



Mejora de la calidad del suministro eléctrico mediante centros de transformación inteligentes

Palabras clave: continuidad del suministro eléctrico, redes inteligentes, automatización de la red de distribución, centro de transformación inteligente, detección y aislamiento de faltas y reposición del servicio.

Resumen:

En el actual contexto de preocupación por el medioambiente y conexión a las redes de distribución de generadores principalmente basados en fuentes renovables, se requiere un papel más activo de las empresas de distribución eléctrica, donde la automatización de la distribución cobra especial importancia para evolucionar hacia una red más inteligente. Los centros de transformación inteligentes pueden jugar un papel clave, contribuyendo a una mejora de la calidad del suministro. En este artículo se evalúa el impacto de la implantación de centros de transformación inteligentes sobre la continuidad del suministro eléctrico.

Key words: *Continuity of supply, smart grids, distribution automation, smart transformer substation, fault detection, isolation and service restoration (FDIR).*

Abstract:

Under current environmental concerns and due to the integration of generation mainly based on renewable sources in distribution networks, distribution automation becomes essential in order to progress towards a smarter network. Smart transformer substations may play a very important role in this process by helping improve quality of supply. This article analyses the impact of the implementation of smart transformer substations on continuity of supply.



Andrea Rodríguez Calvo

Ingeniera Industrial del ICAI. Se incorporó al Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) en 2011 en el Área de Redes Inteligentes Sostenibles.



Pablo Frías Marín

Doctor Ingeniero del ICAI e investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica, donde es responsable del Área de Redes Inteligentes Sostenibles.



Javier Reneses Guillén

Doctor Ingeniero de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI y Licenciado en Ciencias Matemáticas. Actualmente es Investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT).



Carlos Mateo Domingo

Doctor Ingeniero de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI e Ingeniero Técnico en Informática de Sistemas. Se incorporó al Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) en 2001.



Luis del Río Etayo

Ingeniero Técnico Industrial de la UPV/EHU y MSc en Sist. Eléctrico. Actualmente trabaja como VTLab Manager en Ormazabal.



Santiago Bañales

Ingeniero Industrial de la UPM y MSc Technology and Policy. Actualmente es Managing Director - Strategy, Development & Technology en Ormazabal.

Introducción

La automatización en los sistemas eléctricos se ha centrado principalmente en las redes de transporte y alta tensión, donde el número de elementos y nudos que se han de controlar es mucho menor y la potencia conectada a cada nudo es mucho mayor. En los niveles más altos de tensión la implantación de cualquier medida de mejora tiene, por tanto, un impacto mayor en el sistema. Sin embargo, en el actual contexto de preocupación por el medioambiente y la seguridad del suministro energético, se está experimentando un cambio en el paradigma del sistema eléctrico. El número de generadores conectados a las redes de distribución, principalmente basados en fuentes renovables, ha visto un crecimiento muy notable. En el año 2012, casi la mitad de la generación de régimen especial estaba conectada a redes eléctricas de menos de 73 kV. La integración de una gran cantidad de recursos conectados a las redes de distribución supone un reto que requiere que el distribuidor tenga un papel más activo en la gestión y operación de las mismas, para garantizar la calidad y eficiencia del servicio.

Los centros de transformación inteligentes (que conectan las redes de media y baja tensión) son la pieza clave en este proceso de automatización de las redes de distribución. Los centros de transformación inteligentes pueden contribuir a una mejora significativa de la operación y mantenimiento de las redes de distribución que podría conllevar numerosos beneficios, como la mejora de la calidad del suministro, la reducción de pérdidas de energía en la red y la reducción de costes y emisiones de gases invernadero.

Este artículo presenta el concepto de continuidad del suministro eléctrico y analiza cómo la automatización de los centros de transformación es capaz de mejorarla, desde un punto de vista conceptual y con distintos ejemplos prácticos.

