

“Gestión dinámica en la red de Viesgo. Transformación de un concepto en un modelo de explotación real”

Rafael Mínguez (Viesgo), Alberto Laso (UC), Rodrigo Domingo (UC), Mario Mañana (UC), Raquel Martínez (UC), Alberto Arroyo (UC).

Viesgo Distribución Eléctrica S.L.

RESUMEN

DYNELEC es un planteamiento innovador que, mediante información climática local y de la temperatura de los conductores en tiempo real, permite operar las líneas por encima de la capacidad estática, aprovechando de esta manera las posibilidades tecnológicas para el aprovechamiento de los activos.

Este documento trata de mostrar los retos que la implantación de un proyecto de estas características contempla, en términos de monitorización y estimación de medidas, de seguridad y protección de los datos y de la información, de incorporación de tecnologías no habituales, y de aplicabilidad estratégica para el futuro.

PALABRAS CLAVE

Régimen dinámico, gestión de activos, Internet of things (IoT), Machine to machine (M2M), ciberseguridad.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las circunstancias de las redes de distribución, así como los nuevos retos que las compañías distribuidoras de electricidad han de afrontar, hacen que la innovación en dichas redes se vuelva un foco importante a considerar.

Es conveniente recalcar, por un lado, que las redes de distribución se diseñan en base a puntas de potencia. Por otra parte, el ratio de generación /demanda pico se ha multiplicado por 7,7 en España en los últimos 20 años.

Adicionalmente, los conductores actuales con las que se diseñan y construyen las líneas de distribución, establecen unos límites en cuanto a sus capacidades que garantizan la seguridad en la explotación de la infraestructura y distribución de la energía.

DYNELEC, es un planteamiento innovador que, mediante información climática local y de la temperatura de los conductores en tiempo real, permite operar las líneas por encima de la capacidad estática, aprovechando de esta manera las posibilidades tecnológicas para el aprovechamiento de los activos. El incremento de capacidad en punta es 200 veces más barato que el obtenido por vías convencionales (cooper and iron tech).

Viesgo considera un plan de implantación tal, que en 2019 todas las líneas de alta tensión (132 kV) operarán en régimen dinámico, mejorando de esta manera la productividad y rentabilidad de las mismas.

Por su propia naturaleza, este esfuerzo de ampliar las capacidades de las líneas aéreas, se plantea para líneas subterráneas. SPADI es el proyecto que Viesgo actualmente contempla dentro de su línea de iniciativas para la innovación.

2. MOTIVACIÓN

La motivación que lleva a plantear un estudio sobre el aumento de la potencia de las redes eléctricas surge debido al escenario creciente en las redes de distribución eléctricas de la generación distribuida, debido principalmente a la construcción de campos eólicos. Este escenario compromete la eficiencia de las actuales infraestructuras que establece unos límites legales en la distribución de la energía, limitando su capacidad, e impidiendo con ello el suministro de toda la energía generada.

Además, es importante plantear el aumento de la potencia de las redes eléctricas evitando la construcción de nuevas infraestructuras, y afectando lo menos posible en el servicio ofrecido a los clientes, reduciendo repotenciaci3nes que obligan a paradas de los activos.

Por su naturaleza mixta, las líneas de alta tensión se componen, en muchos casos, de conductores aéreos y subterráneos, lo que lleva a plantear un estudio de similares características para conductores enterrados bajo diversas topologías para lograr una optimización integral de la línea.

Finalmente, la problemática de la generación distribuida se traslada a las líneas de baja tensión en área urbana, donde la generación fotovoltaica en particular, y la renovable en general, así como otros escenarios, como el vehículo eléctrico, obligan a la optimización de las líneas BT aéreas y subterráneas, considerando sus capacidades de explotación.

3. DEL CONCEPTO A LA INDUSTRIALIZACIÓN. RETOS

El proyecto de calibrado dinámico líneas (DYNELEC) consiste en la monitorización de cada línea en tiempo real para obtener la corriente y los parámetros climáticos y de localización donde se encuentra la línea.

Mediante la aplicación de la ecuación de equilibrio térmico y con el conocimiento de los datos meteorológicos, el objetivo es aumentar la corriente que transporta el conductor, valorando que para condiciones determinadas el conductor se encuentra más frío que para otras. Es por esto que se estudia la relación entre la corriente y las condiciones climáticas, mediante la aplicación de la norma IEEE 738 y la guía CIGRE TB601 [1][2].

