MPPT, el GFL entrega siempre su máximo y no responde a la frecuencia.

Sin reparto natural
Cada convertidor sigue su consigna; el escalón de carga recae en las máquinas que quedan.

X CONGRESO INTERNACIONAL | SISTEMAS BESS Y MINIGRANJAS SOLARES
10 ANIVERSARIO ExpoSolar Colombia 2026

La red también se sostiene en tensión: su nivel de cortocircuito mide qué tan robusta es

3 · Ante una falla: cuánta corriente aporta cada fuente



Ilustrativo · valores típicos; el GFM puede sobredimensionarse para aportar más

Potencia de cortocircuito: la fortaleza en un nodo

$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{cc} = V^2 / Z_{th}$

Corriente que entrega la red ante una falla en ese nodo. La fijan las líneas, los transformadores y las máquinas en línea.

Relación de cortocircuito: la fortaleza relativa

$SCR = S_{cc} / P_{planta}$

IEEE 1204: con SCR < 3 la red es débil. XM usa el SCRIF, que suma la interacción entre plantas: promedio de 1,2 en 45 nodos para 2029.

Lo que aporta un GFM, y lo que no

$I_{cc} \approx 1{,}1–1{,}5 \times I_n$, en el mismo ciclo

Fija la tensión y estabiliza a los GFL vecinos, pero su corriente la limita el semiconductor: las protecciones dependen del nivel mínimo que dan las máquinas síncronas.

Hacemos parte de econexia operado por corferias
Organiza Centro de Ciencia y Sensibilización Ambiental | corferias
SUNGROW Clean power for all

03

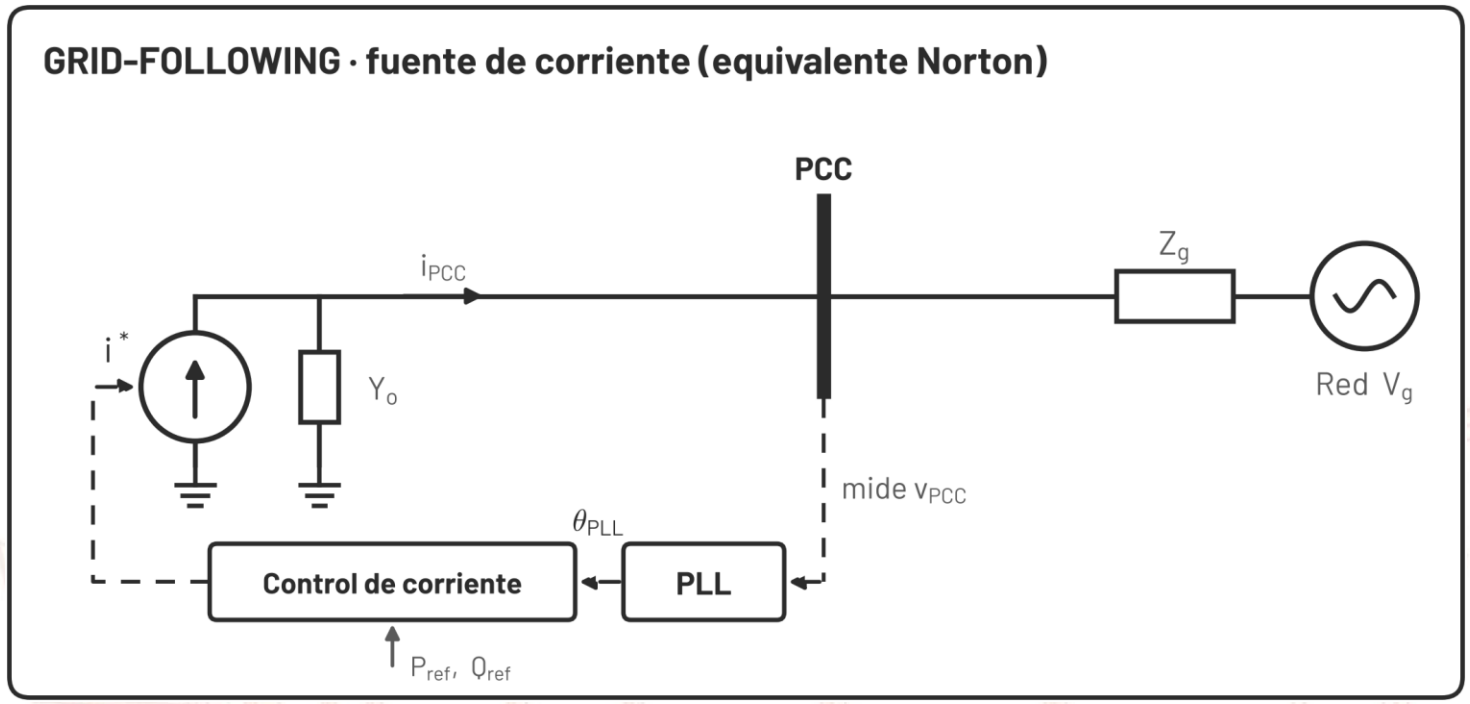
Tecnología grid-forming

Qué cambia en el control, cómo responde ante fallas y red débil, y qué no puede hacer.



Bramley · Reino Unido · 100 MW / 331 MWh · grid-forming

El inversor que instalamos durante una década sigue a la red: es una fuente de corriente guiada por un PLL



Fuente de corriente (equivalente Norton)

Calcula i* para entregar la P y Q de consigna; la red ve una corriente con admitancia Y_o en paralelo.

Se sincroniza con un PLL

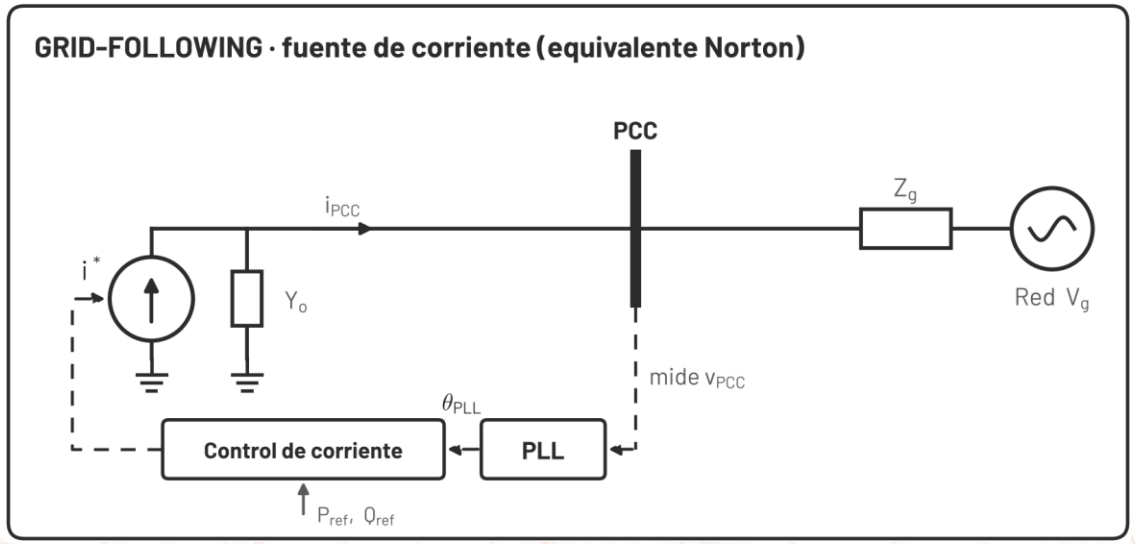
Mide el ángulo de v_{PCC} y alinea su corriente con él: la tensión y la frecuencia las impone la red.

