

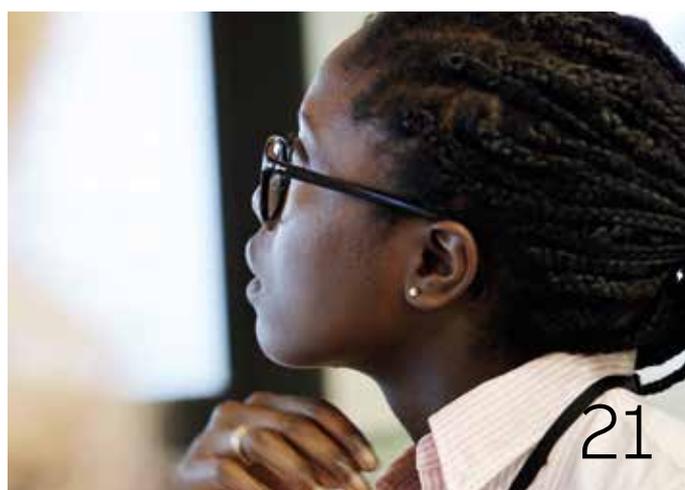
# review

03|2018 es

## Encuentro entre algoritmos y materiales



08



21

- 
- 08–25 Encuentro entre algoritmos y materiales
  - 26–43 Tendencias de transformación
  - 44–61 Análisis digital



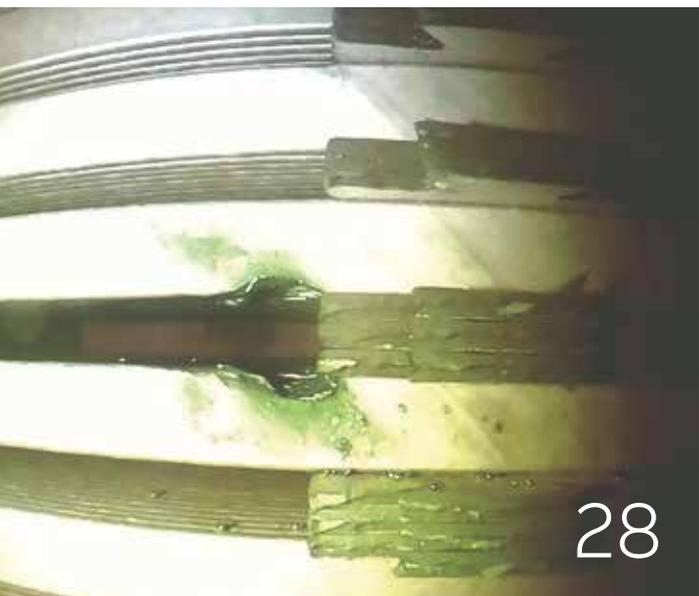
46

Estabilidad energética para los fabricantes



14

Aislamiento termoplástico



28

El robot TXplore inspecciona los transformadores

HVDC para el sector eólico marino

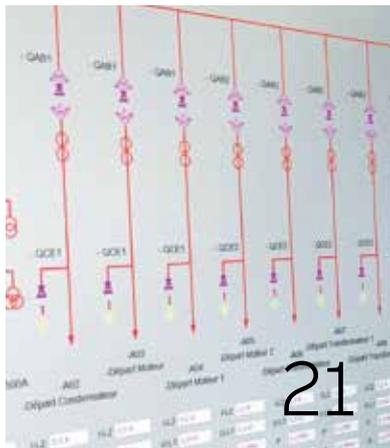


36



Modelización de los inversores  
solares de ABB

Automatización de la  
distribución de la electricidad



05 Editorial

## Encuentro entre algoritmos y materiales

- 08 Sistemas FACTS: estabilidad energética para la minería
- 14 Aislamiento termoplástico
- 21 Automatización de la distribución de la electricidad

## Tendencias de transformación

- 28 El robot TXplore inspecciona los transformadores
- 36 HVDC para el sector eólico marino

## Análisis digital

- 46 Estabilidad energética para los fabricantes
- 52 Modelización de los inversores solares de ABB
- 58 La ciberseguridad en el punto de mira

## Desmitificación de términos técnicos

62 Cifrado cuántico

63 Consejo editorial



—  
**La digitalización no se reduce a recopilar grandes cantidades de datos y extraer la información que estos proporcionan, sino que cambia los modos tangibles en que las tecnologías y los sistemas se crean y gestionan. En este número de la revista ABB Review se examinan algunos de los ejemplos más recientes de cómo y dónde se benefician de ella las empresas.**

**Como siempre, agradecemos sus comentarios: [abb.com/abbreview](http://abb.com/abbreview)**

---

EDITORIAL

# Encuentro entre algoritmos y materiales



Estimado/a lector/a:

La industria se adentra en una revolución sin precedentes. Mientras que muchas empresas en la actualidad basan su actividad en configuraciones de fábrica con cableado físico y equipos instalados, en el futuro su ventaja competitiva radicará en los datos y los conocimientos de procesos portátiles. La digitalización, la inteligencia artificial y los servicios basados en la nube ampliarán e interconectarán los conocimientos y permitirán su despliegue óptimo.

Este número de ABB Review está dedicado a la fabricación y el despliegue de materiales en relación con métodos digitales más inteligentes. Se incluye el uso de técnicas de simulación avanzadas para el diseño de productos, el uso de robots para la inspección y el análisis de equipos, y el control avanzado de fábricas.

Las tecnologías digitales mejoran enormemente la productividad, pero pueden incrementar la vulnerabilidad a los ciberataques. ABB cuestiona continuamente el *status quo* en el ámbito de la seguridad para ofrecer los niveles de seguridad más elevados. En este número se analizan las actividades de ABB en las áreas de la ciberseguridad y la criptografía cuántica.

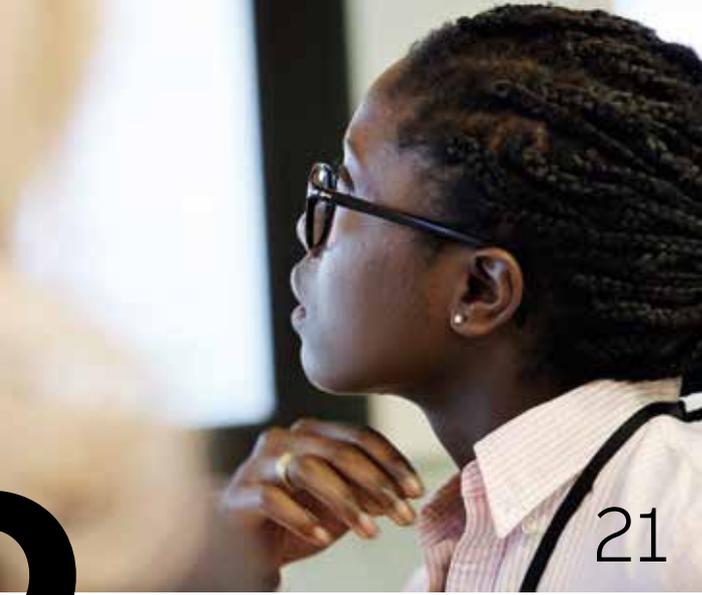
Que disfrute de la lectura

Bazmi Husain  
Director de Tecnología



# Encuentro entre algoritmo y material





Los operadores de tecnologías con una misión crucial se basan en criterios de rendimiento establecidos. ABB está utilizando la ciencia de datos avanzada para investigar, desarrollar y probar materiales que puedan innovar aquellos sistemas, como la sustitución del cartón prensado por espaciadores radiales termoplásticos en bobinas de transformadores, y de los componentes mecánicos de los accionamientos de molinos con motores sin engranajes.

- 08 Los sistemas FACTS aportan estabilidad energética a los equipos mineros
- 14 Aislamiento termoplástico en transformadores de potencia
- 21 El dulce sabor del éxito: automatización de la distribución de electricidad para una fábrica de azúcar



---

ENCUENTRO ENTRE ALGORITMOS Y MATERIALES

# Los sistemas FACTS aportan estabilidad energética a los equipos mineros

Los accionamientos gigantes sin engranajes para molinos (GMD, por sus siglas en inglés) se utilizan de forma generalizada como fuente de energía de los molinos que trituran minerales. A medida que los propietarios de minas optan por aumentar la productividad en las minas existentes, en lugar de abrir otras nuevas, se pueden agregar más GMD a una red eléctrica ya cargada. En estas difíciles condiciones, los sistemas FACTS de ABB garantizan la estabilidad de la red.