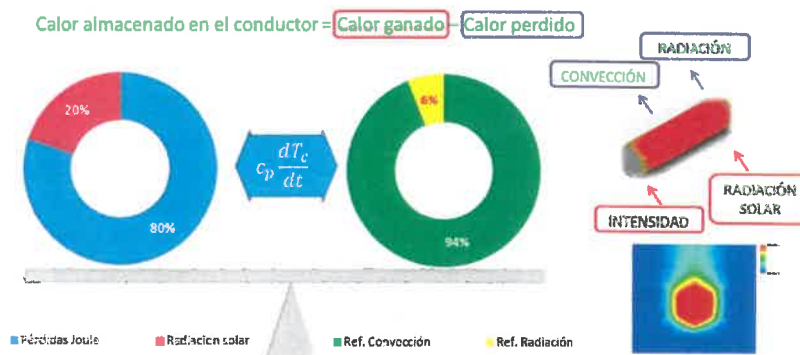


Figura 1. Balance térmico del conductor.

La explotación de este concepto requiere una adaptación de las infraestructuras, considerando la instalación de estaciones meteorológicas, sensores de temperatura, analizadores de red y nuevas redes de comunicación que garanticen la privacidad de los datos que se transmiten entre los distintos dispositivos. Consustancialmente a esta adaptación física, surgen nuevos retos

- 1) Asegurar una representatividad uniforme, fiel a la realidad y fiable a lo largo de las líneas (activos longitudinales) de las condiciones de explotación mediante medidas puntuales.
- 2) Proporcionar una calidad en la captación de las condiciones ambientales que permita cálculos precisos de temperatura y ampacidad en un contexto de explotación.
- 3) Garantizar el uso de sensores de temperatura que juegan el papel crucial para la comprobación y calibración de los cálculos y algoritmos.
- 4) Plantear medidas de ciberseguridad ante la transformación conceptual de los activos, que pasan de modelos de explotación y operación habituales a modelos donde las comunicaciones se vuelven críticas, y los datos transmitidos entre dispositivos se exponen a un escenario no habitual de transferencia, donde nuevas consideraciones para la privacidad de los datos transmitidos se han de contemplar.

Estos retos propios de la implantación, obligan a plantear una serie de medidas y estudios técnicos ambiciosos y de cierta complejidad. Por un lado, la representatividad de las medidas puntuales requiere de planteamientos estadísticos para el estudio del comportamiento del

viento efectivo a lo largo de las líneas, por otro lado, en lo referente a la captación y tratamiento de las medidas meteorológicas, la metodología a aplicar dista de los estándares habituales en este tipo de dominio o materia. Además, la instalación de elementos no habituales en las infraestructuras afectadas, como son los sensores de temperatura, ponen sobre la mesa un componente de riesgo relativo a su comportamiento cuando están instalados y funcionando conjuntamente con los conductores. Finalmente el paso a un paradigma Internet of things (IoT), por su propia naturaleza, obliga a tomar medidas de seguridad propias de este tipo de planteamiento, basado, primordialmente, en la transmisión de datos críticos por internet.

Estos retos y consideraciones se detallan a continuación, exponiendo así lo experimentado en la implantación del proyecto DYNELEC

Gestión de los activos longitudinales mediante medias puntuales

Es importante conocer en todo momento, y en cualquier punto de las líneas, el valor de la temperatura del conductor asumiendo índices bajos de error o desvíos, factor determinante para la explotación dinámica de las líneas. Esta afirmación plantea una serie de consideraciones a tener en cuenta, siendo una relevante la toma de decisión en cuanto a la localización de las estaciones meteorológicas a lo largo de las líneas.

Características de los activos y entorno.

La afirmación previa plantea aspectos no triviales por la propia naturaleza heterogénea de las líneas; su longitud y su naturaleza estructural.

En lo referente a la naturaleza estructural, se ha de considerar que existen líneas mixtas, es decir, con tramos aéreos y tramos subterráneos, lo que dificulta la representatividad de las medidas, y por ende la explotación en régimen dinámico por la falta de información de las condiciones en los tramos subterráneos.

La orografía, como elemento añadido, es otro factor que hace necesario determinar cuáles son las zonas de las líneas donde se pueda producir menor refrigeración del cable conductor.

Efectivamente, existen líneas de longitud reducida, y líneas de varios cientos de kilómetros. Mientras que en las primeras la confianza de las mediciones, para la estimación de la temperatura del conductor según normativa, se garantiza con la monitorización de datos meteorológicos en los extremos (subestaciones), en aquellas longitudinalmente exigentes no se garantiza la exactitud de las medias aplicando esta estrategia. Es por ello necesaria la instalación en algún punto a lo largo de la línea de estaciones meteorológicas adicionales que garanticen la fiabilidad del dato. Así y todo, no siempre una línea de corta distancia garantiza medidas fiables en los extremos, si la misma está sometida a condiciones orográficas que condicionan significativamente sus condiciones de refrigeración.

