



El control de tensión en redes de distribución con Generación Distribuida (II)

Palabras clave: Generación distribuida (GD), Red de distribución, Gestor del sistema de distribución (GSD) y control de tensión.

Resumen:

Desde inicios de la década de los noventa, numerosos y relevantes cambios se han producido en el entorno de la generación eléctrica en el continente europeo y más concretamente en el territorio nacional. Aspectos como la conservación de los recursos naturales, la creciente preocupación por el impacto medioambiental, el incremento de los precios de los combustibles fósiles, la eficiencia energética y la continua búsqueda de una menor dependencia energética en combustibles fósiles (asociado en Europa a una menor dependencia energética exterior) han propiciado el desarrollo de directivas europeas y legislación de ámbito nacional que han promovido el desarrollo de tecnologías de generación, más eficientes (como la cogeneración) por un lado, y de tecnologías de generación de origen renovable, por otro. De entre todos los retos que los gestores de las redes de distribución afrontan para la integración de la generación, en este artículo se va estudiar el impacto de la participación de la generación distribuida (GD) en el control tensión-reactiva en distintas redes reales típicas de distribución, desde alta a baja tensión.

Key words: *Distributed Generation, Distribution Networks, Distribution System Operator, Voltage control.*

Abstract:

Since the last two decades relevant changes have taken place in the electric generation sector, at both European and national levels. The increasing environmental awareness, higher fuel prices, and the aim of reduction of energy dependence on fossil fuels (exterior energy dependence) have driven the development of new European Directives and National Regulations to promote efficient technologies (such as cogeneration) and renewable generation. Among the main challenges that distribution system operators must face for the proper integration of distributed generation this paper will focus on the voltage control in distribution networks with distributed generation analyzing the technical aspects in real distribution networks of high, medium and low voltage.



David Trebolle Trebolle

Ingeniero industrial (2001), Master en Gestión Técnica y Económica del Sector Eléctrico Español (2005), Diploma de estudios avanzados (2007) por la Universidad Pontificia de Comillas y PDD por el Instituto de Empresa Business School (2008). Actualmente es jefe del departamento de "Gestión Activa, Control de Red y Aplicaciones Avanzadas" en la dirección de Explotación de Unión Fenosa Distribución.



Pablo Frías Marín

Doctor Ingeniero del ICAI (2008). Trabaja como investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica donde es responsable del área de Redes Inteligentes Sostenibles, a la vez que profesor en el Departamento de Electrotecnia y Sistemas, donde coordina el "Laboratorio de Máquinas Eléctricas".



José María Maza Ortega

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla (2001), donde en la actualidad es Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Eléctrica.



Jorge Tello Guijarro

Ingeniero industrial de ICAI (2006) y Especialista en Proyecto y Construcción de Infraestructuras Eléctricas de AT (2010). Actualmente es responsable de "Redes Activas y Recursos energéticos distribuidos", dentro del departamento de "Gestión Activa, Control de red y Aplicaciones avanzadas" en la dirección de Explotación de Unión Fenosa Distribución.

Análisis del impacto de la GD en redes de distribución

En la primera parte de este artículo [7] se realizó un análisis técnico y conceptual del control tensión reactiva con GD. En este segundo artículo se va a analizar en más detalle dicho impacto mediante el estudio de varias redes de distribución reales y representativas. Las redes de estudio comprenden una red de alta tensión, cinco redes de media tensión y cuatro redes de baja tensión, que incluyen diferentes segmentaciones. Los esquemas de dichas redes se muestran en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3, respectivamente. La red de alta tensión es un anillo de 45kV constituido por 11 subestaciones, y en el que se localizan 4 generadores distribuidos que suman una potencia de 45MW. Las redes de media tensión seleccionadas representan configuraciones típicas, desde 11 centros de transformación, 5 kilómetros, 7 MVAs de potencia de transformación puramente subterránea en la red urbana, hasta 48 centros de transformación, 50 kilómetros, y 11MVA de potencia con el 94% de la red aérea, en la segmentación mixta. Por último, las redes representativas de baja tensión están asociadas a centros de transformación desde 250 kVA, trazado totalmente aéreo y tramos largos, hasta potencias de 800 kVA y trazado subterráneo con líneas muy cortas.