La continuidad del suministro eléctrico

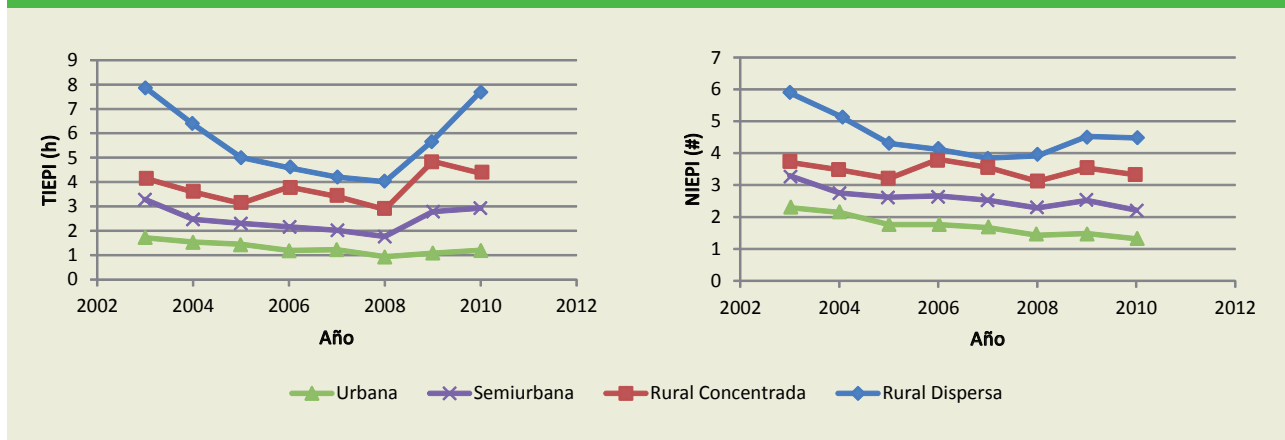
La calidad del suministro eléctrico se evalúa según distintos conceptos, incluyendo la calidad de la onda, la atención comercial y la continuidad de la calidad del suministro, que se refiere al número y duración de las interrup-

ciones del suministro. Dichas interrupciones acarrear importantes pérdidas económicas para los clientes domésticos, comerciales e industriales, que ven impedida su actividad. Por ello, la regulación eléctrica establece unos incentivos y penalizaciones para que las empresas de distribución mejoren la continuidad del suministro¹.

De acuerdo a la normativa vigente en España, la continuidad del suministro eléctrico se mide mediante los índices de calidad TIEPI y NIEPI² que, de alguna manera, cuantifican el número medio de interrupciones que sufren los consumidores conectados a la red de distribución y el tiempo medio de duración de estas interrupciones. Se distinguen cuatro tipos de zona de acuerdo a la densidad de consumo eléctrico, tanto para la evaluación de estos índices como para el establecimiento de requisitos mínimos de calidad³.

La Figura 1 muestra la evolución de los índices de continuidad del suministro registrados en las redes de distribución españolas durante el periodo 2003-2010. En la actualidad, España goza de un buen nivel de continuidad del suministro en comparación con

Figura 1. Evolución histórica de los índices de calidad del suministro eléctrico TIEPI (izda.) y NIEPI (dcha.) en España durante el periodo 2003 – 2010, según los distintos tipos de zona⁴



⁽¹⁾ Real Decreto 222/2008, de 15 de febrero, por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica. Orden ITC/3801/2008, de 26 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir de 1 de enero de 2009.

⁽²⁾ Los índices TIEPI (Tiempo de Interrupción Equivalente de la Potencia Instalada en media tensión) y NIEPI (Número de Interrupciones Equivalente de la Potencia Instalada en media tensión) se definen en la Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo, por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico.

⁽³⁾ La regulación española distingue cuatro tipos de zona: urbana, para capitales de provincia o municipios con más de 20.000 suministros; semiurbana, para municipios con un número de suministros comprendido entre 2.000 y 20.000; rural concentrada, para municipios con un número de suministros comprendido entre 200 y 2.000; y rural dispersa, para municipios con menos de 200 suministros y suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.

⁽⁴⁾ Elaboración propia a partir de los datos del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo: <https://oficinavirtual.mityc.es/eee/Conexion/SubMenu.aspx?loc=19>