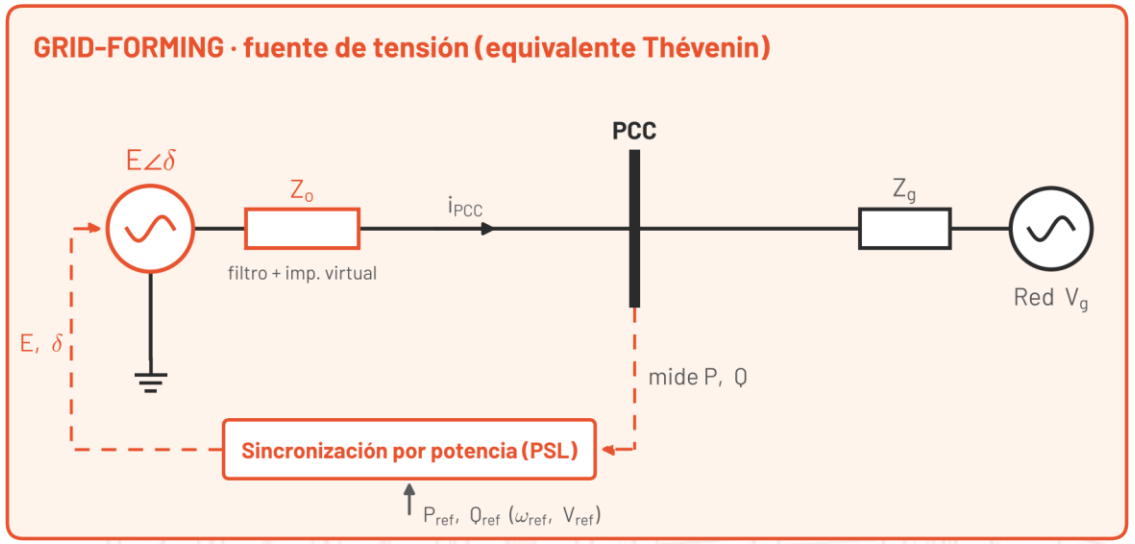
Su punto débil: la red débil

$v_{PCC} = V_g + Z_g \cdot i_{PCC}$. Con SCR < 3, Z_g es grande: la tensión que mide el PLL se mueve con su propia corriente y el lazo puede oscilar o perder el sincronismo.

Fuentes: Sungrow, TI SC450HX GFM (2026).

La diferencia está en el control: el GFL inyecta una corriente que sigue a la red; el GFM impone una tensión





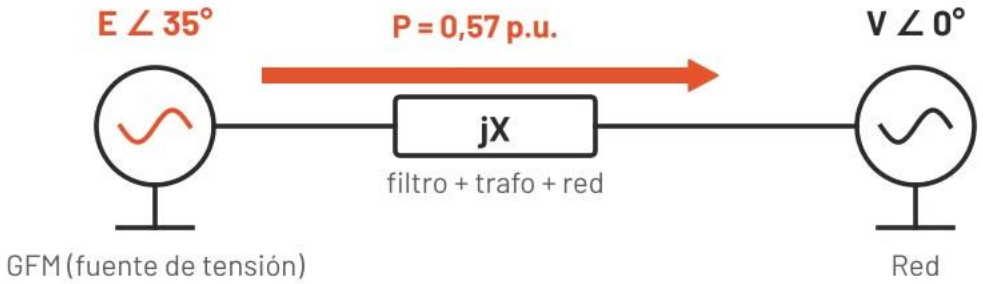
Referencia: ángulo de v_{PCC} medido por el PLL.
Ante un evento: sostiene su corriente hasta que el control la recalcula.
Límite: necesita red fuerte; no forma isla ni arranca en negro.

Referencia: tensión interna $E\angle\delta$, sincronizada por balance de potencia.
Ante un evento: la corriente cambia al instante, $i = (E - v) / Z$.
Límite: opera con SCR bajo y en isla, pero exige limitar corriente y margen de sobrecarga ($1{,}5\ I_n \cdot 10$ s).

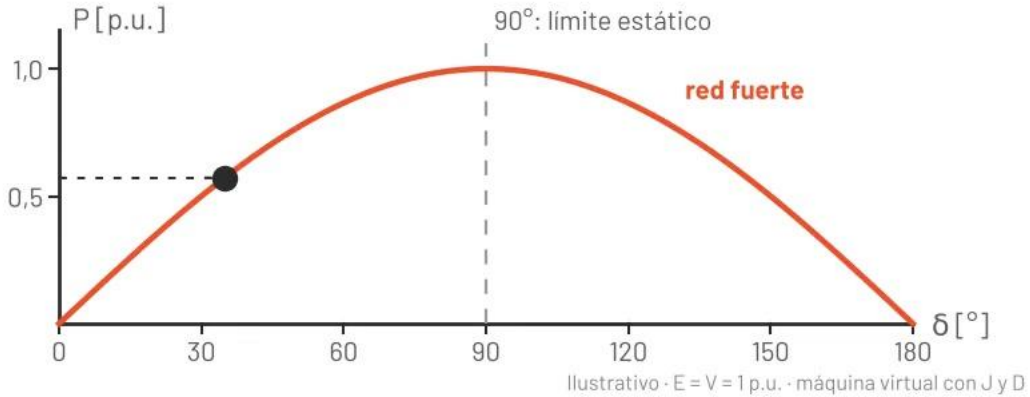
Fuentes: Sungrow, TI SC450HX GFM (2026).

X CONGRESO INTERNACIONAL | SISTEMAS BESS Y MINIGRANJAS SOLARES
10 ANIVERSARIO ExpoSolar Colombia 2026

Un GFM se sincroniza por potencia, como una máquina síncrona: sin PLL en el lazo principal



3 · Red débil (X × 1,6): menos margen hasta 90°



Ilustrativo · E = V = 1 p.u. · máquina virtual con J y D

La potencia sale por el ángulo

$$P = (E \cdot V / X) \cdot \text{sen}\ \delta$$

Como en una máquina síncrona: más ángulo δ entre E y V, más potencia. La amplitud E gobierna la reactiva: $Q = (E \cdot V \cdot \cos\delta - V^2) / X$.

Si entrega menos de lo pedido, acelera; si entrega más, frena

$$J \cdot \omega_n \cdot d\omega/dt = P_{set} - P_e + D_p \cdot (\omega_n - \omega)$$

Rotor virtual: J es la inercia (Sungrow usa $T_j = 2H$) y D_p el estatismo. Así se sincroniza con la red sin PLL.

Si la tensión cae, sube su reactiva

$$K \cdot dE_{ref}/dt = D_q \cdot (V_n - V_o) + Q_{set} - Q_e$$

Excitación virtual con estatismo Q–V. Los lazos internos de tensión y corriente limitan la corriente en falla.

Hacemos parte de econexia operado por corferias
Organiza Centro de Ciencia y Sensibilización Ambiental | corferias

Fuentes: Sungrow GFM Technical Description (2026)

SUNGROW Clean power for all

Cada lazo de control grid-forming emula una función que antes aportaba la máquina síncrona

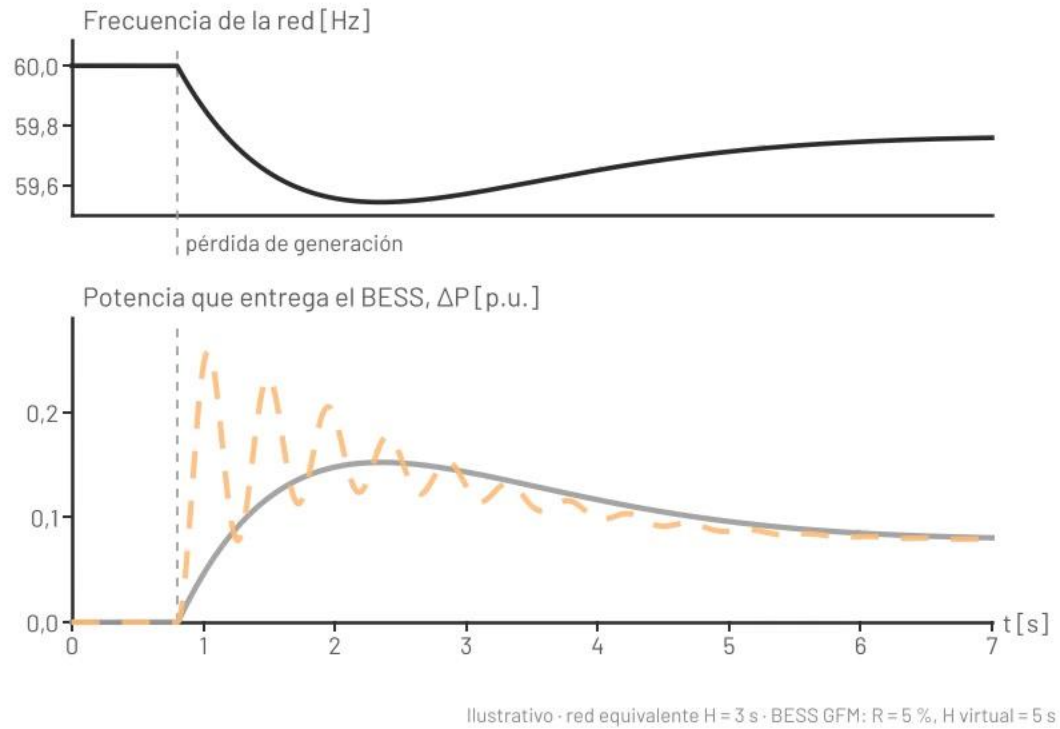
Máquina síncrona	Lazo de control GFM	Servicio a la red
Masa rotante (constante H)	**Inercia virtual (Tj = 2H) ajustable**	Frena el RoCoF en los primeros ms
Gobernador de la turbina	**Lazo P–f (estatismo)**	Regulación primaria de frecuencia
Regulador de tensión (AVR)	**Lazo Q–V**	Soporte de tensión y reactiva
Devanados amortiguadores / PSS	**Amortiguamiento + impedancia virtual**	Oscilaciones sub y súper-síncronas
FEM detrás de reactancia	**Fuente de tensión + límite de corriente**	Corriente de falla sostenida
Excitación propia	**Referencia V/f interna**	Operación en isla y arranque en negro

A diferencia del rotor, cada parámetro es **configurable**: el operador puede pedir la inercia y el amortiguamiento que su red necesita.