Figura 2. Esquemas unifilares de las redes de media tensión

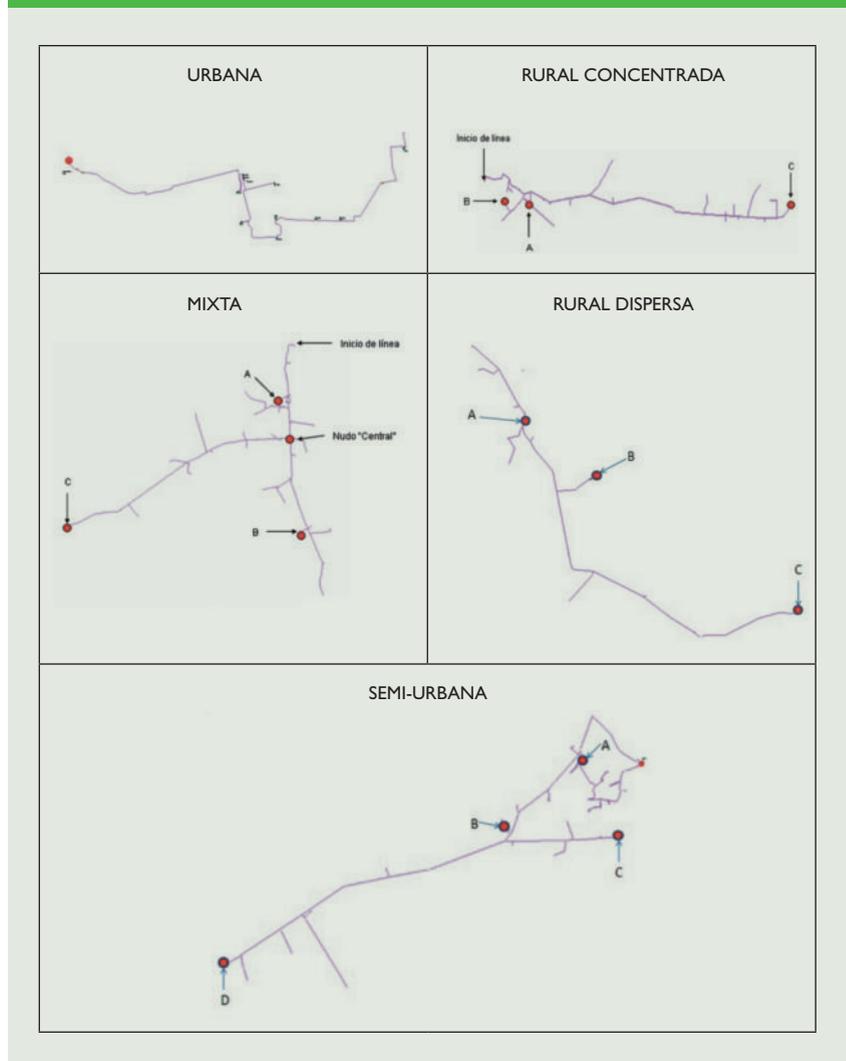
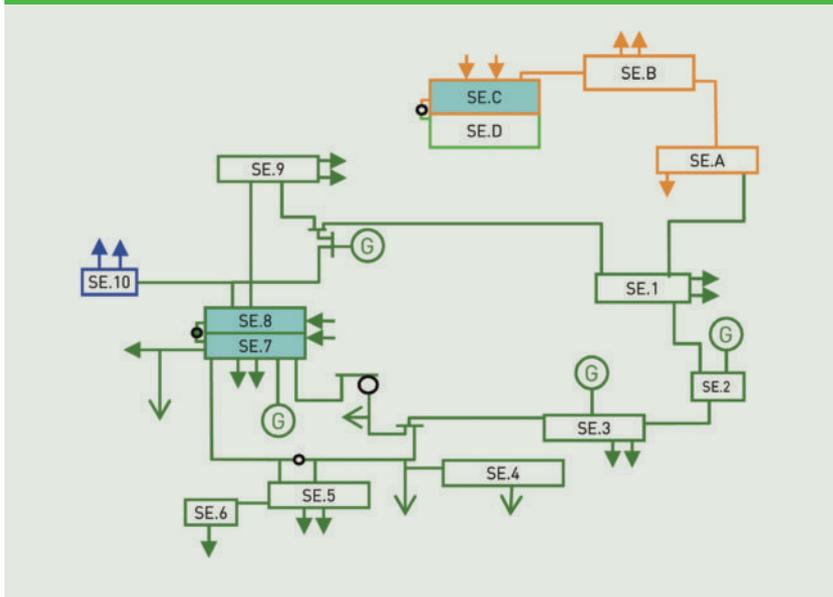


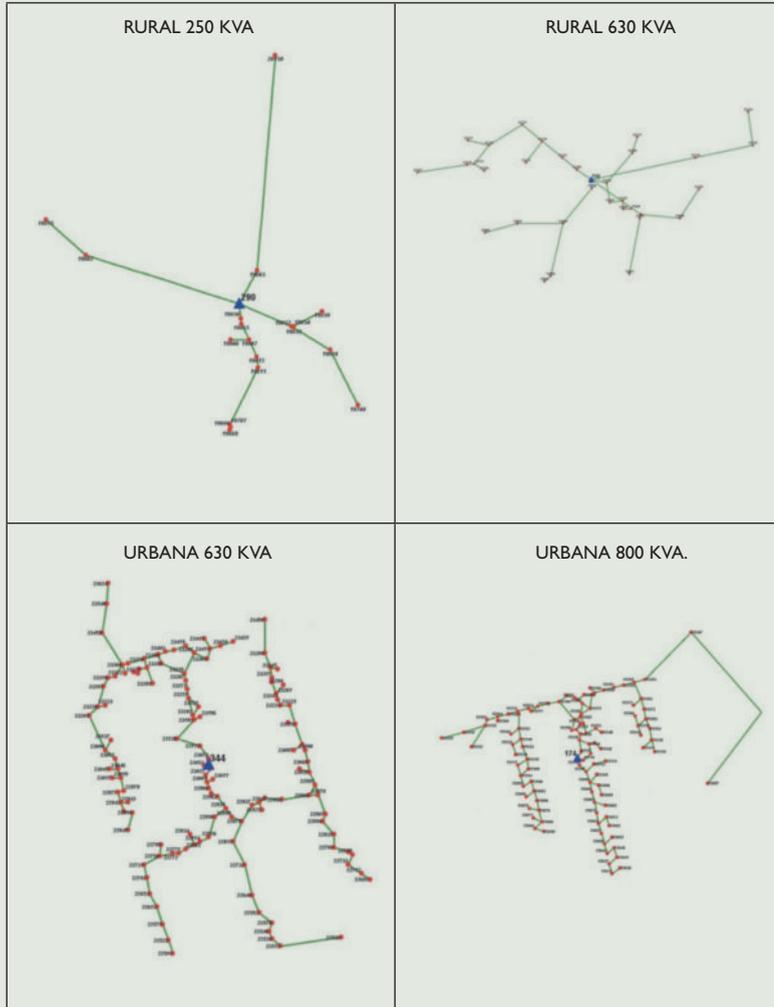
Figura 1. Esquema unifilar de la red de alta tensión



Tal y como se observó en [7], las tecnologías de GD predominantes varían en función del nivel de tensión, por lo que de cara a los estudios y evaluación de impacto se ha supuesto que en las redes de reparto (132-45kV) la generación predominante es la eólica y la cogeneración, en las redes de MT, la cogeneración, solar fotovoltaica y minihidráulica, y en las redes de BT, la solar fotovoltaica. Para el análisis se han usado distintos perfiles típicos por tecnología (Figura 4).

A continuación se analiza el impacto de la GD en las tensiones en las tres categorías de redes de distribución, estudiando varios aspectos tales como el efecto de la potencia activa y reactiva, el nivel de

Figura 3. Esquemas unifilares de las redes de baja tensión



penetración y la localización (concentrada o distribuida) de la GD, así como distintas estrategias de control de tensión.