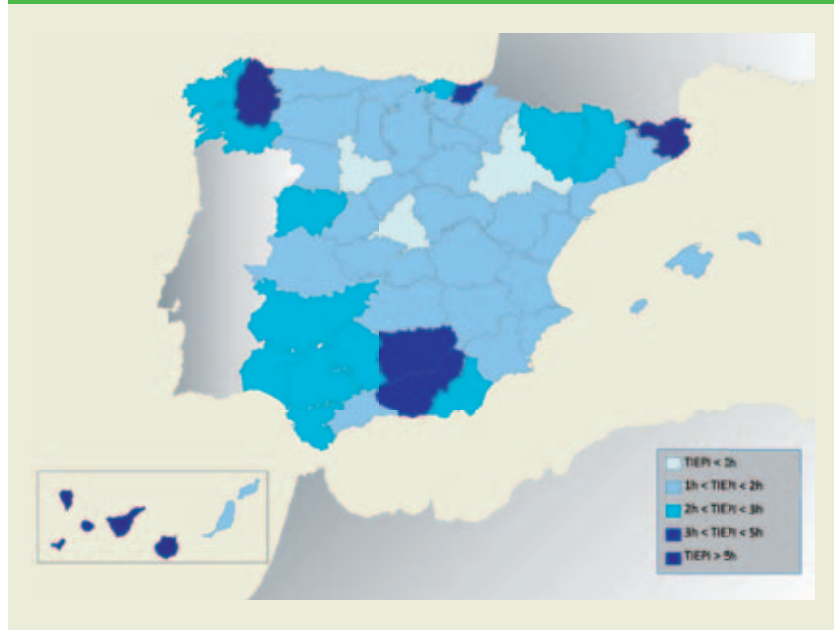
los índices de calidad en otros países⁵. Sin embargo, factores como el envejecimiento de las redes y la creciente integración de generación distribuida pueden poner en riesgo los valores actuales. Resulta, por tanto, muy interesante plantear medidas que puedan contribuir a la mejora o prevención del deterioro de la continuidad del suministro.

Es importante remarcar, además, que incluso entre regiones cercanas y de valores similares de densidad de consumo existen disparidades entre los niveles de calidad, tal y como se muestra para las provincias españolas en la gráfica de la Figura 2, donde se representa el mapa de provincias españolas coloreadas de acuerdo a los valores de TIEPI registrados en 2010 en las zonas urbanas. Esta heterogeneidad se debe tener presente a la hora de evaluar el efecto de las medidas de mejora.

La calidad del suministro eléctrico depende de forma directa de la capacidad de la empresa de distribución de detectar y solucionar un incidente eléctrico. Cuando se produce una avería, las brigadas de mantenimiento localizan la falta siguiendo un proceso iterativo, conocido en algoritmia como bisección o búsqueda dicotómica. En cada desplazamiento, las brigadas se dirigen al punto de la red cuya operación proporciona mayor información, típicamente el punto medio (centro de gravedad de la carga asumiendo una distribución uniforme de la misma). Mediante la operación de las protecciones de cabecera de circuito y del centro de transformación al que se haya desplazado la cuadrilla, los operarios pueden detectar si la falta se ha producido aguas arriba o aguas abajo del punto analizado. En el caso de redes malladas que cuenten con el apoyo de otros circuitos, la cuadrilla puede además reponer el servicio en el segmento libre de falta.

A continuación se ilustra este proceso mediante un ejemplo. En la Figura 3 se

Figura 2. Mapa de clasificación de las provincias españolas en base a los índices TIEPI registrados en las zonas urbanas en el año 2010⁶



representan dos circuitos de media tensión (a y b), alimentados por una misma subestación AT/MT. Cada circuito alimenta a su vez a seis centros de transformación convencionales (CT) conectados en configuración entrada y salida a través de protecciones manuales; es decir, existe un interruptor manual tanto en la entrada (P1) como en la salida (P2). Adicionalmente, los circuitos están dotados de un interruptor de cabecera automático⁷ (Pa1 y Pb1), normalmente cerrado para permitir el paso de la corriente, y un elemento de protección de apoyo (Pab), normalmente abierto, que permite conectar entre sí distintos circuitos para proveer un camino alternativo para el suministro eléctrico en caso de falta en alguno de los circuitos.

Si ocurre una falta entre los centros de transformación CTa2 y CTa3, como muestra la imagen superior de la Figura 3, el interruptor de cabecera del circuito a (Pa1) se abre automáticamente, dejando el circuito entero aislado y, por tanto, sin servicio. La compañía de distribución manda entonces una brigada de mantenimiento que se dirige al centro de trans-

formación CTa4. De acuerdo con la imagen central de la Figura 3, al abrir el interruptor aguas abajo de CTa4 y cerrar remotamente el interruptor de cabecera (Pa1), este último se abre automáticamente, ya que la falta se encuentra aguas arriba de CTa4. Así, la brigada puede reponer el servicio en los centros de transformación CTa4 – CTa6, aislando este segmento del resto del circuito y uniéndolo al circuito b mediante el cierre del interruptor Pab, tal y como muestra la imagen inferior de la Figura 3. Este proceso se repite de forma que la cuadrilla realiza otros dos desplazamientos para reponer el servicio para los consumidores conectados primero a los centros de transformación CTa1 y CTa2 y después CTa3. Finalmente, la cuadrilla realiza los trabajos de reparación necesarios en el segmento de la falta para restaurar el funcionamiento normal del sistema.