**José Luis Olabarrieta Rubio**  
ABB Ring Motors  
Trapagarán, España.

jose-luis.olabarrieta@es.abb.com

En la industria minera se utilizan varios tipos de molinos para triturar el mineral en trozos más pequeños para su posterior procesamiento: los molinos de bolas se componen de un cilindro hueco horizontal y giratorio, con un interior resistente a la abrasión. El molido se realiza mediante bolas de piedra, metal o caucho que se mueven libremente, que son elevadas a



**Pablo Eguia**  
Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Universidad del País Vasco  
Lejona, España

---

Los accionamientos GMD son motores de alto rendimiento y velocidad variable, que se consideran la solución más eficaz para los molinos de alta potencia.

cierta altura por adherencia natural al interior del cilindro. Los molinos autógenos (AG) son similares, pero tienen placas de elevación internas y usan grandes partículas de mineral como material de amolado. Si el mineral es demasiado



01

—  
01 Las empresas mineras suelen optar por ampliar una mina existente, en lugar de abrir una nueva. Los dispositivos FACTS de ABB permiten añadir máquinas que consumen gran cantidad de energía, como los accionamientos GMD, sin poner en peligro la estabilidad de la red local. En la fotografía se observa uno de los tres GMD instalados por ABB en la mina de oro y cobre de Esperanza, en Chile.

duro o abrasivo, se pueden agregar bolas de acero: el molino se denominará entonces molino semiautógeno (SAG). Los molinos AG y SAG pueden utilizarse como trituradores de una etapa, pero a menudo se utilizan como la primera etapa de un proceso de trituración de dos o múltiples etapas, en el que el molino de bolas realiza la segunda etapa.

Estos molinos pueden ser impulsados por motores de inducción (de bajo coste, pero poco rendimiento debido a las pérdidas en los engranajes), motores síncronos (que se limitan a una potencia de aproximadamente 9 MW por piñón) o motores sin engranajes, los denominados GMD. Los GMD son motores de alto rendimiento

y velocidad variable, con potencias de hasta 30 MW, que se consideran la solución más efectiva para molinos de alta potencia, en especial cuando se considera el coste total de propiedad. El motor síncrono GMD es alimentado por un cicloconvertidor, es decir, un dispositivo que convierte la CA en una de menor frecuencia sin un enlace intermedio de CC [1].

Los GMD tienen la enorme ventaja de que eliminan todos los componentes mecánicos de un sistema clásico de molinos, como la corona dentada, el piñón, la caja reductora, el acoplamiento, el eje motor y los cojinetes, lo que permite ofrecer un mejor rendimiento energético, una mayor fiabilidad, una mayor disponibilidad del proceso y una vida útil más prolongada →1.

—  
02 Potencia activa y reactiva que se consume en el arranque de un motor SAG a los 1200 s.

—  
03 La tensión nominal cae alrededor de un 1,4 % en diferentes buses eléctricos después de una nueva puesta en marcha a los 1200 s.

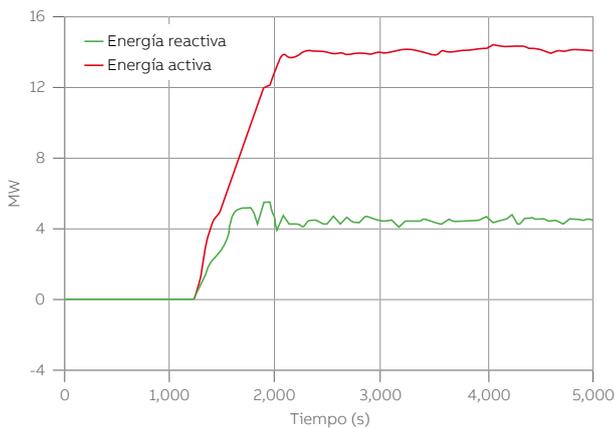
—  
Los sistemas FACTS de ABB se basan en controladores de electrónica de potencia que aumentan la capacidad de transmisión y el margen de estabilidad de la red, y mejoran su comportamiento dinámico.

**Ampliación de minas**

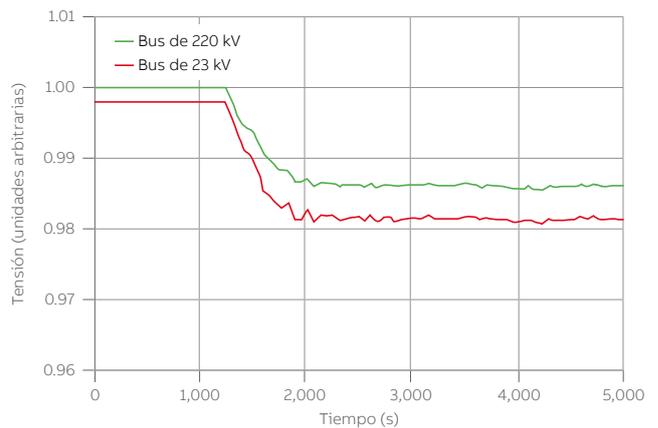
La apertura y explotación de una nueva mina es una empresa compleja. Deben llevarse a cabo evaluaciones del impacto ambiental y la ingeniería, así como obtener una serie interminable de permisos, licencias, acuerdos y autorizaciones (construcción, explosivos, etc.). Como resultado, los propietarios de minas suelen optar por aumentar la productividad de minas ya existentes, mediante su ampliación en lugar de la apertura de otras nuevas. Una mina típica tiene uno o dos molinos SAG, y de dos a cuatro molinos de bolas, de modo que una ampliación generalmente implica agregar uno más de cada tipo.

**Vulnerabilidades de los sistemas eléctricos de las minas**

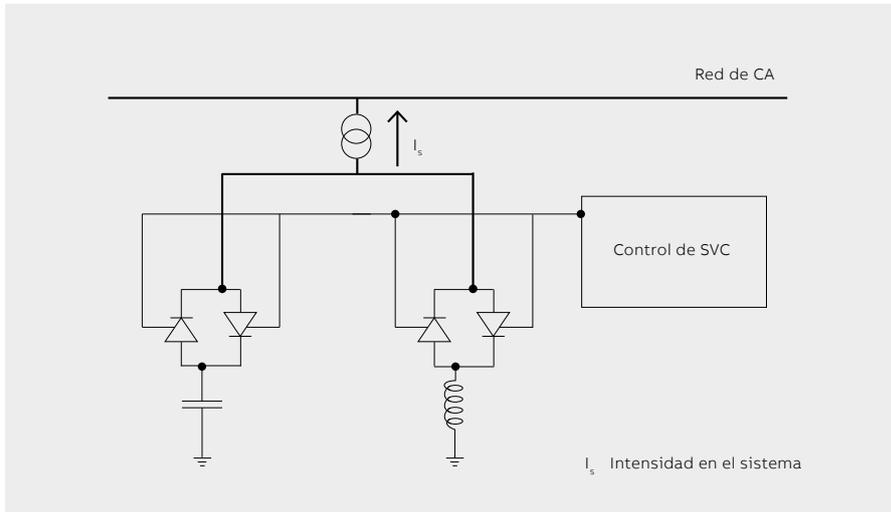
Al añadir nuevos molinos a una infraestructura de minas ya existente, una consideración fundamental es la solidez de la red eléctrica, es decir, su capacidad para suministrar tensión y frecuencia estables con independencia de las perturbaciones de la carga y la red. Aunque algunas redes disponen de generadores síncronos (que no sólo satisfacen la demanda de energía, sino que también proporcionan estabilidad de tensión y frecuencia), otras no, y ello deja la red vulnerable a variaciones de tensión y frecuencia a la menor perturbación, como un arranque del motor o una pequeña variación de la carga. Las redes de las minas suelen ser de este tipo débil, es decir, con poca potencia de cortocircuito y principalmente resistiva, y con una baja relación reactancia/resistencia.