X CONGRESO INTERNACIONAL SISTEMAS BESS Y MINIGRANJAS SOLARES
10 ANIVERSARIO ExpoSolar Colombia 2026

Tres ajustes definen cómo responde un GFM a un evento: estatismo, inercia virtual y amortiguamiento

3 · + Amortiguamiento (D): mismo aporte, sin oscilación



Ilustrativo · red equivalente H = 3 s · BESS GFM: R = 5 %, H virtual = 5 s

Estatismo P–f (droop): cuánto aporta

$\Delta P = -\Delta f / (R \cdot f_0)$

Aporta en proporción a la desviación y fija el valor final. CREG 101 113: R ajustable entre 2 y 6 %.

Inercia virtual (J, H): cuándo aporta

$\Delta P \approx -2H \cdot d(f/f_0)/dt$

Responde a la pendiente, no a la desviación: aporta desde el primer instante y reduce el RoCoF. Sungrow la ajusta como $T_j = 2H$.

Amortiguamiento (D): cómo llega

$\Delta P_D = -D \cdot (\omega - \omega_{red})$

Disipa la oscilación del rotor virtual contra la red sin cambiar el valor final. Con la impedancia virtual, evita resonancias.

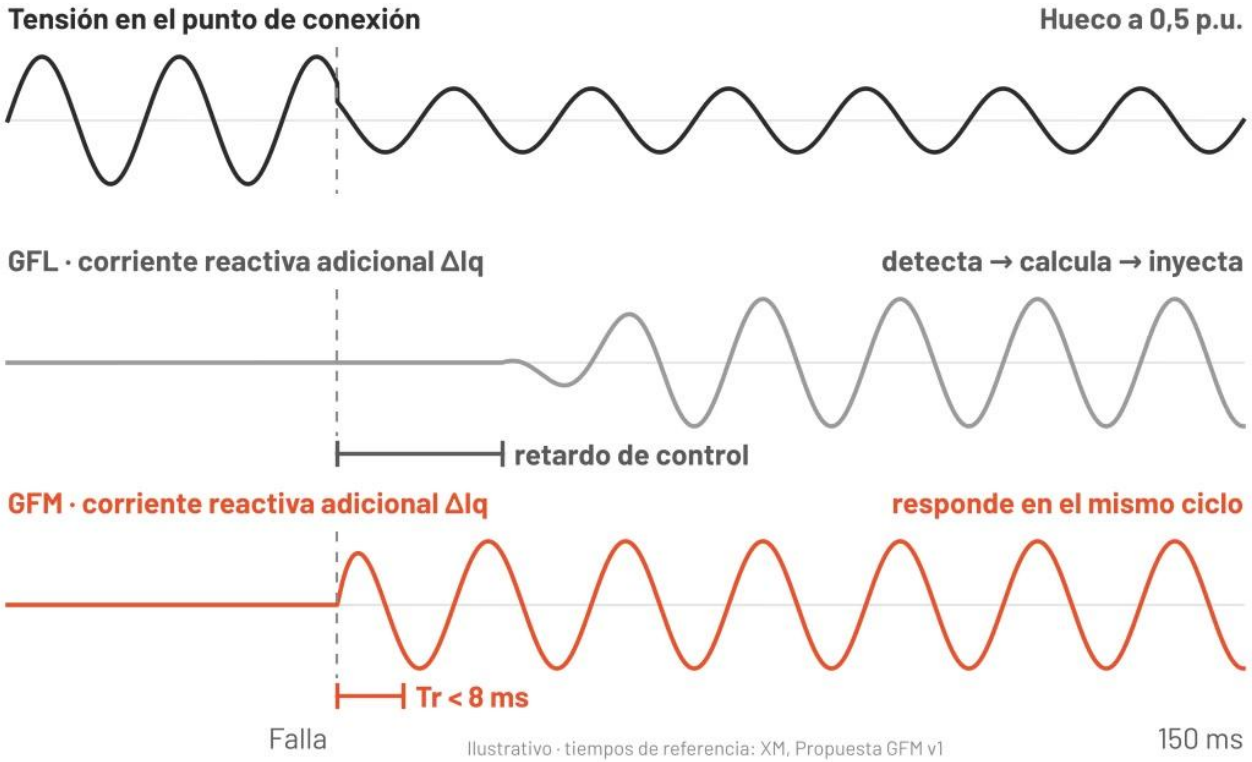
Familias de control grid-forming

Droop · VSG/VSM · sincronverter · PSC · VOC

Variantes de una misma idea: con D/J → 0, un VSG se comporta como un droop. Sungrow usa un esquema tipo VSG, con J y D_p.

Hacemos parte de econexia operado por corferias
Organiza Centro de Ciencia y Sensibilización Ambiental corferias
SUNGROW Clean power for all

Ante una falla, el GFM responde dentro del mismo ciclo



Ilustrativo · tiempos de referencia: XM, Propuesta GFM v1

GFL - Fuente de corriente

El PLL y el control deben medir el hueco, calcular la consigna y recién entonces inyectar.

GFM - Fuente de tensión

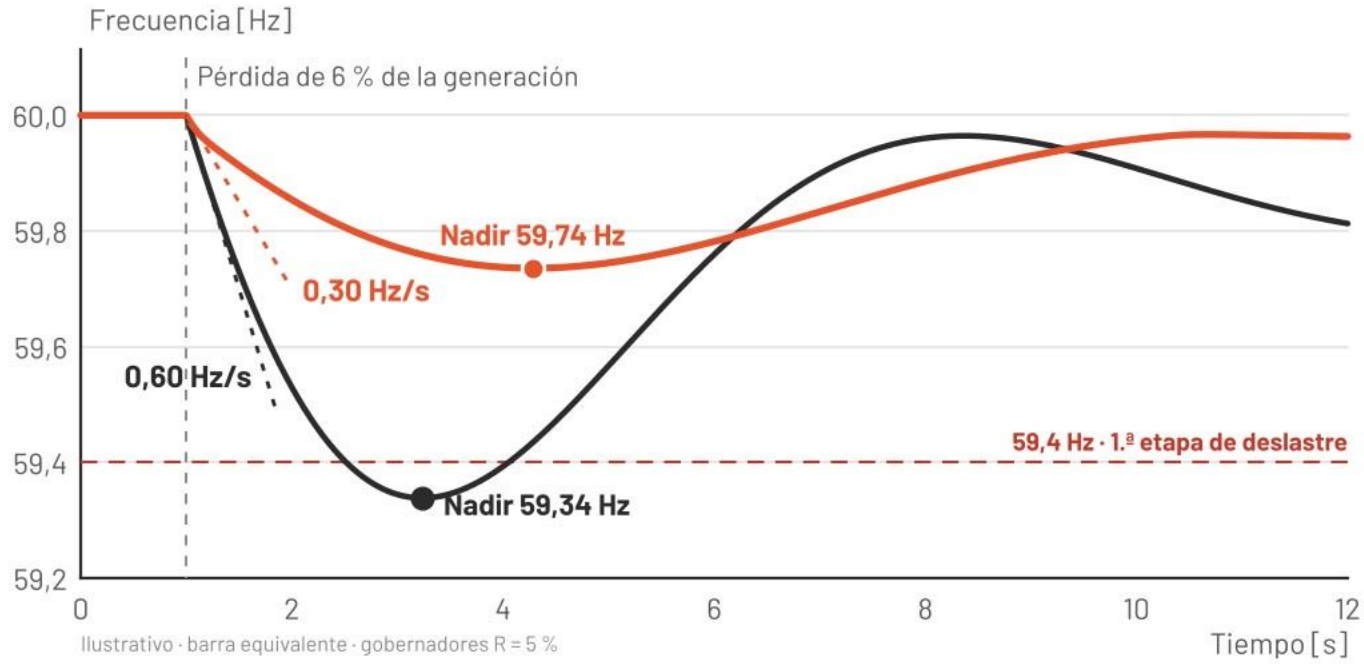
Mantiene su tensión interna detrás de una impedancia: la corriente aparece por física, (E – V)/X, sin esperar una medición.