Centros de transformación inteligentes

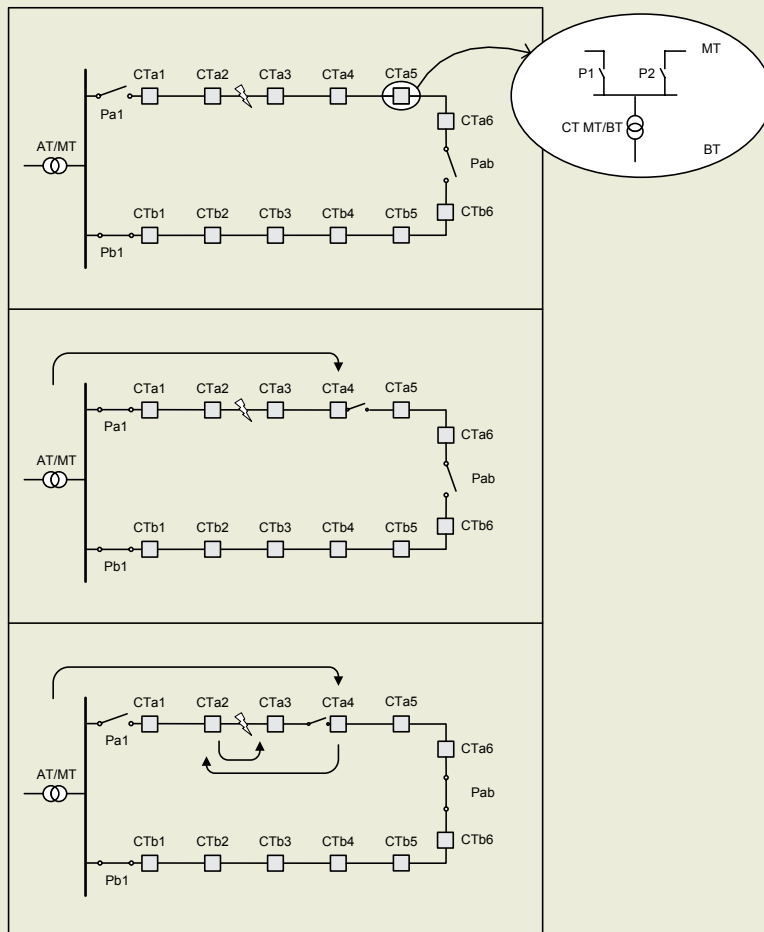
Los centros de transformación inteligentes incorporan diversas funciona-

⁵ El informe *5th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity Supply 2011*, emitido por la CEER, presenta una comparativa de los niveles de continuidad del suministro en los países de la Unión Europea. Los resultados sitúan a España en puestos intermedios.

⁶ Elaboración propia a partir de los datos del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo: <https://oficinavirtual.mityc.es/eee/Conexion/SubMenu.aspx?loc=19>

⁷ Se entiende que este interruptor es capaz de abrir en carga y además permite ser telecontrolado.

Figura 3. Proceso de detección y aislamiento de faltas y reposición del servicio en un esquema de red urbano con centros de transformación convencionales



lidades adicionales a la conversión de potencia de media a baja tensión, ya que, además, son capaces de detectar y aislar faltas y reponer el servicio

(FDIR: Fault Detection, Isolation and Service Restoration) de forma automática. Para poder realizar FDIR, el centro de transformación inteligente

ha de incorporar una serie de funcionalidades, tal y como se representa en el esquema de la Figura 4.