Viento efectivo y estaciones meteorológicas a lo largo de la línea

Cuando se afronta el trabajo de instrumentalizar las líneas para ser explotadas en régimen dinámico, estos condicionantes se han de considerar y estudiar, para garantizar unas medidas fiables de las condiciones de los conductores con márgenes de error admisibles, que pasa por el despliegue e instalación de puntos de medición fiables en las zonas críticas.

Para llegar a la solución óptima al problema planteado se opta por el estudio del viento efectivo como elemento clave para el cálculo de la temperatura, mediante:

- 1) la confección de modelos de propagación de vientos,
- 2) conjuntamente con modelos estadísticos para la elección de la ubicación de nuevas estaciones meteorológicas y la determinación de los errores asociados.

De forma esquemática y resumida, el planteamiento para el estudio se puede describir de la siguiente manera:

- 1) Se realiza un análisis del viento efectivo a lo largo de la línea para diferentes vientos y direcciones de entrada, de esta manera se puede localizar los puntos más críticos de la línea (vientos efectivos mínimos) para cada viento y dirección de entrada. Se consideran velocidades de 1 m/sg y direcciones de 1 a 360°. Se consideran las subestaciones de cabecera y subestaciones cercanas.
- 2) Una vez conocemos los vientos efectivos mínimos se crea un algoritmo basado en redes neuronales que permite calcular a través de las estaciones meteorológicas situadas en las subestaciones los valores de viento efectivo mínimo de la línea.
- 3) Por último se realizan los pasos anteriores pero suponiendo que existe una tercera estación situada en alguno de los apoyos de la línea (se analizan todas las combinaciones, es decir, primer análisis → 2 estaciones en las subestaciones + 1 estación en el apoyo 1, segundo análisis → 2 estaciones en las subestaciones + 1 estación en el apoyo 2, etc.)
- 4) Se compara el error medio en el cálculo del viento efectivo mínimo (viento efectivo medido - calculado) para el caso de 2 estaciones con el caso de 3.

El entrenamiento se realiza con un algoritmo de retro-propagación de Levenberg-Marquardt. La red neuronal es de dos capas con una capa oculta compuesta de 10 neuronas sigmoideas y neuronas de salida lineales [9].

Conjuntamente, el estudio micro-climático ayuda a optimizar y seleccionar las líneas más susceptibles de ser procesadas y calculadas en función del viento efectivo.

Finalmente, los cálculos obtenidos se han de contrastar y comparar con medidas reales tomadas mediante sensores de temperatura en los puntos críticos calculados. Esto permite no solo garantizar la fiabilidad de los modelos sino el ajuste de los mismos.

Toda estrategia analítica lleva implícita complejidad en el procesamiento de los datos, con tiempos de cálculo elevados, lo que obliga a establecer estrategias de optimización de las fuentes de información y transformación de los conjuntos de datos, buscando tiempos asumibles para la obtención de resultados admisibles.

Medidas medioambientales

Ya se ha expuesto en el punto anterior la importancia de la localización de las estaciones meteorológicas para poder manejar mediciones de temperatura fiables.

La localización no es el único reto que se tiene que afrontar en este proyecto de industrialización. La relevancia de la exactitud de las medidas se conjuga con los mecanismos que se han de usar para la captación de los datos. No es un tema trivial.

- 1) Por un lado existen localizaciones con limitados recursos de infraestructura (como son los puntos a lo largo de la línea),

- 2) Por otro lado, las necesidades periódicas de la monitorización de los datos ambientales son más exigentes que las establecidas por los estándares habituales, en planteamientos de recolección de variables de meteorología.
- 3) Además, la criticidad en los cálculos de la velocidad baja del viento requiere umbrales de medición exigentes (minutales),
- 4) Al igual que hay que tener en cuenta que las estaciones meteorológicas no son elementos habituales dentro de una infraestructura como es una subestación.

Características de las estaciones meteorológicas

Esta combinación de factores obliga a realizar un benchmarking detallado de las posibles alternativas técnicas (estaciones meteorológicas), para poder elegir las mejores opciones en referencia a la autonomía, fiabilidad, capacidad de captación y transmisión de datos en escalas concretas, así como en las necesidades de instalación y sus limitaciones en entornos críticos y estratégicos como son las subestaciones de distribución eléctrica.

Tras estudios comparativos previos y un proceso de licitación centrado en estos factores, se opta por instalar, por una parte, en las subestaciones, estaciones meteorológicas provistas de sensores para la medición de diversas variables atmosféricas, como anemoveleta ultrasónica, termo-higrómetro, piranómetro, sensor de presión y pluviómetro. Los datos capturados por los sensores se almacenan en un DataLogger que se encarga de almacenarlos y transmitirlos a los sistemas centrales, en tiempo real, para el cálculo de la ampacidad o corriente máxima que el conductor, bajo condiciones concretas, puede distribuir.