Influencia de la GD en las redes de distribución de alta tensión

El efecto de la inyección de potencia activa y reactiva en la red de alta tensión analizada se muestra en la Figura 5. Se observa un mayor impacto de la potencia reactiva en las tensiones que de la potencia activa. La tensión de la red se incrementa, en promedio, un 0.16%/MW y 0.36%/Mvar ante inyecciones de potencia activa y reactiva de la GD, respectivamente. La afectación de la inyección de potencia reactiva es mayor que la de potencia activa ya que el ratio R/X de la impedancia de las líneas de la red analizada es en promedio 0.4.

En horas punta, si se desconectase la GD acoplada se obtendrían unos valores de tensión próximos al 95% de la tensión nominal, como se observa en la Figura 5. La conexión de la GD y su funcionamiento a factor de potencia unidad (inyección de potencia reactiva nula), conforme al R.D.1565/2010, mejora las tensiones. Si los generadores operasen para obtener la máxima bonificación según el R.D. 661/2007, éstos funcionarían a un factor de potencia 0.95. Por tanto, las tensiones aumentarían notablemente, llegando en algunos nudos a 1.03 p.u.

No obstante, desde el punto de vista de la operación sería recomendable poder regular las tensiones entre ambos valores extremos. Para ello bastaría dar consignas de tensión a los diferentes unidades de GD. En la Figura 5 también se muestra el valor de las tensiones de la red si toda la GD siguiese consignas de tensión 1 ó 1.025 p.u.

Influencia de la GD en las redes de media tensión

El efecto de los flujos de potencia activa sobre las tensiones es mayor que los de potencia reactiva, debido a que el ratio R/X de las líneas de media tensión suele ser mayor que la unidad, tal como se indicó en el análisis conceptual según [1, 2 y 7]. El efec-

Figura 4. Perfil típico de generación de las distintas tecnologías renovables y cogeneración

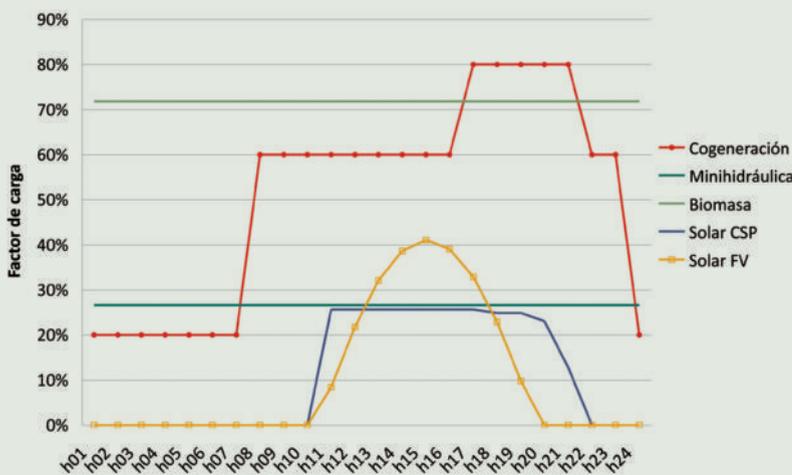
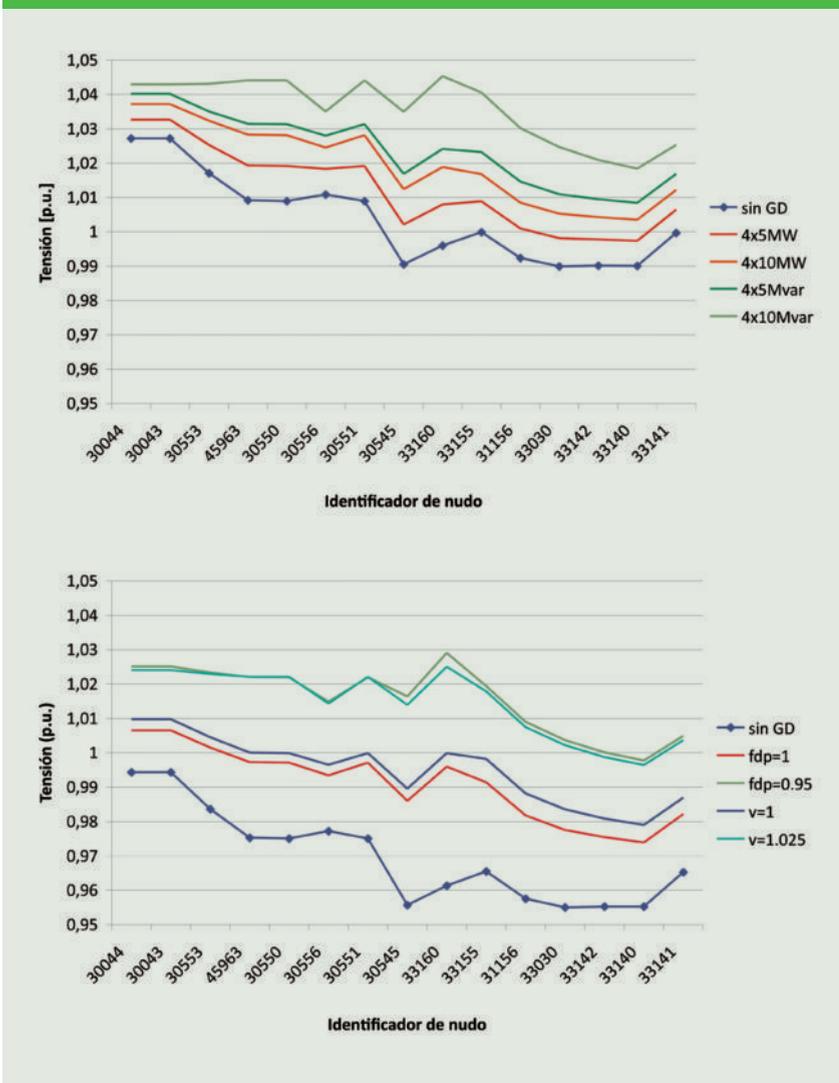


Figura 5. Variación de la tensión en función de la inyección de P y Q de GD (arriba) y con diferentes estrategias de control (abajo)



to depende de la red sobre la que se estudie, siendo la red mixta donde se aprecia un efecto similar de la potencia activa y reactiva.