- **Monitorización:** el centro de transformación necesita conocer el estado de la red mediante la medida de corrientes, tensiones y potencias activas y reactivas en media y baja tensión.
- **Inteligencia:** se precisa de un sistema o algoritmo de control que procese la información recibida sobre el estado del sistema y pueda proponer decisiones de forma autónoma para actuar en caso de falta. La inteligencia del sistema podrá estar implementada, en mayor o menor grado, de forma distribuida, es decir, en cada centro de transformación inteligente, o de forma centralizada, en el centro de control de distribución. En cualquier caso, se ha de garantizar una buena coordinación entre las distintas funcionalidades de los centros de transformación inteligentes y entre los distintos elementos conectados a la red de distribución.
- **Comunicaciones:** el centro de transformación inteligente necesita comunicarse y coordinarse con otros elementos de la red y para ello se requiere una infraestructura de comunicaciones.
- **Telecontrol o control remoto:** los elementos de protección han de ser telecontrolables, de forma que permitan su operación tanto desde el propio centro de transformación como desde el centro de control del operador de la red de distribución.

El conjunto de funcionalidades descrito requiere a su vez la implementación de una serie de capas interconec-

Figura 4. Funcionalidades del centro de transformación inteligente con FDIR automático

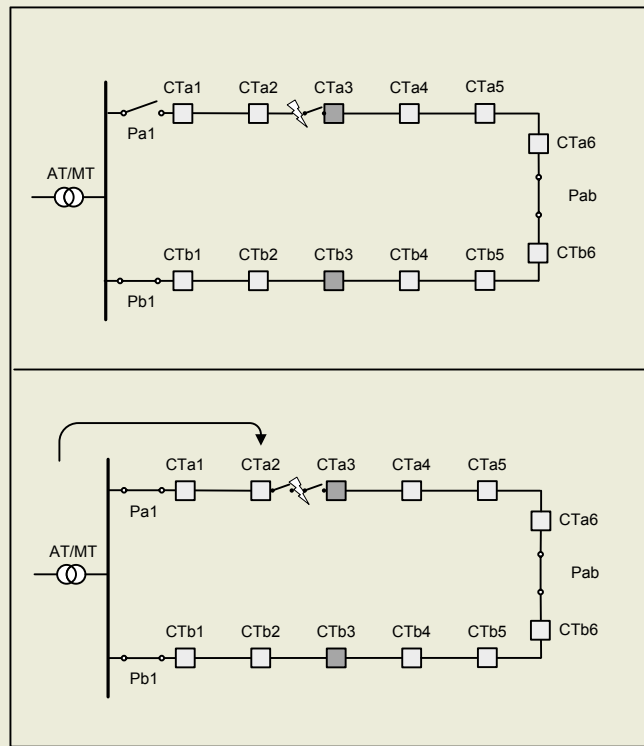


tadas, que pueden ser designadas como hardware, middleware y software. La capa de hardware comprende toda la infraestructura física (componentes y equipos), el software engloba los algoritmos y sistemas que llevan a cabo la gestión y el procesado de toda la información (medidas, instrucciones, etc.) y la capa de middleware es la responsable de la interacción de hardware y software (comunicación y control).

La implantación de centros de transformación inteligentes agiliza enormemente el proceso de gestión de faltas en las redes de distribución. El ejemplo propuesto en el anterior apartado se retoma para ilustrar el efecto de la implementación de un centro de transformación inteligente en cada circuito, lo cual corresponde a un grado de automatización aproximado del 15%. En la Figura 5 se representan los circuitos a y b con un centro de transformación inteligente cada uno (CTa3 y CTb3). En este caso, si ocurre una falta entre los centros de transformadores CTa2 y CTa3, el centro de transformación inteligente actúa automáticamente de forma coordinada con el resto de protecciones, tal y como se muestra en la imagen superior de la Figura 5. De esta forma, se abren automáticamente los interruptores de cabecera del circuito a (Pa1) y aguas arriba del centro de transformación inteligente CTa3 para aislar el segmento que comprende



Figura 5. Proceso de detección y aislamiento de faltas y reposición del servicio en un esquema de red urbano con centros de transformación inteligentes



CTa1-CTa2. Al mismo tiempo, se cierra automáticamente el interruptor Pab, quedando repuesto el servicio para los consumidores conectados a los centros de transformación CTa3-CTa6. Ahora, como se observa en la imagen inferior de la Figura 5, la brigada de mantenimiento puede reponer el servicio para los consumidores restantes, realizando un único desplazamiento al centro de transformación CTa2. Allí ha de realizar la operación explicada en la sección anterior para detectar que la falta se ha producido aguas abajo de dicho centro de transformación y reponer el servicio, cerrando el interruptor de cabecera y abriendo el interruptor aguas abajo de CTa2. Finalmente, se puede reparar el segmento dañado sin necesidad de interrumpir el suministro.