El modelo que se instala de estación meteorológica es FRT FWS600, de 140x360 mm y peso de aproximadamente 1,5 kg. Provee medida de temperatura (rango entre -50 y 60 grados centígrados), de humedad relativa (0 a 100%), presión del aire (entre 300 y 1200 hpa), dirección del viento (principio ultrasónico, entre 0-360 grados), velocidad del viento (entre 0 y 75 m/s) y lluvia (Optical scattering theory). Además ofrece el interface de comunicación RS485/RS232.

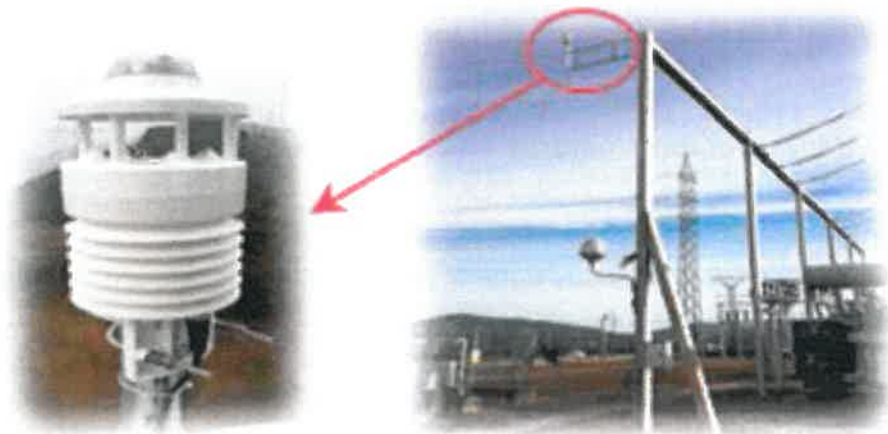


Figura 2. Estación meteorológica instalada en subestación.

Garantiza la captación y transmisión de los datos meteorológicos mediante captura de medidas minutales, escala requerida para este contexto de aplicación, y proporciona sensores robustos y compactos, que proporcionan bajo mantenimiento y niveles altos de fiabilidad.

Localización de las estaciones meteorológicas

Por su propia naturaleza, se prioriza la instalación de las mismas en las propias subestaciones, garantizando la autonomía al tener fuentes de alimentación proporcionadas por la propia infraestructura.

Sin embargo, en aquellas localizaciones de difícil acceso, como son los apoyos en mitad de la línea, y sin posibilidades de infraestructura para la alimentación del datalogger, se tienen que incorporar paneles fotovoltaicos y baterías. Esta solución de compromiso presenta problemas de accesibilidad, y de fiabilidad, muy dependiente de la capacidad de la batería para abastecer adecuadamente al datalogger, así como de la cobertura telefónica y de las condiciones meteorológicas. La fiabilidad en este tipo de ubicaciones es menor que en la conseguida en las subestaciones.

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura utilizados [5] se localizan e instalan sobre los propios conductores aéreos. Su papel dentro de la instrumentación de las líneas es el de proporcionar la temperatura real que el conductor experimenta en un momento dado, como referencia fiable de cara a la validación y ajuste del algoritmo de cálculo de la temperatura estimada en función de las condiciones meteorológicas y la intensidad eléctrica en un momento dado. Su naturaleza es itinerante, no siendo necesarios de forma permanente una vez los cálculos se han contrastado y validado con éxito.

Inconvenientes encontrados.

Debido al uso poco común de este tipo de dispositivo en este tipo de infraestructuras, se experimentan en las primeras pruebas comportamientos y casuísticas anómalos:



- 1) Efectos mixtos de campos electromagnéticos y eléctricos, que afectan directamente a las comunicaciones.
- 2) Baja fiabilidad de las medidas debidas por sus características constructivas (sensores y sondas poco robustas ante inclemencias ambientales y aislamientos no suficientes)
- 3) Signos de corrosión en los PCB's de los sensores en tiempo corto de instalación.

Para mejorar la fiabilidad en las comunicaciones y en las mediciones de los sensores, se realizan una serie de acciones, tras un estudio pormenorizado con los fabricantes, consistentes en:

- 1) Cambio de sondas y sensores más robustos, capaces de soportar las condiciones ambientales desfavorables.
- 2) Mejorar el aislamiento de la electrónica, mediante técnicas mejoradas de barnizado y uso de juntas de aislamiento alternativas.

- 3) Se hicieron análisis químicos de la superficie de sulfurados de cobre (EDX) modificados electroquímicamente por parte de General Electric.

A toda esta problemática se le añade la necesidad de descargar las líneas cada vez que se instalan los sensores de temperatura, lo que demuestra las dificultades de un planteamiento propio de "prueba y error".



Figura 3. Sensor de temperatura del conductor. Esquema.