El impacto de la penetración de la GD en el perfil de tensiones de redes de media tensión depende de la segmentación y del escenario de demanda. En la Figura 6 se observa el impacto que la GD (cuantificada en porcentaje respecto a la demanda de cada escenario, punta o valle), conectada en el nudo final, tiene en la tensión del mismo nudo, respecto al escenario sin GD. Como se observa, el incremento de la tensión es linealmente proporcional a la inyección de potencia activa en el nudo.

La segmentación mixta es en la que se aprecia mayor variación, dado que la longitud de los tramos de línea es mayor que en otras segmentaciones, y que la demanda en los nudos también es superior. También se observa una gran variación en la red rural concentrada, caracterizada por líneas largas. El resto de segmentaciones tienen una menor variación: las redes urbana y semiurbana tienen menores longitudes de red, mientras que la red rural dispersa tiene poca demanda. Las variaciones de la tensión en horas valle (Figura 6) son menores que las observadas en horas punta. Esto se debe a que la producción de la GD es parcialmente función de la demanda

Figura 6. Variación de la tensión en función del grado de penetración en horas punta (izq.) y valle (dcha.)

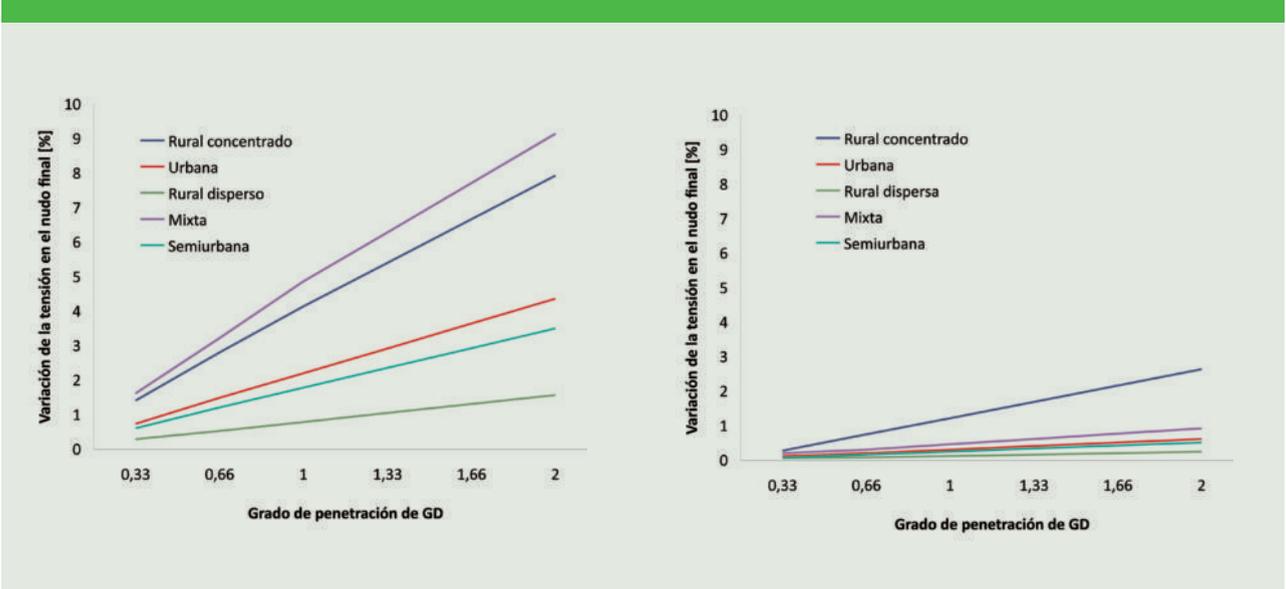


Figura 7. Variación de la tensión en función de la localización de la GD en una red media tensión



(cogeneración), que al ser menor que en horas punta, dicha producción también es menor. El orden de afectación es similar al de horas punta, siendo en este caso la red rural concentrada la que sufre mayor impacto.

La Figura 7 muestra el impacto de la localización de la GD en una red de media tensión de segmentación rural concentrada. Al inyectar potencia activa en un punto de la red, se reduce el flujo de potencia en los tramos aguas-arriba. Esta reducción resulta en una menor caída de tensión en dichos tramos previos. Por tanto, aumentan las tensiones de la red, manteniendo perfiles similares. Cuanto más próximo a la cabecera de la línea se localice la GD su impacto en las tensiones aguas-abajo es menor, dado que hay menos tramos donde se reducen los flujos de potencia.

La mayor variación de las tensiones se produce si la inyección se realiza al final de la línea, dado que la reducción del flujo de potencia afecta a muchos más tramos de línea de MT, y se aumentan notablemente las tensiones. De esta forma el escenario que sirve como referencia al límite superior de tensión en la red es el correspondiente a GD a final de la línea, en un escenario de punta (con mayor producción).

El efecto en las otras segmentaciones de redes de distribución es conceptualmente similar; y el impacto real en las tensiones depende de las características propias de las mismas [5].

Influencia de la GD en las redes de baja tensión

Inicialmente, la inyección de potencia activa frente a la de potencia reactiva tiene un mayor impacto en las tensiones de la línea. Este resultado responde a que el ratio R/X de la impedancia de las líneas de baja tensión es muy superior a la unidad. Por tanto, las inyecciones de potencia activa modifican en mayor medida las tensiones de la línea en comparación con las de potencia reactiva

A esta situación, se añade el efecto secundario de que al modificarse los flujos de potencia por las líneas, también se modifica el flujo de potencia por el transformador del centro de transformación de media a baja tensión

(CT). En los transformadores la impedancia es básicamente inductiva, frente a la componente fundamentalmente resistiva de las líneas. Si asumimos que se mantiene la tensión del lado de la red aguas-arriba en su valor nominal (equivalente a un nudo de potencia infinita), entonces la variación de los flujos de potencia activa tendrán menos efecto que los flujos de potencia reactiva en el transformador del CT.

Por tanto, sumando ambos efectos, si se inyecta potencia activa en la red, la caída de tensión en el transformador del CT se modificará poco, sin embargo las tensiones a lo largo de la red sí que experimentarán cambios. Por otro lado, si se inyecta potencia reactiva en la red, la caída de tensión a lo largo de la línea sufrirá poca variación, sin embargo la caída de tensión en el transformador de cabecera se modificará, afectando a todos los nudos de la red de baja tensión conectados a él.

Si en lugar de mantener la tensión constante en el nudo de alta tensión del CT se mantiene en el nudo de baja, los resultados que se obtienen son similares a los presentados para las redes de media tensión, teniendo más influencia la potencia activa que la reactiva, como se presentó en [7]. Además, como se muestra en la Figura 8 si se inyecta potencia en un nudo al final de la línea, es fácil identificar los dos efectos en la caída de tensión: el correspondiente a las líneas donde

Figura 8. Variación de la tensión en función de la potencia inyectada a final de línea

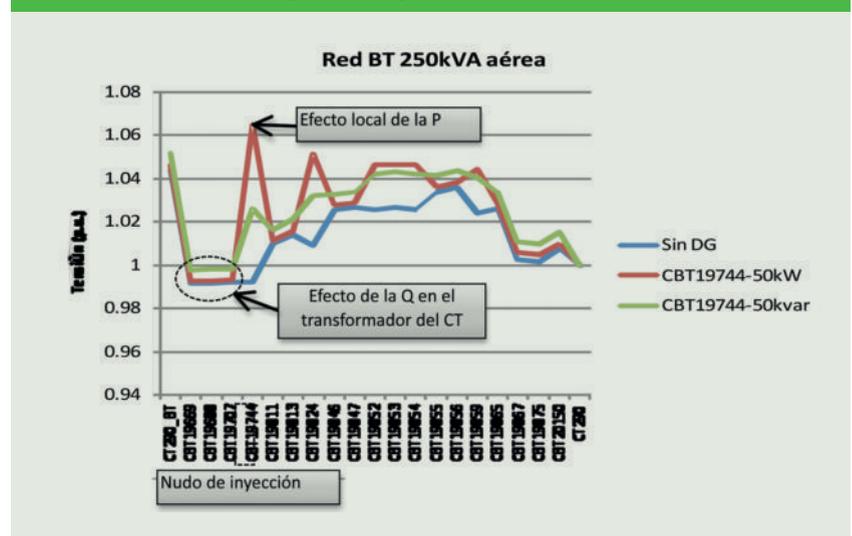
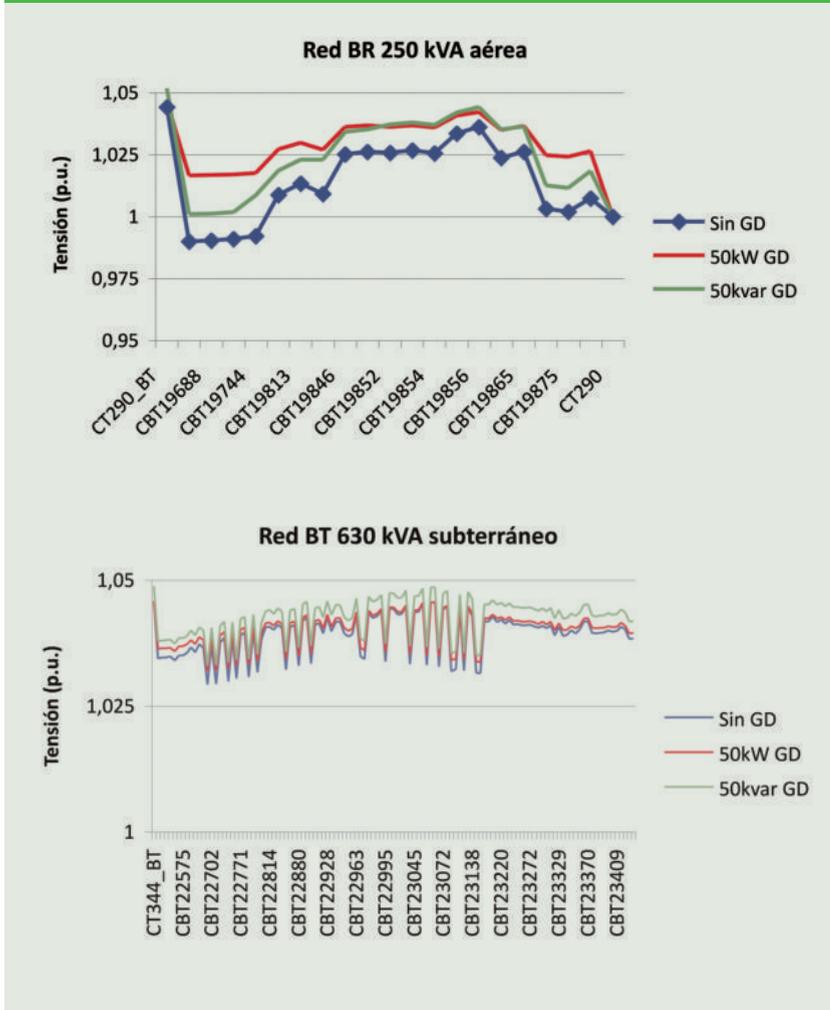


Figura 9. Variación de la tensión en función de la potencia inyectada



predomina el efecto de la potencia activa, y el correspondiente al transformador, donde el efecto de la potencia reactiva es el relevante.

Dado que la previsión es que la GD en redes de baja tensión sea distribuida, se va a estudiar el impacto sobre las tensiones de las distintas redes de baja tensión debido a la inyección en todos los nudos de una potencia total de 50kW y 50kvar, cuyos resultados más significativos se muestran en la Figura 9. En ésta se observa que el impacto sobre las tensiones difiere según la red analizada. La red rural aérea presenta el mayor impacto de la potencia activa sobre las tensiones, ya que en promedio el ratio R/X es superior a 4. La red de BT asociada al CT 630kVA subterránea presenta la variación de tensiones más pequeña, debido a que es la red que tiene

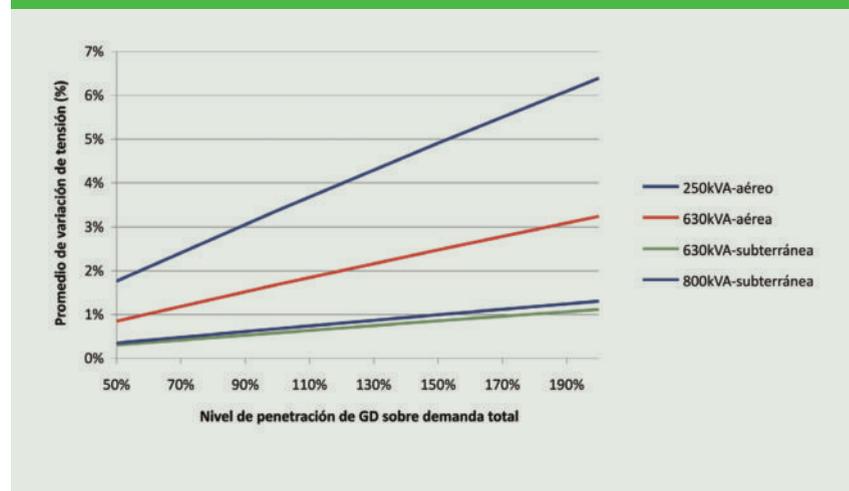
la menor longitud media de las líneas. En esta red, el impacto de la potencia reactiva distribuida es mayor que

el de la potencia activa, ya que todos los nudos están muy próximos al CT y cobra más importancia la caída de tensión en éste que la que aparece en las líneas. Un efecto similar se observa en las otras dos redes, que no están representadas.

En la Figura 10 se muestra cómo varía en promedio la tensión de las distintas redes de baja tensión si se aumenta el nivel de penetración de GD. Distintos niveles de penetración de GD han sido analizados, desde un 33% de la demanda neta de la red estudio, hasta una penetración de GD inyectando el doble de potencia de la demanda. Al igual que en el caso anterior la inyección es homogénea en todos los nudos de la red.

Se observa que hay una mayor variación de las tensiones en redes aéreas que en redes subterráneas. En concreto, la red asociada al CT de 250kVA presenta la mayor sensibilidad a la inyección de potencia activa. Al igual que se indicó en el apartado anterior, se debe a que la red tiene una longitud muy superior al resto. Al tener mayores impedancias en las líneas, la afectación de la variación de los flujos de potencia es también superior al resto de redes. Las redes subterráneas tienen un comportamiento muy parecido, dado que tienen características topológicas similares. La red asociada al CT de 630kVA es la que menos se ve afectada por la penetración de GD, y también es

Figura 10. Variación de la tensión en función de penetración de GD



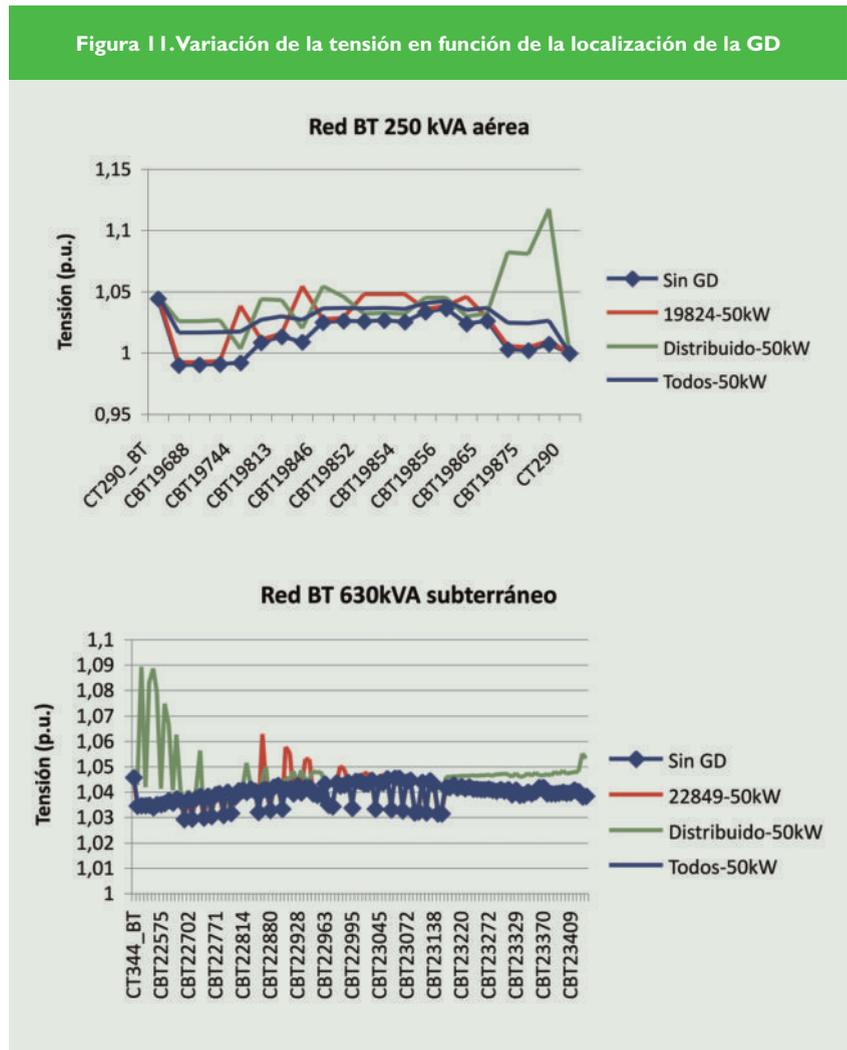
la que menor longitud media de los tramos de línea tiene.

Respecto a la localización de la GD en todas las redes estudio se ha analizado el impacto de la inyección de 50kW. Se han estudiado tres localizaciones de dicha inyección: concentrada en un nudo de final de línea, distribuido en cinco nudos que son final de línea, y distribución de la potencia inyectada entre todos los nudos del sistema. Los resultados para las dos redes más representativas se presentan en la Figura 11.

La inyección de potencia en un nudo final de línea da lugar a sobretensiones en la zona próxima al nudo de inyección, aunque en ningún caso se ha observado tensiones fuera de límite en las redes típicas analizadas. Si la inyección se realiza simultáneamente en distintos nudos sensibles de la red pueden producirse sobretensiones no admisibles, como es el caso de la red rural del CT de 250kVA. De los resultados también se deduce que las redes aéreas analizadas son más sensibles a la inyección de potencia.

Por otro lado, cuanto más se distribuya la inyección de potencia activa en la red menor será el impacto en las tensiones de la red y por tanto menor la posibilidad de sobretensiones. Esta es la situación que se podría esperar en un futuro, donde distintas unidades fotovoltaicas se instalen de forma distribuida.

También es importante señalar que si la penetración de GD fuese mayor



a los 50kW analizados en el ejemplo, la afectación a las tensiones podría dar lugar a más incumplimientos por sobretensiones.

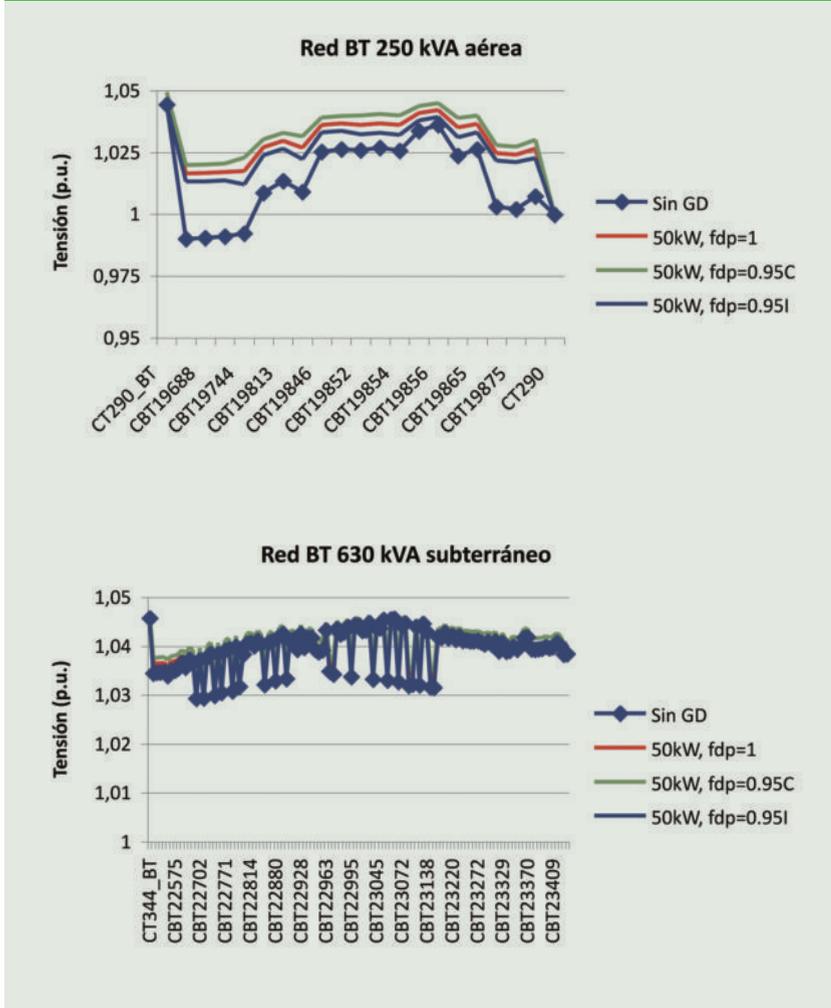
Respecto a las estrategias de con-

trol de tensión sobre las redes estudio de GD distribuida de 50kW, se contemplan las siguientes posibilidades de control de tensión: control con factor de potencia unidad (conforme al R.D. 1565/2010), máxima capacidad de generación de potencia reactiva (factor de potencia 0.95 capacitivo) y máxima capacidad de absorción de potencia reactiva (factor de potencia 0.95 inductivo). Estas dos últimas estrategias permiten evaluar la participación de la GD que maximizase su bonificación conforme al R.D. 661/2007 (debido al RD 1/2012 dicha bonificación no aplica a instalaciones nuevas).

Como se muestra en la Figura 12 frente a la situación sin GD, la inyección de potencia activa en la red afecta notablemente a las tensiones de la red, como ya se ha destacado en las secciones anteriores. El impacto es mayor en redes rurales que en redes



Figura 12. Variación de la tensión en función de la estrategia de control de tensión



urbanas, siendo el impacto en las redes urbanas muy pequeño.

Como se observa en la red asociada al CT de 250kVA, la operación con factor de potencia unitario puede dar lugar a sobretensiones locales (ver Figura 11). Por tanto, en la mayoría de las situaciones de explotación se requiere la absorción de potencia reactiva por parte de la GD para poder compensar las sobretensiones. En este sentido, si se absorbe potencia reactiva en los nodos de conexión de la GD (f.d.p. 0.95 inductivo) se pueden corregir parcialmente estas sobretensiones.

Conclusiones

- El impacto en las tensiones en redes de distribución típicas, debido a la inyección de potencia activa es mayor que el resultante de inyectar potencia reactiva, justo lo con-

trario a lo que ocurre en las redes de transporte. La impedancia de las líneas de distribución tiene una componente resistiva similar o mayor a su componente inductiva (no así en las líneas de transporte). Esta característica hace que la caída de tensión por variación de los flujos de potencia activa tenga un mayor efecto que la originada por los flujos de reactiva.

- La inyección de potencia activa en las redes de distribución supone un incremento de las tensiones de toda la red, siendo esta afectación lineal con el nivel de penetración. Para escenarios de elevada penetración de generación distribuida, en las redes analizadas, la variación de las tensiones es del 5% para la red de alta tensión, entre el 1% y el 10% para las redes de media tensión, y entre

el 1% y el 10% para redes de baja tensión.

La afectación en las tensiones difiere según la segmentación de la red analizada. El impacto es mayor en redes rurales que en redes urbanas, debido a la mayor longitud de las primeras, lo que da lugar a una mayor impedancia y por tanto una menor caída de tensión por flujos minorados por la GD.

- La localización de la GD influye notablemente en las tensiones de las redes de distribución analizadas. El impacto de la inyección de potencia activa aumenta cuanto más nos alejamos de la cabecera de la línea, dado que se reducen las caídas de tensión en más tramos.

El tipo de tecnología de GD, debido a sus tamaños óptimos por economías de escala y retribución actual, determina fundamentalmente su tamaño y localización. Por ejemplo, en redes de reparto o media tensión, la GD predominante son las plantas de cogeneración o eólica de elevada potencia y localizadas en puntos específicos; en redes de media tensión la fotovoltaica, pequeña hidráulica y cogeneración de mediana potencia más distribuidas por dicha red; y, finalmente, en redes de baja tensión se espera que predomine la generación solar fotovoltaica de pequeña potencia nominal la cual estará muy distribuida a lo largo de toda la red.

La red de alta tensión analizada tiene estructura de anillo y control de tensión continuo con los transformadores con regulación en carga, y por tanto no hay mucha afectación de la localización de la GD. En las redes de media y baja tensión analizadas se observa que, dado que su estructura es radial, el impacto más relevante es el que tiene lugar cuando la GD se conecta al final de la línea. En el caso de las redes de baja tensión el efecto es más relevante ya que en estas redes no existe control dinámico de la tensión.

- El perfil de generación de cada tecnología (Figura 4) y su correspondencia con la demanda determinan el impacto en las tensiones. Las



plantas de cogeneración, conectadas principalmente en redes de reparto y media tensión, dado que suelen estar asociadas a ciclos productivos, siguen parcialmente la curva horaria de la demanda. La generación solar fotovoltaica, con producción diurna, se ajusta a la curva de demanda en verano, aunque en invierno no aporta durante el pico de demanda nocturno. Con niveles de penetración moderados, ambas tecnologías no afectarían negativamente a las tensiones de red. Sin embargo, la energía eólica, cuya producción no sigue un patrón productivo determinado, puede empeorar las tensiones en horas valle ya de por sí elevadas. Otras tecnologías de base, como la minihidráulica o algunas cogeneraciones también tendrían un impacto negativo sobre las tensiones en horas valle.

- La estrategia de control de tensión supone una ayuda necesaria para minimizar el impacto negativo de la penetración de GD en las redes eléctricas. En este artículo se han analizado tres estrategias: control a factor de potencia unidad, control a factor de potencia 0.95 (inductivo o capacitivo), y control con consigna de tensión. En las redes de

distribución analizadas, el control a factor de potencia unidad supone generalmente tensiones de red muy elevadas. Éstas se pueden mejorar si se opta por un control a factor de potencia 0.95, absorbiendo potencia reactiva. No obstante, en algunas situaciones de operación este control no es adecuado porque lleva a valores de tensión muy degradados, o por lo contrario no se aprovecha toda la capacidad de absorción de la GD. Por tanto, como se observa en los resultados, si se opta por un control con consigna de tensión, se mejora el perfil de las tensiones de la red, con un aprovechamiento adecuado de los recursos de reactiva de la GD.

- Se precisa definir un sistema de control de tensiones eficaz. La inyección de potencia activa en las redes de distribución por parte de la GD impacta sobre las tensiones de forma significativa. A esta situación se añade la incertidumbre en cantidad y tiempo de la inyección de potencia activa. La GD controlable (cogeneración) no siempre sigue una operación conforme a un programa, y la GD no controlable (eólica, solar o minihidráulica) tiene una produc-

ción incierta y variable. Finalmente, al distribuidor le resulta muy difícil el responder en tiempo real en las redes de media y baja tensión a las variaciones de tensión producidas por la GD, ya que el último control dinámico de la tensión se realiza en el parque de subestación de media tensión. Por tanto, la GD debería contribuir de alguna forma al control de tensiones, ya que con niveles crecientes de penetración no se puede asegurar los actuales valores de la calidad de la tensión de la red.

Agradecimientos

El trabajo y las conclusiones que se han expuesto en el presente artículo son fruto de los trabajos realizados en los proyectos Redes 2025¹, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y PRICE-GDI². ■

Bibliografía

[1] AICIA, "Análisis de la contribución efectiva de las generación distribuida al control de tensiones", PSE-REDES 2025 (PSS-120000-2009-29), entregable PT4/2, junio 2010.

[2] Labein/Ziv, "Tecnologías de control tensión-reativa", PSE-REDES 2025, entregable PT4/3, junio 2010.

[3] P. Frías, T. Gómez, R. Cossent, J. Rivier, "Improvements in current European network regulation to facilitate the integration of distributed generation", International Journal of Electrical Power & Energy Systems. vol. 31, no. 9, pp. 445-451, octubre 2009.

[4] R. Cossent, P. Frías, T. Gómez, Current state of and recommendations for improvement of the network regulations for large-scale integration of DER in to the European electricity market. SOLID-DER Project Phase II. November 2008. Online: www.solid-der.org

[5] IIT, "Modelado de la red", Control de tensiones mediante generación distribuida, PSE-REDES 2025 (PSS-120000-2009-29), entregable PT4/4, diciembre 2010.

[6] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, RD1565/2010 de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

[7] David Trebolle, Pablo Frías, José María Maza, José Luis Martínez, "El control de tensión con generación distribuida en redes de distribución", Revista Anales, Número marzo-abril, 2012.

⁽¹⁾ Redes 2025: desarrollo e implementación de soluciones tecnológicas para la RED eléctrica española del 2025 (PSS-120000-2009-29) www.redes2025.es

⁽²⁾ PRICE-GDI: proyecto conjunto de redes inteligentes en el corredor de Henares. Gestión de la generación distribuida – PRICE GDI (IPT-2011-1501-920000) www.priceproject.es