Propuesta XM

Tr < 8 ms · Te ≤ 50 ms

Tiempo de respuesta y de establecimiento propuestos para el GFM

Con inercia sintética, la misma contingencia hace caer la frecuencia a la mitad de velocidad



Sin GFM (H = 3 s)

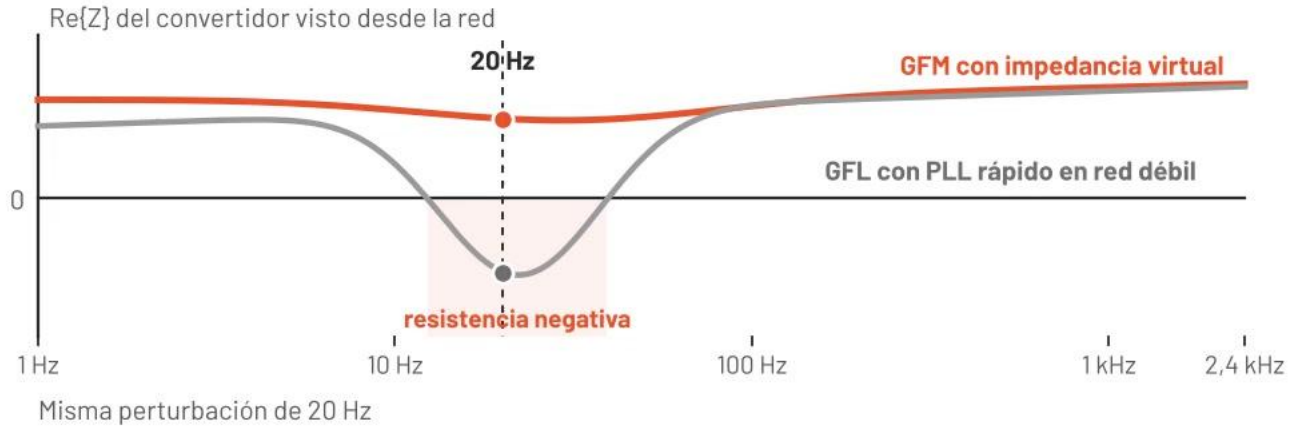
Con GFM (+3 s de H a nivel sistema)

Indicador	Sin	Con
RoCoF [Hz/s]	0,60	**0,30**
Nadir [Hz]	59,34	**59,74**
Caída máxima [mHz]	660	**260**

Caso real · Minety, Reino Unido

Disparo de 1 GW (IFA1), f → 49,3 Hz: el BESS Sungrow de 100 MW pasó de 4,6 a 84,4 MW en milisegundos.

Oscilaciones: el convertidor puede alimentarlas o amortiguarlas, según la impedancia que presenta a la red



Misma perturbación de 20 Hz

El criterio

Si Re{Z(jω)} > 0 en toda la banda, el convertidor disipa energía de la oscilación: es pasivo y la amortigua.

Península Ibérica · 28-abr-2025

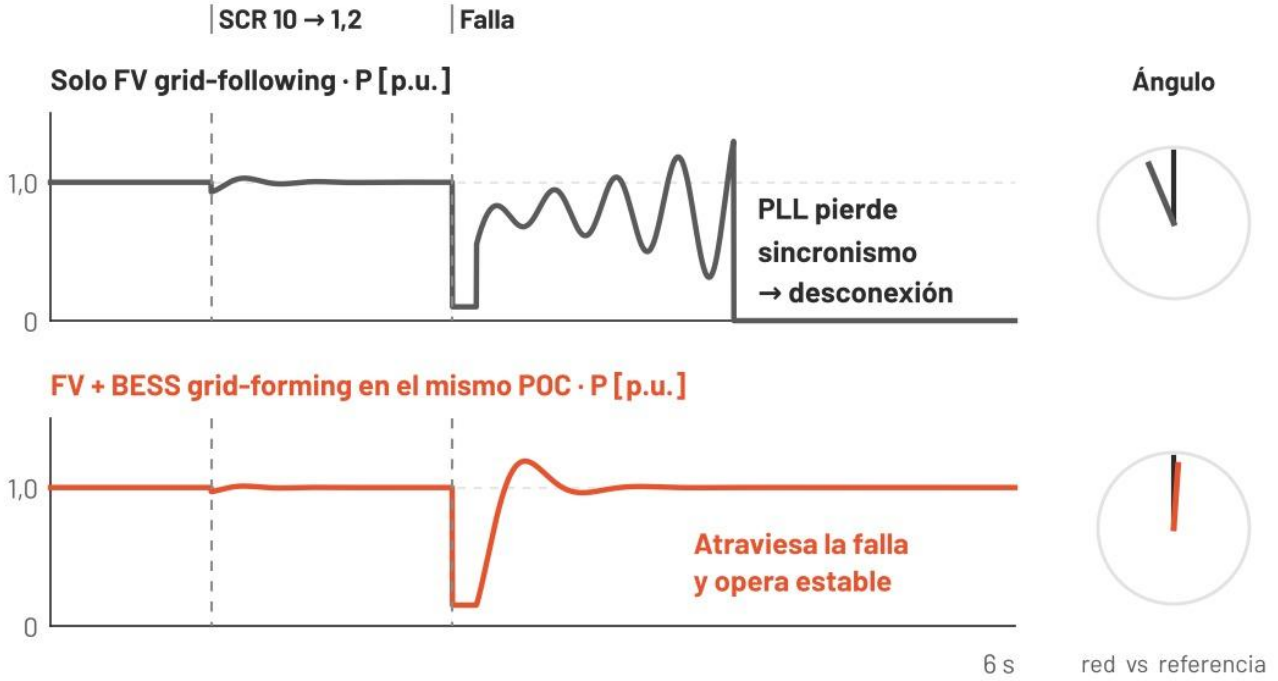
Dos oscilaciones previas al apagón: **0,64 Hz** (12:03–12:07) y **0,21 Hz** (12:19–12:22).

Dato Sungrow

0,1–2,5 Hz: amortiguamiento activo especificado en la TI del PCS. **1 Hz–2,4 kHz**: resistencia positiva reportada en pruebas.

Esquemático · valores ilustrativos

Con SCR 1,2 el PLL pierde la referencia y la FV se desconecta; un BESS grid-forming en el mismo punto la sostiene



Por qué falla el GFL

Con SCR bajo, la tensión del POC depende de la propia corriente del inversor: el PLL persigue una referencia que él mismo mueve.

Qué aporta el GFM

Fija tensión y ángulo detrás de una impedancia y le devuelve al nodo la fortaleza que perdió.

CREG 101 113 · b.1

Operar desde SCR 1,2: el SCRIF promedio que XM proyecta para 2029 en 45 subestaciones.

Grid-forming complementa, no reemplaza a la máquina síncrona

Atributo	Generador síncrono	GFM
Inercia	Inherente, H ≈ 2–10 s	Controlable (H hasta 10 s; Tj = 2H), limitada por corriente, margen de potencia y SoC
Corriente de cortocircuito	3–10 p.u. subtransitoria; decae en pocos ciclos	1,1–1,5 p.u. típico, sostenida; más, sobredimensionando el PCS
Respuesta en frecuencia	Turbina–generador: 1–6 s	Casi instantánea en potencia activa
Arranque autónomo	Posible, sin restricción de energía	Requiere energía almacenada disponible
Interacciones de control	Conocidas; PSS y criterios maduros	Nuevos modos entre GFM y GFL: sintonía coordinada y EMT de área amplia

Criterio XM: el nivel mínimo de fortaleza lo garantizan compensadores y generadores síncronos. El GFM aporta por encima de ese mínimo —respuesta rápida, inercia, estabilidad en red débil— verificado con EMT de área amplia.

04

¿Qué exige Colombia?

Lo que piden otros operadores, la CREG 101 113 de 2026, la verificación de XM, y dónde y cuándo se necesita.



Proyecto de referencia · Reino Unido

Los operadores convergen: Grid-forming pasa de recomendación a requisito de conexión

Australia

AEMO

Especificación voluntaria GFM (2023) y marco de pruebas. Hornsdale (150 MW) y Victorian Big Battery (300 MW) ya operan en GFM.

Reino Unido

NESO

Contratos de estabilidad desde 2022: BESS GFM en Eccles 400 kV con 2.686 MW·s de inercia.

Finlandia

Fingrid

Capacidad GFM exigida a BESS Tipo C y Tipo D (≥10 MW).

Chile

Coordinador Eléctrico Nacional

Requisitos técnicos mínimos para recursos basados en inversores grid-forming (abr-2025).

México

CNE · DACG SAEE (DOF 16-04-2026)

Todo almacenamiento con electrónica de potencia hacia la RNT o las RGD debe ser formador de red.

Colombia

CREG 101 113 (19-06-2026)

GFM obligatorio para SAEB ≥ 1 MW, con requisitos cuantitativos y banco de pruebas de XM.

Fuentes: AEMO, NESO, Fingrid, CEN, CNE, CREG; XM Propuesta GFM v1

SUNGROW Clean power for all

Las normas IEEE no exigen grid-forming: las especificaciones vienen de operadores y guías técnicas

Documento	Alcance	¿Exige GFM?
IEEE 2800-2022	Desempeño de IBR conectados a transmisión: FRT, respuesta de frecuencia y tensión	No; operadores como MISO lo adaptan con excepciones para GFM
IEEE 1547-2018	Recursos distribuidos (DER) conectados a distribución	No; contempla isla intencional, no define GFM
NERC (2023)	White paper: especificación funcional GFM para BESS del sistema de potencia	Guía técnica, no obligatoria
NESO · GC0137 (2022)	Especificación mínima GB Grid Forming en el Grid Code británico	Voluntaria; remunerada vía contratos de estabilidad
AEMO (2023)	Especificación voluntaria GFM y marco de pruebas de requisitos núcleo	Voluntaria
ENTSO-E	Requisitos GFM para almacenamiento y renovables de más de 1 MW	No vinculantes
CREG 101 113 (2026)	Requisitos de conexión de SAEB en el SIN	**Sí, obligatorio para SAEB ≥ 1 MW**

En Colombia todo SAEB de 1 MW o más debe ser grid-forming (CREG 101 113 de 2026)

Art. 71 literal a)

SAEB < 1 MW

Puede ser GFL, con soporte de tensión y frecuencia, FRT y respuesta rápida de corriente en secuencia positiva y negativa.

Art. 71 literal b)

SAEB ≥ 1 MW

Debe ser **GFM** y cumplir 23 requisitos (b.1 a b.23), verificados en el **punto de conexión**.

Art. 61 Transición

Híbridos CREG 174/2021

Con entrada en operación hasta el 31-dic-2029, el SAEB asociado se acoge a los requisitos GFL.

Art. 72 Pruebas: las ejecuta una persona jurídica, universidad o centro de investigación; un Acuerdo CNO define qué se acepta por certificado de fábrica, qué en sitio y qué por simulación EMT/RMS.

Fuente: Resolución CREG 101 113 de 2026, Arts. 61, 71 y 72

Los requisitos : 1,5 p.u. por 5 s, 3 s de inercia y respuesta en menos de 8 ms

b.1 · Fortaleza de red
SCR 1,2–20 · X/R 2,4–30

b.3 · Salto de ángulo
Hasta 60°

b.4 · RoCoF
Hasta 5 Hz/s

b.5 · b.6 · b.7 · b.9 · Corriente
≥ 1,5 p.u. / ≥ 5 s
Activa y reactiva, continua

b.10 · Inercia sintética
≥ 3 s
Sobre la capacidad nominal

Tiempos Tr / Te
< 8 ms / ≤ 50 ms
Valores instantáneos

b.15 · b.16 · Regulación primaria
≥ 3 % Pn · ≥ 1 min
Banda muerta 0–120 mHz (inicial ≤ 30 mHz) · estatismo 2–6 %

b.18 · b.19 · Límite de corriente
Sin priorización
Escalamiento P/Q / retorno ≤ 0,05 p.u./s

b.13 · b.14 · b.22 · Permanencia
FRT sin cesación
LVRT/HVRT/TOVRT/LFRT/HFRT / modelos EMT

Fuente: CREG 101 113 de 2026, Art. 71 lit. b); Tr/Te según XM v1

El cumplimiento se demuestra EMT y HIL, con 22 pruebas propuestas por XM

1 **Modelo EMT** con código real del fabricante

2 **Hardware-in-the-Loop** con el controlador físico

3 **Informe de tercero** + declaración del agente ante el CND

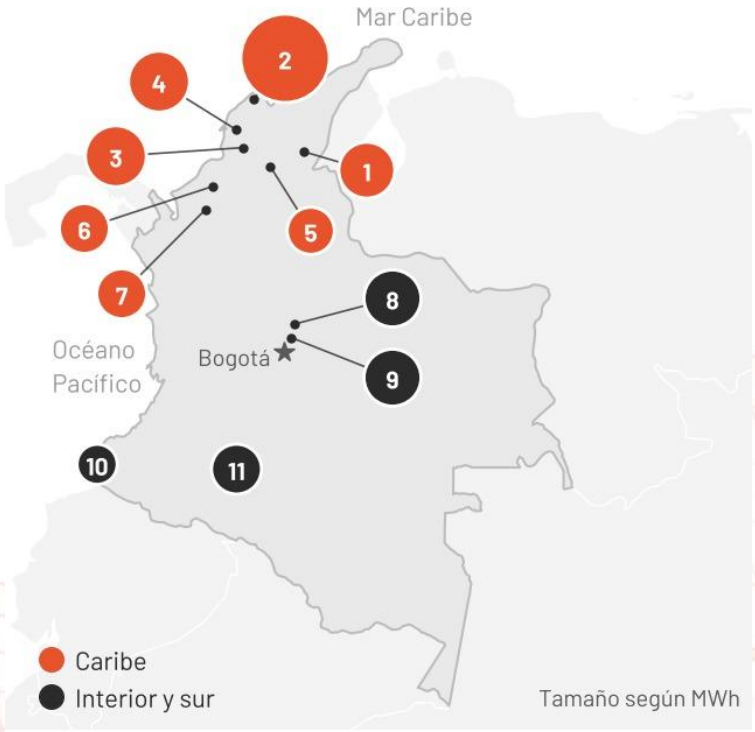
Escenarios con despacho –1, 0 y +1 p.u., SCR 1,2 y 20, X/R 2,4, 9 y 30.

P1–4 · Pérdida de recurso síncrono	**P5** · Rampas de frecuencia (RoCoF)
P6–7 · SCR y X/R decrecientes + falla	**P8** · Saltos de ángulo de tensión
P9–11 · Conexión de cargas	**P12–14** · Tensión y FRT
P15 · Arranque autónomo	**P16–17** · Barridos V/I, Q/V y P/θ
P18–19 · Amortiguamiento	**P20** · Inercia sintética
P21–22 · Casos críticos y umbrales	**+8** · Inicialización y parametrización

Fuente: XM, Propuesta GFM v1 (abr-2026), cap. 4; CREG 101 113, Art. 72

SUNGROW Clean power for all

XM ya señaló dónde: 610 MW / 1.890 MWh de SAEB en 11 nodos con la red agotada



#	Nodo	MW	MWh
1	La Loma 110 kV	150	150
2	Cordialidad 110 kV	140	600
3	Carmen 66 kV	50	200
4	Gambote 66 kV	50	200
5	Mompox 110 kV	50	80
6	Río Sinú 110 kV	25	100
7	Tierra Alta 110 kV	25	100
8	Ubaté	40	160
9	Termozipa	40	160
10	Buchely	20	40
11	Doncello	20	100
	Total	**610**	**1.890**

Guajira–Cesar–Magdalena

Susceptible a **FIDVR**: ahí la reactiva rápida del GFM es decisiva.

Caribe 2 · estudio de XM

+400 MW de importación (1.600 → 2.000 MW) y B/C 1,82 con los 490 MW GFM del Caribe.

Nivel de tensión

66–110 kV con red agotada: el escenario del requisito SCR 1,2.

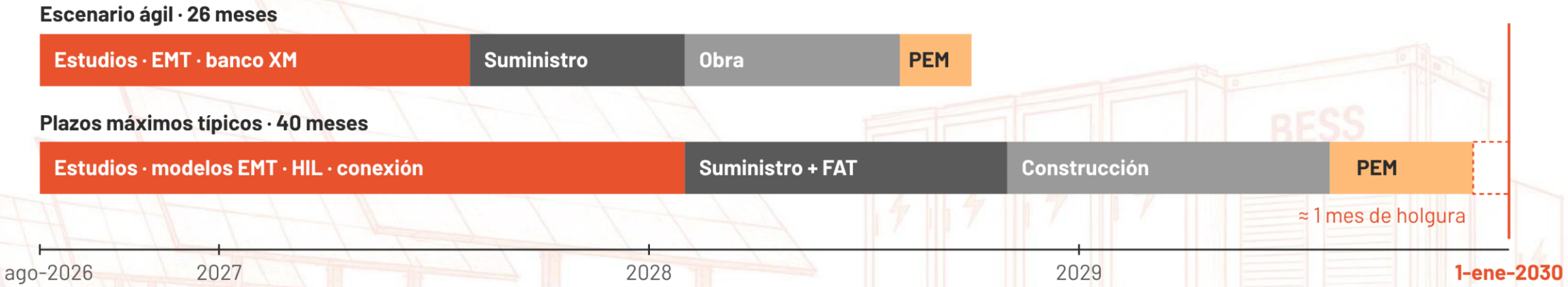
Fuente: XM, 2° Congreso de Almacenamiento (02-oct-2026); Informe Trimestral de Restricciones III-2026

Los primeros 100 MW de SAEB adjudicados en subasta entran en 2030

100 MW
de SAEB con 270 MW FV - Producto 3

390 MWh-día
bloque h9–h21 · 315,87 $/kWh

15 años
desde el 1-ene-2030



Fuentes: Bolsa Mercantil, subasta CLPE (oct-2026); plazos: Sungrow, FISE 2026

05

Aplicaciones y exigencias

Black start, microrredes y nuevos ingresos; y lo que exigen en corriente de falla y en decisiones de ingeniería desde el día uno.

Montaje de bloques BESS en obra · referencia Sungrow

Black start: el BESS reenergiza la red desde 0 V, y en Colombia ya es un servicio exigible



Caso Indiana, EE. UU. · 15 MW / 5,5 MWh

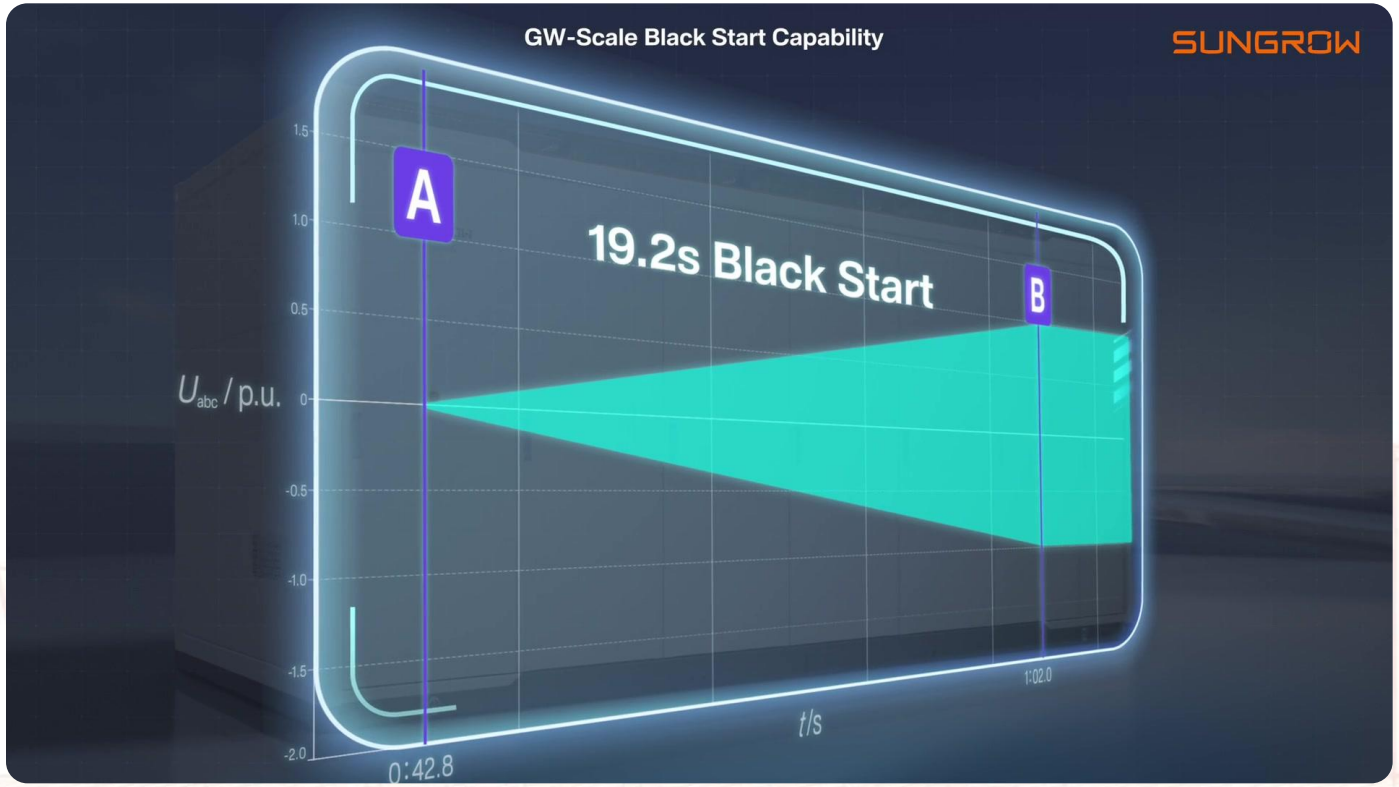
Arrancó dos turbinas de gas de 110 MW
≤ 5 % desbalance de corriente entre PCS

CREG 101 113 · Art. 73

SAEB ≥ 1 MW con GFM deben prestar arranque autónomo si la energía almacenada alcanza. Independientes: energía remunerada a precio de bolsa de la carga. Sin obligación de reservar energía.

Fuentes: Sungrow, Grid-forming Introduction (2026); CREG 101 113, Art. 73

Black start a escala GW: la red se reconstruye desde 0 V, sin una sola máquina síncrona



Demostración a escala GW

19,2 s

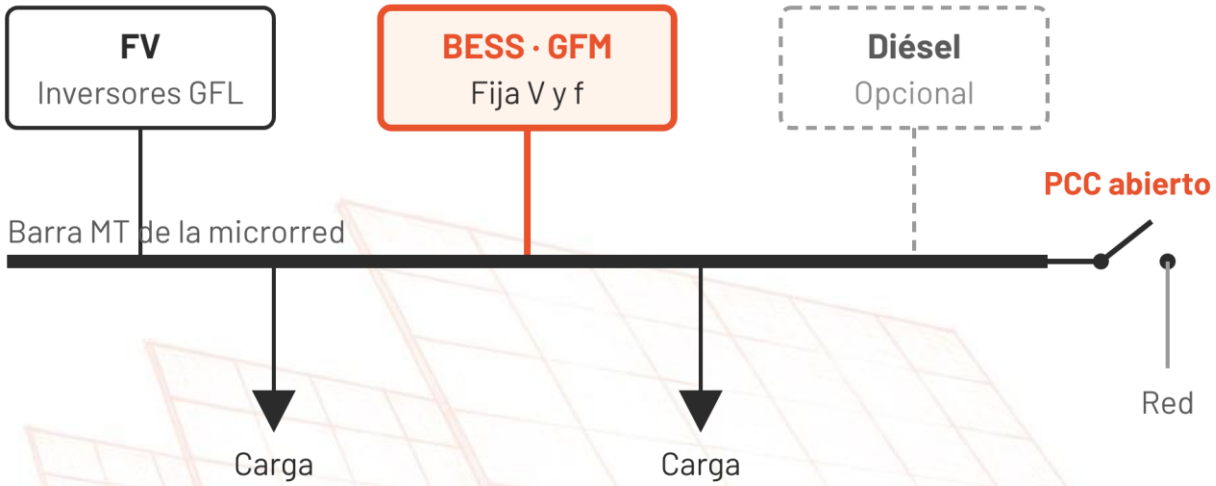
de rampa de tensión, de 0 V a tensión nominal

Sin fuente externa: el BESS fija tensión y frecuencia, energiza transformadores y toma carga.

En Colombia: servicio exigible para SAEB ≥ 1 MW con GFM (Art. 73).

Fuente: Sungrow, GFM Extreme Test con TÜV Rheinland (2026); CREG 101 113

En una microrred aislada no hay red a la cual seguir: el BESS grid-forming es la red



Sin máquina síncrona: inercia, tensión y frecuencia vienen del PCS

Amaala · Arabia Saudita

140 MW FV · 760 MWh BESS

Microrred turística: operación en red, en isla y transiciones validadas.

Microrred minera · China

400 MW FV · 1.600 MWh BESS

Siete bancos RT-LAB en HIL, incluido el arranque en negro secuencial.

Colombia · Zonas no interconectadas

Renovables con baterías grid-forming para dar continuidad y reducir diésel.

Fuentes: Sungrow GTC (2026); MinEnergía, 2° Congreso de Almacenamiento

Más allá del requisito: dónde el GFM ya genera ingresos o evita inversiones

Fortaleza de red · Australia (AEMO)

6–24 M USD

de CAPEX y OPEX evitados por cada GW renovable en red débil, frente a 0,1–0,4 MVAr de STATCOM o compensador síncrono por MW GFL.

Inercia · Europa

Mercados de inercia

Reino Unido contrata estabilidad desde 2022; en Alemania, la guía FNN/VDE define cómo un GFM participa en el mercado de inercia.

Arranque en negro

2,22 mil M USD

mercado global del servicio en 2024. En Colombia, la CREG 101 113 (Art. 73) lo hace exigible para SAEB ≥ 1 MW con GFM.

Puesta en servicio sin red · Arabia Saudita

−1 mes

en PIF II (2,6 GW FV): los inversores en modo fuente de tensión energizaron los subarreglos sin diésel.

Colombia · beneficio/costo según XM (oct-2026)

1,82 y 3,9

B/C de los SAEB grid-forming propuestos en el Caribe (490 MW) y en la Sabana Norte, sin valorar black start, inercia virtual, corriente de cortocircuito, HVRT/LVRT ni amortiguamiento.

Cumplir 1,5 p.u. es un reto de corriente y de térmica, no de energía

Reactiva: la pone el convertidor

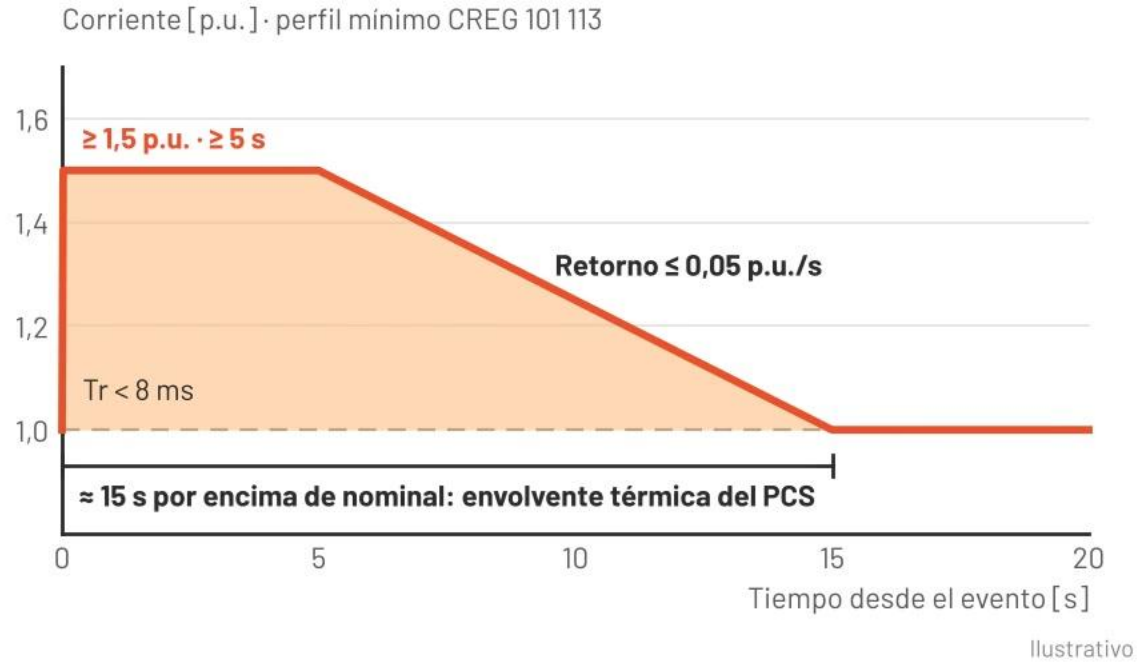
1,5 p.u. de Iq depende de los kVA y de la térmica del PCS, no de la batería.

Activa: la pone la batería

100 MW × 0,5 p.u. × 5 s ≈ **0,07 MWh**. El límite es potencia DC, C-rate y BMS, y el margen que queda si está despachado al 100 %.

Sin priorización: se escala

Id = Iq = 1,2 p.u. → I ideal = 1,70 → F = 1,5 / 1,70 = 0,88 → **Id = Iq ≈ 1,06 p.u.**



Perfil mínimo derivado de CREG 101 113, b.5–b.19; ejemplo ilustrativo

Seis decisiones de ingeniería que se toman en la fase conceptual, no en la puesta en servicio

1 **Dimensionar en el punto de conexión.** Transformador y cables reducen la corriente y la Q que llegan al POC.

2 **PPC diseñado para GFM.** Evita sobreimpulso de P y déficit de Q; suprime corriente circulante entre PCS (3 % → 0,1 %).

3 **Modelos desde la ingeniería básica.** EMT de código real (PSCAD/EMTP), RMS (PSS®E/PowerFactory) y HIL.

4 **Protecciones recalibradas.** Coordinar relés con 1,5 p.u. sostenidos, no con los 3–10 p.u. de una máquina síncrona.

5 **Black start desde el inincio.** Inrush y saturación de transformadores, referencia de tierra, rampa suave y SOC mínimo (≈ 15 %).

6 **Pruebas en el contrato.** Quién certifica (Art. 72) y qué se demuestra en fábrica, en sitio o en EMT.



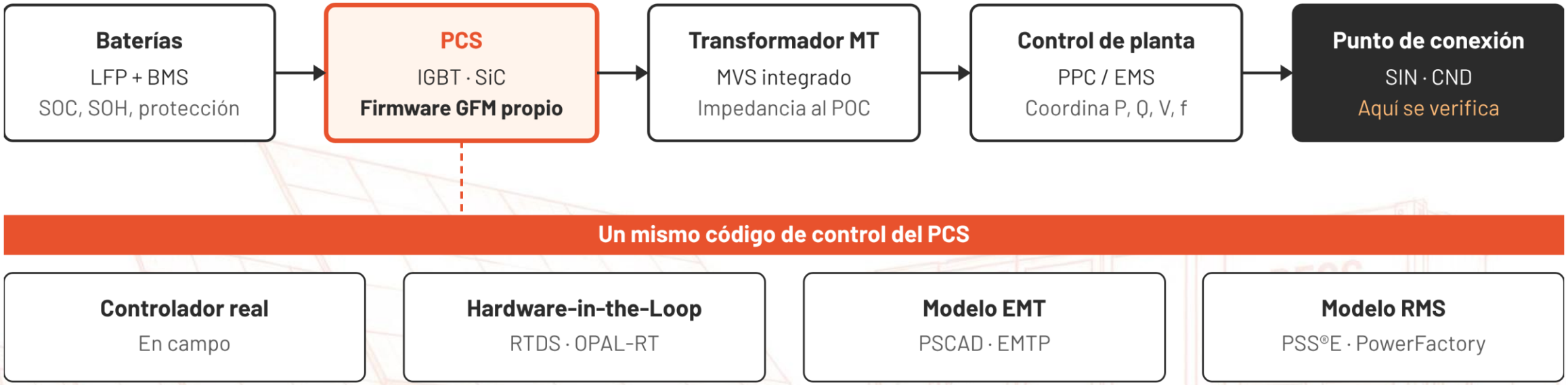
BESS Arica · Chile



BESS del Desierto

Fuentes: Sungrow Grid Technology Center (2026); CREG 101 113; XM v1

Del semiconductor al punto de conexión: un fabricante de PCS controla cada capa del grid-forming



Lo que se valida en HIL y EMT es el mismo algoritmo que opera en campo: justo lo que XM pide con los «modelos de código real».

06

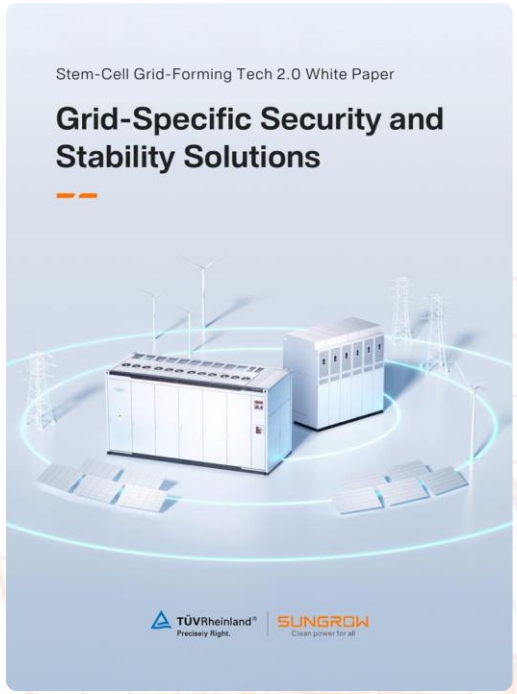
Implementación industrial

Un caso concreto: cómo un fabricante de PCS integra, prueba y despliega grid-forming.



Línea de ensamblaje de convertidores · Sungrow

Grid-Forming: Sungrow coordina batería, convertidor y planta como un solo sistema



Planta control coordinado	**0 V** black start multiunidad	**≤ 10°** error al sincronizar	**Red ↔ isla** conmutación sin saltos
Convertidor soporte CA	**±90°** salto de fase	**40 → 1** caída de SCR	**≤ 2,4 kHz** amortiguamiento
Batería lado DC	**+8 %** descarga con SOC balanceado	**–30,4 %** consumo auxiliar	**3 × In** hardware dimensionado
Simulación de extremo a extremo	**100+** especialistas	**20+** bancos HIL	**1.000+** casos DMAT (AEMO)

Seis capacidades grid-forming de Sungrow, demostradas en laboratorio, en TÜV y en campo



Referencia propia de V y f

Fuente de tensión de baja impedancia; lazo de tensión < 100 µs.



Inercia sintética

Tj ajustable de 2 a 20 s (H de 1 a 10 s); inicio de respuesta ≤ 5 ms.



Corriente de falla

1,5× por 10 s; cortocircuito y secuencia negativa validados.



Red débil

Estable con SCR 1–40; salto de fase ±60° especificado y ±90° demostrado en pruebas.



Amortiguamiento

0,1–2,5 Hz especificado; resistencia positiva de 1 Hz a 2,4 kHz reportada en pruebas.



Isla y black start

Transición red ↔ isla y arranque en negro validados por TÜV.

Fuentes: Sungrow.

Desde su primer proyecto VSG en 2014, Sungrow suma 22 GWh+ en proyectos grid-forming



2014

Primer proyecto VSG multienergía · China



2019

Black start con BESS GFM · Indiana, EE. UU.



2023

PV-VSG grid-forming · Baolin, Hubei



2024

Proyecto multienergía GFM · NEOM



2025

7,8 GWh GFM con black start · Arabia Saudita



2016

ESS aislado en alta montaña · China



2023

Isla offshore con black start · Weizhou



2024

ESS + FV grid-forming · Gansu



2025

Operación en isla FV + BESS GFM · Sichuan

Fuente: Sungrow, «GFM Innovation in Action», OSKA Day 2026

PowerTitan con PCS grid-forming: validación independiente frente a cada requisito de la CREG

TÜV Rheinland · Validación GFM de escenario completo a gran escala

Requisito CREG 101 113	Capacidad Sungrow validada
SCR 1,2–20 (b.1)	SCR 1–40 en lado BT, incluido salto 40 → 1
Salto de ángulo ≤ 60° (b.3)	±60° especificado; ±90° demostrado en pruebas
≥ 1,5 p.u. por ≥ 5 s (b.5–b.9)	1,5 In / 10 s · 1,2 In / 10 min · 1,1 In continuo
Inercia sintética ≥ 3 s (b.10)	Tj 2–20 s (H 1–10 s); inicio de respuesta ≤ 5 ms
Arranque autónomo (b.12)	Black start multibloque desde 0 V, en laboratorio y en campo
Amortiguamiento (b.8)	0,1–2,5 Hz especificado; 1 Hz–2,4 kHz en pruebas
Tr < 8 ms y RoCoF 5 Hz/s	Inicio de respuesta ≤ 5 ms; RoCoF admisible ±5 Hz/s
Regulación primaria (b.15–b.16)	Banda muerta configurable 0–1 Hz (defecto 0,2 Hz); K = 38,5

En LATAM, Sungrow tiene 13,1 GWh de BESS contratados





BESS del Desierto · Chile

Colombia

La Martina (Erco): primer BESS acoplado en DC del país

1,2 GW+ de inversores FV Sungrow contratados

Almacén de repuestos e ingenieros en **Cartagena**

Cuatro ideas para llevarse a su próximo proyecto SAEB

1. **En Colombia, GFM ya no es opcional:** es condición de conexión para todo SAEB de 1 MW o más.
2. **Complementa a la máquina síncrona:** su valor está en la velocidad, la inercia y la estabilidad en red débil.
3. **El grid-forming vive en el firmware del PCS:** por eso importa **quién fabrica el convertidor** y quién valida su código.
4. **Se diseña desde el día uno:** corriente, térmica, controlador de planta y modelos, antes de la ingeniería de detalle.

X CONGRESO INTERNACIONAL
SISTEMAS BESS Y MINIGRANJAS SOLARES

SUNGROW
Clean power for all

10 ANIVERSARIO ExpoSolar Colombia 2026
Energía renovable, futuro imparable

Muchas gracias por su atención

Juan Esteban Garavito

Application Engineer ESS · Sungrow

[+57 3124200636] juan.garavito@sungrowamericas.com sungrowpower.com

Hacemos parte de econexia ECOSISTEMA DIGITAL DE CONEXIONES & NEGOCIOS operado por corferias

Organiza Centro de Ciencia y Sensibilización Ambiental | corferias Generadores de Oportunidades y Progreso | Empresa B Certificada





Fuentes citadas en la ponencia

Regulación y operación del SIN

[1] CREG. Resolución 101 113 de 2026.

[2] XM. Propuesta de requisitos grid-forming, v1 (abr-2026).

[3] XM. IPOELP 2025-I y 2025-II.

[4] XM. 2.º Congreso de Almacenamiento (02-oct-2026) e Informe de restricciones.

[5] Bolsa Mercantil de Colombia. Subasta CLPE (2026).

[6] CREG. Resolución 025 de 1995, Código de Redes.

Normas, guías y eventos

[7] IEEE Std 2800-2022 e IEEE Std 1547-2018.

[8] NERC (2023). White Paper: GFM Functional Specification for BPS-connected BESS.

[9] Ofgem (2022). Decisión GC0137, GB Grid Forming.

[10] AEMO (2023). Voluntary Specification for Grid-Forming Inverters.

[11] AEMO (2017), NGESO (2019) y ENTSO-E (2025). Informes de eventos.

[12] EPRI (2026). State of the Art on GFM Regulation and Deployment.

Fundamentos

[13] EPRI (2025). Grid Forming Inverters: Tutorial.

[14] V. Gevorgian et al., NREL (2020). Dynamic Stability Considerations, ESIG.

[15] A. Barrena (2024). Operación del sistema y grid-forming, Mondragon Unibertsitatea.

Fabricante y validación

[16] Sungrow (2026). TI SC450HX: Grid-Forming Technical Description y Parameters.

[17] Sungrow (2025). Stem-Cell Grid-Forming Tech 2.0; TÜV Rheinland CN26YZH6 001.

[18] Sungrow (2026). GFM Technology and Capability; perfil corporativo; track record LATAM.

[19] Research Nester (2024), citado en [18].

Las animaciones son modelos ilustrativos de elaboración propia (máquina equivalente y curvas esquemáticas); no reemplazan estudios EMT del sitio.