Así, aplicando mejoras en los dispositivos una vez obtenidos y analizados los resultados de los distintos análisis y actuaciones por parte de General Electric, se mejora el modelo FMC62 Intelligent line Monitoring System, con capacidades propias de comunicación de los datos capturados mediante su componente de comunicaciones SNG (Sensor Network Gateway), y tras pruebas exhaustivas diversas, se plantea su instalación en el entorno productivo.

Comunicaciones y Ciberseguridad

Existe un cambio de paradigma en cuanto a cómo se concibe la propia infraestructura que afecta de forma relevante a las comunicaciones y a la seguridad de los datos, siendo estos, por la naturaleza estratégica de los activos adaptados, de alta criticidad.

IoT y M2M

El escenario de esta adaptación de la infraestructura, es un escenario denominado M2M (máquina a máquina). La idea básica detrás de la tecnología M2M es agilizar la manera en que los datos se recogen de dispositivos físicos en campo e incorporados en sistemas informáticos, de forma desatendida. Así, las líneas instrumentalizadas, pasan de ser un activo tradicional, a ser parte de lo que se llama red de objetos físicos a los que se accede a través de Internet (IoT, internet de las cosas).

Dado que no es lo mismo pilotar un planteamiento de estas características que industrializarlo y llevarlo a un entorno productivo y explotable, este cambio de concepto y comportamiento implica riesgos que antes estos activos no experimentaban.

Comunicaciones y Ciberseguridad

Los diferentes dispositivos desplegados en campo (estaciones meteorológicas, sensores de temperatura, analizadores de red) a través de los dataloggers y gateways, comunican datos sensibles, de distinta naturaleza y críticos para la explotación de las líneas eléctricas, a sistemas centrales corporativos mediante GPRS, que se encuentran desplegados en la LAN de

la compañía. Cada uno de los elementos de comunicación, por lo tanto, disponen de un módulo de identificación de abonado (SIM) necesario para este tipo de comunicación.

Desde el momento en que la transmisión de los datos se produce bajo las reglas de comunicaciones de internet, enseguida surge la necesidad de proteger el canal de transmisión para garantizar la privacidad, completitud, y la integridad de los datos.

Con esta realidad de comunicaciones y dispositivos, para garantizar la seguridad y privacidad de los datos transmitidos desde los dispositivos a los sistemas centrales, es necesaria la instalación y configuración de un APN privado, que da así acceso directo a los sistemas bajo la red LAN y permite especificar ciertos parámetros como el espacio de direcciones privadas asignadas a los dispositivos y los atributos de servidor para la autenticación de usuarios. La ventaja es que el tráfico es seguro y no pasa por una red pública. Esto disminuye la complejidad en las comunicaciones y reduce los puntos de fallo en el sistema.

La seguridad es un punto de especial relevancia, pero no es menos trivial garantizar la continuidad del servicio, y de sistematizar el despliegue escalonado de los distintos dispositivos siguiendo una hoja de ruta de las prioridades de las líneas.

Garantía del servicio, calidad y visualización

La garantía del servicio pasa por redundar todos los procesos críticos, dado que la información que se proporciona sirve para la toma de decisiones en tiempo real por parte de los operadores de la red de distribución (centro de control). El sistema siempre ha de estar disponible. Para ello se diseña una arquitectura de los sistemas de alta disponibilidad, donde los nodos están balanceados y replicados en diferentes CPD's, o ubicaciones físicas.

Esta arquitectura es acompañada de un plan de respaldo que contempla actuaciones necesarias antes de que se produzca un incidente, un plan de emergencia en caso de que se produzca un incidente, y un plan de recuperación que establece actuaciones para la recuperación de nodos dañados.

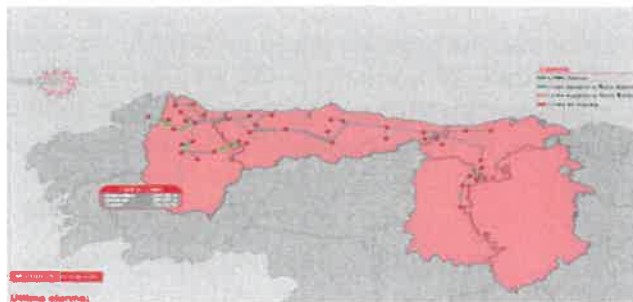


Figura 4. Web para la Gestión Dinámica.

Además, el ciclo de vida de la industrialización incremental debe garantizar la calidad de los despliegues, reduciendo significativamente los riesgos ante posibles fallos en los pasos a explotación. Para ello se diseñan y ponen en funcionamiento tres entornos convenientemente dimensionados para cubrir las fases de desarrollo, preproducción/pruebas, y producción, todos ellos regidos por un procedimiento de autorizaciones, flujo de trabajo y actualizaciones de software.

Finalmente, al centro de control se le ha de proporcionar algún tipo de herramienta visual de fácil manejo, donde se les muestre a los técnicos que operan la red los datos para la toma de decisiones. Este proyecto se decanta por la herramienta de visualización de datos Idbox.



Figura 5. Gráficas de ampacidad en la web de gestión.

Plan de implantación, resultados e impacto.

Implantación y resultados

Con todos los retos previamente contemplados, el plan de implantación de DYNELEC ofrece los datos, correspondientes a su situación actual y a la prevista, que a continuación se relacionan:

1. Se gestionará completamente la red de 132 kV en 2019
2. Transporte de 6,96 GWh en 2015, y 9,36 GWh en 2016
3. Horas anuales de gestión dinámica 523 h en 2015 y 601 horas en 2016
4. Reducción en al 1,7 % de las horas de restricción a parques eólicos

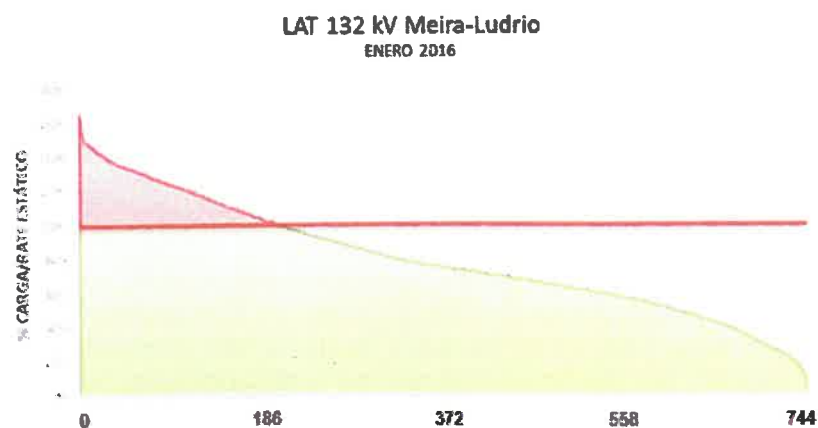


Figura 6. Aprovechamiento adicional de energía gracias a la Gestión Dinámica.

La implantación de DYNELEC no solo conlleva adaptaciones de las infraestructuras y activos, sino que también supone un esfuerzo previo de cara al centro del control, principal responsable de la fiabilidad y seguridad en la explotación de las líneas de distribución de alta tensión. Aunque los resultados finales reflejaron un transporte de energía de 2000 MWh extra anuales, así como la superación de la franja de 200 horas anuales en explotación dinámica de las líneas (datos de 2015), se requirió de una divulgación previa, y de pruebas sobre una línea localizada, a modo de piloto para la puesta en explotación.

Un concepto interesante que se añade a la implantación de DYNELEC es la estacionalidad de la aplicación de la explotación dinámica, dadas las condiciones meteorológicas propicias (bajas temperaturas y mayor manifestación de viento efectivo). Todo ello conlleva un cambio cultural en la operación de las líneas.

Impacto

Finalmente, viendo la experiencia actual en la explotación de las líneas en régimen dinámico, se experimenta:

1. Una mejora en la operación de la red (capacidades de las líneas más adaptables al escenario de las energías renovables, mayor eficiencia de la operación y mayor seguridad de la operación en casos de emergencia),
2. Una optimización en la gestión de los activos, dado que es posible con este planteamiento realizar una monitorización de las temperaturas de los conductores (gestión de activos inteligentes), conocer la condición real de las líneas (precisando acciones de mantenimiento predictivo y preventivo), así como proporcionar más información de los activos para la toma de decisiones relativas a inversiones.

4. HACIA UN ESCENARIO DE LÍNEAS MIXTAS. SPADI

La iniciativa SPADI parte como evolución natural dentro del contexto de explotación dinámica de las redes de alta tensión. Se centra en el estudio de los cables subterráneos para el aprovechamiento de la capacidad de los mismos.

Esta línea de trabajo contempla varias circunstancias que el mundo de la distribución eléctrica afronta y afrontará con mayor intensidad en los próximos años.

SPADI se centra en modelos predictivos meteorológicos y de capacidad en cables subterráneos y conductores aéreos. Ahora mismo, al encontrarnos con líneas de alta tensión mixtas (tramos aéreos y tramos subterráneos), no se optimiza la explotación dinámica puesto que los tramos subterráneos mantienen los límites de transporte de la corriente establecidos por los fabricantes.

El proyecto contempla el estudio de varias topologías de cables subterráneos, así como nuevos sensores de temperatura y humedad para medidas puntuales y fibra óptica para la medida de la temperatura.