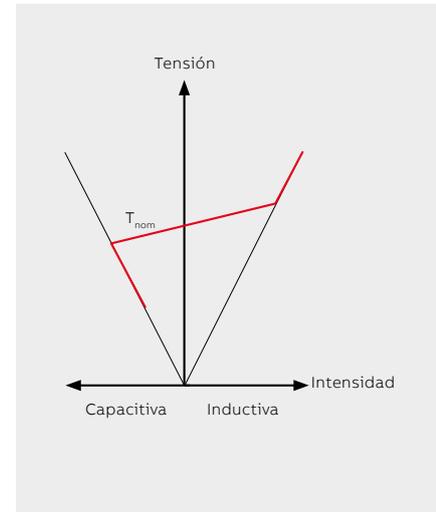
02



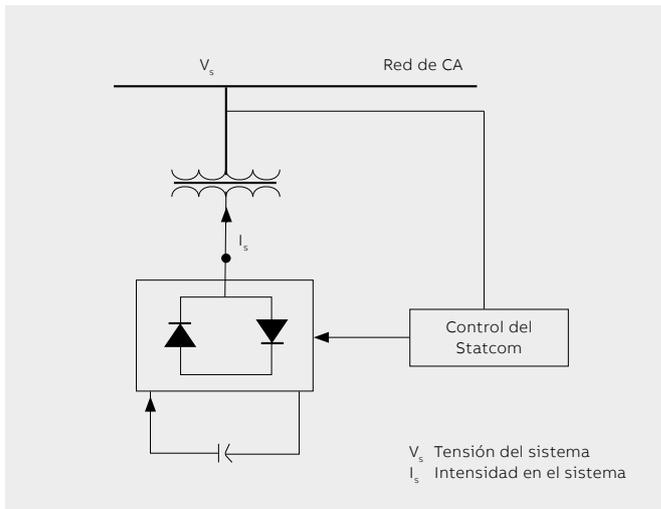
03



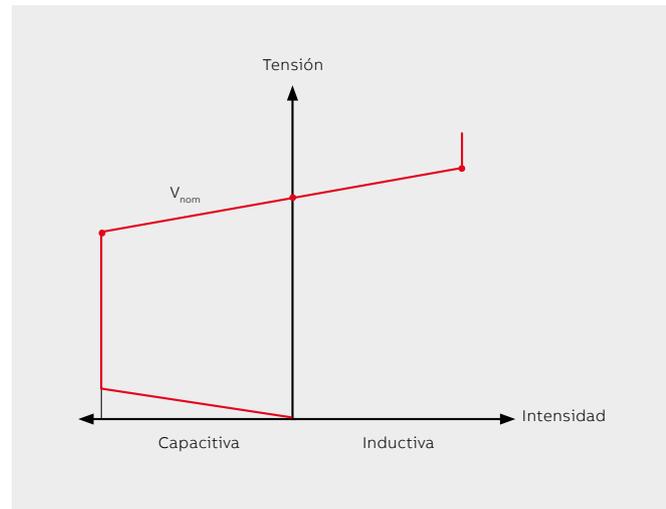
04



05



06



07

— 04 Diagrama eléctrico de SVC (compensadores estáticos de var).

— 05 La característica V-I de los SVC indica que se puede obtener una regulación progresiva alrededor de la tensión nominal ( $V_{nom}$ ) en el rango normal de funcionamiento definido por las máximas corrientes inductivas y capacitivas del SVC. Estas corrientes máximas dependen de la tensión del sistema.

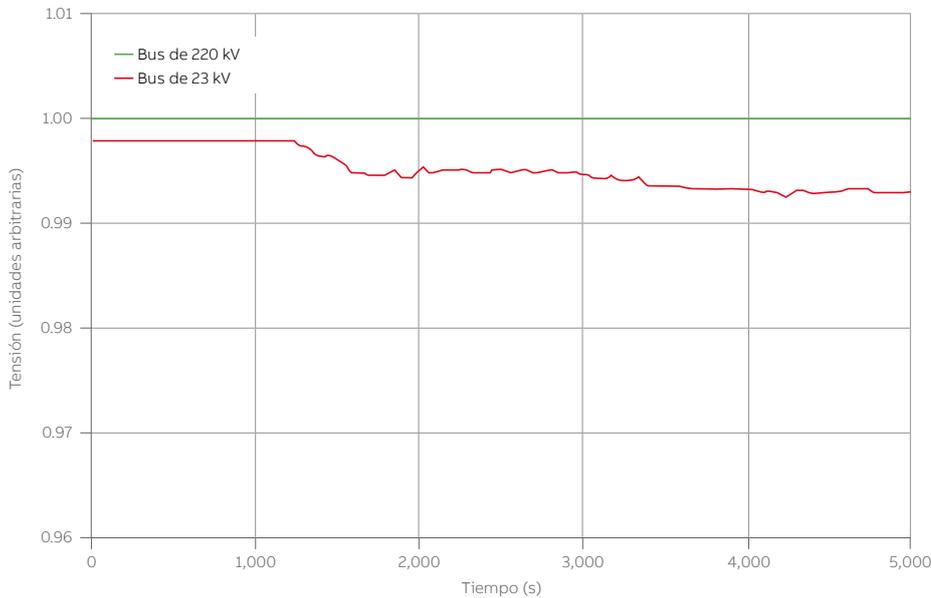
— 06 STATCOM.

— 07 La característica V-I del muestra que un STATCOM puede proporcionar corriente capacitiva e inductiva independientemente de la tensión del sistema.

Además, las minas suelen estar ubicadas en áreas remotas y al final de largas líneas de tendido eléctrico, lo que hace que el suministro eléctrico sea aún más débil y más vulnerable e impredecible. En estas redes débiles, el consumo de energía activa y reactiva de los GMD, los generadores, las líneas y los transformadores provoca caídas de

SVC y STATCOMS son los dispositivos de derivación FACTS más comunes que se encuentran en la minería.

tensión y una mala calidad del suministro →2-3. En tales situaciones, la estabilidad de la tensión es una cuestión crucial para mejorar la seguridad y fiabilidad de la energía [2].



08

08 Simulación de tensiones de bus tras la puesta en marcha y el funcionamiento nominal de nuevos GMD con un STATCOM en los 220

09 Potencia reactiva inyectada por dispositivo FACTS.

#### Referencias

- [1] A. Symonds, M. Laylabadi, "Cycloconverter Drives in Mining Applications", IEEE Industry Applications magazine Nov./dic. 2015.
- [2] J. Pontt, et al., "Current issues on high-power cycloconverter-fed gearless motor drives for grinding mills", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2003.
- [3] ABB FACTS. Disponible en: <http://new.abb.com/facts>
- [4] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems", Wiley-IEEE Press, 1999.
- [5] K. B. Bimal, "Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends", p. 126, Academic Press, 2006.

### Dispositivos FACTS

En una red eléctrica, la capacidad de transportar energía de CA está restringida por consideraciones de estabilidad de transitorios y límites térmicos, de tensión y de corriente de cortocircuito. Los FACTS (sistemas flexibles de transporte de corriente alterna) de ABB son un concepto basado en controladores de electrónica de potencia que aumentan la capacidad de transmisión y el margen de estabilidad de la red y mejoran su comportamiento dinámico [3-5]. Los FACTS también incorporan dispositivos de electrónica de potencia para suministrar energía inductiva o reactiva a la red. Las principales capacidades de estos dispositivos son la compensación de energía reactiva, el control de tensión y el control del flujo de la energía. En los sistemas FACTS se puede distinguir entre tipos de serie y de derivación:

### Un STATCOM puede compensar la caída de tensión causada por la instalación de un nuevo GMD.

- En el caso de la compensación de derivación, el SVC (compensador estático de var) y el STATCOM (compensador estático) actúan como compensadores de potencia reactiva.
- Para la compensación en serie, los dispositivos más importantes son el TCSC (compensador en serie controlado por tiristor) y el SSSC (compensador en serie síncrono estático), que aumentan o disminuyen la reactancia de transferencia de la línea eléctrica a la frecuencia nominal.

Estos dispositivos se instalan por todo el mundo en subestaciones eléctricas, ferrocarriles, complejos mineros, estaciones HVDC (CC de alta tensión), centrales de energía renovable, etc. La potencia total de los dispositivos en derivación instalados en todo el mundo suma alrededor de 95 000 MVA, mientras que la de los dispositivos de compensación en serie se acerca a los 360 000 MVA.