Es evidente que la implantación de centros de transformación inteligentes presenta un enorme potencial en la mejora de la operación y el mantenimiento de las redes de distribución. Por un lado, cuando se produce

una falta, el número de consumidores afectados por la interrupción del suministro se ve reducido drásticamente. Por otro lado, durante el proceso de gestión de faltas, tanto el número de desplazamientos de cuadrilla necesarios como la distancia que se ha de cubrir en cada desplazamiento es menor. En consecuencia, se reducen tanto el número medio de interrupciones como la duración media de las mismas, y por tanto, el NIEPI y el TIEPI.

Quantificación del impacto en redes tipo

En redes urbanas totalmente mallas, todos los circuitos están provistos de un camino alternativo para ser alimentados y, por tanto, una automatización total conllevaría un incremento de la calidad hasta alcanzar el punto de TIEPI y NIEPI nulos, ya que cualquier falta sería automáticamente aislada y el servicio repuesto en un tiempo reducido (típicamente inferior a un minuto⁸). Sin embargo, la implantación de centros

⁸ Los índices TIEPI y NIEPI se calculan contabilizando sólo interrupciones de suministro de duración superior a 3 minutos.

Tabla 1. Parámetros del caso de estudio

Esquema de configuración	CTs (n°)	Potencia instalada (kVA)	Consumidores (n°)	Longitud (km)	Tasa de fallos ⁹ (fallos/ km·año)	Tiempos FDIR ¹⁰ (min)
Bucle	10	8.000 kVA	2.000	1	1	45; 25; 15; 10

de transformación inteligentes conlleva un coste considerable. Por ello, es de suma importancia cuantificar el verdadero efecto que tiene la automatización de los centros de transformación en las redes de distribución.

Este artículo presenta el análisis del impacto de la implantación de centros de transformación inteligentes, considerando distintos grados de automatización, sobre los índices de continuidad del suministro en redes de distribución urbanas de media tensión. El estudio se ha realizado sobre una red tipo en configuración en bucle (similar al representado en las figuras 3 y 5), asumiendo carga homogéneamente distribuida a lo largo de los circuitos. Los valores considerados para los distintos parámetros de los circuitos analizados se recogen en la Tabla 1.

Las gráficas de la Figura 6 muestran la evolución de los índices TIEPI y NIEPI a

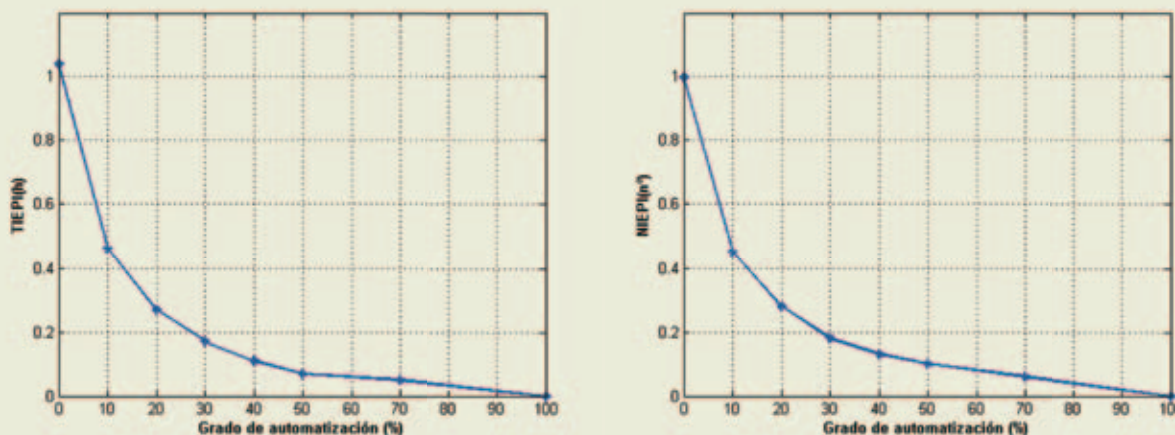
medida que se incrementa el grado de automatización, es decir, el porcentaje de centros de transformación inteligentes en la red. Los resultados prueban que efectivamente, la implementación de centros de transformación inteligentes mejora muy significativamente la calidad del suministro. Asimismo, se aprecia un impacto más marcado para cierto grado de automatización, de forma que será de vital importancia completar el análisis económico detallado que evalúe el coste asociado a la automatización frente al beneficio ligado a la mejora de la continuidad del suministro.

