

OCW Integración de energías renovables en la red eléctrica. Huecos de tensión y su efecto sobre la generación renovable.

Francisco Arredondo

Índice

1. Caracterización y tipos de huecos de tensión	1
2. Requisitos y normativa sobre soporte de huecos de tensión	4
A. Atribución de imágenes	7

Un hueco de tensión se define como una bajada repentina de la tensión de una o más fases de la red, seguida de un rápido restablecimiento a su valor nominal después de un corto espacio de tiempo comprendido entre la mitad de un periodo (10ms a 50Hz) y 1 minuto. Estas perturbaciones son habituales que ocurran en los sistemas eléctricos de potencia, causadas por eventos como cortocircuitos, arranques de motores de gran tamaño, conmutaciones de carga o fallos en la red de distribución o transmisión. Dado que los eventos de este tipo son impredecibles, en cuanto a su tiempo, forma y magnitud, es crucial que el sistema y sus dispositivos, incluyendo la generación renovable, estén preparados para soportarlos y responder ante ellos.

Aunque los huecos de tensión suelen ser fenómenos transitorios relativamente rápidos, con una duración de tiempo en la mayoría de los casos inferior a un segundo, estos pueden afectar significativamente el desempeño de dispositivos eléctricos y sistemas de generación. La creciente integración de generación renovable no-síncrona que se conecta a red a través de electrónica de potencia, como la eólica de velocidad variable y solar fotovoltaica, representa un reto en este campo. Esto se debe a que los convertidores electrónicos son altamente sensibles a variaciones en la tensión, lo que puede provocar desconexiones inesperadas, reducción de la capacidad de generación o incluso daños en los equipos. Dado que la integración de energías renovables en la red eléctrica sigue en aumento, es fundamental comprender cómo estas perturbaciones afectan su estabilidad y operación para desarrollar estrategias de mitigación adecuadas.

El estudio de los huecos de tensión en redes con alta penetración de renovable no-síncrona es necesario para garantizar la fiabilidad y calidad del suministro eléctrico. Diversos estándares internacionales y normativa establecen los requisitos sobre la capacidad de las plantas renovables para soportar estas perturbaciones sin desconectarse. Asimismo, disponen cómo deben responder ante este tipo de eventos para aportar estabilidad al sistema.

1. Caracterización y tipos de huecos de tensión

Los huecos de tensión son las perturbaciones de calidad de energía más frecuentes en un sistema eléctrico. Por esta razón, su caracterización y clasificación resultan fundamentales para realizar estudios que permitan predecir sus efectos en la red, y asegurar el diseño y una configuración adecuada de los controladores y sistemas de protección de las plantas de generación renovable. La norma UNE-EN 61000-2-8 es un documento de referencia a consultar. Basada en la IEC 61000-2-8, proporciona información sobre los huecos de tensión, describiendo sus características y parámetros en redes eléctricas [1]. Un hueco de tensión se caracteriza principalmente por su profundidad y duración como muestra la figura 1.

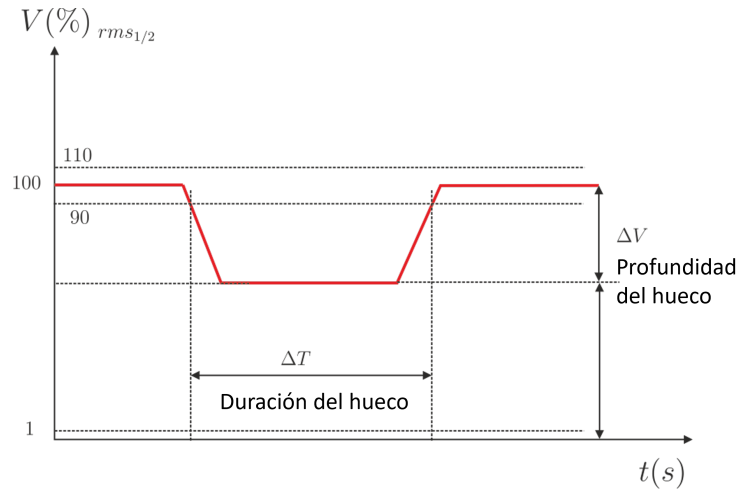


Figura 1: Caracterización de un hueco de tensión

La profundidad de un hueco de tensión hace referencia a la diferencia entre la magnitud de la tensión durante el evento con respecto al valor nominal. La profundidad de un hueco de tensión se puede calcular de la siguiente forma:

$$\Delta V(\%) = \frac{V_{nom} - V_{min}}{V_{nom}} \times 100$$

donde:

- ΔV es la profundidad del hueco de tensión, expresada en términos porcentuales.
- V_{min} es el valor mínimo de la tensión durante el hueco.
- V_{nom} es el valor nominal de la tensión.