Para aplicaciones mineras, se prefieren los dispositivos en derivación, y estos suelen instalarse en el mismo bus que los GMD. Los SVC y los STATCOMS son los dispositivos de derivación FACTS más comunes que se encuentran en la minería y su misión es:

- Garantizar los intercambios de energía contractuales equilibrando la potencia reactiva
- Mantener la calidad de la energía a pesar de las enormes fluctuaciones de la demanda
- Mejorar la estabilidad estática o de transitorios

### SVC

Un SVC se compone de una combinación de condensadores eléctricos conmutados por tiristor (TSC) y reactores conmutados por tiristor (TSR) o reactores controlados por tiristor (TCR), que se comportan como una reactancia variable conectada en derivación. Esta disposición genera o absorbe energía reactiva para regular la magnitud de la tensión en el punto de conexión a la red de CA. Un control coordinado hace variar la energía reactiva a la salida del SVC, modificando así continuamente las calificaciones capacitiva e inductiva del sistema →4-5.

### STATCOM

Un STATCOM es equivalente a una fuente de tensión controlable detrás de una reactancia. Un STATCOM es un dispositivo de compensación reactiva

conectado en derivación, capaz de producir o absorber energía reactiva en el rango capacitivo e inductivo para mantener el control de parámetros eléctricos específicos del sistema →6-7.

#### Los sistemas FACTS en la minería

Para compensar la caída de tensión causada por

—  
Aprovechando los productos FACTS de ABB, los nuevos GMD y los equipos asociados pueden integrarse sin problemas en la red eléctrica local sin debilitarla.

la instalación de un nuevo GMD en una aplicación minera como se ha descrito anteriormente, se puede elegir un dispositivo en derivación, en concreto un STATCOM, por su capacidad de proporcionar corriente capacitiva e inductiva independientemente del nivel de tensión. La capacidad necesaria del STATCOM puede describirse como:

$$\Delta U(\%) = Q/S_{cc} * 100$$

Donde:

$\Delta U(\%)$  = porcentaje del nivel de tensión que debe recuperarse, con respecto a la tensión nominal.

$Q$  = potencia reactiva del sistema FACTS

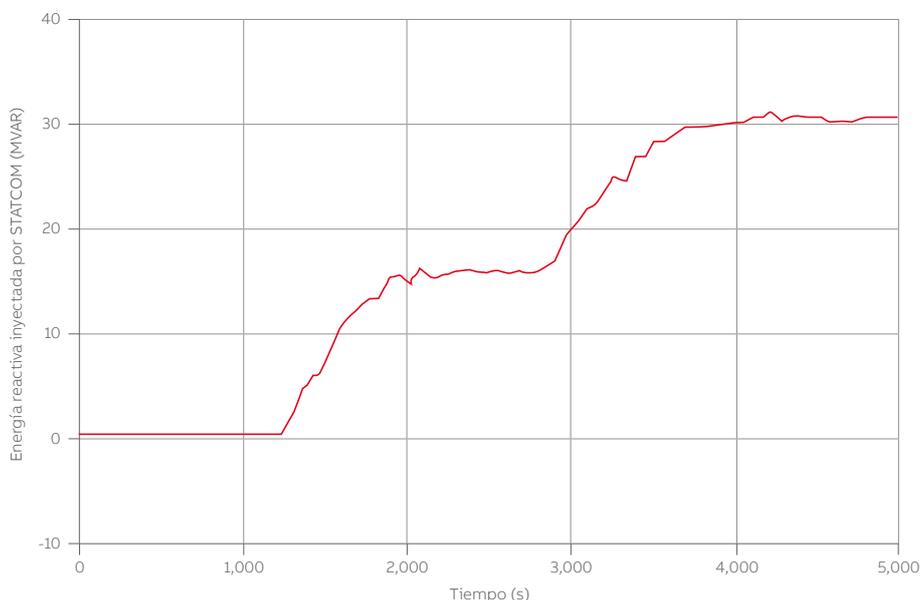
$S_{cc}$  = potencia de cortocircuito en el bus en el que se coloca el sistema FACTS.

En consecuencia, un STATCOM de 40 MVAR podrá recuperar el 4 % de la tensión nominal en un bus con una potencia de cortocircuito de 1000 MVA.

Un STATCOM con este valor puede controlar la tensión del bus y recuperar cualquier caída causada, por ejemplo, por el arranque del motor. En →8 se muestra una simulación de las tensiones del bus tras el arranque y el funcionamiento nominal de nuevos GMD con un STATCOM (en el bus de 220 kV). A los 1200 s arranca el primer motor, consumiendo potencia activa y reactiva e induciendo una caída de tensión del 1,4 %. El control del STATCOM reacciona inyectando potencia reactiva para compensar la tensión del bus de 220 kV. Como resultado de esta inyección de potencia reactiva, también se compensa la tensión del bus de 23 kV, manteniéndola por encima del 99 % de la tensión nominal. A los 2800 s se pone en marcha un segundo motor, lo que hace que el STATCOM inyecte más potencia reactiva para compensar esta nueva caída.

En →9 se muestra la potencia reactiva en los MVAR inyectados por el STATCOM. Se observan dos eventos de inyección de potencia reactiva: a los 1200 s, cuando arranca el primer GMD, y a los 2800 s, cuando lo hace el segundo motor GMD. Esta inyección de potencia reactiva estabiliza la tensión del sistema.

La adición de otro GMD permite a las empresas mineras lograr una mayor producción y productividad en una ubicación existente, además de ahorrar el enorme esfuerzo que implica abrir un nuevo complejo minero. Al aprovechar los productos FACTS de ABB, los nuevos GMD y los equipos asociados pueden integrarse sin problemas en la red eléctrica local sin debilitarla. De hecho, las redes ya débiles se reforzarán con la incorporación de, por ejemplo, dispositivos SVC o STATCOM. ●



ENCUENTRO ENTRE ALGORITMOS Y MATERIALES

# Aislamiento termoplástico en transformadores de potencia

ABB ha desarrollado y probado con éxito el aislamiento termoplástico de espaciadores radiales para transformadores llenos de aceite. Aplicando la técnica de moldeo por inyección y una nueva herramienta de moldeo flexible, se ha desarrollado un método de producción rápido y rentable para ofrecer a los clientes una alternativa sólida y fiable al cartón prensado.

**Adam Michalik**  
**Renata Porębska**  
Corporate Research Center  
Cracovia, Polonia

adam.michalik@pl.abb.com  
renata.porebska@pl.abb.com

**Su Zhao**  
**Orlando Girlanda**  
**Harald Martini**  
Corporate Research Center  
Västerås, Suecia

su.zhao@se.abb.com  
orlando.girlanda@se.abb.com  
se.abb.com  
harald.martini@se.abb.com

**Claire Pitois**  
ABB Product Group  
Västerås, Suecia

claire.pitois@se.abb.com

ABB es el fabricante de transformadores más fiable del mundo. Ofrece a los clientes una gama completa de transformadores, componentes y servicios, e identifica las necesidades individuales para proporcionar soluciones óptimas. En

En 2011, los centros de investigación corporativos de ABB iniciaron un proyecto de colaboración con el fin de identificar nuevos materiales para su uso en la fabricación de espaciadores de transformadores.

respuesta a las cambiantes condiciones del mercado, ABB ha ampliado su familia de transformadores invirtiendo en innovación y mejora de productos y procesos →1. En la actualidad, ABB está estudiando la idoneidad de nuevos materiales para componentes de transformadores, y redefiniendo los procesos de fabricación para desarrollar los mejores productos posibles →2.



—  
01 Los transformadores de potencia de ABB se fabrican con los conocimientos especializados y la experiencia que facilitan los más de 100 años de historia.