Además, se ha ampliado el análisis para evaluar la sensibilidad frente al nivel inicial de calidad de las redes. Para ello, se han modificado los valores de las tasas de fallo considerados en el caso base, para incluir valores entre 0.1 y 2 fallos/km·año. Los resultados obtenidos se presentan en las gráficas

de la Figura 7, donde se puede observar que el impacto de la automatización sobre la continuidad del suministro es mayor para valores altos de tasa de fallos. De estos resultados se desprende que cuando se parte de redes con niveles más bajos de calidad, hay mayor margen de mejora y, por tanto, para un mismo grado de automatización se conseguirá un mayor beneficio para el sistema.

Por último, se ha evaluado el efecto de considerar distintos tiempos de desplazamiento y operación en los pasos del proceso de gestión de faltas, parámetro clave en la determinación del TIEPI. En la Figura 8 se comparan los resultados obtenidos para el doble (2t) y la mitad (t/2) de los tiempos considerados para el caso base (t). Como cabía esperar, la automatización tiene mayor efecto en los casos en los que los tiempos requeridos son mayores, ya que la

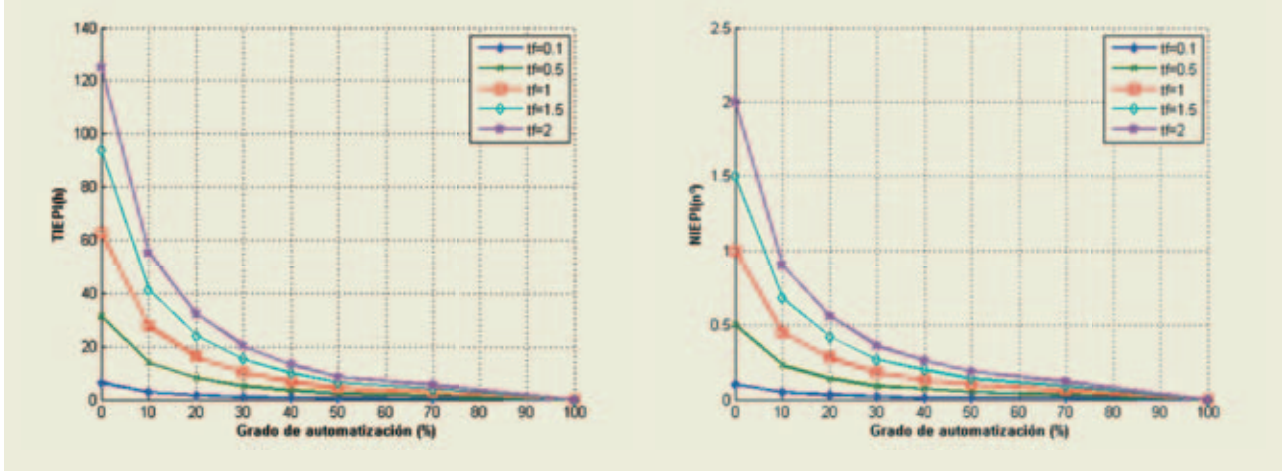
Figura 6. Impacto de la implantación de centros de transformación inteligentes sobre los índices de continuidad del suministro TIEPI (izda.) y NIEPI (dcha.) en redes de distribución urbanas en función del grado de automatización



⁹⁾ Se consideran en esta tasa de fallos todas las posibles faltas causadas por el fallo de cualquier elemento de la red de MT, así como las debidas a causas externas a la red y/o a la compañía de distribución.

¹⁰⁾ Este tiempo hace referencia al tiempo necesario para el desplazamiento de la cuadrilla y la operación de protecciones en cada paso del proceso de gestión de faltas descrito anteriormente. Por ejemplo, en el caso representado en la Figura 3, las flechas representan los tres pasos, de forma que el primero lleva un tiempo de 45 min; el segundo, 25 min; y finalmente el tercero, 15 min.