La profundidad de un hueco de tensión está estrechamente relacionada por el emplazamiento del punto de observación con relación al lugar del origen de la falta, donde alcanza su máxima magnitud. En general, cuanto más cerca se esté del punto en el que ha ocurrido una contingencia, más similar será la profundidad del hueco a la del sitio de esta. Un cortocircuito en una red de transporte puede tener como consecuencia un hueco de tensión que afecte a una red muy amplia, incluso a centenares de kilómetros. Principalmente, la propagación de un hueco de tensión depende, entre otras cosas, de la distancia a la falta, la sección de los cables, el grupo de conexión de los transformadores entre la falta y el punto de análisis del hueco, la topología de la red y la impedancia de los distintos elementos.

La duración de un hueco de tensión es el tiempo que transcurre entre el instante en que la tensión en un punto particular de una red eléctrica desciende por debajo de un umbral inicial y el instante que alcanza el umbral final como se muestra en la figura 1. Según la norma UNE-EN 61000-2-8, para estos umbrales se utilizan generalmente valores entre 0,85 p.u. y 0,95 p.u. sobre la tensión de referencia. La duración de un hueco suele estar estrechamente relacionada con la velocidad de actuación de los sistemas de protección, soliendo oscilar para gran parte de los cortocircuitos entre los 100 ms a 500 ms, siendo generalmente más rápida la extinción de faltas en la red de transporte que en distribución.

Los huecos de tensión se clasifican en dos categorías principales: trifásicos, donde las tres fases experimentan caídas de tensión proporcionales, y asimétricos, donde las caídas de tensión varían entre las fases. Los huecos monofásicos, que afectan a una sola fase, son los más comunes. Por otro lado, los huecos trifásicos son los más severos, aunque menos frecuentes. La mayoría de las faltas que originan huecos de tensión ocurren en líneas aéreas, principalmente en redes de distribución de

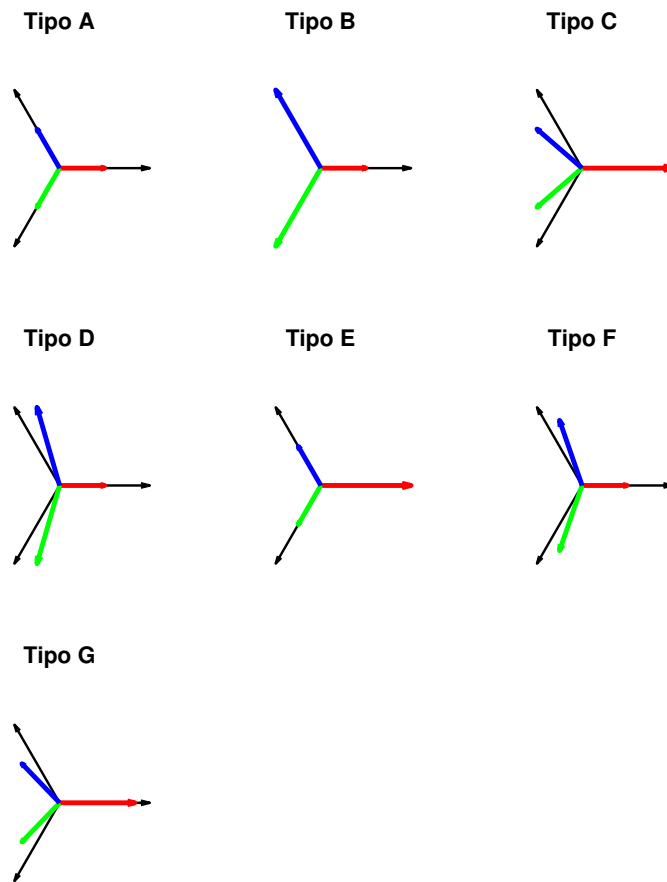


Figura 2: Clasificación ABC de huecos de tensión: Diagrama fasorial por tipo de hueco.

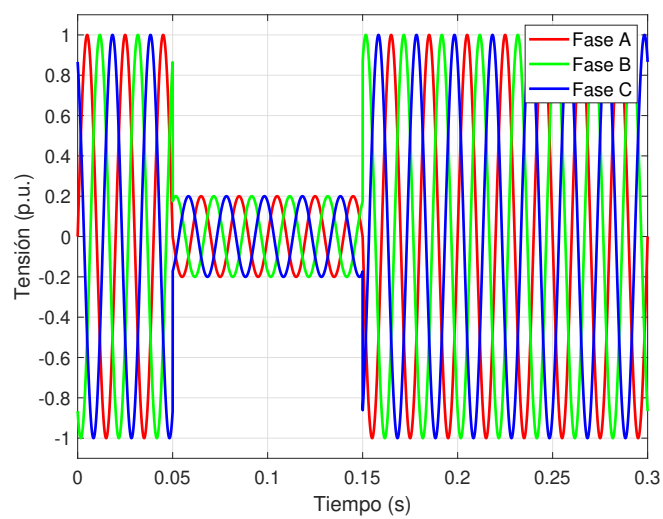


Figura 3: Ejemplo de hueco de tensión trifásico, clasificado como tipo A en la Figura 2

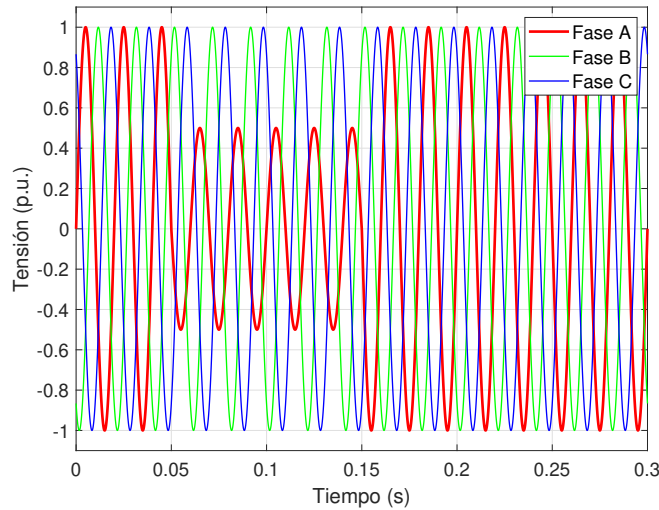


Figura 4: Ejemplo de hueco de tensión monofásico, clasificado como tipo A en la Figura 2

baja y media tensión, aunque también ocurren en la red de transporte, siendo su impacto mucho más severo y alcanzando la propagación de los huecos de tensión áreas mucho más extensas.

Aunque se han propuesto diferentes tipos de clasificaciones para huecos de tensión, la más utilizada actualmente es la clasificación ABC propuesta en [2], que comprende siete tipos, y que se representan mediante su diagrama fasorial que se muestra en la figura 2. Las figuras 3 y 4 muestran la evolución temporal de las tres fases de tensión para los huecos tipo A y tipo B, que corresponden con un hueco de tensión trifásico equilibrado y un hueco monofásico, respectivamente. En ellas se pueden observar y analizar las diferentes características descritas para un hueco de tensión, explicadas en esta sección.

2. Requisitos y normativa sobre soporte de huecos de tensión

A principios de los 2000, la energía eólica comenzó a expandirse rápidamente en España, convirtiéndose en una fuente clave dentro del sistema eléctrico. Sin embargo, en sus inicios, los parques eólicos no estaban preparados para soportar huecos de tensión. Ante caídas bruscas de tensión en la red, los aerogeneradores se desconectaban automáticamente para proteger su electrónica de potencia. Aunque esta estrategia evitaba daños en los equipos, generaba un problema crítico para la estabilidad del sistema: la desconexión masiva de generación eólica podía agravar las perturbaciones y poner en riesgo el suministro eléctrico.