### Espaciador radial: pequeño pero importante

Uno de los componentes claves del aislamiento del típico transformador de tipo disco, lleno de aceite, es un espaciador radial. Este elemento, relativamente pequeño, se coloca en el núcleo de los devanados del transformador y garantiza la distancia correcta entre cada uno de los discos de devanado apilados del transformador →2. El espaciador debe ser capaz de soportar una carga mecánica constante, que procede de las fuerzas de

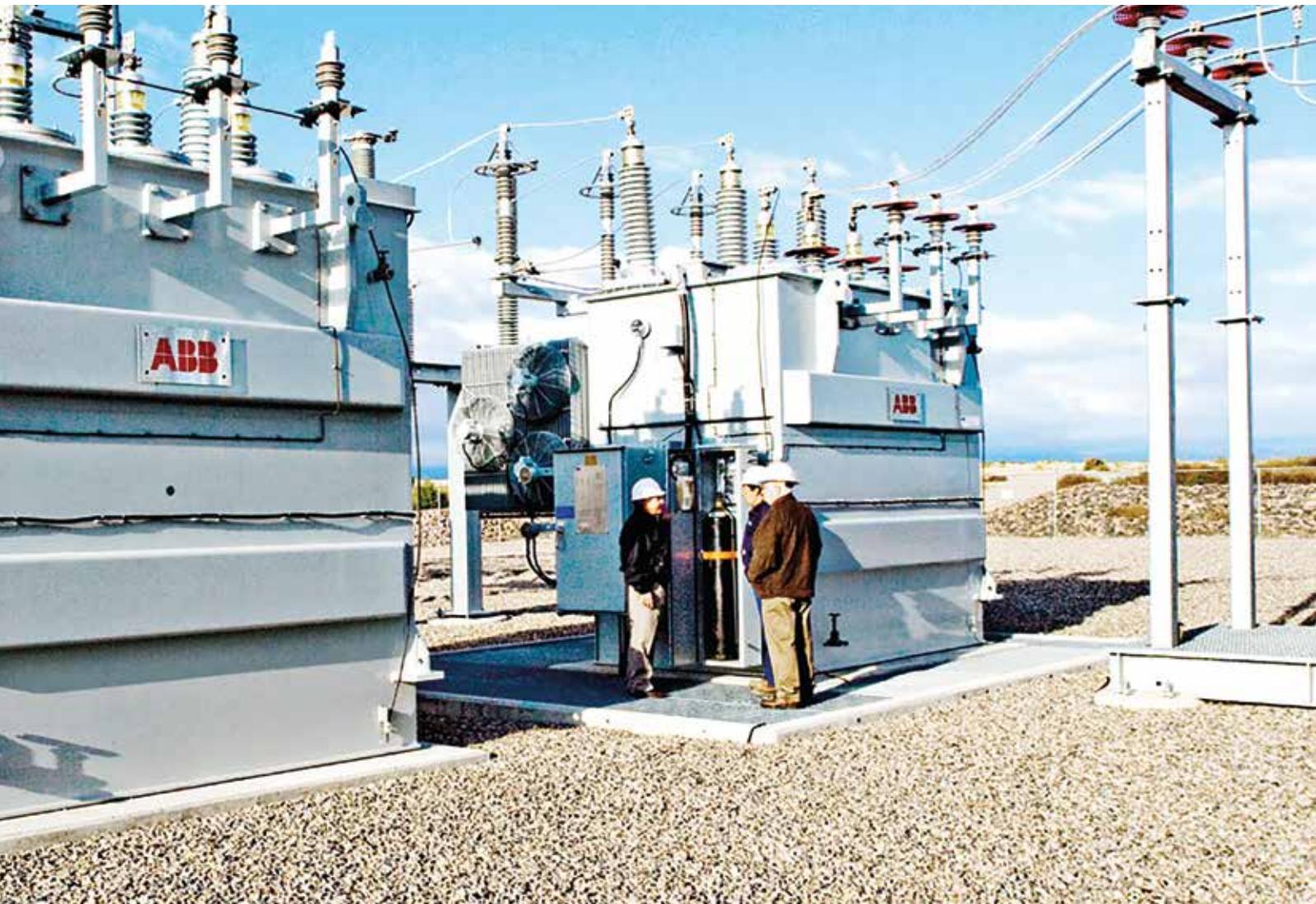
—  
**Los espaciadores termoplásticos tienen estabilidad dimensional y fiabilidad excelentes, lo que garantiza el comportamiento mecánico a largo plazo del devanado.**

sujeción y, en caso de cortocircuito, una gran carga adicional causada por fuerzas electrodinámicas. Además, el espaciador debe poder soportar temperaturas de trabajo de entre 98 °C y 110 °C [1,2], así como aumentos rápidos de temperatura

de corta duración debidos a posibles sobrecargas. Por otra parte, estas estructuras deben resistir la interacción con el aceite del transformador.

El cartón prensado ha sido el producto preferido para los espaciadores y los componentes de aislamiento del transformador. Desarrollado en la primera mitad del siglo XX, el cartón prensado es ligero y adecuado para las exigentes necesidades mecánicas y eléctricas de los transformadores. Por consiguiente, durante mucho tiempo no se realizaron trabajos de investigación y desarrollo sobre la utilidad de otros materiales porque no se consideraba económica ni técnicamente viable [3]. Hoy en día se utiliza el cartón prensado como espaciador en la mayoría de los tipos de transformadores, que van desde pequeños transformadores de distribución hasta grandes transformadores de potencia. Las únicas excepciones a estas aplicaciones son los transformadores especiales, que requieren temperaturas de trabajo extremadamente altas [4,5] o soluciones extremadamente seguras, como los transformadores de tracción. En tales casos se utilizan materiales sintéticos a base de aramida, de altas prestaciones, debido a su alta resistencia y ausencia de conductividad.

01





02

### Alternativas de plástico

Tras décadas de utilizar el cartón prensado como material de base para el aislamiento de los transformadores, ABB cree que el mercado está preparado para explorar otros materiales innovadores que mejoren la elección del cliente. La disponibilidad y el rápido desarrollo de plásticos con propiedades exclusivas sugieren aplicaciones imposibles hasta entonces. Los plásticos modernos tienen propiedades mecánicas y térmicas mejoradas, como un elevado índice RTI, una alta temperatura de deflexión y una alta resistencia a la compresión; esto hace del plástico un posible candidato para actuar doblemente como material de soporte y de aislamiento en el campo de los transformadores. Además, los avances en los procesos de fabricación permiten una producción simple y energéticamente eficiente, lo que aumenta el atractivo de los plásticos.

Por lo general, los plásticos se caracterizan por bajos índices de absorción de agua de la humedad ambiente –en algunos grados de termoplástico, la absorción de agua podría incluso ser  $< 1$  % en peso– lo que es conveniente porque las moléculas de agua dentro del material aislante impactan negativamente en sus propiedades eléctricas y podrían afectar al espaciador y al conjunto del devanado. En consecuencia,

los espaciadores de cartón prensado y otros componentes aislantes se secan: primero, tras la fase de montaje del devanado, y una segunda vez justo antes de su impregnación con aceite [6]. La evacuación del agua que se ha absorbido en los elementos aislantes puede producir un cambio de dimensiones debido a la contracción. Por tanto, se aplica un procedimiento especial de dimensionamiento para conseguir el tamaño deseado del devanado montado después del proceso de secado. Los procesos de secado y

—  
El uso de materiales nuevos como el plástico podría eliminar o reducir la necesidad del secado o el dimensionamiento, lo cual ahorraría energía y aceleraría la eficiencia de la producción.

dimensionamiento requieren tiempo, esfuerzo y una cantidad considerable de energía [6]. El uso de materiales nuevos como el plástico podría eliminar o reducir la necesidad de estos pasos, lo cual ahorraría energía y aceleraría la eficiencia de la producción.



—  
02 Instalaciones típicas de producción de transformadores de potencia, ABB Monseice, Italia.

—  
03 Esquema de transformadores con devanados internos y aislamiento.