Figura 7. Impacto de la implantación de centros de transformación inteligentes sobre los índices de continuidad del suministro TIEPI (izda.) y NIEPI (dcha.) en redes de distribución urbanas en función del grado de automatización para distintos valores de la tasa de fallos (tf)



automatización suprime pasos que requieren tiempos mayores.

Conclusiones

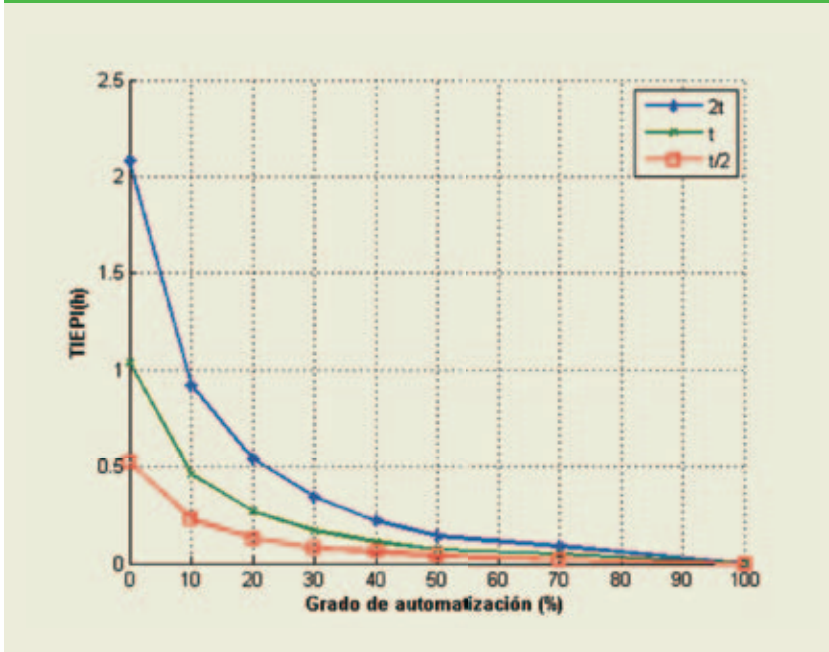
Las interrupciones del suministro eléctrico suponen costes elevados para todos los consumidores y, por tanto, es fundamental asegurar unos niveles adecuados de fiabilidad. Los niveles de calidad actuales se ven amenazados por el envejecimiento progresivo de la red y la conexión de

generación distribuida en la red, por lo que resulta interesante considerar medidas de mejora de calidad. En este artículo se ha analizado el impacto de la implantación de centros de transformación inteligentes en la continuidad del suministro en redes de distribución urbanas, contemplando el grado de automatización de dichas redes. Fruto de este análisis, se puede concluir que la automatización de redes de distribución urbanas puede

contribuir efectivamente a una mejora sustancial de la calidad del suministro. Esta mejora es más pronunciada para redes donde el grado de automatización no es muy elevado, debido a que hay un mayor margen para la mejora.

Además, el análisis de sensibilidades muestra que el efecto de la automatización es más profundo cuando los índices de continuidad del suministro son inicialmente más altos, ya que, de nuevo, hay un mayor margen de mejora. ■

Figura 8. Impacto de la implantación de centros de transformación inteligentes sobre el índice de continuidad del suministro TIEPI en redes de distribución urbanas en función del grado de automatización para distintos tiempos requeridos para el desplazamiento de la cuadrilla y operación de protecciones



Referencias

- T. Gómez, P. Frías, R. Cossent, *Las redes eléctricas inteligentes*. Ed. Fundación Gas Natural Fenosa. Madrid, España, 2011.
- G. Rothwell, T. Gómez, *Electricity economics. Regulation and deregulation*. Editores Geoffrey Rothwell, Tomás Gómez. Ed. Wiley-IEEE Press. Nueva York, EE.UU., 2003.
- J. Rivier, J. Román, T. Gómez, J.I. de la Fuente, "La regulación de la calidad del servicio eléctrico", *Anales de Mecánica y Electricidad*. vol. LXXVI, no. 1, pp. 30-38, Enero 1999.
- A. Rodríguez-Calvo, P. Frías, J. Reneses, C. Mateo, "Optimal degree of smart transformer substations in distribution networks for reliability improvement", *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe Conference*. Berlin, Alemania, 14-17 Octubre 2012.
- Real Decreto 222/2008, de 15 de febrero, por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica.
- Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo, por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico.