



Comité de estudios CIGRE B4

PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DE UN NUEVO GRUPO DE TRABAJO

WG B4.7

NOMBRE DEL CONVOCANTE

Jorge W. González-Sanchez

TÍTULO

Servicios de flexibilidad basados en convertidores de electrónica de potencia y su simulación digital en tiempo real

EL GRUPO DE TRABAJO APLICA A REDES DE DISTRIBUCIÓN: SÍ

TRANSICIÓN ENERGÉTICA

5/Redes y Flexibilidad

BENEFICIO POTENCIAL DEL GRUPO DE TRABAJO

2/interés potencial para una amplia gama de actores

DIRECCIÓN ESTRATÉGICA

1/Refuerzo del sistema eléctrico del futuro con naturaleza extremo a extremo del CIGRE: responde a la velocidad de los cambios en la industria mediante la preparación y difusión de avances tecnológicos de vanguardia

OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE

7/Energía asequible y no contaminante

9/Industria, innovación e infraestructura

ANTECEDENTES

El aumento de la penetración de recursos basados en convertidores de electrónica de potencia (Inverter Based Resources, IBR), sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS), respuesta de la demanda, sistemas HVDC, FACTS y tecnologías flexibles AC/DC está transformando la provisión de los servicios tradicionales del sistema. Se espera que los servicios de flexibilidad para el soporte de tensión, la seguridad del sistema, la gestión de carga/capacidad, la emulación de inercia y el control primario de frecuencia sean prestados por una combinación de activos a gran escala y recursos energéticos altamente distribuidos, conectados a través de convertidores de electrónica de potencia. Además, estos servicios están a menudo coordinados mediante agregadores, comunidades energéticas y centrales eléctricas virtuales que deben incorporar sistemas de control complejos que interactúan con dispositivos de electrónica de potencia en constante innovación y hasta cambio.

La electrónica de potencia se ha convertido en un pilar de los sistemas eléctricos modernos, pero sigue siendo un área poco conocida en profundidad por muchos ingenieros de potencia. La naturaleza altamente no lineal, conmutada y dependiente de control de sus convertidores hace que su comprensión intuitiva y su modelamiento en programas de simulación digital sean especialmente retadores. Los modelos simplificados a veces no capturan fenómenos críticos, mientras que los modelos detallados pueden ser complejos, pesados computacionalmente y difíciles de validar. Esta brecha entre la realidad física y las herramientas de simulación representa un desafío para el diseño, la operación y la protección de redes con alta penetración de electrónica de potencia. En este contexto, la simulación digital en tiempo real surge como una necesidad para lograr un entendimiento más fiel del comportamiento dinámico de estos sistemas y obtener resultados más confiables para la toma de decisiones.

Las plataformas de simulación digital en tiempo real (RTDS) se están convirtiendo en un habilitador clave para la integración segura y eficiente de recursos de flexibilidad distribuidos y a escala de servicio público en las redes de transmisión y distribución (T&D). Permiten a los operadores de sistema, fabricantes, agregadores e instituciones de investigación reproducir condiciones de operación

realistas y ensayar esquemas avanzados de control y protección en un entorno de laboratorio seguro y totalmente controlable. Las simulaciones convencionales fuera de línea RMS o EMT ya no son suficientes para validar este tipo de interacciones complejas, especialmente cuando intervienen controladores físicos, relés de protección, convertidores de electrónica de potencia o plataformas de control orientadas al mercado. Los simuladores digitales en tiempo real como RTDS, OPAL-RT, Typhoon HIL y plataformas similares permiten realizar ensayos de controlador-y-hardware-en-el-lazo (C-HIL / P-HIL), co-simulaciones con plataformas de mercado y SCADA, y entornos tipo gemelo digital capaces de reproducir en tiempo real tanto redes de transmisión como de distribución.

En este contexto, existe una necesidad clara de disponer de lineamientos internacionales coordinados sobre cómo modelar, implementar y validar servicios de flexibilidad en entornos RTDS, utilizando redes de referencia T&D representativas y arquitecturas de control realistas, así como sobre cómo extraer valor agregado para empresas de servicios públicos, proveedores, universidades y comunidades energéticas, con un énfasis especial en aplicaciones en Colombia.

PROPÓSITO / OBJETIVO / BENEFICIO DE ESTE TRABAJO

El objetivo de este Grupo de Trabajo es desarrollar un marco integral para la aplicación de la simulación digital en tiempo real a sistemas con interfaces de electrónica de potencia para el estudio y comprobación de servicios de flexibilidad en sistemas de potencia, con especial énfasis en comunidades colombianas para:

- Control de tensión y soporte de potencia reactiva en los niveles de transmisión y distribución;
- Seguridad del sistema y gestión de cargabilidad/congestión;
- Emulación de inercia y respuesta rápida de frecuencia a partir de recursos basados en convertidores de electrónica de potencia y BESS;
- Control primario de frecuencia y servicios de reserva a partir de activos distribuidos y agregados.

El Grupo de Trabajo:

- Identificará y estructurará casos de uso relevantes para Colombia, en los que los servicios de flexibilidad puedan ensayarse y calificarse de forma realista en laboratorios de simulación en tiempo real;
- Propondrá enfoques de modelado, configuraciones de prueba e indicadores de desempeño para la simulación en tiempo real de estos

servicios en redes de transmisión y distribución basadas en sistemas colombianos;

- Proporcionará procedimientos de ensayo de laboratorio que puedan ser adoptados por empresas de servicios públicos, fabricantes, agregadores, universidades y comunidades energéticas para reducir riesgos en el despliegue en campo y apoyar el desarrollo y la estandarización de códigos de red.

Los beneficios esperados incluyen:

- Reducción del riesgo técnico y operativo al desplegar nuevos esquemas de flexibilidad y controles de IBR en redes reales;
- Colaboración más eficiente entre los operadores de transmisión (TSO), operadores de distribución (DSO) nacionales, fabricantes, laboratorios de investigación e iniciativas de comunidades energéticas mediante el uso de modelos de referencia compartidos y protocolos de ensayo RTDS;
- Mejor comprensión del valor y las limitaciones de los servicios de flexibilidad bajo condiciones de operación realistas, incluidos escenarios de falla y eventos extremos.

ALCANCE

El Grupo de Trabajo investigará y reportará sobre, aunque no necesariamente limitado a, los siguientes temas:

Casos de uso y servicios del Sistema:

- Definición y clasificación de la electrónica de potencia y sistemas de control para los servicios de flexibilidad relevantes en la operación T&D, tales como: control de tensión, gestión de congestión y límites de cargabilidad, suficiencia y seguridad a corto plazo, emulación de inercia, respuesta primaria de frecuencia y reservas rápidas.
- Correspondencia de estos servicios con los actores típicos (TSO, DSO, agregadores, comunidades energéticas, prosumidores, operadores de BESS) y con sus escalas temporales de operación.
- Plataformas y arquitecturas de simulación digital en tiempo real
- Revisión y comparación de las plataformas RTDS más comunes (p. ej. RTDS, OPAL-RT, Typhoon HIL y similares) y su idoneidad para distintos casos de uso de servicios de flexibilidad.

- Arquitecturas de controlador-hardware-en-el-lazo (C-HIL), hardware-de-potencia-en-el-lazo (P-HIL) y co-simulación (RTDS + plataformas EMS/SCADA/mercado).
- Requisitos de modelado para recursos de flexibilidad
- Modelos en tiempo real de BESS, generación basada en convertidores, máquinas síncronas, cargas controlables, infraestructura de recarga de VE y recursos a escala comunitaria.
- Representación de convertidores grid-forming y grid-following, esquemas de emulación de inercia, algoritmos de control primario de frecuencia y características tensión-potencia reactiva en entornos de tiempo real.
- Redes y escenarios de referencia T&D
- Selección o adaptación de redes de referencia CIGRE y de otros orígenes, representativas de sistemas de transmisión y distribución activa, adecuadas para simulación en tiempo real.
- Definición de escenarios de operación, eventos de contingencia, períodos de alta generación renovable y condiciones de estrés relevantes para los servicios de flexibilidad.
- Procedimientos de ensayo de laboratorio para servicios de flexibilidad

Diseño de secuencias de prueba y criterios de desempeño para:

- Servicios de soporte de tensión (p. ej. controles Q(V), Volt/VAR, Volt/Watt);
- Gestión de congestión y cargabilidad mediante redespacho de potencia activa y cambios de topología;
- Emulación de inercia, respuesta rápida de frecuencia y control primario;
- Operación coordinada de BESS y otros DER para la provisión de múltiples servicios.
- Lineamientos para la repetibilidad, escalabilidad y seguridad en los ensayos de laboratorio con RTDS.
- Coordinación TSO–DSO–agregador en entornos RTDS
- Representación de las interfaces TSO–DSO, mercados de flexibilidad y plataformas de agregación en la simulación en tiempo real, incluyendo el intercambio de datos y las jerarquías de control.
- Emulación de esquemas de comunidades energéticas y plataformas locales de flexibilidad que interactúan con los operadores del sistema.
- Validación, benchmarking e interoperabilidad
- Comparación entre estudios EMT/RMS fuera de línea y resultados en tiempo real para casos de uso seleccionados.
- Métricas y procedimientos para validar dispositivos de control y protección, algoritmos de flexibilidad y esquemas de coordinación utilizando RTDS.

- Aspectos de interoperabilidad al combinar múltiples simuladores o laboratorios (experimentos RTDS multi-sitio).
- Recomendaciones, brechas y tendencias futuras
- Identificación de brechas de investigación y estandarización relacionadas con la validación en tiempo real de servicios de flexibilidad.
- Recomendaciones para empresas de servicios públicos, proveedores e instituciones de investigación sobre cómo integrar los ensayos basados en RTDS en sus procesos de innovación y despliegue.
- Vínculos con conceptos emergentes como los gemelos digitales para sistemas de potencia y la co-simulación ciber-física.

OBSERVACIONES

El GT se apoyará en, y complementará, las actividades y publicaciones existentes de CIGRE, entre ellas, aunque no limitadas a:

Application of Real-Time Digital Simulation in Power Systems, CIGRE WG C4.64 / C4.65 TOR y materiales relacionados.

Guide to Develop Real-Time Simulation Models for HVDC Operational Studies, Technical Brochure 864 (WG B4.74).

System Operation Emphasizing DSO/TSO Interaction and Coordination, Technical Brochure 733.

Flexibility Provision from Distributed Energy Resources, JWG C6/C2.34 Terms of Reference and related outputs.

Distributed Energy Resources Aggregation Platforms for the Provision of Flexibility Services, WG C6.35.

Power System Dynamic Modelling and Analysis in Evolving Networks, CIGRE Green Book GB-16, which covers EMT and real-time simulation aspects.

Otras referencias académicas e industriales relevantes sobre avances en simulación en tiempo real de sistemas de potencia y energía, y sobre productos y mercados de flexibilidad.

El Grupo de Trabajo se coordinará, cuando sea apropiado, con otros Comités de Estudio de CIGRE (p. ej. C2, C4, C5, C6).

ENTREGABLES Y CRONOGRAMA PROPUESTO

Brochure Técnico que resuma:

Casos de uso, modelos, arquitecturas RTDS y procedimientos de ensayo de laboratorio para convertidores de electrónica de potencia y sus controles orientados para servicios de flexibilidad;

Redes de referencia y ejemplos de casos de estudio para sistemas T&D;

Recomendaciones y buenas prácticas para empresas de servicios públicos, fabricantes, agregadores, universidades y laboratorios de comunidades energéticas.

Artículo en conferencia CIGRE.

Webinar que presente los principales resultados y ejemplos prácticos de ensayos de flexibilidad basados en RTDS para interfaces de electrónica de potencia y sus controles.

Cronograma indicativo:

Q1 2026 – Constitución del Grupo de Trabajo y vinculación de miembros.

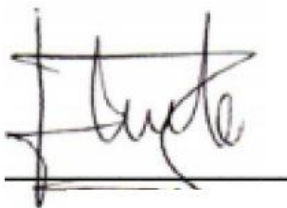
Q3 2026 – Finalización del plan de trabajo detallado y selección de casos de uso.

Q4 2027 – Borrador del Brochure Técnico para revisión del Comité de Estudio.

Q2 2028 – Brochure Técnico final y resumen para ELECTRA.

Q4 2028 – Tutorial y webinar.

APROBACIÓN POR EL RESPONSABLE CONSEJO TÉCNICO:



FECHA: 04/12/2025