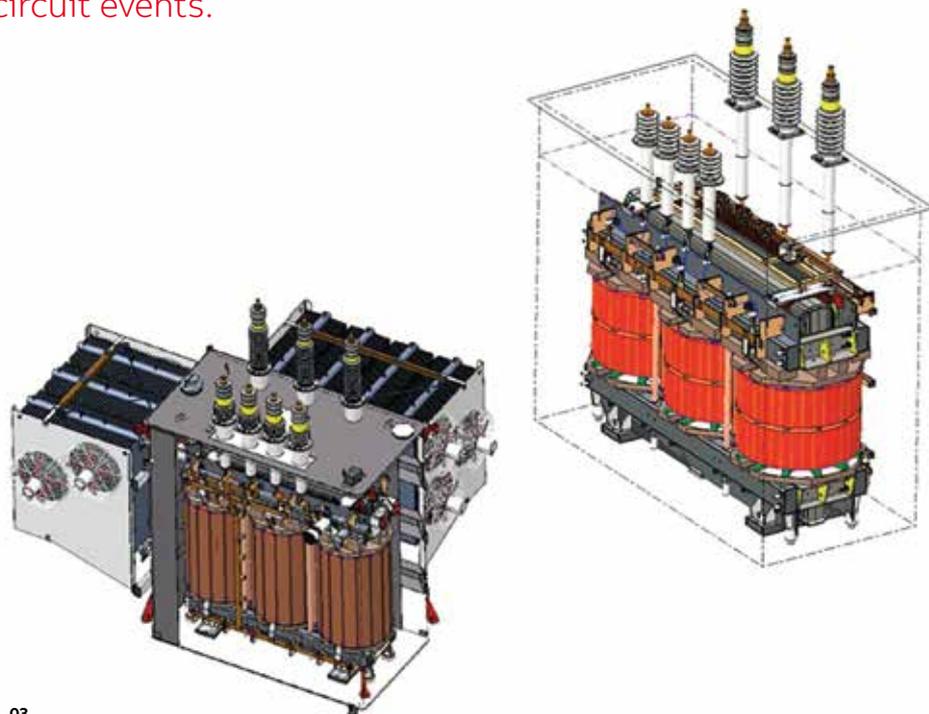
Basándose en más de 100 años de experiencia en fabricación y desarrollo de transformadores en muchas instalaciones de producción, ABB sabe que en el mercado competitivo actual, los clientes de servicios públicos, ferrocarriles y otros clientes de transformadores confían en los conocimientos especializados y la experiencia de ABB en materia de aislamiento. Los plásticos con características térmicas superiores y la capacidad de absorber cantidades insignificantes de agua serían idealmente adecuados como espaciadores radiales y permitirían un proceso de producción más limpio, en el que se podría eliminar o reducir la necesidad del primer paso de secado y, posiblemente, el paso del dimensionamiento. La mejora de la eficiencia operativa y la reducción de los costes de fabricación resultantes podrían traducirse en ahorros reales para los clientes que desean espaciadores radiales alternativos.

—  
El comportamiento de los transformadores con espaciadores termoplásticos se verificó con éxito en las condiciones de trabajo más exigentes, como casos de cortocircuito de red. short circuit events.

### Termoplásticos

En 2011, los centros de investigación corporativos de ABB iniciaron un proyecto de colaboración con el objetivo de identificar un material para su uso en la construcción de espaciadores, que permitiera nuevas capacidades funcionales, proporcionando así a los clientes una alternativa tangible mejor al cartón prensado en los transformadores de potencia. Además, los equipos buscaron un método de producción más rápido, fiable y rentable, que asegurara una alta precisión de los elementos fabricados.

Los termoplásticos se consideraron un material de aislamiento ideal para transformadores de potencia por su estructura molecular, que les permite fundirse y remodelarse repetidamente cuando se aplica calor y porque son fáciles de fabricar. Su uso es cada vez mayor en relación con diversos dispositivos eléctricos del segmento de los productos de baja tensión, y se han introducido recientemente en aplicaciones de media y alta tensión en las que se instalan como alojamiento de polos integrados, sustituyendo al epoxi convencional, para proporcionar soporte mecánico y aislamiento eléctrico.



A juzgar por la amplia gama de grados termoplásticos que hay disponibles en la actualidad, resulta sorprendente que pocos hayan sido evaluados para su viabilidad en transformadores de potencia. Las pruebas realizadas verificaron las excelentes propiedades

—

**Los transformadores de potencia diseñados y optimizados para pedidos y requisitos específicos necesitan un proceso de fabricación flexible.**

de los termoplásticos: comportamiento mecánico estable en condiciones de carga, incluso durante la sobrecarga; compatibilidad química o resistencia a la degradación por la interacción con el aceite; baja absorción de la humedad y rigidez dieléctrica habitual. Los espaciadores termoplásticos se fabricaron e instalaron dentro de las pilas de devanado y se sometieron a pruebas →4, 5a. Se descubrió que tenían una excelente estabilidad dimensional y fiabilidad, lo que garantizaba un comportamiento mecánico a largo plazo del devanado →5b.

El comportamiento térmico también se probó con éxito. La tolerancia de temperaturas elevadas significa que el riesgo de fallo térmico relacionado con el punto caliente del devanado se reduce en gran medida. El uso de termoplásticos como espaciadores hace, por tanto, que los transformadores sean resistentes y robustos.

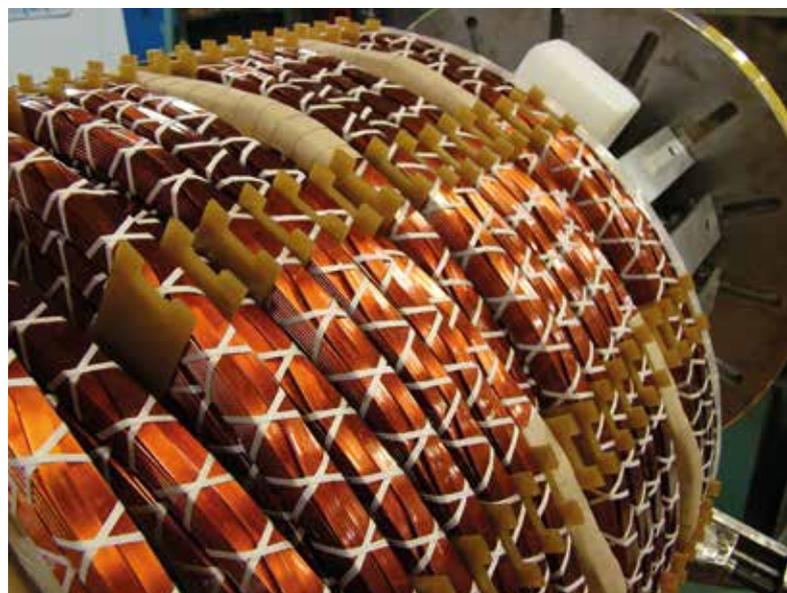
### Proceso eficiente

ABB buscó un método de producción que fuera lo suficientemente rápido como para proporcionar el elevado número de espaciadores necesarios (miles por cada transformador), y lo suficientemente flexible como para permitir una variación continua en el tamaño de los espaciadores para cada unidad fabricada, debido a los requisitos del pedido del cliente y un tiempo de respuesta rápido. Además, el proceso de fabricación tuvo que garantizar una precisión de producción superior, homogeneidad y excelente reproducibilidad.

Se eligió la técnica de moldeo por inyección, usada convencionalmente para procesar termoplásticos, y resultó ser exigente desde el punto de vista técnico debido a la diversidad de tamaños de los espaciadores que se iban a producir. Esta técnica se ha utilizado principalmente para la producción en masa de objetos con una geometría fija. Durante el proceso, el polímero líquido se inyecta en la cavidad de moldeo con sus dimensiones específicas; sólo se puede producir un tamaño de elemento concreto utilizando una sola herramienta de moldeo. Los transformadores diseñados y optimizados para pedidos y requisitos concretos precisan un proceso de fabricación flexible en términos de tamaño del devanado y los espaciadores. ABB ha desarrollado una herramienta especial de moldeo para resolver este problema →6.



04a



04b

—  
04 Los espaciadores radiales termoplásticos se apilan y se colocan dentro de los devanados del transformador.

04a Espaciadores radiales termoplásticos.

04b Los espaciadores radiales termoplásticos proporcionan soporte adicional y aislamiento eléctrico a las pilas de devanado.

—  
05 Los espaciadores termoplásticos instalados proporcionan estabilidad.

05a Montaje de las pilas de devanado del transformador empleando espaciadores termoplásticos.

05b Devanado del transformador listo para su uso.



05a



05b

La herramienta modular, equipada con paredes ajustables, permite cambiar la longitud del espaciador en una gama continua, cubriendo así completamente el rango de tamaños necesario para los transformadores de potencia. La herramienta está equipada con cavidades de moldeo múltiples que permiten la producción simultánea de unos pocos espaciadores en menos de un minuto mediante un ciclo de inyección único.

—  
**ABB desarrolló una herramienta especial de moldeo equipada con paredes ajustables para cambiar la longitud del espaciador en una gama continua.**

El equipo de soporte de simulación de ABB aplicó sus conocimientos y experiencia en técnicas avanzadas de simulación multifísica al proceso de diseño, eliminando así las iteraciones de optimización por prueba y error que tradicionalmente se han realizado y acelerando el proceso de diseño.

Finalmente, tras la optimización de los parámetros del proceso, las tolerancias del espesor del espaciador pudieron reducirse con éxito a  $\pm 0,015$  mm, garantizando la precisión de la producción, la reproducibilidad y la homogeneidad del prototipo.