Para solucionar esta situación, el operador del sistema junto a las autoridades regulatorias introdujeron el Procedimiento de Operación P.O. 12.3 en el año 2006 [3], que estableció la obligación de que los parques eólicos soportaran huecos de tensión sin desconectarse y aportaran corriente reactiva durante la falta. Esta normativa pionera exigió a los fabricantes y promotores de parques adaptar sus aerogeneradores, incorporando nuevas estrategias de control y refuerzos en la electrónica de potencia para garantizar una respuesta más robusta ante perturbaciones en la red.

Con el tiempo, la regulación siguió evolucionando en línea con las directrices europeas. En 2016, con la aprobación del Reglamento (UE) 2016/631 [4], se estableció un marco común en toda la Unión Europea para los códigos de red, incluyendo requisitos armonizados sobre el soporte de huecos de tensión. España adaptó su normativa a este reglamento a través de la Orden Ministerial TED/749/2020 [5] y la Norma Técnica de Supervisión (NTS) [6], estableciendo así un marco regulador actualizado que garantiza la estabilidad del sistema eléctrico y la integración segura de

energías renovables.

Requisitos de soporte de huecos de tensión según tipo de modulo de generación eléctrica.

La Orden Ministerial TED/749/2020 [5] establece el requisito de capacidad de soportar huecos de tensión sin desconectarse según el tipo de modulo de generación. La clasificación de los tipos de modulo se presenta y se puede consultar en el tema 7. Para el caso de faltas equilibradas, los perfiles de tensión mínimos en función del tiempo que deben ser capaces de soportar los módulos de generación de electricidad serán los que se indican a continuación. En todos los casos, los perfiles representan el límite inferior de la tensión en el punto de conexión, expresando su valor real respecto a su valor de referencia de 1 p.u., antes, durante y después de una falta.

- **Módulos de generación de electricidad síncronos de tipo B, C o D conectados por debajo del nivel de tensión de 110 kV.** El perfil de tensión en función del tiempo será el indicado en la figura 5.

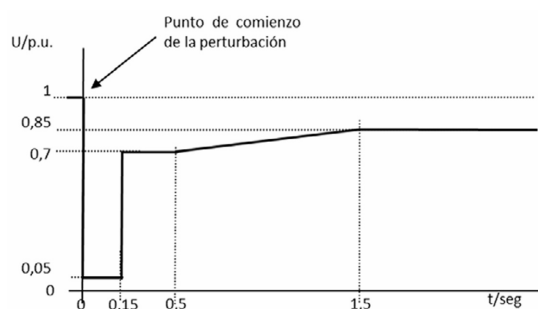


Figura 5: Perfil de la capacidad para soportar huecos de tensión de un módulo de generación de electricidad síncrono de tipo B, C o D conectado a tensión inferior a 110 kV[5].

- **Módulos de parque eléctrico de tipo B, C o D conectados por debajo del nivel de tensión de 110 kV.** El perfil de tensión en función del tiempo será el indicado en la figura 6.

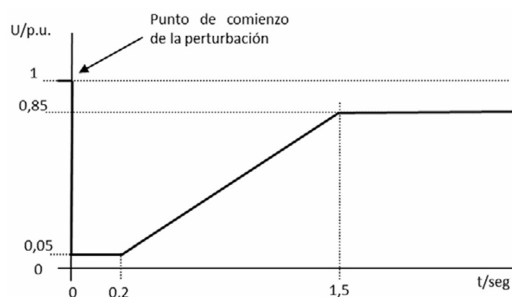


Figura 6: Perfil de la capacidad para soportar huecos de tensión de un módulo de parque eléctrico de tipo B, C o D conectado a tensión inferior a 110 kV[5].

- **Módulos de generación de electricidad síncronos de tipo D conectados a tensión igual o superior 110 kV.** El perfil de tensión en función del tiempo será el indicado en la figura 7.

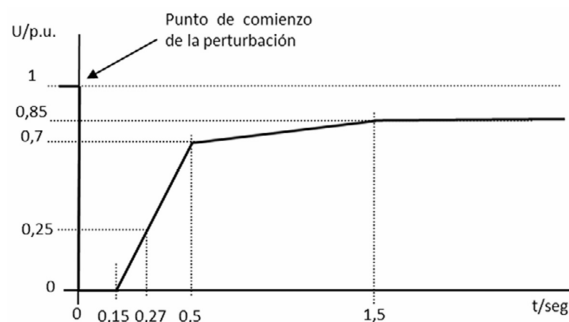


Figura 7: Perfil de la capacidad para soportar huecos de tensión de un módulo de generación de electricidad síncrono de tipo D conectado a tensión igual o superior a 110 kV [5].