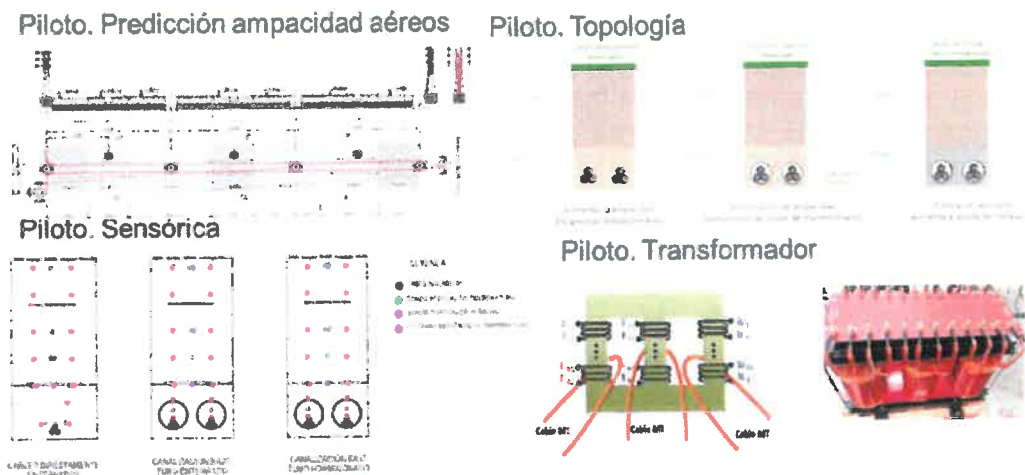


Figura 7. Esquemas de prototipo para el estudio de cables subterráneos.

Actualmente se está verificando el estudio teórico, contrastando con los datos que se obtienen de campo mediante la captación de señales provenientes del piloto construido en la subestación de Astillero. Además de verificar el estudio teórico, se estudia la influencia de la explotación dinámica de los cables cercanos, así como el efecto de las transiciones aero-subterráneas.

La situación actual del proyecto SPADI permite el ajuste del cálculo de la temperatura del conductor en condiciones específicas de explotación y ambientales, al disponer de datos reales de la temperatura de los conductores y del terreno. Además se pueden contrastar los resultados obtenidos teóricamente y reflejados en [8].

Si atendemos a los datos obtenidos de los conductores aéreos, la siguiente gráfica, muestra la temperatura del conductor bajo una intensidad de 210 amperios durante un periodo de tiempo. Se refleja cómo se comporta la temperatura de los conductores en el momento del transporte eléctrico y sin él.

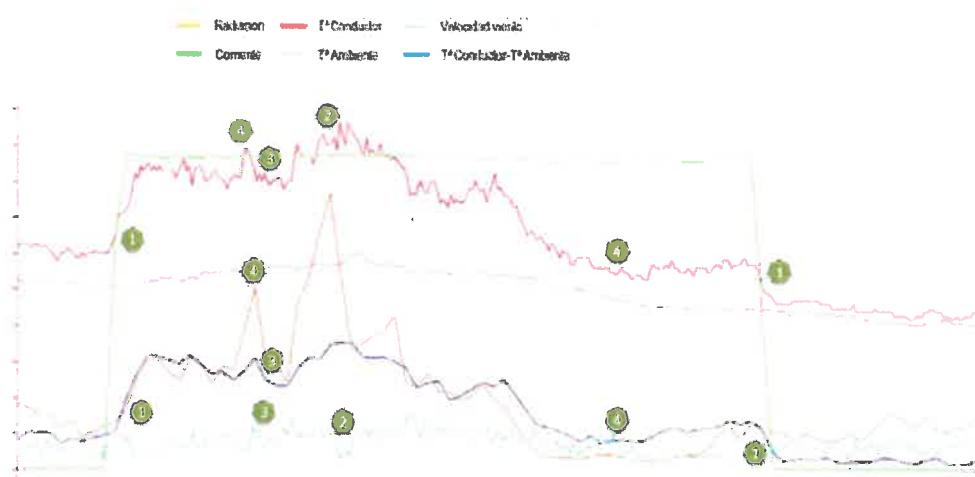


Figura 8. Primeros datos experimentales del piloto en conductores aéreos.

Se puede apreciar, el comportamiento de la temperatura del conductor bajo distintas casuísticas.

- 1) La inercia térmica para cables aéreos es baja, en 8 minutos desde que el transformador comienza a funcionar, se alcanza el equilibrio térmico.
- 2) Se comprueba como a velocidad de viento baja, la capacidad de refrigeración del cable disminuye y se incrementa su temperatura.
- 3) La influencia de ráfagas de viento hace que la refrigeración sea mayor y la temperatura del conductor disminuya.
- 4) La influencia de la temperatura ambiente y de la radiación es tal que hacen que, a mayor temperatura y radiación, mayor calentamiento del conductor.

Esta demostración gráfica reafirma la criticidad del estudio del viento efectivo, uno de los retos principales que surgen en este proyecto de industrialización de la explotación dinámica de líneas.

En cuanto a las líneas subterráneas, el estudio de las mismas no puede plantearse en los mismos parámetros que el de las líneas aéreas, debido a que los conductores enterrados se localizan en entornos menos variables en cuanto a circunstancias climáticas, si bien no se puede extraer que la complejidad del estudio sea menor: la temperatura del terreno a distintos niveles, como las consideraciones estructurales de la disposición de los cables (entubado, bajo hormigonado, etc...), las dificultades para la instalación de sensorica para contrastar los modelos de predicción, y otras consideraciones diferencian este planteamiento del de las líneas aéreas.

Una muestra de las diferencias entre conductores aéreos y subterráneos es la gráfica siguiente, donde, mientras la inercia térmica es baja en los cables aéreos, en los subterráneos es alta (de horas).

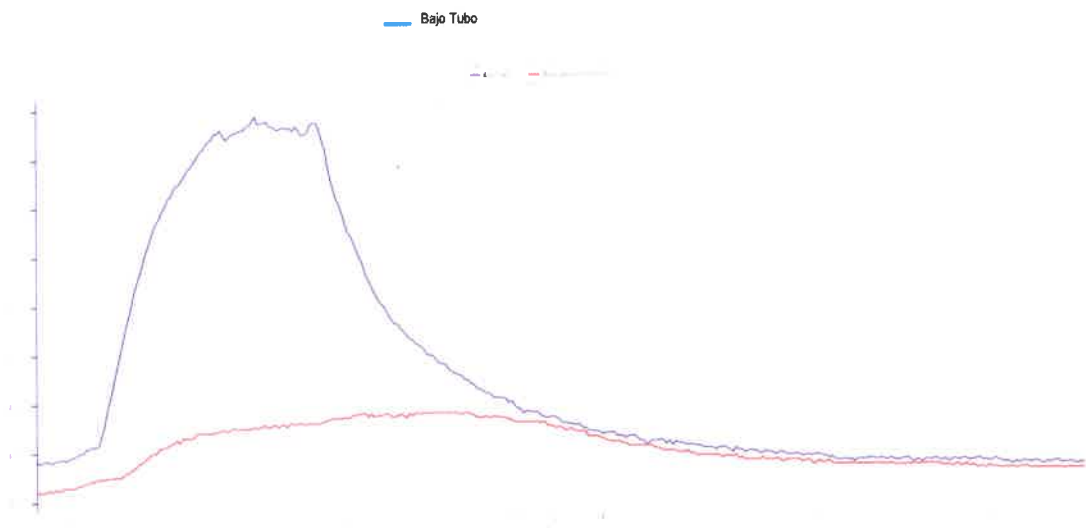


Figura 9. Primeros datos experimentales del piloto en conductores subterráneos.

5. CONSIDERACIONES SOBRE BAJA TENSIÓN Y ENTORNOS URBANOS

Tanto DYNELEC como SPADI son iniciativas importantes de cara a tener en cuenta y revisar su viabilidad de aplicación en la media y baja tensión. Los objetivos de predicción de ampacidad, de predicción meteorológica, de optimizar los límites de explotación de las líneas puras, aéreas y subterráneas, y las mixtas, son pasos necesarios para afrontar un escenario con estas características: por un lado una emergente generación distribuida en la media y baja tensión (DER), así como la incorporación del vehículo eléctrico, afectando no solo a la media tensión, sino a las redes de baja tensión, que abastecen a los medios rurales y urbanos. En ellos, existen tanto cableado aéreo como subterráneo de baja tensión. Es por ello que establecer nuevos límites que optimicen las infraestructuras actuales se vuelve especialmente importante, como alternativa viable a una sustitución de las infraestructuras existentes.

6. PRÓXIMOS PASOS

Dentro del proyecto DYNELEC se plantean los siguientes pasos.

- 1) Instrumentalización del resto de la red.
- 2) Legalización de los proyectos con rating dinámico

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] 738-2012 - IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors
- [2] Cigre TB601. Guide for thermal rating calculations of overhead lines. Dicember 2014.
- [3] IEC 60287 Electric cables - Calculation of the current rating. 2015.
- [4] Cigre TB 640. A Guide for Rating Calculations of Insulated Cables
- [5] FMC62 Intelligent line monitoring system instruction manual
- [6] V.T. Morgan. _The heat transfer from bare stranded conductors by natural and forced convection in air_. En: International Journal of Heat and Mass Transfer 16.11 (1973), págs. 2023 -2034.
- [7] Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23
- [8] Gestión dinámica de cables subterráneos. Exprimiendo los activos existentes al máximo. Rafael Mínguez Matorras.
- [9] Neural Networks, 1996, IEEE International Conference on. Levenberg-Marquardt training for modular networks. Meng-Hock Fun, M.T. Hagan.