#### **Pruebas con espaciadores termoplásticos en transformadores de potencia**

Estudios rigurosos realizados con transformadores con componentes espaciadores termoplásticos dieron resultados ilustrativos. Hasta la fecha, los transformadores con espaciadores termoplásticos han superado todas las pruebas de rutina y tipo, incluyendo el aumento de temperatura con pruebas de sobrecarga y pruebas de dieléctrico. El comportamiento de los transformadores con espaciadores termoplásticos utilizados para separar las pilas de devanado se verificó con éxito en las condiciones de trabajo más exigentes, como casos de cortocircuito de red. Se realizaron pruebas de cortocircuito total y se repitieron satisfactoriamente, al igual que las inspecciones visuales de las partes activas de los componentes y los devanados individuales.



06

—  
06 La herramienta de moldeo permite ajustar la longitud del espaciador radial de acuerdo con las especificaciones del cliente.

#### Referencias

- [1] Norma IEEE relativa a los requisitos generales para transformadores de distribución, de potencia y de regulación sumergidos en líquido, IEEE C57.12.00: 2015.  
[2] Norma IEC sobre transformadores de potencia – Partes 1-7, IEC 60076: 2011.  
[3] Norma IEC sobre cartón prensado y papel prensado para fines eléctricos – Partes 1-3, IEC 6064: 2004.  
[4] Norma IEC sobre transformadores de potencia – Parte 14: Transformadores de potencia sumergidos en líquido utilizando materiales de aislamiento a alta temperatura, IEC 60076-14, 2013.  
[5] Norma IEEE relativa al diseño, las pruebas y la aplicación de transformadores de distribución, de potencia y de regulación sumergidos en líquido utilizando sistemas de aislamiento a alta temperatura y con altas temperaturas de funcionamiento, IEEE C57.154: 2018.  
[6] M.J. Heathcote, "The J&P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer", 12ª edición, Newnes, Oxford, 1998.

#### Perspectivas futuras

La incorporación de un espaciador radial termoplástico totalmente nuevo a la paleta de productos de aislamiento de transformadores de

—  
**La incorporación del nuevo espaciador radial termoplástico a la paleta de productos de aislamiento de transformadores de potencia de ABB garantiza que los clientes puedan acceder al espaciador adecuado.**

potencia de ABB garantiza que los clientes puedan acceder al espaciador adecuado para los exigentes requisitos del mercado actual de transformadores. Este producto será de especial interés para los clientes del mercado estadounidense, donde el uso de material aislante sin celulosa es una solución

de ABB. La combinación de este tipo de material aislante con espaciadores termoplásticos permitirá la eliminación de la fase de secado.

Los equipos de investigación de ABB respondieron eficazmente a la disponibilidad de nuevos materiales para desarrollar un producto fiable y rentable para estabilizar y aislar eléctricamente el devanado del transformador. El proceso de producción se ha perfeccionado y simplificado; las herramientas nuevas y modificables ayudan a optimizar aún más el proceso de fabricación. La eliminación de algunos pasos de la producción, al tiempo que se mantiene la calidad del producto y se mejora la fiabilidad, se traduce en un producto mejor para los clientes.

El significado del uso de termoplásticos para este nuevo producto se extiende más allá de su aplicación para espaciadores radiales. El éxito de este material, recientemente adoptado para espaciadores, ayuda a allanar el camino en el futuro para el uso de materiales avanzados en componentes aislantes. ●

---

ENCUENTRO ENTRE ALGORITMOS Y MATERIALES

# El dulce sabor del éxito: automatización de la distribución de electricidad para una fábrica de azúcar

Gracias a sus conceptos futuristas y sus capacidades de visualización, el sistema de ABB para la automatización de la distribución de electricidad está ayudando a Sucrivoire a impulsar la productividad y la seguridad en su fábrica de azúcar de Costa de Marfil.



**Benjamin Kabeya**  
ABB Technology SA  
Yamoussoukro,  
Costa de Marfil

benjamin.kabeya@  
ci.abb.com

Desde 1970, la producción anual de azúcar en Costa de Marfil ha pasado de prácticamente cero a alrededor de 200 000 toneladas métricas. Sucrivoire, una empresa pública recientemente privatizada, es ahora una filial del Grupo SIFCA, un grupo agroindustrial con sede en Costa de Marfil, y un actor importante en este mercado del azúcar en rápida expansión. Sucrivoire fabrica y vende azúcar

de caña multiuso y de calidad, que se utiliza en siropes, productos para hornear y medicamentos. La fábrica de Sucrivoire tiene una capacidad anual de producción de azúcar de 110 000 toneladas, generada a partir de sus 11 000 hectáreas de plantaciones de caña de azúcar. La dirección tiene previsto un aumento de la producción hasta las 118 000 toneladas en 2020.

01



Con una única instalación importante, una enorme producción anual y ambiciosos planes para aumentarla, la disponibilidad de la fábrica es, sin duda alguna, un parámetro de la máxima importancia para Sucrivoire, especialmente durante los picos de producción estacionales.

—  
 Para hacer frente a las interrupciones del suministro eléctrico, Sucrivoire optó por recurrir a la última tecnología de ABB para la automatización de la distribución de electricidad.

Una de las principales causas de los períodos de inactividad de Sucrivoire es la interrupción del suministro eléctrico de la planta. Para hacer frente a esta amenaza, Sucrivoire optó por recurrir a la última tecnología de ABB para la automatización de la distribución de electricidad.

Este nuevo sistema de ABB combina tecnologías digitales, dispositivos convencionales y aplicaciones enchufables que permiten a los operadores supervisar y obtener rápidamente una visión global de la infraestructura eléctrica. También ofrece una lista de alarmas y tendencias relacionadas con las operaciones de la fábrica. Esta información les permite reducir las interrupciones del suministro eléctrico o restaurar dicho suministro rápidamente en caso de cortes, minimizando así los períodos de inactividad →2-3. Además, la flexibilidad de la nueva tecnología de automatización de la distribución permite una medición rápida y precisa de los principales parámetros de producción, lo que a su vez genera un aumento de la productividad y una mejora de la seguridad de la fábrica.

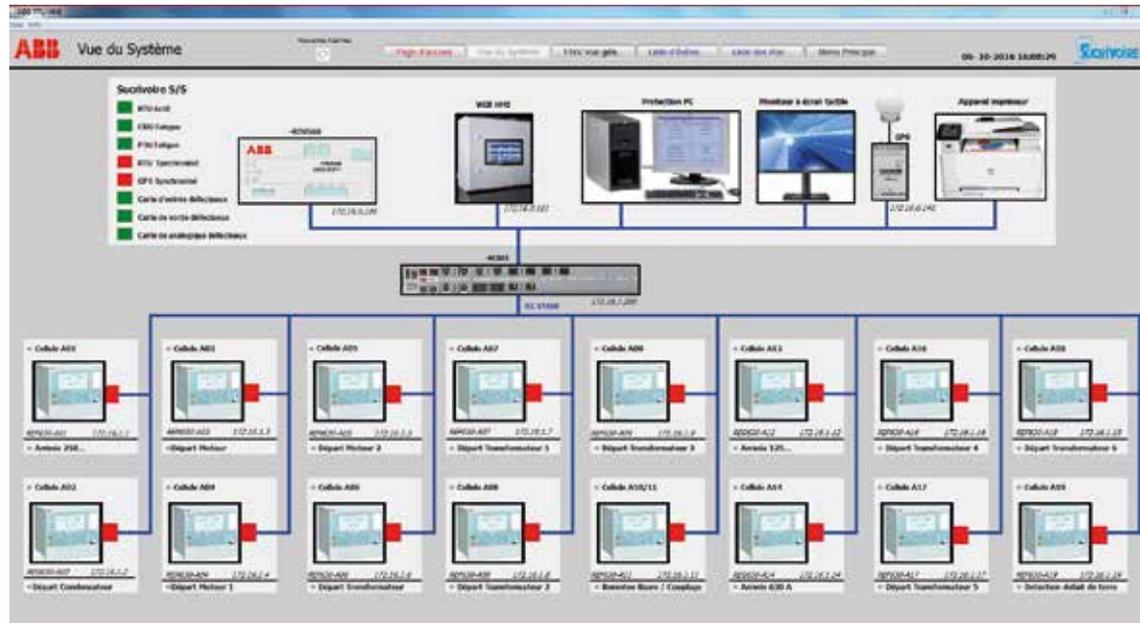
02



—  
 01 El nuevo sistema de ABB para la automatización de la distribución de la electricidad combina tecnologías digitales, dispositivos convencionales y aplicaciones enchufables que permiten a los operadores supervisar y obtener rápidamente una visión global de la infraestructura eléctrica.