- **Módulos de parque eléctrico de tipo D conectados a tensión igual o superior a 110 kV.** El perfil de tensión en función del tiempo será el indicado en la figura 8.

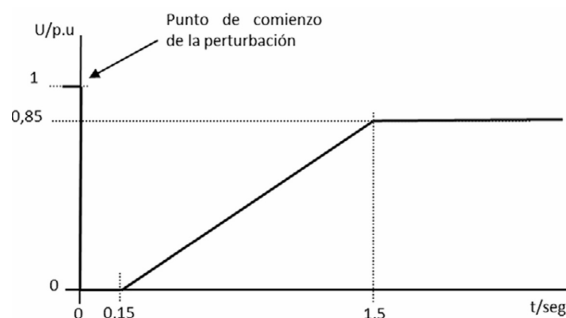


Figura 8: Perfil de la capacidad para soportar huecos de tensión de un módulo de parque eléctrico de tipo D conectado a tensión igual o superior a 110 kV [5].

En cuanto la capacidad para soportar huecos de tensión en caso de faltas desequilibradas, la normativa establece que los módulos de generación de electricidad deben seguir perfiles de tensión específicos según el tipo de cortocircuito:

- En cortocircuitos bifásicos a tierra o monofásicos, aplica el perfil correspondiente de la capacidad para soportar huecos de tensión para faltas equilibradas a la menor menor tensión fase-fase o fase-tierra.
- En cortocircuitos bifásicos aislados de tierra, se considerará la menor tensión fase-fase sobre el perfil correspondiente de la capacidad para soportar huecos de tensión para faltas equilibradas.

Si la red dispone de neutro, este podrá utilizarse como referencia en lugar de la tierra. Además, en situaciones donde la tensión en el punto de conexión caiga por debajo de un umbral determinado, se permite el bloqueo de la electrónica de potencia en los módulos de generación de electricidad, siempre que este se elimine en un tiempo establecido una vez que la tensión se recupere.

Las condiciones previas y posteriores a las faltas en relación con la capacidad de los módulos de generación para soportar huecos de tensión incluyen requisitos sobre la potencia de cortocircuito y el punto de funcionamiento, dependiendo del tipo de módulo. Estos aspectos aseguran que los generadores puedan mantenerse conectados a la red y contribuir a su estabilidad. Asimismo, cabe mencionar que los módulos de parque eléctrico de tipo B, C o D deben ser capaces de gestionar la inyección rápida de corriente a través de un sistema de control continuo durante la perturbación. Para profundizar sobre todos estos aspectos se recomienda consultar la normativa actual [5].

A. Atribución de imágenes

1. Figura 5: Por Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, fuente en [5]
2. Figura 6: Por Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, fuente en [5]
3. Figura 7: Por Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, fuente en [5]
4. Figura 8: Por Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, fuente en [5]

El resto de figuras son de elaboración propia.

Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización (UNE), “UNE-EN 61000-2-8: Compatibilidad electromagnética (CEM) - Parte 2-8: Entorno - Parámetros de compatibilidad para huecos de tensión y otras variaciones de tensión en sistemas de alimentación de baja tensión,” 2006.
- [2] M. H. Bollen, *Understanding power quality problems*. IEEE press New York, 2000, vol. 3.
- [3] Ministerio de Industria Comercio y Turismo, “P.O. 12.3. Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas,” 2006. [Online]. Available: https://www.ree.es/sites/default/files/2024-02/PO_resol_12.3_Respuesta_huecos_eolica.pdf
- [4] ENTSO-E, “Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators,” 2016. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/631/oj>
- [5] Ministerio para la Transición Energética y el Reto Demográfico, “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.” [Online]. Available: <https://boe.es/boe/dias/2020/08/01/pdfs/BOE-A-2020-8965.pdf>
- [6] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, “Norma Técnica de Supervisión de la conformidad de los módulos de generación de electricidad según el Reglamento (UE) 2016/631,” 2020, Versión 2.1, publicada en julio de 2021. [Online]. Available: <https://aelec.es/wp-content/uploads/2021/07/20210709-NTS-SEPE-v2.1.pdf>