

red eléctrica

Una empresa de Redeia

Guía para la implementación de controles POD

Versión 2

Dirección General de Operación
Dirección de Desarrollo del Sistema
Departamento de Fiabilidad del Sistema Eléctrico
Septiembre 2024

Control de modificaciones

Versión	Fecha	Modificaciones
1.0	27/06/2024	Versión inicial.
2.0	24/09/2024	Aspectos de formato, secciones 8 y 9, y modificaciones menores.



Índice

1	Introducción	1
2	Controles POD en las propuestas de normativa y procedimientos de operación	3
2.1	Controles POD en el borrador del RfG2.....	3
2.2	Controles POD en el borrador del P. 0. 12.2.....	3
3	Controles POD	5
3.1	Fundamentos.....	5
3.2	Esquemas habituales de controles POD.....	7
3.3	Umbral de activación en controles POD-P	10
4	Frecuencias de oscilación de los modos electromecánicos	12
5	Evaluación del comportamiento de controles POD	13
5.1	Criterios de aceptación de controles POD	14
5.1.1	Criterio de aceptación de robustez del control POD.....	14
5.1.2	Criterio de aceptación de eficacia del control POD	15
5.2	Particularidades de la evaluación del comportamiento de controles POD en el SEPE y en los SENP	16
5.3	Particularidades de la evaluación del comportamiento de controles POD en sistemas de almacenamiento de energía.....	17
6	Consideraciones adicionales	18
6.1	Opciones de controles POD: a nivel MPE o a nivel convertidor UGE.....	18
6.1.1	A nivel control de planta (PPC).....	18
6.1.2	A nivel de convertidor (UGE).	18
6.2	Señales de entrada en controles POD	19
6.3	Procesamiento de la señal de entrada de los controles POD y modelado	20
6.4	Variantes de los controles POD-P y POD-Q	20
6.5	Variantes del control POD-Q.....	21
6.6	Particularidades de controles POD según la tecnología.....	22
7	Ideas principales (resumen) de la propuesta de especificaciones técnicas para controles POD.....	23
8	Exención de responsabilidades	26
9	Canales de contacto	26
10	Referencias	27



1 Introducción

Las oscilaciones electromecánicas, también conocidas como oscilaciones de potencia, es un fenómeno de estabilidad de ángulo de sistemas eléctricos ante pequeñas perturbaciones [1]. Las oscilaciones electromecánicas involucran a generadores del sistema que oscilan entre sí a través del sistema eléctrico. Las oscilaciones electromecánicas se ven reflejadas en las distintas variables del sistema eléctrico como frecuencias y tensiones en los nudos, o flujos de potencia o flujos de corriente por las ramas del sistema, entre otras. Las oscilaciones electromecánicas se pueden dividir entre oscilaciones locales y oscilaciones inter-área [1], [2]. Las oscilaciones locales involucran oscilaciones entre grupos de generadores coherentes que se encuentran próximas entre sí y la frecuencia de oscilación de estos modos ronda los 0,7-2,5 Hz. Las oscilaciones inter-área involucran oscilaciones entre grupos de generadores coherentes en áreas lejanas y la frecuencia de oscilación de estos modos ronda los 0,1-1 Hz. Si bien tradicionalmente el fenómeno de estabilidad de ángulo ante pequeña perturbación en sistemas eléctricos estaba dominado por las dinámicas de las máquinas síncronas [3], en sistemas modernos los dispositivos de electrónica de potencia pueden tener un impacto significativo en este tipo de fenómeno de estabilidad, clasificado como *estabilidad dominada por convertidores de potencia – interacciones lentas* [4]. Incidentes en los últimos años ponen de manifiesto la problemática de las oscilaciones inter-área en el sistema continental europeo [5].

Una de las formas más eficaces de amortiguar oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos es mediante controles suplementarios en los distintos dispositivos del sistema:

- Máquinas síncronas: Mediante el uso de estabilizadores de potencia (Power System Stabilizer, PSS). Este grupo incluye módulos de generación de electricidad síncronos y compensadores síncronos.
- Instalaciones que contengan dispositivos de electrónica de potencia, como módulos de parque eléctrico (MPE), sistemas de almacenamiento de energía (ESS), sistemas flexibles de transporte de energía en corriente alterna (Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS) o sistemas de transporte de energía en corriente continua en alta tensión (High Voltage Direct Current, HVDC): Mediante el uso de controles para el amortiguamiento de oscilaciones de potencia (Power Oscillation Damping, POD).

En los últimos años, se ha estudiado el uso de controles POD en convertidores tipo fuente de tensión (Voltage Source Converter, VSC) con control *seguidor de red* (grid following, GFL). En concreto, se pueden encontrar ejemplos de controles POD en generadores eólicos [6], [7], [8], [9], [10], [11], MPE fotovoltaicos [12], [13], convertidores de potencia en general (incluyendo sistemas, con sistemas de almacenamiento de energía) [14], [15], sistemas FACTS [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], y sistemas de transporte de energía en corriente continua en alta tensión con convertidores tipo fuente de tensión (VSC-HVDC) [23], [24], [25], [26], [27], [28]. Además de sistemas con convertidores VSC con control GFL como los ejemplos antes mencionados, recientemente también se han propuesto controles POD en convertidores VSC con control *formador de red* (grid forming, GFM) [29]. Por último, se ha de mencionar que también se pueden implementar controles POD en sistemas HVDC con convertidores fuente de corriente (LCC-HVDC) [30], [31], [32].

En la propuesta de revisión de la normativa europea para requisitos técnicos de generadores (Directiva europea UE 2016/631 (RfG) [33]), sometida por ACER a consulta pública en julio de 2023, se proponen requisitos técnicos para controles POD. El documento borrador se conoce como Requirements for Generators 2 (RfG2) [34]. A su vez, en la propuesta borrador del Procedimiento de Operación (PO) 12.2 [35], remitida al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) del Gobierno de España en junio de 2022, se proponen requisitos técnicos para controles POD, en la línea de la normativa europea vigente [33], [36] y española [37]. Estos requisitos son de carácter general y no imponen variantes específicas de controles POD. Independientemente de la libertad en la forma de un control POD particular, es imprescindible que los controles POD propuestos estén alineados con las capacidades técnicas que se espera de ellos.

El operador del sistema (OS) propuso la creación de un grupo de trabajo¹ entre los distintos agentes del sector eléctrico para la redacción de una especificación de las funciones técnicas de los controles POD. El objetivo de este grupo de trabajo es tener una visión común y consensuada sobre este tipo de controles, sus

¹ El GT_POD se desarrolló de junio 2023 a junio 2024, y como resultado se ha elaborado esta guía.

especificaciones técnicas, criterios de admisibilidad, su posible implementación y sus peculiaridades dependiendo de la tecnología.

En este documento se discute la implementación y especificaciones técnicas para controles POD en las instalaciones siguientes:

- MPE eólicos o fotovoltaicos.
- Sistemas de almacenamiento de energía (Energy Storage Systems, ESS).
- Instalaciones híbridas.
- Sistemas de corriente continua en alta tensión (HVDC).
- Sistemas FACTS.

En este documento se utilizará el término de *módulo de almacenamiento de electricidad (Electricity Storage Module, ESM)*, utilizado en el documento borrador de RfG2 [34]. Un ESM engloba tanto a sistemas de almacenamiento de energía de uso dedicado, como a instalaciones híbridas. Por otra parte, según la propuesta de [34], un ESM puede ser de tipo módulo de generador de electricidad síncrono (MGES) o de tipo MPE. Los controles POD tratados en este documento solo aplican para el caso de sistemas ESM de tipo MPE y se utilizará el término ESM-MPE a largo de este documento para referirse a ellos.

El documento describe los controles POD en convertidores de potencia de tipo VSC con control GFL, que es el control más extendido hoy en día, discutiendo las particularidades de cada tipo de sistema. Se discutirán aspectos específicos sobre la implementación de controles POD dependiendo de la tecnología y evaluación de su comportamiento. El documento se enfoca principalmente en controles POD aplicados a MPE y ESM-MPE. Por último, se resumirán los requisitos técnicos aplicables a controles POD.

En el documento, se tratan las capacidades técnicas que los controles POD pueden proporcionar al sistema eléctrico, pero no se describen métodos particulares de diseño de controles POD. Se recalca la relevancia de la implementación de unos correctos ajustes de los parámetros de los controles POD, ya que están directamente ligados a su efectividad. Sin embargo, el documento no trata los métodos particulares de diseño de controles POD debido a que se considera que el fabricante debe tener libertad a la hora de escoger el método utilizado para determinar los ajustes de los parámetros de los controles POD, siempre que proporcionen las capacidades técnicas al sistema que se espera de ellos.

En el grupo de trabajo y en la elaboración de este documento han participado las siguientes entidades:

- Red Eléctrica: operador del sistema (coordinador del grupo de trabajo).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) del Gobierno de España (supervisor del grupo de trabajo).
- Asociaciones/entidades representantes de empresas de distribución de energía eléctrica: aelec, ASEME, CIDE y UFD.
- Asociaciones de empresas de sistemas de almacenamiento de energía: AEPIBAL y ASEALEN.
- Asociaciones de empresas de energías renovables: AEE, APPA Renovables, UNEF.
- Laboratorios acreditados y empresas certificadoras acreditadas: SGS y Fundación CIRCE.

En el grupo de trabajo se han realizado reuniones, dando lugar a discusiones técnicas entre los participantes. También, tanto el OS como el resto de los participantes del grupo de trabajo han presentado resultados de simulación, dando soporte al contenido técnico de este documento.

En el grupo de trabajo se ha planteado la necesidad de proyectos piloto a nivel nacional para pruebas de concepto de controles POD. El OS ha manifestado su apoyo a este tipo de iniciativas y el objetivo es llevarlas a cabo en los próximos años. Actualmente, ya hay ejemplos de instalaciones con controles POD en el sistema eléctrico español. Por ejemplo, el enlace VSC-HVDC de interconexión España-Francia 2x1000 MW (INELFE-1) [38], en operación desde 2015, dispone de controles POD [28]. Por su parte, la planificación eléctrica del periodo 2020-2026 contempla la instalación de dispositivos STATCOMs (4x150 Mvar) con controles POD en distintos puntos del sistema [39]. También, se ha realizado un proyecto piloto de un parque eólico con sistema de almacenamiento de energía en el que se han probado controles POD [40]. Independientemente de estos ejemplos, es conveniente la realización de más proyectos piloto en los próximos años para que los controles POD alcancen una madurez tecnológica suficiente para que la integración de controles POD sea eficaz y viable.

Por último, se recalca que este es un documento vivo, en el sentido de que el grupo de trabajo de controles POD podría consensuar incluir modificaciones del documento en un futuro si se considerase necesario, en base a la experiencia en la industria en este tipo de controles durante los próximos años.

2 Controles POD en las propuestas de normativa y procedimientos de operación

A continuación, se presenta el texto literal relacionado con controles POD de los siguientes documentos:

- Documento borrador de *Requirements for Generators 2 (RfG2)* (normativa europea).
- Documento borrador de *Procedimiento de Operación (P. O.) 12. 2*.

2.1 Controles POD en el borrador del RfG2

En el documento borrador de normativa de requisitos técnicos para generadores RfG2 (a fecha de redacción de este documento) [34] se hace referencia a los controles POD en las siguientes partes:

- Artículo 21.2.f (generadores tipo C):
*With regard to **power oscillations damping control**, if specified by the relevant TSO a power park module shall have a power oscillation damping function which, through the control of the active power, reactive power, or both, helps to attenuate the power oscillations. be capable of contributing to damping power oscillations. The power oscillation damping shall be able to damp inter-area oscillations in the range of, at least, 0,1 Hz – 1,0 Hz. The voltage and reactive power control characteristics of power park modules must not adversely affect the damping of power oscillations.*
- Artículo 22.2 (generadores tipo D):
*2. With regard to **power oscillations damping control**, type D power park modules shall have a power oscillation damping function which helps to attenuate the power oscillations, through the control of the active power, reactive power, or both. The power oscillation damping shall be able to damp inter-area oscillations in the range of, at least, 0,1 Hz – 1,0 Hz. The relevant TSO in co-ordination with the relevant system operator shall have the right to request and approve the tuning of the power oscillation damping by the power-generating facility owner to damp the inter-area oscillation mode based on frequency ranges specified by the relevant TSO in coordination with adjacent TSO or TSOs. The relevant TSO shall have the right to request the tuning of the power oscillation damping by power-generating facility owner to damp the local oscillation mode, in which the power park modules is oscillating against the network. The proposed power oscillation damping control shall be approved by the relevant TSO.*

A su vez, en el RfG2 se indica:

- Sección “Whereas (3)-(s1),
The requirements on electricity storage are considered to be the same as those on power generation modules unless explicitly stated otherwise in this Regulation.

2.2 Controles POD en el borrador del P. O. 12.2

En el documento borrador de P. O. 12.2 (a fecha de redacción de este documento) [35] se hace referencia a los controles POD en las siguientes partes:

- Módulos de generación de electricidad que no tengan consideración existente – Módulos de generación de electricidad del SEPE – Requisitos de frecuencia – Control de la potencia (sección 5.1.1.1)
*Los controles de la potencia de despacho (de establecimiento, de limitación, de limitación de rampa, de anti vertido en autoconsumidores o si el módulo de generación de electricidad dispone de un sistema de control que impida que la potencia activa que pueda inyectar a la red supere la capacidad de acceso concedida), se diseñarán de forma que no se impidan las inyecciones transitorias de potencia acumuladas derivadas de la regulación potencia frecuencia (MRPF, MRPFL-O y MRPFL-U) ni, en su caso, de la emulación de inercia, **amortiguamiento de oscilaciones** u otros controles incrementales de la potencia del módulo de generación de electricidad.*

- Módulos de generación de electricidad que no tengan consideración existente - Módulos de generación de electricidad de los SENP - Requisitos de tensión - Amortiguamiento de las oscilaciones de potencia para módulos de parque eléctrico de tipo C y D (sección 5.2.2.4)
*En el caso de no contribuir al **amortiguamiento de las oscilaciones de potencia**, el diseño de todos sus controles será de tal forma que se asegure que no generarán o contribuirán a desamortiguar **oscilaciones de potencia** entre 0,2 Hz y 2,5 Hz. No obstante, el operador del sistema podrá establecer valores diferentes por subsistema eléctrico. Estos nuevos valores deberán ser comunicados al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico que deberá pronunciarse sobre los mismos en el plazo de un mes. Transcurrido ese plazo sin pronunciamiento expreso, éste se entenderá realizado en sentido favorable.*
- Instalaciones híbridas – Modalidad A (sección 10.1)
*Los equipamientos de almacenamiento de parque eléctrico de tipo C o D deberán disponer de un **sistema POD-Q** (Power Oscillation Damping), módulo destinado a amortiguar oscilaciones mediante potencia reactiva, y **POD-P** (Power Oscillation Damping), módulo destinado a amortiguar oscilaciones mediante potencia activa, tanto en generación como en consumo en su caso. Dependiendo del tipo de almacenamiento y para evitar un envejecimiento prematuro del mismo, el control **POD-P** solo se activará cuando la amplitud de la frecuencia de oscilación supere un umbral definido por el operador del sistema. El control se mantendrá activo hasta que la amplitud de la frecuencia de oscilación permanezca durante 5 minutos por debajo del umbral. En el caso de tecnologías de almacenamiento o sistemas híbridos que permitan este control de manera continua sin un envejecimiento extra, el operador del sistema podrá mantener activo este control de manera continua. La integración de estas funciones podrá ser implementada en un plazo transitorio de 1 año a partir de la entrada en vigor del presente procedimiento.*
- Instalaciones híbridas – Modalidad B (sección 10.2)
*Si el conjunto es de parque eléctrico de tipo C o D deberá disponer de **POD-Q** (Power Oscillation Damping), módulo destinado a amortiguar oscilaciones mediante potencia reactiva, y **POD-P** (Power Oscillation Damping), módulo destinado a amortiguar oscilaciones mediante potencia activa, tanto en generación como en consumo en su caso en las mismas condiciones que se requiere en la modalidad A.*
- Sistemas HVDC y módulos de generación de electricidad en corriente continua - Requisitos para el SEPE - Requisitos de frecuencia (sección 9.1.1.1)
Los controles de la potencia de despacho (de establecimiento, de limitación, de limitación de rampa o si el módulo de parque eléctrico en corriente continua dispone de un sistema de control, que impida que la potencia activa que pueda inyectar a la red supere la capacidad de acceso concedida), cumplirán los mismos requisitos de diseño establecidos para los módulos de generación de electricidad del SEPE.
- Sistemas HVDC y módulos de generación de electricidad en corriente continua - Requisitos para los SENP - Requisitos de frecuencia - Capacidad de amortiguación de oscilaciones de potencia (sección 9.2.1.4)
*Los sistemas HVDC de los SENP deberán amortiguar posibles **oscilaciones electromecánicas** en el rango de frecuencia de 0,2 Hz a 2,5 Hz modificando el correspondiente rango establecido en el apartado 13 del Anexo III de la Orden TED 749/2020 para los sistemas HVDC del SEPE.*
- Sistemas de almacenamiento independiente (sección 11)
Si el equipamiento de almacenamiento inyecta y absorbe su energía a la red a través de alternadores o convertidores electrónicos propios, y éste no forma parte de una instalación híbrida, cumplirá los requisitos técnicos correspondientes al equipamiento de almacenamiento según la modalidad A establecidos en el apartado 10.

3 Controles POD

En esta sección se describen de forma general los controles POD en instalaciones que involucran convertidores tipo *seguidor de red* (grid following, GFL) y su implementación según esquemas habituales, con fines ilustrativos. Se considera de forma genérica un convertidor GFL representando una instalación, con el fin de describir de forma general los controles POD. El documento hará referencia a esta instalación de forma genérica como *dispositivo GFL*.

3.1 Fundamentos

Se considera un convertidor de tipo fuente de tensión (Voltage Source Converter, VSC) con control GFL (*dispositivo GFL*) conectado al sistema, como el de la Figura 1. Las inyecciones de potencia activa y reactiva del dispositivo GFL se representan como P y Q , respectivamente, y el fasor de su inyección de corriente como \bar{I} . La tensión en el punto de conexión se representa como $\bar{V} = V\angle\theta$ y la frecuencia en el punto de conexión como ω (pu). Se asume una estructura de control sencilla, por facilitar el análisis:

- Control de potencia activa (P).
- Control de potencia reactiva (Q).

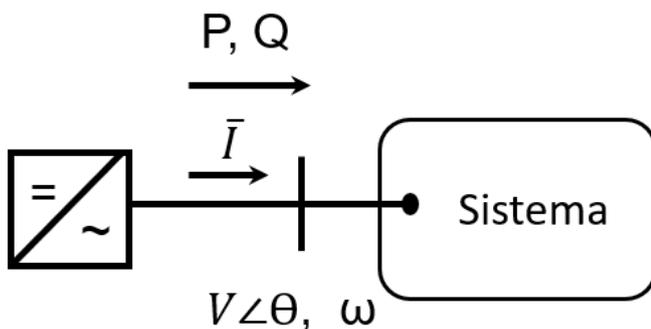


Figura 1: Dispositivo GFL.

Un control POD (Power Oscillation Damping) tiene como objetivo amortiguar oscilaciones electromecánicas en el sistema eléctrico (también conocidas como oscilaciones de potencia). El dispositivo GFL puede contribuir al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas mediante controles suplementarios de dos formas:

- Modulación de la inyección de potencia activa (POD-P).
- Modulación de la inyección de potencia reactiva (POD-Q).

Se ha de mencionar que los controles POD-P están ligados a la fuente primaria de energía del convertidor. En sistemas de almacenamiento de energía, un control POD-P se podría implementar con funcionalidad plena y garantizada si se reserva una banda de operación de potencia y de energía. En cambio, en un MPE un control POD-P se podría implementar con reserva específica para esta aplicación, o con funcionamiento únicamente *a bajar* (cuando no exista fuente primaria a subir disponible) o con sistema de almacenamiento de energía adicional.

En general, pueden existir distintas opciones de controles POD:

- Controles POD con distintas entradas. Por ejemplo, frecuencia en el punto de conexión, tensión en el punto de conexión, variables remotas (frecuencia de nudo lejano, etc...), o combinación de señales.
- Controles POD con distintas salidas: POD-P: referencia suplementaria de potencia activa, de corriente de eje directo, etc... POD-Q: referencia suplementaria de potencia reactiva, de corriente de eje transverso, o de tensión, etc...
- Controles POD con distintas estructuras de control.

Sin embargo, en este documento se describirá únicamente la estructura de controles POD más habitual y consolidada. Se buscarán controles POD-P y POD-Q:

- Eficaces
- Robustos

La Figura 2 muestra un esquema general de controles POD en dispositivos GFL. El control POD-P tiene como entrada la señal y_P y como salida una referencia suplementaria de inyección de potencia activa ($\Delta P^{ref,POD}$). El control POD-Q tiene como entrada la señal y_Q y como salida una referencia suplementaria de inyección de potencia reactiva ($\Delta Q^{ref,POD}$).

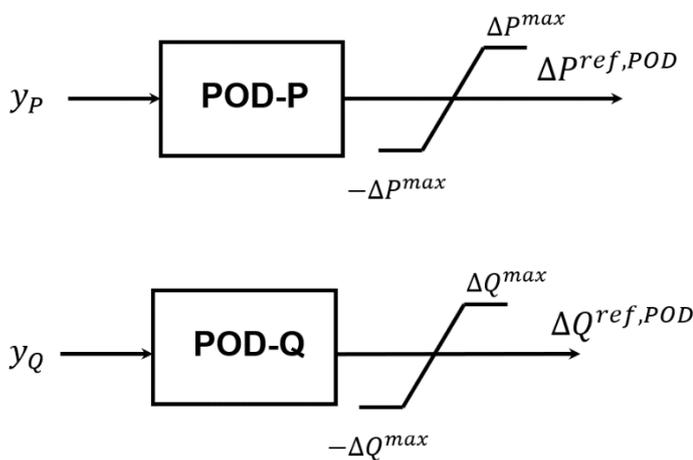


Figura 2: Esquema general de controles POD.

Las referencias de inyecciones de potencia activa y reactiva vienen dadas por:

$$P^* = P_0 + \Delta P^{ref,POD} \quad (1)$$

$$Q^* = Q_0 + \Delta Q^{ref,POD} \quad (2)$$

donde:

- P_0 es un término de referencia inyección de potencia activa constante.
- Q_0 es un término de referencia inyección de potencia reactiva constante.
- $\Delta P^{ref,POD}$ es la referencia suplementaria de potencia activa proporcionada por el control POD-P.
- $\Delta Q^{ref,POD}$ es la referencia suplementaria de potencia reactiva proporcionada por el control POD-Q.

Independientemente de las particularidades de cada implementación, el comportamiento de los controles POD debe tener las siguientes características generales:

- Un control POD debe contribuir al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas del sistema eléctrico.
- Un control POD debe estar enfocado a pequeña perturbación. Es decir, en la medida de lo posible, un control POD deberá actuar de forma continua ante pequeñas perturbaciones, salvo que se indique lo contrario en casos particulares debido a aspectos específicos relacionados con la tecnología de la instalación.
- Los parámetros específicos de un control POD deben garantizar que las acciones de control vayan en la dirección correcta para contribuir al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas del sistema eléctrico.
- Los parámetros específicos de un control POD deben garantizar que las acciones de control sean suficientemente significativas para contribuir al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas del sistema eléctrico, pero garantizando que el sistema sea estable.
- El control POD debe tener un parámetro de saturación, para limitar la acción de control ante perturbaciones grandes (ΔP^{max} y ΔQ^{max} en la Figura 2).
- El control POD debe tener los elementos de filtrado necesarios para lograr que sea eficaz para las señales de entrada consideradas.
- Un control POD no debe actuar en régimen permanente cuando la entrada tiene un valor medio (“offset”).

3.2 Esquemas habituales de controles POD

La Figura 3 muestra la estructura general de controles POD-P y POD-Q en dispositivos GFL, siguiendo la implementación más habitual. Debe quedar claro que la implementación de controles POD descrita en esta subsección es una opción posible basada en esquemas habituales de este tipo de controles, pero este documento no está exigiendo esta implementación particular para los controles POD. Los objetivos de incluir esta descripción de implementación habitual de controles POD en esta subsección son los siguientes:

- Mostrar un ejemplo de implementación de controles POD, siguiendo los diagramas de bloques más habituales y utilizando información pública. Esto busca ser de utilidad y ayudar a los distintos agentes a familiarizarse o profundizar más sobre controles POD, en caso de necesitarlo.
- Con fines ilustrativos.

El esquema general de los controles POD siguiendo la implementación más habitual (Figura 3) contiene:

- Filtro paso bajo.
- Filtro wash-out (filtro paso alto).
- Filtros lead/lag (filtros de compensación de fase).
- Ganancia del control.
- Parámetros de saturación del control.

En la Tabla 1 se pueden identificar los parámetros de cada bloque con una breve descripción.

Esta estructura general de controles POD ha sido ampliamente estudiada en la literatura técnica (ver referencias [14], [18], [41], por ejemplo) y es análoga a la utilizada en estabilizadores de potencia (Power System Stabilizer, PSS) [42].

Siguiendo la práctica habitual de controles POD y de PSSs, se asume que los parámetros de los controles POD de la Figura 3 están en magnitudes unitarias (pu) referidas a la potencia aparente nominal del dispositivo en MVA. Es importante remarcar que el fabricante podrá utilizar la base para las magnitudes unitarias que considere oportuna en su sistema de control POD, o incluso en magnitudes reales, por lo que no se impone el uso de una base determinada.

Se puede implementar con una estructura simétrica para el POD-P y para el POD-Q, como el de la Figura 3. El control POD-P tiene un “-1” en su diagrama de bloques, debido a que, para una misma señal de entrada, el control POD-P y el control POD-Q típicamente deben tener dirección contraria, en general. Los controles POD-P y POD-Q podrían estar activados simultáneamente (POD-PQ).

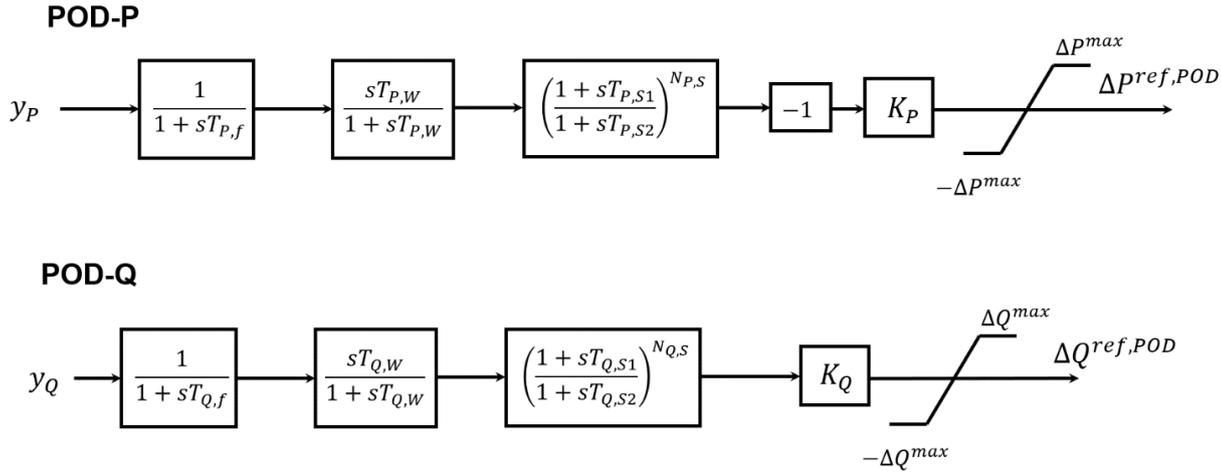


Figura 3: Esquema general de controles POD con una implementación habitual.

En el dominio de Laplace, las referencias de potencia activa y reactiva suplementarias proporcionadas por los controles POD-P y POD-Q vienen dadas por:

$$\Delta P^{ref,POD} = -K_P \cdot \frac{sT_{P,W}}{1 + sT_{P,W}} \cdot \frac{1}{1 + sT_{P,f}} \cdot \left(\frac{1 + sT_{P,S1}}{1 + sT_{P,S2}} \right)^{N_{P,S}} \cdot y_P \quad (3)$$

$$\Delta Q^{ref,POD} = K_Q \cdot \frac{sT_{Q,W}}{1 + sT_{Q,W}} \cdot \frac{1}{1 + sT_{Q,f}} \cdot \left(\frac{1 + sT_{Q,S1}}{1 + sT_{Q,S2}} \right)^{N_{Q,S}} \cdot y_Q \quad (4)$$

Los modos electromecánicos de interés deben ser observables en las variables de entrada de los controles POD-P y POD-Q (y_P e y_Q , respectivamente) y, en general, puede existir múltiples opciones que resulten en controles POD-P y POD-Q eficaces y robustos.

Una variable de entrada para los controles POD-P y POD-Q que presenta buenas propiedades de robustez es la desviación de frecuencia en el punto de conexión:

$$y_P = y_Q = \Delta\omega \text{ (pu)} \quad (5)$$

donde: $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ con $\omega_0 = 1$ pu la frecuencia nominal en el terminal del convertidor. Las ganancias son positivas (fijarse en el criterio de signos). Se ha de notar que usar desviación de frecuencia (ω) o frecuencia (ω) como entradas es equivalente, debido al filtro paso alto (wash-out).

En general, cuando se usa la desviación de frecuencia como señal de entrada las ganancias de los controles POD-P y POD-Q de la Figura 3 suelen ser positivas ($K_P \geq 0$ y $K_Q \geq 0$), aunque esto dependerá del diseño particular de los controles POD, de la respuesta dinámica de la instalación y sus controles, y de su localización.

En convertidores GFL, la frecuencia, ω , se mide con un Phase-Locked Loop (PLL) y esta señal se puede usar directamente como la entrada de los controles POD, o, alternativamente, se pueden utilizar otros métodos de estimación de la frecuencia.

La Tabla 1 presenta una descripción de los parámetros de controles POD-P y POD-Q y valores típicos, asumiendo controles POD-P y POD-Q usando desviación de frecuencia como entrada. En la cuarta columna se indica si el parámetro es diseño/fijo. Se ha de recalcar que los controles POD-P y POD-Q podrían estar activos simultáneamente (POD-PQ).

Tabla 1: Parámetros de los controles POD-P y POD-Q. Parámetros típicos usando como entrada la desviación de frecuencia en pu, con fines ilustrativos.

Control	Parámetro	Descripción	Diseño/fijo	Comentario
POD-P	K_p	Ganancia	Diseño	Ganancia para obtener un amortiguamiento razonable del modo o modos de interés en el caso estudio a analizar. Valores típicos de ganancia para un control POD-P usando desviación de frecuencia (en pu) como entrada: en el rango [-400, 400] pu (pu con respecto a la potencia aparente nominal del convertidor). Normalmente $K_p \geq 0$, aunque podría haber excepciones en casos particulares.
	$T_{P,S1},$ $T_{P,S2}$	Filtros lead/lag	Diseño	Compensación de fase necesaria. Existe la opción de despreciar este filtro. En general, un control POD-P puede ser eficaz sin necesidad de este filtro, siempre y cuando el control de potencia activa del convertidor sea lo suficientemente rápido.
	$N_{P,S}$	Exponente filtros lead/lag	Fijo	Valores típicos: $N_{P,S} = 1$, $N_{P,S} = 2$ o $N_{P,S} = 3$. Valor de referencia: $N_{P,S} = 2$.
	$T_{P,W}$	Filtro wash-out	Fijo	Valores típicos entre 1-20 s. Valor de referencia: $T_{P,W} = 5$ s.
	$T_{P,f}$	Filtro paso bajo	Fijo	Valores típicos entre 0-0,20 s. Valor de referencia: $T_{P,f} = 0,1$ s. Este parámetro puede representar un filtro implementado en el propio control, o podría ser una representación del proceso de medida de la señal de entrada.
	$\pm\Delta P^{max}$	Parámetro de saturación	Fijo	Valores típicos entre 5%-20% (% con respecto a la potencia aparente nominal del convertidor). Valor de referencia: $\pm\Delta P^{max} = \pm 10$ %.
POD-Q	K_Q	Ganancia	Diseño	Ganancia para obtener un amortiguamiento razonable del modo o modos de interés en el caso estudio a analizar. Valores típicos de ganancia para un control POD-Q usando desviación de frecuencia (en pu) como entrada: en el rango [-400, 400] pu (pu con respecto a la potencia aparente nominal del convertidor). Normalmente $K_Q \geq 0$, aunque podría haber excepciones en casos particulares.
	$T_{Q,S1},$ $T_{Q,S2}$	Filtros lead/lag	Diseño	Compensación de fase necesaria. Existe la opción de despreciar este filtro. No siempre es cierto que diseños del POD-Q sin este filtro son eficientes y robustos, pero en algunos casos, sí. Factores que pueden tener una influencia en la compensación de fase requerida son rapidez del control de potencia reactiva del convertidor y la red (e.g. SCR, etc..).
	$N_{Q,S}$	Exponente filtros lead/lag	Fijo	Valores típicos: $N_{Q,S} = 1$, $N_{Q,S} = 2$ o $N_{Q,S} = 3$. Valor de referencia: $N_{Q,S} = 2$.
	$T_{Q,W}$	Filtro wash-out	Fijo	Valores típicos entre 1-20 s. Valor de referencia: $T_{Q,W} = 5$ s.
	$T_{Q,f}$	Filtro paso bajo	Fijo	Valores típicos entre 0-0,20 s. Valor de referencia: $T_{Q,f} = 0,1$ s. Este parámetro puede representar un filtro implementado en el propio control, o podría ser una representación del proceso de medida de la señal de entrada.
	$\pm\Delta Q^{max}$	Parámetro de saturación	Fijo	Valores típicos entre 5%-20% (% con respecto a la potencia aparente nominal del convertidor). Valor de referencia: $\pm\Delta Q^{max} = \pm 10$ %.

3.3 Umbral de activación en controles POD-P

Tal como se ha indicado anteriormente, los controles POD deben estar enfocados a pequeña perturbación y, en la medida de lo posible, deberán actuar de forma continua ante pequeñas perturbaciones. En algunas tecnologías de almacenamiento de energía, una modulación continua de potencia activa, aunque sea pequeña, podría degradar su vida útil, en base a las discusiones técnicas llevadas a cabo con distintos fabricantes. Por este motivo, se permite el uso de un umbral de activación del control POD-P en sistemas ESM-MPE, para que solo se active cuando se detecte una oscilación continuada en el sistema con una amplitud superior o igual a un determinado umbral.

Como las oscilaciones electromecánicas se observan bien en la frecuencia de los distintos nudos del sistema, una opción es usar la frecuencia en el punto de conexión para detectar las oscilaciones del sistema. En este caso, un esquema general del control POD-P de un ESM-MPE (tanto como si es independiente como si forma parte de una instalación híbrida) será como el de la Figura 4. El control POD-P se activará solo en caso de que se detecte una amplitud de oscilación sostenida en el tiempo vista en la frecuencia del punto de conexión, cuya amplitud (\hat{f}) sea mayor o igual a un umbral especificado (\hat{f}_{thr}).

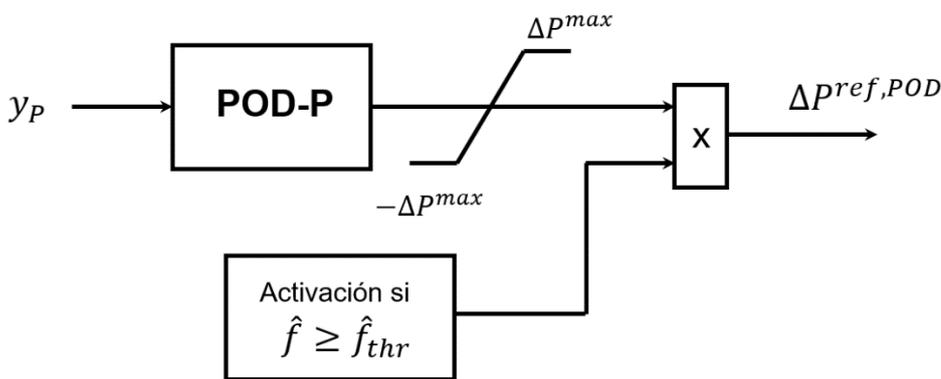


Figura 4: Esquema general de un control POD-P de un sistema ESM-MPE con umbral de activación.

Puede haber distintas formas de implementar el umbral de activación del control POD-P (algoritmos específicos de detección de la oscilación, temporización, ventanas de muestreo, características de histéresis para activación/desactivación, etc...). No se establece ninguna restricción para implementar el umbral de activación del control POD-P en ESM-MPE con distintos métodos, siempre y cuando se garantice y pruebe su correcto funcionamiento.

Valores típicos de umbral de activación pueden rondar los $\hat{f}_{thr} = 0 - 40$ mHz. Se propone como valor de referencia una amplitud de $\hat{f}_{thr} = 15$ mHz. El rango de frecuencias de las oscilaciones a detectar es 0,1-2,5 Hz.

La Figura 5 muestra un ejemplo ilustrativo de oscilaciones sostenidas de 0,2 Hz observadas en la frecuencia: una de amplitud $\hat{f} = 5$ mHz, en azul, y otra de amplitud $\hat{f} = 40$ mHz, en rojo. También se muestra la interpretación del umbral de activación $\hat{f}_{thr} = 15$ mHz. El control POD-P del sistema ESM-MPE se activaría frente a la oscilación de amplitud $\hat{f} = 40$ mHz (en rojo), pero no frente a la de amplitud $\hat{f} = 5$ mHz (en azul). En el ejemplo, el valor medio de la frecuencia es 50 Hz, pero este valor puede ser distinto debido a las pequeñas variaciones constantes de la frecuencia del sistema. Se ha de tener en cuenta que la oscilación se debe medir con respecto al valor medio de la frecuencia.

Por último, se ha de mencionar que se permite el uso de umbral de activación en controles POD-P en sistemas ESM-MPE, pero esto no quiere decir que estén obligados a tenerlo.

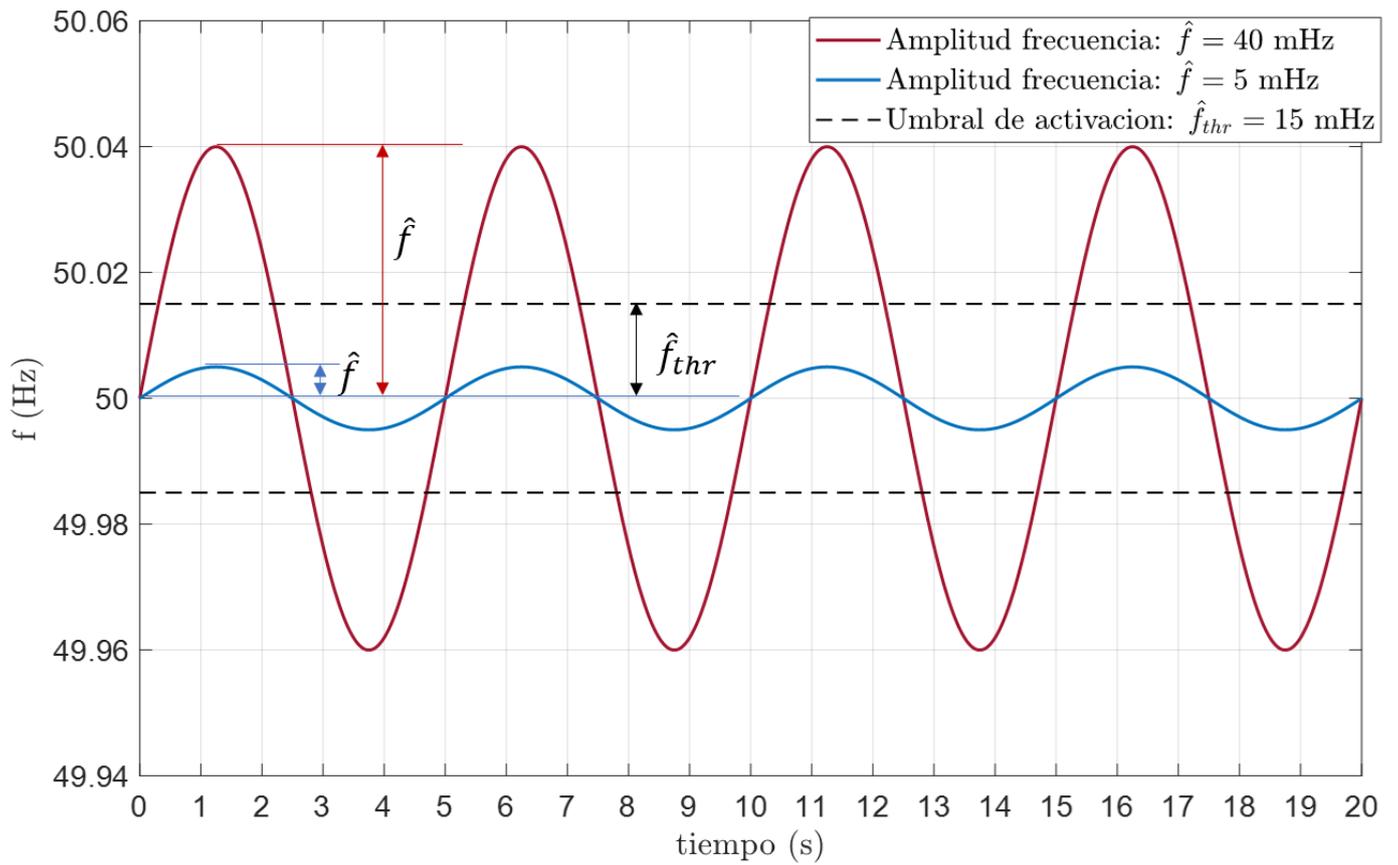


Figura 5: Ejemplo ilustrativo de una oscilación de 0,2 Hz observada en la frecuencia de un nudo.

4 Frecuencias de oscilación de los modos electromecánicos

En esta sección se discuten aspectos relacionados con la frecuencia de oscilación de los modos electromecánicos del sistema, con el objetivo de evitar confusiones relacionadas con este aspecto y de aclarar los criterios de aceptación según la normativa vigente de supervisión NTS [43].

En general, un control POD se diseña para contribuir a aumentar el amortiguamiento de modos electromecánicos del sistema eléctrico y los principales modos de interés son los modos inter-área. A su vez, si bien hay valores orientativos de las frecuencias de oscilación de los modos electromecánicos (tal como se presentó en la sección 1), en la realidad no se pueden poner límites rígidos a las frecuencias de oscilación. A esto se le suma la incertidumbre cómo evolucionarán las oscilaciones electromecánicas y sus propiedades dinámicas en sistemas eléctricos con alto contenido de elementos de electrónica de potencia y la responsabilidad del OS es garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.

Teniendo en cuenta estos aspectos, el OS considera necesario disponer de controles POD con buen comportamiento en el rango de frecuencias de oscilación de 0,1-2,5 Hz. Sin embargo, el OS es consciente que no es realista esperar controles POD con mejoras significativas en todo ese rango de frecuencias especificado. Por tanto, se deben tener en cuenta los siguientes matices para los controles POD en instalaciones en el SEPE:

- Oscilaciones electromecánicas en el rango 0,1-0,3 Hz: Se espera que los controles POD sean eficaces en este rango de frecuencias, ya que los modos inter-área críticos del sistema continental europeo están en este rango [5]. Se supervisa y se acepta el comportamiento del control POD en este rango de frecuencias según los criterios propuestos en este documento y según la NTS [43].
- Oscilaciones electromecánicas en el rango 0,3-1,5 Hz: Se espera que los controles POD proporcionen resultados razonables en este rango de frecuencias (las mejoras pueden ser pequeñas o al menos no se debe empeorar el amortiguamiento). Se supervisa y se acepta el comportamiento del control POD en este rango de frecuencias según los criterios propuestos en este documento y según la NTS [43].
- Oscilaciones electromecánicas en el rango 1,5-2,5 Hz: Se espera que los controles POD no exciten otros modos del sistema que pudiesen estar en este rango de frecuencias, pero no se esperan mejoras. Se asume que el diseño del control POD propuesto por el fabricante es suficientemente robusto para garantizar esto y que el fabricante realizará/adaptará las simulaciones y/o medidas necesarias para asegurarlo.
- Oscilaciones de otra naturaleza: Se espera que los controles POD no exciten modos de otra naturaleza del sistema. Se asume que el diseño del control POD propuesto por el fabricante es suficientemente robusto para garantizar esto y que el fabricante realizará/adaptará las simulaciones y/o medidas necesarias para asegurarlo.

En los SENP, hay algunas particularidades, ya que (a) las frecuencias de oscilación de los modos inter-área son más elevadas, (b) hoy en día las oscilaciones electromecánicas no son críticas en estos sistemas y (c) debido al pequeño tamaño de este tipo de sistemas y por la incorporación de generación no-síncrona y elementos de electrónica de potencia prevista en los próximos años, hay mucha incertidumbre saber cómo evolucionarán los modos electromecánicos de estos sistemas (en naturaleza, amortiguamiento y frecuencia de oscilación). Para la evaluación de controles POD en el SENP se usará la misma metodología de evaluación que en los controles POD en el SEPE, y podrá ser actualizada en los próximos años la naturaleza de las oscilaciones electromecánicas en este tipo de sistemas lo requiere. Debido a estas incertidumbres, se considera necesario que instalaciones dispongan de controles POD, pero este deberá de estar desactivado. Si en un futuro se considera necesario, el OS podrá solicitar la activación de los controles POD. La forma de evaluación de controles POD en SENP se trata en la subsección 5.2..

Se recalca que todos los aspectos aquí mencionados son compatibles con la normativa vigente (española y europea).

5 Evaluación del comportamiento de controles POD

La evaluación del comportamiento de los controles POD se realizará de acuerdo con la Norma Técnica de Supervisión (NTS) [43]. Cualquier matiz adicional se presentaría al grupo de trabajo de supervisión (GTSUP). Se considera el sistema sintético de dos áreas de la NTS (Figura 6). El sistema sintético representa una oscilación inter-área entre un generador síncrono en un área coherente pequeña (nudo 1) y un generador síncrono equivalente un área coherente más grande (nudo 4). Este sistema sintético permite representar una oscilación electromecánica a distintas frecuencias de oscilación, ajustando la reactancia de la línea 2-3 ($X_L = X_{23}$). El sistema sintético de dos áreas y la metodología para análisis de oscilaciones inter-área con información limitada fueron propuestos en [44], y su aplicación para el análisis del impacto de un MPE en el amortiguamiento de oscilaciones inter-área fue propuesto en [43]. El objetivo de este sistema sintético es capturar las propiedades generales de oscilaciones inter-área en el sistema europeo con información limitada.

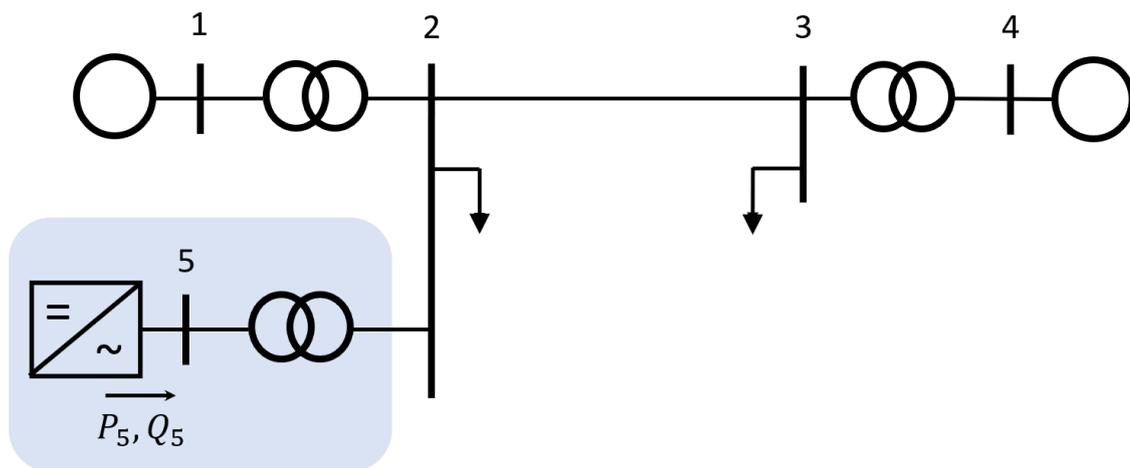


Figura 6: Sistema sintético de dos áreas (NTS).

El dispositivo GFL está conectado al nudo 5 y tendrá una potencia aparente nominal de 1500 MVA, siguiendo la metodología de la NTS. Todos los datos del sistema se pueden encontrar en [43]. Este sistema simplificado permite analizar el impacto del dispositivo GFL en el amortiguamiento del modo inter-área de un sistema de dos áreas.

Se propone un diseño de control POD-P y POD-Q para un dispositivo GFL en este sistema. Para las simulaciones, la instalación debe tener todos sus controles activados, además de los controles POD, siguiendo las pautas de la NTS [43].

Comparación de distintos casos:

- Resultados del caso base, únicamente máquinas síncronas conectadas y sin dispositivo GFL (B0).
- Resultados del caso base donde se incluye el dispositivo GFL sin controles POD (B1).
- Resultados del caso base donde se incluye el dispositivo GFL con control POD-P.
- Resultados del caso base donde se incluye el dispositivo GFL con control POD-Q.
- Resultados del caso base donde se incluye el dispositivo GFL con control POD-PQ.
- Todos los resultados del sistema base donde se incluye el dispositivo GFL debe realizarse para
 - a. Modo de potencia reactiva constante.
 - b. Modo control de tensión, con una constante droop del control de tensión – potencia reactiva (QV) de 2%, 4% y de 7%.

Nótese que los controles POD deben ser eficaces en todos los modos de control y puntos de operación del dispositivo GFL. Sin embargo, para la evaluación de los controles POD se han escogido unos casos representativos y no se exige realizar toda la lista de simulaciones que sí se exigen para evaluación de otras capacidades técnicas, de acuerdo con la NTS.

Para el análisis, los modelos dinámicos deben ser los apropiados para simulaciones de tipo electromecánico, también conocidos como modelos tipo Root-Mean Square (RMS). Es decir, considerando las dinámicas de interés en los modelos dinámicos de los dispositivos y considerando la red eléctrica con ecuaciones algebraicas. Para estudios de estabilidad de pequeña señal (análisis de autovalores y métodos en el dominio de la frecuencia), los modelos dinámicos deben estar preparados para su linealización entorno a un punto de operación.

A continuación, se explican las particularidades de controles POD según el tipo de instalación:

- Sistemas MPE: la normativa vigente a fecha de mayo 2024, no obliga a los sistemas MPE a disponer de controles POD. En caso de que un sistema MPE disponga de controles POD de forma voluntaria para contribuir al amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas del sistema eléctrico, aplicarán los criterios de aceptación para controles POD descritos en este documento. Se ha de mencionar que los controles POD-P y POD-Q se podrían validar de forma independiente. Por ejemplo, un MPE podría disponer de POD-Q únicamente y, por tanto, en los criterios de aceptación solo aplicaría para POD-Q.
- En el caso de sistemas que involucran sistemas de almacenamiento de energía (instalaciones híbridas Modalidad A y B y sistemas de almacenamiento de energía independiente), la normativa vigente a mayo 2024 tampoco obliga a estos controles, si bien la propuesta normativa de nuevo PO 12.2 sí que lo considera: aplicarán los criterios de aceptación para controles POD descritos en este documento.

Tanto la metodología de evaluación como los criterios de aceptación de controles POD propuestos en este documento serán acordados con el grupo de trabajo de supervisión (GTSUP), una vez aprobado, en su caso, el P.O. 12.2, o cualquier otra normativa que requiriera este tipo de controles.

5.1 Criterios de aceptación de controles POD

Para poder determinar si los controles POD contribuyen a mejorar el amortiguamiento de los modos inter-área, los casos con POD se deben comparar con el caso base (con dispositivo GFL y sin controles POD, que corresponde con el caso B1). Si los modos electromecánicos obtenidos en los casos con controles POD tienen mayor amortiguamiento que el caso base, entonces el comportamiento de los controles POD será satisfactorio. Nótese que la mejora del caso B1 (con dispositivo GFL y sin POD) con respecto al caso B0 (caso base sin dispositivo GFL) ya está cubierta en la norma vigente de la NTS. Por este motivo, el impacto de los controles POD se compara únicamente con el caso B1.

Los criterios de aceptación (o admisibilidad) de controles POD propuestos en este documento se dividen en dos:

- Criterio de aceptación de robustez del control POD.
- Criterio de aceptación de eficacia del control POD.

Estos criterios de aceptación aplican tanto para sistemas MPE con control POD, como para sistemas que involucran almacenamiento de energía (ESM-MPE).

5.1.1 Criterio de aceptación de robustez del control POD

El criterio de aceptación de robustez consiste en la evaluación del comportamiento de los controles POD en un rango de frecuencias del modo electromecánico, siguiendo la metodología y criterios de aceptación de la NTS [43].

El comportamiento de los controles POD se podrá evaluar de dos formas, siguiendo las pautas de la NTS:

- Análisis de estabilidad de pequeña señal (autovalores) (procedimiento y criterios de aceptación detallado en las secciones 5.10.2.1 y 5.10.3.1 de [43], respectivamente). Criterio de aceptación: amortiguamiento de modos electromecánicos mayor o igual que 5%.
- Simulación en el tiempo (procedimiento y criterios de aceptación detallado en las secciones 5.10.2.2 y 5.10.3.2 de [43], respectivamente).

Idealmente, se esperaría que al activar el control POD, el amortiguamiento del modo electromecánico sea mayor o igual que el obtenido sin control POD (caso B1) para todo el rango de frecuencia cubierto al variar la reactancia de la línea de 0,01 pu a 0,6 pu (pu en base 100 MVA). Sin embargo, podrían existir algunos casos en los que para algún valor de reactancia de la línea concreto esto no se cumpla y es más práctico usar únicamente el criterio de amortiguamiento de los modos electromecánicos mayor o igual que 5 %. Es decir, el criterio de aceptación de robustez no cuantifica la mejora que deben producir los controles POD y, salvo la forma de expresarlo, en la práctica no hay diferencias con respecto a los criterios de aceptación de MPE en su conjunto para oscilaciones de potencia según la normativa vigente (NTS).

5.1.2 Criterio de aceptación de eficacia del control POD

Sin menoscabo de lo que pudiera decirse en el GT_Sup y en su caso establecerse en la NTS [43] como criterio de certificación de estos controles, se propone, a falta de este desarrollo en la NTS, el siguiente criterio de eficacia, como resultado de las discusiones y análisis del GT_POD.

Se considera el sistema de la Figura 6 con reactancia de la línea $X_L = 0,6$ pu (base 100 MVA), que corresponde a un rango de frecuencias de 0,10-0,25 Hz aproximadamente. Los criterios de aceptación de eficacia se resumen en la Tabla 2. Todos los resultados del sistema base donde se incluye el dispositivo GFL debe realizarse para una constante droop del control de tensión de 2%, 4% y de 7% (droop QV). Se ha de recalcar que, debido a los criterios de aceptación de robustez, para todos los casos y valores de reactancia X_L el amortiguamiento del modo electromecánico debe ser mayor o igual que 5%. El criterio de aceptación de eficacia se puede probar mediante análisis de estabilidad de pequeña señal (autovalores) o mediante simulación en el tiempo.

A diferencia del criterio de aceptación de robustez, en el criterio de aceptación de eficacia sí se cuantifica la mejora en amortiguamiento del modo electromecánico del control POD. La mejora requerida se cuantifica para un único punto de trabajo ($X_L = 0,6$ pu), debido a que no sería realista exigir una mejora específica para todo el rango de frecuencias.

El incremento de amortiguamiento del modo electromecánico utilizado en el criterio de admisibilidad propuesto en la Tabla 2 se define como:

$$\Delta\zeta_i = \zeta_i - \zeta_{B1} \quad (6)$$

donde:

- ζ_{B1} : amortiguamiento del modo electromecánico obtenido en el caso B1 (%).
- ζ_1 : amortiguamiento del modo electromecánico obtenido en el caso con control POD-P (%).
- ζ_2 : amortiguamiento del modo electromecánico obtenido en el caso con control POD-Q (%).
- ζ_3 : amortiguamiento del modo electromecánico obtenido en el caso con los controles POD-P y POD-Q activados simultáneamente (POD-PQ) (%).

Debe tenerse en cuenta que los incrementos obtenidos en el amortiguamiento del modo electromecánico $\Delta\zeta_i$ de la Tabla 2 solo debe evaluarse para los controles POD que tenga la instalación. Por ejemplo, si un MPE dispone únicamente de control POD-Q, pero no dispone de control POD-P, se exige cumplir el criterio de aceptación de eficacia para el control POD-Q ($\Delta\zeta_2 \geq 5$ %), pero, de forma evidente, no se exige cumplir los criterios de eficacia para el control POD-P o ambos simultáneamente (POD-PQ) ($\Delta\zeta_1$ y $\Delta\zeta_3$, respectivamente).

Tabla 2: Propuesta de criterio de aceptación de eficacia de controles POD. Sistema de dos áreas con $X_L = 0,6 pu$ (que corresponde a una frecuencia de 0,15-0,25 Hz aproximadamente).

Caso	Criterio de aceptación
Con control POD-P	Incremento de amortiguamiento del modo electromecánico de al menos 5 % en comparación con el caso B1: $\Delta\zeta_1 \geq 5 \%$.
Con control POD-Q	Incremento de amortiguamiento del modo electromecánico de al menos 5 % en comparación con el caso B1: $\Delta\zeta_2 \geq 5 \%$.
Con control POD-PQ	Incremento de amortiguamiento del modo electromecánico, $\Delta\zeta_3$, de al menos 5 % en comparación con el caso B1: $\Delta\zeta_3 \geq 5 \%$.

5.2 Particularidades de la evaluación del comportamiento de controles POD en el SEPE y en los SENP

El contexto de oscilaciones electromecánicas en el SEPE y los SENP es diferente y, por tanto, la evaluación de controles POD tendrá matices en cada caso.

Por un lado, en el SEPE se observan oscilaciones inter-área del sistema continental europeo y son un tema crítico hoy en día. Las oscilaciones inter-área más críticas están en el rango de frecuencia 0,1-0,3 Hz. En este caso, la instalación con control POD estará necesariamente en el área coherente de generadores del SEPE, que oscila en contra de otras áreas coherentes del sistema continental europeo.

En cambio, los sistemas SENP tienen características diferentes entre ellos, y típicamente las frecuencias de oscilación de los modos de electromecánicos son más altas que en el SEPE (pueden estar en el rango 0,8 Hz-2,5 Hz). Hoy en día, las oscilaciones electromecánicas en los SENP no son problemáticas. Sin embargo, la naturaleza cambiante de este tipo de sistemas (por la incorporación de generación no-síncrona y elementos de electrónica de potencia) pueden provocar que en un futuro el escenario sea distinto en cuanto a amortiguamiento y frecuencias de los modos electromecánicos. A su vez, la instalación con control POD puede estar localizada en distintas áreas coherentes de las oscilaciones electromecánicas. Por estos motivos, se considera necesario que instalaciones dispongan de controles POD, pero determinar unos ajustes a día de hoy no garantiza su correcto funcionamiento a futuro.

En esta línea, una propuesta razonable para la evaluación del comportamiento de controles POD en el SEPE y en los SENP es la siguiente:

- SEPE: Evaluación del comportamiento tal como se describe al principio de la sección 5 y con los criterios de aceptación de la subsección 5.1.
- SENP: Evaluación del comportamiento tal como se describe al principio de la sección 5 y con los criterios de aceptación de la subsección 5.1. Pero la instalación deberá tener desactivado siempre en control POD. Si en un futuro el OS considera necesaria la activación del control POD de la instalación, se definirá en conjunto un estudio que llevará a cabo el propietario de la instalación para definir los parámetros de los controles POD, con la colaboración del OS.

5.3 Particularidades de la evaluación del comportamiento de controles POD en sistemas de almacenamiento de energía

En los sistemas ESM-MPE se permite el uso de un umbral de activación del control POD-P cuando se detecta una oscilación de determinada amplitud (\hat{f}_{thr}) (ver la sección 3.3). Independientemente de esto, para la evaluación el impacto del control POD-P antes pequeñas perturbaciones hace inevitable que algunas simulaciones para su evaluación deban realizarse con el umbral de activación desactivado, independientemente de que en la realidad lo tengan activado.

Las particularidades de la evaluación del comportamiento del control POD-P de sistemas ESM-MPE son las siguientes:

- Evaluación del comportamiento tal como se describe al principio de la sección 5 y con los criterios de aceptación de la subsección 5.1. Para estas simulaciones, el umbral de activación del control POD-P deberá estar desactivado. Es decir, el control POD-P debe actuar de forma continua para cualquier amplitud de oscilación.
- Verificaciones adicionales de simulación en el tiempo del sistema de sintético de la Figura 6, con el umbral de activación del control POD-P activado:
 1. Simulación con una perturbación suficientemente pequeña que no provoca la activación del control POD-P.
 2. Simulación con una perturbación suficientemente grande que provoca la activación del control POD-P.

6 Consideraciones adicionales

A continuación, se discuten algunos aspectos adicionales relacionados con la implementación de controles POD:

- Opciones de controles POD: a nivel de control de planta del MPE/ESM-MPE o a nivel de convertidor (unidad de generación de electricidad, UGE).
- Señales de entrada de los controles POD.
- Procesamiento de la señal de entrada de los controles POD y modelado.
- Variantes de los controles POD-P y POD-Q.
- Variantes del control POD-Q.
- Particularidades de controles POD según la tecnología.

6.1 Opciones de controles POD: a nivel MPE o a nivel convertidor UGE

Los controles POD-P y POD-Q se pueden implementar de dos formas distintas:

- A nivel control de planta (Power Plant Controller, PPC). Es decir, a nivel centralizado en el MPE/ESM-MPE.
- A nivel de convertidor. Es decir, a nivel UGE.

6.1.1 A nivel control de planta (PPC).

Las características principales son las siguientes:

- En este caso, las referencias suplementarias de inyección de potencia activa y reactiva proporcionadas por los controles POD-P y POD-Q ($\Delta P^{ref,POD}$ y $\Delta Q^{ref,POD}$, respectivamente) llegan a las consignas del control de planta (PPC) del MPE o ESM-MPE.
- El PPC se encarga de repartir las referencias de inyecciones de potencia activa y reactiva de la planta (P^* y Q^* de (1) y (2), respectivamente) entre los convertidores del parque (a nivel UGE). Para ello, es necesario un sistema de comunicaciones. Los retrasos en las comunicaciones (tiempo de cálculo + latencias de comunicación) pueden tener un impacto en el comportamiento de los controles POD y, por tanto, se deben representar en los modelos y se deben tener en cuenta en los diseños de los controles POD.
- Es común usar medidas en el punto de conexión del parque como entrada para los controles POD-P y POD-Q, como frecuencia o módulo de la tensión en el punto de conexión.
- El control de planta suele ser más lento. Por tanto, para poder conseguir que los controles POD-P y POD-Q sean eficaces, se necesita un diseño de la compensación de fase necesaria proporcionada con los filtros lead/lag.

6.1.2 A nivel de convertidor (UGE).

Las características principales son las siguientes:

- En este caso, las referencias suplementarias de inyección de potencia activa y reactiva proporcionadas por los controles POD-P y POD-Q ($\Delta P^{ref,POD}$ y $\Delta Q^{ref,POD}$, respectivamente) se suman las consignas de inyecciones de potencia activa y reactiva del convertidor, a nivel UGE.
- Las referencias totales de inyección de potencia activa y reactiva de cada UGE serán el término correspondiente la consigna enviada por el PPC y el término del control POD (P^* y Q^* de (1) y (2), respectivamente).
- Cada UGE podría utilizar medidas locales, como frecuencia o módulo de la tensión en sus terminales de AC. Alternativamente, también podrían usar medidas en el punto de conexión del parque, requiriendo comunicaciones, debiendo tener en cuenta los tiempos de retraso asociados, aunque la primera implementación parece más práctica.

- Es imprescindible coordinar los controles POD-P y POD-Q a nivel de convertidor (UGE) con el PPC, ya que, si estas capas de control no se coordinan correctamente, el PPC podría anular o atenuar el efecto de los controles POD-P y POD-Q a nivel UGE.
- La implementación más limpia de controles POD-P y POD-Q a nivel UGE es cuando el control de planta es en lazo abierto. Es decir, cuando el PPC no tiene un regulador proporcional-integral (PI) con realimentación negativa de las medidas inyecciones de potencia activa o reactiva (o tensión), sino que el reparto de consignas entre las UGE se realiza por un cálculo de las consignas a nivel MPE/ESM-MPE.

6.2 Señales de entrada en controles POD

Hay distintas posibilidades de señales de entrada de los controles POD-P y POD-Q. En las referencias [9], [11], por ejemplo, se discuten controles POD-P y POD-Q en parques eólicos utilizando distintas señales de entrada.

En general, una práctica extendida es escoger una de las siguientes opciones de entrada para los controles POD-P y POD-Q: en convertidores GFL:

- Frecuencia (o desviación de frecuencia con respecto a la frecuencia nominal) en el punto de conexión.
- Módulo de la tensión en el punto de conexión.

Los controles POD-P y POD-Q podrían tener distinta señal de entrada. La frecuencia y módulo de la tensión estarán medidas en el punto de conexión. Si se consideran los controles POD a nivel de MPE, el punto de conexión será el del parque en el lado de alta tensión. Si se consideran los controles POD a nivel de convertidor (UGE), el punto de conexión será el terminal de AC del convertidor.

Se pueden utilizar las señales de entrada que se consideren oportunas para los controles POD-P y POD-Q, siempre que se pruebe su eficacia y robustez. Sin embargo, el OS tiene preferencia por el uso de señales de frecuencia como entrada para ambos controles POD-P y POD-Q, debido a las propiedades de robustez que aportan a los controles, en el contexto de interés:

- Oscilaciones inter-área en el sistema continental europeo.
- Península ibérica: área coherente de generadores síncronos en un extremo de las oscilaciones inter-área de interés.
- Dispositivos con controles POD-P y POD-Q en dispositivos instalados en la Península Ibérica.

En la referencia [41] se estudian controles POD-P y POD-Q utilizando señales de frecuencia o de tensión como entrada, discutiendo los aspectos principales de cada opción. A continuación, se exponen las propiedades relevantes de controles POD-P y POD-Q usando señales de frecuencia o tensión como entrada:

- Controles POD usando medida de frecuencia como entrada
 - Los controles POD-P suelen ser más eficaces que los controles POD-Q cuando se utilizan señales de frecuencia como entrada.
 - Frecuencias en los extremos de la oscilación inter-área presentan una observabilidad elevada.
 - Frecuencias en los puntos cercanos al centro de la oscilación inter-área presentan una observabilidad baja.
 - Los factores de observabilidad del modo inter-área en las frecuencias en los nudos del sistema en los dos extremos de una oscilación inter-área tienen un desfase considerable (fase opuesta entre los dos puntos opuestos de la oscilación).
- Controles POD usando medida de tensión como entrada
 - Los controles POD-Q pueden ser más eficaces que los controles POD-P cuando se utilizan señales de tensión como entrada para dichos controles.
 - Los controles POD-Q usando la tensión como entrada podrían ser más eficaces que controles POD-Q usando la frecuencia como entrada, siempre y cuando el diseño sea apropiado y dependiendo de la topología del sistema.
 - Los factores de observabilidad del modo inter-área en las tensiones en los nudos pueden tener una magnitud elevada en puntos medios de la oscilación inter-área.
 - Los factores de observabilidad del modo inter-área en las tensiones en los nudos del sistema (en magnitud y en fase) dependen fuertemente de la topología de la red, flujos de potencia en

el sistema y de la localización de elementos de control de tensión en el sistema (por ejemplo, generadores conectados, etc...).

Por los motivos expuestos anteriormente y en concreto por sus propiedades de robustez, el OS tiene preferencia por el uso de señales de frecuencia entrada para los POD-P y POD-Q. Aunque, como ya se ha indicado anteriormente, cualquier opción de controles POD es válida siempre y cuando se pruebe su correcto funcionamiento y sea acordado con el OS.

La señal de entrada de frecuencia puede ser la frecuencia del punto de conexión (si los controles POD están implementados a nivel PPC), la frecuencia en el terminal de AC de cada convertidor (si los controles están implementados a nivel UGE) o incluso podrían usarse como entrada señal de frecuencia de un nudo remoto del sistema. En general, si se usa como entrada de los controles POD la frecuencia, se admite cualquiera de estas variantes. En caso de usar como señal de entrada la de un nudo remoto, se deberá informar al OS de esta circunstancia.

6.3 Procesamiento de la señal de entrada de los controles POD y modelado

El modelo de controles POD-P y POD-Q debe contener una representación realista del procesamiento de las señales de entrada (y_P e y_Q), incluyendo filtros de medida, retrasos en comunicaciones (si los hubiese).

Por ejemplo, si el proceso de medida de las señales de entrada se puede aproximar por un filtro de primer orden con constante de tiempo de 80 ms (es decir, $1/(1 + sT_m)$ con $T_m = 0,08$ s), esta función de transferencia debe incluirse en los modelos dinámicos de los controles POD-P y POD-Q.

No considerar estas dinámicas en los modelos podría provocar diseños no adecuados de los controles POD-P y POD-Q y llevar a conclusiones erróneas. Este efecto se puede representar en el modelo de forma aproximada, siempre y cuando el comportamiento dinámico refleje la realidad con suficiente precisión.

6.4 Variantes de los controles POD-P y POD-Q

En general, pueden existir controles POD-P y POD-Q de distinta naturaleza, que puedan ser eficaces. Por ejemplo:

- Distintos diagramas de bloques.
- Distintas señales de entrada (por ejemplo, frecuencia, tensiones, flujos de potencia por una línea).
- Señales de entradas con medidas locales o medidas remotas.
- Controles POD con distintas señales de salida:
POD-P: referencia suplementaria de potencia activa, de corriente de eje directo, etc...
POD-Q: referencia suplementaria de potencia reactiva, de corriente de eje transversal, o de tensión, etc...
- Parámetros fijos o adaptativos.
- Distintas variantes de implementar el control POD-Q cuando el dispositivo GFL está en modo control de tensión. Este aspecto está relacionado con la señal de salida de control POD-Q. Debido a que puede ser más común, se trata de forma separada en la sección 6.5.

En general, el OS considerará como válida cualquier variante de controles POD-P y POD-Q siempre y cuando se garantice su eficacia y robustez (ver sección 5.1).

- Controles POD-P y POD-Q basándose en la estructura general descrita en este documento usando como entrada la frecuencia en el punto de conexión (o desviación de frecuencia en el punto de conexión con respecto a la frecuencia nominal) y cumpliendo los requisitos técnicos: serán aceptados por el OS.
- Controles POD-P y POD-Q basándose en otras variantes u otras variables de entrada: deberán ser presentados al OS con los estudios correspondientes. El OS analizará tanto los controles POD como los estudios, para determinar su aceptación.

6.5 Variantes del control POD-Q

El control POD-Q de la Figura 3 es válido, no sólo para un dispositivo GFL con control de la potencia reactiva inyectada en el punto de conexión, sino también cuando un dispositivo GFL controla el módulo de la tensión en el punto de conexión, siempre y cuando el lazo de tensión pase por calcular una consigna de potencia reactiva intermedia, la implementación sea correcta y se asegure que el control de tensión y el control POD-Q no interactúan.

Alternativamente, si el dispositivo GFL se encuentra controlando el módulo de la tensión en el punto de conexión, una alternativa a la mostrada anteriormente para el control POD-Q es incluir una referencia suplementaria de tensión en vez de inyección de potencia reactiva. Este control puede mantener el nombre de POD-Q (implementación 2) o, eventualmente, se le puede conocer con el nombre de POD-V, pero es para la misma aplicación. En este caso (Figura 7), la referencia total de tensión vendría dada por:

$$V^* = V_0 + \Delta V^{ref,POD} \tag{7}$$

$$\Delta V^{ref,POD} = K_V \cdot \frac{sT_{V,W}}{1 + sT_{V,W}} \cdot \frac{1}{1 + sT_{V,f}} \cdot \left(\frac{1 + sT_{V,S1}}{1 + sT_{V,S2}} \right)^{N_{V,S}} \cdot y_V \tag{8}$$

donde: V^* es la referencia de tensión del GFL, V_0 es un valor constante, $\Delta V^{ref,POD}$ es la referencia suplementaria de tensión del control POD-Q (implementación 2 o POD-V) e y_V es su entrada.

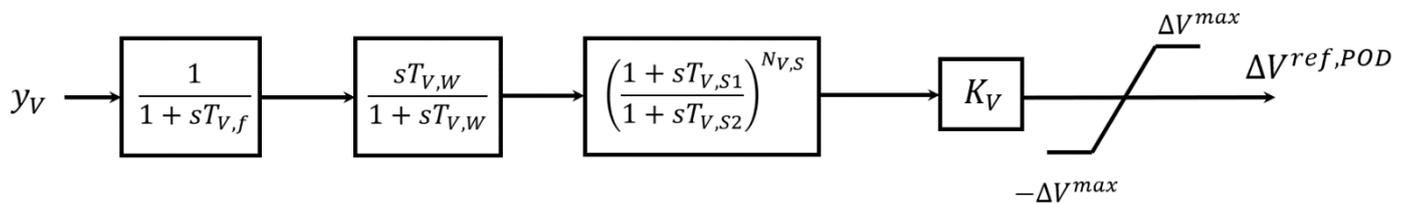


Figura 7: Control POD-Q con implementación 2 (POD-V).

Se ha de mencionar que al igual que los controles POD de la subsección 3.2, esta implementación particular se presenta con fines ilustrativos y puede haber implementaciones diferentes que también serían admisibles. En caso de decantarse por esta opción, se debe garantizar su correcto diseño y efectividad.

6.6 Particularidades de controles POD según la tecnología

A continuación, se presenta un resumen, de forma general, de los requisitos técnicos de controles POD-P y POD-Q, conforme al estado de la normativa a fecha de mayo 2024:

- MPE:** Según la normativa actual, se exige que el MPE (tipos C y D) no contribuya de forma negativa al amortiguamiento de las oscilaciones inter-área (Orden TED-749-20) [37]. No se exige de forma explícita que el MPE esté equipado con controles POD-P y/o POD-Q, pero podría disponer de estos controles de forma voluntaria o en caso de ser necesario para cumplir el requisito de no contribuir de forma negativa al amortiguamiento de las oscilaciones inter-área.

En la propuesta de normativa europea RfG2 [34], se exige que el MPE (tipo D) disponga de controles POD: o bien únicamente POD-P, o bien únicamente POD-Q o ambos (POD-PQ). En MPEs de tipo C, se pueden exigir controles POD de forma explícita únicamente si el gestor de red pertinente lo requiere.

En caso de que el MPE disponga de controles POD-P y/o POD-Q, estos deben cumplir las funcionalidades técnicas, según lo descrito en este documento.
- Módulo de almacenamiento de electricidad (ESM):** según la propuesta de P. O. 12.2 [35], el sistema de almacenamiento de energía eléctrica (tipos C y D), tanto como si es independiente como si forma parte de una instalación híbrida, deben estar equipados con controles POD-P y POD-Q. Dependiendo la tecnología de almacenamiento de energía y para evitar su envejecimiento prematuro, el control POD-P solo se activará cuando la amplitud de la oscilación de frecuencia supere un umbral definido por el OS (todos los detalles descritos en [35]). Esto está en la línea de la propuesta de normativa europea RfG2 [34].

En la propuesta de normativa europea RfG2 [34], se exige que el ESM-MPE (tipo D) disponga de controles POD: o bien únicamente POD-P, o bien únicamente POD-Q o ambos (POD-PQ) (ya que se indica explícitamente que los requisitos a MPE aplican también a ESM-MPE). En ESM-MPEs de tipo C, se pueden exigir controles POD de forma explícita únicamente si el gestor de red pertinente lo requiere.

En caso de que el ESM-MPE disponga de controles POD-P y/o POD-Q, estos deben cumplir las funcionalidades técnicas, según lo descrito en este documento.
- Sistemas HVDC:** Se exige de forma obligatoria controles POD-P y POD-Q (Orden TED-749-20) [37].
- FACTS:** Se trata como un componente adicional de un módulo de generación de electricidad (CAMGE). Por tanto, los requisitos de oscilaciones de potencia se aplican de forma agregada a un MPE (no empeorar el amortiguamiento de oscilaciones inter-área), según lo descrito arriba. Por ejemplo, podría ocurrir que un control POD esté instalado en un dispositivo FACTS integrado en el MPE. En este caso, los controles POD-P y POD-Q deben cumplir las funcionalidades técnicas, según lo descrito en este documento.

7 Ideas principales (resumen) de la propuesta de especificaciones técnicas para controles POD

A continuación, se resumen las especificaciones técnicas de los controles POD, para el cumplimiento de los requisitos técnicos de la normativa:

- Requisitos técnicos según la normativa europea [33], [34], [36], la orden TED-749-20 [37] y el borrador del nuevo P. O. 12.2 [35].
- Se pueden implementar controles POD según la propuesta de este documento (siguiendo los diagramas de bloques más extendidos y aceptados y usando como entrada la frecuencia (o desviación de frecuencia con respecto a la frecuencia nominal), tal como se describe en la sección 3). La señal de entrada de frecuencia puede ser la frecuencia del punto de conexión (si los controles POD están implementados a nivel PPC), la frecuencia en el terminal de AC del convertidor (si los controles están implementados a nivel UGE) o incluso podría usarse como entrada la señal de frecuencia de un nudo remoto.
También, se pueden implementar otras variantes de controles POD distintas a las descritas en este documento. Sin embargo, se debe garantizar el correcto funcionamiento de los controles POD y la propuesta debe ser aceptada por el OS.
- Los controles POD se pueden implementar a nivel control de planta (PPC) o a nivel convertidor (UGE). En cualquier caso, se debe garantizar el correcto funcionamiento de los controles POD.
- La evaluación del comportamiento de los controles POD se realizará según la normativa NTS [43] (sección 5 de este documento). En caso de usar otras variantes de controles POD y en caso de necesitarse pruebas adicionales debido a limitaciones en las conclusiones extraíbles del sistema sintético de la NTS cuando se usan estas variantes, se aceptarán estudios complementarios que garanticen el correcto funcionamiento de los controles POD.
- Especificaciones técnicas: Los parámetros de saturación de los controles POD deben cumplir las especificaciones técnicas descritas en la Tabla 3. Estas especificaciones técnicas aplican a cualquier variante de control POD, incluyendo esquemas distintos a los descritos en este documento. Se ha de recalcar que estas especificaciones aplican a parámetros de saturación, pero no tienen que ver con el concepto de reserva de potencia activa y reactiva de la instalación.
Si se utiliza la implementación más habitual de los controles POD-P y POD-Q (Figura 3) con entrada desviación de frecuencia en pu, los parámetros de los controles POD deben ser consistentes con los de la Tabla 4.
- En el caso de control POD-P en sistemas de almacenamiento de energía (ver sección 3.3), el umbral de amplitud de oscilación de frecuencia definido por el OS a partir del cual se activará el control deberá ser ajustable y será $\hat{f}_{thr} \leq 15$ mHz (amplitud de la señal sinusoidal con respecto al valor medio, no amplitud pico-pico) para oscilaciones detectadas entre 0,1-2,5 Hz (ver sección 4 para más información sobre las frecuencias de oscilación de los modos electromecánicos). Nótese que un umbral de activación de $\hat{f}_{thr} \leq 15$ mHz quiere decir que el control POD-P solo se activará para oscilaciones en la frecuencia con amplitud $\hat{f} > 15$ mHz. El umbral de activación deberá estar implementado con los elementos de control necesarios para su funcionamiento correcto (por ejemplo, característica de histéresis o temporización para la activación/desactivación, etc...), aunque no se especifican los detalles específicos de estos aspectos, ya que hay distintas formas de realizarlo. El OS podrá solicitar modificar el valor del umbral de activación bajo notificación expresa. Esto se recoge en la Tabla 3.
- En instalaciones en el SEPE, los controles POD deberán estar activados en todo momento, salvo indicación contraria del OS. En instalaciones en los SENP, los controles POD deberán estar desactivados. En un futuro, si se considera necesario para garantizar la fiabilidad y seguridad del sistema, el OS podrá solicitar activar los controles POD de instalaciones en los SENP.

Tabla 3: Especificaciones técnicas de parámetros de controles POD para MPE y para ESM-MPE.

Control	Comentario	Parámetro	Recomendado/obligatorio
POD-P	Control POD-P según el esquema de la Figura 2.	<p>Parámetro de saturación ΔP^{max} ajustable y en el rango 0-20 %.</p> <p>(% con respecto a potencia aparente nominal en MVA).</p> <p>Valor de referencia $\Delta P^{max} = 10 \%$.</p> <p>Valor obligatorio: $\Delta P^{max} \geq 10 \%$, salvo que otro valor más bajo sea especificado por el OS.</p> <p>Sujeto a disponibilidad de recurso (reserva).</p>	Obligatorio
	Solo para ESM-MPE. Control POD-P según el esquema de la Figura 4.	<p>Umbral de activación \hat{f}_{thr} ajustable y en el rango $\hat{f}_{thr} = 0 - 40$ mHz.</p> <p>Valor de referencia: $\hat{f}_{thr} = 15$ mHz.</p> <p>Valor de obligatorio: $\hat{f}_{thr} \leq 15$ mHz, salvo que otro valor más alto sea especificado por el OS.</p>	Obligatorio
POD-Q	Control POD-Q según el esquema de la Figura 2. (implementación 1)	<p>Parámetro ΔQ^{max} ajustable y en el rango 0-20 %.</p> <p>(% con respecto a potencia aparente nominal en MVA).</p> <p>Valor de referencia: $\Delta Q^{max} = 10 \%$. Valor obligatorio: $\Delta Q^{max} \geq 10 \%$, salvo que otro valor más bajo sea especificado por el OS.</p> <p>Sujeto a disponibilidad de reserva.</p>	Obligatorio
	Variante de control POD-Q aplicado a referencia de tensión (POD-V) según (7). (implementación 2)	<p>Parámetro ΔV^{max} ajustable y en el rango 0-10 %.</p> <p>Valor de referencia: $\Delta V^{max} = 5 \%$.</p> <p>Valor obligatorio: $\Delta V^{max} \geq 5 \%$, salvo que otro valor más bajo sea especificado por el OS.</p>	Obligatorio

Tabla 4: Parámetros de los controles POD-P y POD-Q según la implementación habitual (Figura 3), usando como entrada la desviación de frecuencia en pu.

Control	Parámetro	Descripción	Comentario	Recomendado/obligatorio
POD-P	K_P	Ganancia	Rango [-400, 400] pu (pu con respecto a la potencia aparente nominal). Normalmente $K_P \geq 0$, aunque podría haber excepciones en casos particulares. Debe ser ajustado.	Recomendado
	$T_{P,S1}, T_{P,S2}$	Filtros lead/lag	Deben ser ajustados.	Recomendado
	$N_{P,S}$	Exponente filtros lead/lag	Valores típicos: $N_{P,S} = 1, N_{P,S} = 2$ o $N_{P,S} = 3$. Valor de referencia: $N_{P,S} = 2$.	Recomendado
	$T_{P,W}$	Filtro wash-out	Valores típicos entre 1-20 s. Valor de referencia: $T_{P,W} = 5$ s.	Recomendado
	$T_{P,f}$	Filtro paso bajo	Valores típicos entre 0-0,20 s. Valor de referencia: $T_{P,f} = 0,1$ s.	Recomendado
	$\pm \Delta P^{max}$	Parámetro de saturación	Valores típicos entre 5%-20% (% con respecto a la potencia aparente nominal del convertidor). Valor de referencia: $\Delta P^{max} = 10$ %. Valor obligatorio: $\Delta P^{max} \geq 10$ %, salvo que otro valor más bajo sea especificado por el OS.	Obligatorio
	\hat{f}_{thr}	Umbral de activación	Solo para ESM-MPE. Valores típicos entre $\hat{f}_{thr} = 0 - 40$ mHz. Valor de referencia: $\hat{f}_{thr} = 15$ mHz. Valor obligatorio: $\hat{f}_{thr} \leq 15$ mHz, salvo que otro valor más alto sea especificado por el OS.	Obligatorio
POD-Q	K_Q	Ganancia	Rango [-400, 400] pu (pu con respecto a la potencia aparente nominal). Normalmente $K_Q \geq 0$, aunque podría haber excepciones en casos particulares. Debe ser ajustado.	Recomendado
	$T_{Q,S1}, T_{Q,S2}$	Filtros lead/lag	Deben ser ajustados.	Recomendado
	$N_{Q,S}$	Exponente filtros lead/lag	Valores típicos: $N_{Q,S} = 1, N_{Q,S} = 2$ o $N_{Q,S} = 3$. Valor de referencia: $N_{Q,S} = 2$.	Recomendado
	$T_{Q,W}$	Filtro wash-out	Valores típicos entre 1-20 s. Valor de referencia: $T_{Q,W} = 5$ s.	Recomendado
	$T_{Q,f}$	Filtro paso bajo	Valores típicos entre 0-0,20 s. Valor de referencia: $T_{Q,f} = 0,1$ s.	Recomendado
	$\pm \Delta Q^{max}$	Parámetro de saturación	Valores típicos entre 5%-20% (% con respecto a la potencia aparente nominal). Valor de referencia: $\pm \Delta Q^{max} = \pm 10$ %. Valor obligatorio: $\Delta Q^{max} \geq 10$ %, salvo que otro valor más bajo sea especificado por el OS.	Obligatorio

8 Exención de responsabilidades

El Operador del Sistema publica este documento con el propósito de facilitar la comprensión y la implementación de controles POD. Este documento no tiene ningún valor normativo. Se procura que la información esté actualizada y sea exacta, si bien el Operador del Sistema declina toda responsabilidad en cuanto a la información contenida en este documento. Dicha información es de carácter general y no alude a circunstancias específicas de sujetos concretos y no constituye opiniones profesionales o jurídicas.

El Operador del Sistema declina toda responsabilidad por pérdidas sufridas como consecuencia de decisiones, acciones u omisiones basadas en la información publicada en este documento. En particular, el Operador del Sistema declina toda responsabilidad por pérdidas económicas o perjuicios indirectos, incluidos, sin restricciones, cualquier pérdida comercial o lucro cesante resultantes directa o indirectamente de, o relacionados con, la publicación de este documento por el Operador del Sistema, y el uso que pudiera hacerse de este documento.

Ha de tenerse en cuenta que no se garantiza que la información difundida en esta guía reproduzca de manera exacta textos oficiales. Únicamente se consideran auténticos los textos de la normativa española y europea según se publicaron en el Boletín Oficial del Estado y en el Diario Oficial de la Unión Europea, respectivamente.

Ante cualquier posible confusión en la interpretación de algún aspecto concreto entre las versiones en castellano y en inglés de esta guía, el documento de referencia es el escrito en castellano.

La última edición actualizada de esta guía está disponible en el área de clientes de la web corporativa www.ree.es.

9 Canales de contacto

Las dudas o consultas que puedan surgir de esta guía, así como dudas o incidencias de la plataforma, deberán crearse y remitirse a través del Portal de Servicios a Clientes de Red Eléctrica (www.ree.es), en el módulo “Contacta con nosotros”.

Dirección postal:

Red Eléctrica – Redeia
Dirección General de Operación
Dirección de Desarrollo del Sistema
Paseo Conde de los Gaitanes, 177
28109 Alcobendas, Madrid, España
Teléfono: 91 659 91 19

10 Referencias

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, NY, USA: McGraw-Hill (Inc.), 1994.
- [2] M. Klein, G. J. Rogers and P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 6, pp. 914-921, 1991.
- [3] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, H. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, 2004.
- [4] N. Hatziaargyriou, J. Milanovic, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C. Canizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, A. Stankovic, T. Van Cutsem, V. Vittal and C. Vournas, "Definition and classification of power system stability - Revisited & Extended," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3271-3281, 2021.
- [5] ENTSO-E, "Analysis of CE inter-area oscillations of 1st December 2016," ENTSO-E SG SPD REPORT, Brussels, Belgium, 2017.
- [6] C. Martinez, G. Joos and B. T. Ooi, "Power System Stabilizers in Variable Speed Wind Farms," in *Proc. IEEE/PES General Meeting*, Calgary, AB, Canada, 2009.
- [7] L. Sigrist and L. Rouco, "Design of damping controllers for doubly fed induction generators using eigenvalue sensitivities," in *Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, USA, 2009.
- [8] J. L. Domínguez-García, O. Gomis-Bellmunt, F. D. Bianchi and A. Sumper, "Power oscillation damping supported by wind power: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 4994-5006, 2012.
- [9] J. L. Domínguez-García, F. D. Bianchi and O. Gomis-Bellmunt, "Control Signal Selection for Damping Oscillations With Wind Power Plants Based on Fundamental Limitations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4274-4281, 2013.
- [10] S. De Rijcke, N. Hamann, A. Harjula, J. Seppanen, A. Kuusela and I. Luukkonen, "Damping Power System Oscillations by Wind Power Plants," in *Proc. 15th Wind integration Workshop (WIW 2016)*, Vienna, Austria, 2016.
- [11] L. Petersen, P. H. Nielsen, G. C. Tarnowski and T. Lund, "Addressing power oscillations damping requirements for wind power plants," in *Proc. 20th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants (WIW 2021)*, Berlin, Germany, 2022.
- [12] R. Shah, N. Mithulananthan and K. Y. Lee, "Large-Scale PV Plant With a Robust Controller Considering Power Oscillation Damping," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 1, pp. 106-116, 2013.
- [13] N. Jankovic, J. Roldan-Perez, M. Prodanovic and L. Rouco, "Centralised Multimode Power Oscillation Damping Controller for Photovoltaic Plants with Communication Delay Compensation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 39, no. 1, pp. 1-9, 2024.
- [14] N. Jankovic, J. Roldan-Perez and M. Prodanovic, "Power Oscillation Damping using Converter-Interfaced generators under Constrained Active and Reactive Powers," in *Proc. IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Espoo, Finland, 18-21 October, 2021.
- [15] N. Jankovic, J. Roldan-Perez, M. Prodanovic, J. A. Suul, S. D'Arco and L. Rouco Rodriguez, "Power oscillation damping method suitable for network reconfigurations based on converter interfaced

- generation and combined use of active and reactive powers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 149, no. 109010, pp. 1-10, 2023.
- [16] N. Martins and L. T. G. Lima, "Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1455-1469, 1990.
- [17] L. Rouco, "Coordinated design of multiple controllers for damping power system oscillations," *Electric Power Systems Research*, vol. 23, pp. 517-530, 2001.
- [18] A. R. Messina, H. Hernández, E. Barocio, M. Ochoa and J. Arroyo, "Coordinated application of FACTS controllers to damp out inter-area oscillations," *Electric Power Systems Research*, vol. 62, pp. 43-53, 2002.
- [19] B. Kalyan Kumar, S. N. Singh and S. C. Srivastava, "Placement of FACTS controllers using modal controllability indices to damp out power system oscillations," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 1, no. 2, pp. 209-217, 2007.
- [20] N. Mithulananthan, C. A. Canizares, J. Reeve and G. J. Rogers, "Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations," *IEEE transactions on power systems*, vol. 18, no. 2, pp. 786-792, 2003.
- [21] M. Lahtinen, T. Rauhala, H. Kuist, P. Peltola and P. Halonen, "Static Var Compensator enhancing the operational reliability of Finnish transmission network," in *CIGRE Session, paper B4-206*, Paris, France, 2010.
- [22] K. Uhlen, L. Vanfretti, M. M. de Oliveira, A. B. Leirbukt, V. H. Aarstrand and J. O. Gjerde, "Wide-Area Power Oscillation Damper Implementation and Testing in the Norwegian Transmission Network," in *Proc. IEEE/PES General Meeting*, San Diego, CA, USA, 22-26 July, 2012.
- [23] Y. Pipelzadeh, B. Chaudhuri and T. C. Green, "Control coordination within a VSC HVDC link for power oscillation damping: A robust decentralized approach using homotopy," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1270-1279, 2012.
- [24] M. Hadjikypris and V. Terzija, "Active power modulation assisting controller scheme implemented on a VSC-HVDC link establishing effective damping of low frequency power oscillations," in *Proc. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, Croatia, 13-16 May, 2014.
- [25] M. A. Elizondo, R. Fan, H. Kirkham, M. Ghosal, F. Wilches-Bernal, D. Schoenwald and J. Lian, "Interarea Oscillation Damping Control Using High-Voltage DC Transmission: A Survey," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6915 - 6923, 2018.
- [26] J. Renedo, A. Garcia-Cerrada, L. Rouco and L. Sigríst, "Coordinated Design of Supplementary Controllers in VSC-HVDC Multi-Terminal Systems to Damp Electromechanical Oscillations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 712-721, 2021.
- [27] Y. Xing, E. Kamal, B. Marinescu and F. Xavier, "Advanced control to damp power oscillations with VSC-HVDC links inserted in meshed AC grids," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, pp. 1-16, 2021.
- [28] J. Renedo, A. Diaz-García, G. Torresan, E. Lorenzo Cabrera, A. Cordón, S. Sanz Verdugo, J. Peiró, J. Pérez Castro, G. Calvo, A. Hernández Sautua, A. Petit, H. Oukhayi, S. Akkari and H. Saad, "Tests on the POD-P controller of INELFE Spain-France VSC-HVDC interconnector," in *Proc. CIGRE B4 International SC Meeting and Colloquium, paper B4-1145*, Vienna, Austria, 11-15 Sep, 2023.
- [29] J. L. Rodríguez-Amenedo and S. Arnaltes Gómez, "Damping Low-Frequency Oscillations in Power Systems Using Grid-Forming Converters," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158984-158997, 2021.
- [30] R. L. Cresap, W. A. Mittelstadt, D. N. Scott and C. W. Taylor, "Operating experience with modulation of the pacific HVDC inertia," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-97, no. 4, pp. 1053-1059, 1978.

- [31] T. Smed and G. Andersson, "Utilising HVDC to Damp Power Oscillations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 620-627, 1993.
- [32] B. J. Pierre, F. Wilches-Bernal, D. A. Schoenwald, R. T. Elliott, D. J. Trudnowski, R. H. Byrne and J. C. Neely, "Design of the Pacific DC Intertie Wide Area Damping Controller," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 3594-3604, 2017.
- [33] European Union, "COMMISSION REGULATION (EU) 2016/631 of The European Parliament and of The Council: establishing a network code on requirements for grid connection of generators," Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium, 2016.
- [34] ACER, "Amendments for Commission Regulation (UE) 2016/631 (RfG) - Draft," (<https://www.acer.europa.eu/electricity/connection-codes>, último acceso 9-5-2024), Brussels, Belgium, December, 2023.
- [35] Red Eléctrica, «Procedimiento de Operación (PO) 12.2 - Borrador: Instalaciones conectadas a la red de transporte y equipos de generación, consumo, almacenamiento y sistemas HVDC: requisitos,» 2021.
- [36] European Union, "COMMISSION REGULATION (EU) 2016/1447 of The European Parliament and of The Council: establishing a network code on requirements for grid connection of high voltage direct current systems and direct current-connected power park modules," Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium, 2016.
- [37] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España, "Orden TED/749/2020, de 16 de julio, por la que se establecen los requisitos técnicos para la conexión a la red necesarios para la implementación de los códigos de red de conexión," Boletín Oficial del Estado, número 208, España, 2020.
- [38] J. Bola, R. Rivas, Fernández-Alonso, G. Pérez, J. Hidalgo, L. M. Coronado, C. Longás, S. Sanz, G. Lemarchand, J. Roguin and D. Glaise, "Operational experience of new Spain-France HVDC interconnection," in *Proc. CIGRE Session, paper B4-117*, Paris, France, 2016.
- [39] Red Eléctrica, "Plan de desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica: Período 2021-2026," <https://www.planificacioneolica.es> (último acceso 25-01-2023), España, 2022.
- [40] E. Rakhshani, J. M. Ruiz, E. Dominguez, M. Sojo, M. Lasa, A. Molina, G. Quiñonez, S. Martínez Villanueva and M. Lorenzo Sotelo, "Proyecto RES+: Sistema de almacenamiento híbrido como soporte a parques renovables que permiten una amplia gama de servicios de red avanzados en sistemas grid following: Experiencia a escala real en España," in *Proc. I Edición Congreso de Redes Inteligentes (FutuRed)*, Madrid, España, 14 diciembre, 2022.
- [41] L. Rouco, F. L. Pagola, A. Garcia-Cerrada, J. M. Rodríguez-García and R. M. Sanz, "Damping of electromechanical oscillations in power systems with superconducting magnetic energy storage systems: location and controller design," in *Proc. 12th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dresden, Germany, 19-23 August, 1996.
- [42] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy and P. Kundur, "Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 3, pp. 382-390, 1992.
- [43] Red Eléctrica, Aelec, Grupo Naturgy, Cide, Aseme, «Norma técnica de supervisión de la conformidad de los módulos de generación de electricidad según el Reglamento UE 2016/631,» <https://www.esios.ree.es/es/pagina/codigos-red-conexion> (último acceso 1-5-2024), España, 2022.
- [44] J. Renedo, L. Sigrist and L. Rouco, "Design of power system stabilizers to damp low frequency inter-area oscillations with limited information," in *Proc. 13th IEEE/PES PowerTech Conference*, Milano, Italy, 23-27 June, 2019.

red eléctrica
Una empresa de Redeia