—  
 02 La visualización completa de la situación eléctrica de la fábrica permite optimizar las operaciones.

—  
 03 Visión general del sistema.



03

### RTU540

Un elemento clave del sistema de distribución de electricidad es la unidad terminal remota RTU540 (RTU). Utiliza tecnología antigua y nueva, y combina dispositivos existentes y nuevos protocolos normativos en un solo sistema. Una RTU540 incorpora características avanzadas, como el control lógico programable y una interfaz hombre-máquina (HMI) que se conectan a un conjunto de pantallas. En ellas se ve el estado de los disyuntores y seccionadores de la fábrica de azúcar, con valores de medición y listas de alarmas y tendencias. La carcasa compacta de metal RTU540 de alta calidad puede incluir, si es necesario, módulos de entrada y salida, ahorrando así espacio en el armario de control. La inteligencia de la RTU540 permite una rápida interpretación de datos selectiva, de manera que los operadores reciben la información crítica que necesitan de un modo eficiente, restando importancia a los datos menos importantes para evitar confusiones.

—  
 Las pantallas permiten ver el estado de los disyuntores y seccionadores de la fábrica de azúcar, con valores de medición y listas de alarmas y tendencias.

La RTU540 también es fácil de configurar, para acomodar fácilmente las topologías cambiantes de las fábricas de azúcar y ofrecer una visión general de los datos eléctricos cruciales.



### UniGear ZS1

Para mejorar aún más la infraestructura eléctrica de la fábrica de azúcar de Sucrivoire, la aparamenta aislada en aire de media tensión (MT) se ha sustituido por el UniGear ZS1 de ABB. UniGear Digital de ABB es un nuevo concepto basado en una integración optimizada de sensores de corriente y tensión en aparamenta

—

UniGear Digital se basa en una integración optimizada de los sensores de corriente y tensión en la aparamenta de MT, combinada con los últimos IED y comunicación IEC 61850.

de MT, combinado con los últimos dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y comunicación IEC 61850. El concepto se plasma en la aparamenta aislada en aire de MT, UniGear ZS1. Con UniGear Digital, “una talla sirve para todos”, y no hace falta cambiar componentes primarios de MT si cambia la carga. Este planteamiento permite ahorrar tiempo y dinero durante la planificación y la ejecución de los proyectos. Las pérdidas de energía durante el funcionamiento también se reducen con la eliminación del transformador del instrumento. Además, la seguridad del operador aumenta, ya que todas las piezas de MT están totalmente encapsuladas en cubículos resistentes al arco eléctrico.

### Relion®

El sistema de automatización de la distribución de electricidad de la fábrica de Sucrivoire también cuenta con dispositivos combinados de protección y control de la familia de IED Relion de ABB →4. La familia Relion ofrece la más amplia gama de productos para la protección, el control, la medición y la supervisión de sistemas eléctricos aplicaciones IEC y ANSI. Para garantizar soluciones interoperables y a prueba de cambios futuros, los productos Relion han sido diseñados para incorporar los valores esenciales de la norma IEC 61850.



04a

—  
04 IED de Relion.

04a El RTU540CMD01 es un módulo de la línea de productos RTU540 que consta de una unidad de comunicación y una fuente de alimentación de gran alcance aislada galvánicamente en una carcasa metálica sobre un riel DIN.

04b El 540CID01 tiene las mismas características que el 540CMD01, pero cuenta también con un módulo de E/S múltiple.

### ABB Ability™

Los productos ABB empleados en la fábrica de Sucrivoire se benefician del concepto global de digitalización de ABB, ABB Ability. ABB Ability es

—  
La familia Relion ofrece la más amplia gama de productos para la protección, el control, la medición y la supervisión de sistemas eléctricos para aplicaciones IEC y ANSI.

una opción digital intersectorial unificada que se extiende desde los dispositivos hasta la nube con equipos, sistemas, soluciones, servicios y una plataforma que permite obtener más conocimiento del sistema, más capacidades y mejores resultados gracias a la conectividad de los equipos habilitados para ABB Ability.

### Sistemas de ABB para la automatización de la distribución de electricidad

La oferta del sistema de automatización de la distribución de ABB se compone de una gama de productos mucho más amplia de lo que hemos visto en Sucrivoire: desde sistemas básicos de automatización de la distribución, integración renovable y almacenamiento en baterías, hasta sistemas avanzados de automatización de la distribución: ABB ofrece soluciones totalmente nuevas, así como la capacidad de modernizar las instalaciones existentes de la forma más rentable posible, como en el caso de Sucrivoire.

—  
El sistema de automatización de la distribución de electricidad de ABB instalado en Sucrivoire ha mejorado enormemente la fiabilidad y eficiencia de la red eléctrica de la fábrica.

El sistema de automatización de la distribución de electricidad de ABB instalado en Sucrivoire ha mejorado enormemente la fiabilidad y eficiencia de la red eléctrica de la fábrica y ha dotado a los operadores de una visión completa de la infraestructura eléctrica, así como de control sobre ella, permitiendo el aumento de la productividad y la seguridad de la fábrica. De este modo, Sucrivoire puede garantizar la materialización de los ambiciosos objetivos de producción que se han fijado. ●

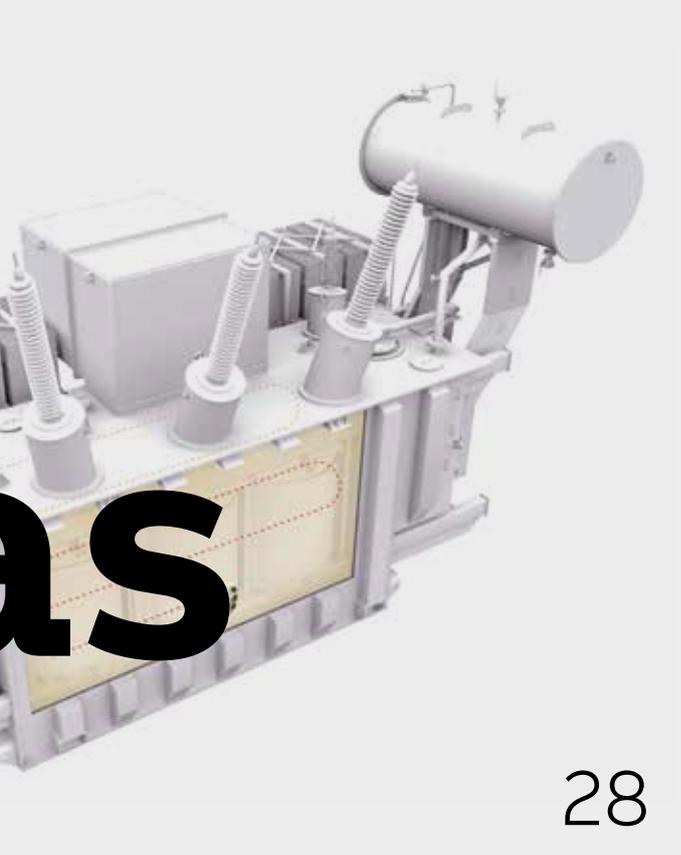


04b



# Tendencia de trans- formación





28

Ya sea proporcionando visibilidad a los interiores de transformadores complejos y peligrosos, sumergidos en aceite, a través de los “ojos” digitales de un nuevo robot, o transportando energía eléctrica desde parques eólicos marinos a redes eléctricas nacionales con una novedosa tecnología de corriente continua de alta tensión, ABB innova en colaboración con las compañías eléctricas para suministrar y distribuir energía de manera segura.

- 28 El robot TXplore de ABB redefine la inspección de transformadores
- 36 La tecnología HVDC para parques eólicos marinos está madurando



36

## TENDENCIAS DE TRANSFORMACIÓN

# El robot TXplore de ABB redefine la inspección de transformadores

El nuevo sistema homologado de ABB para la inspección mediante robot, TXplore, está adaptado al complejo entorno de los transformadores sumergidos en aceite. Las rigurosas pruebas avalan sobradamente la superioridad de las inspecciones robóticas con respecto a las humanas en términos de coste, seguridad y apalancamiento digital.

**Gregory Cole**  
**Harshang Shah**  
ABB USCRC Mechatronics  
and Sensors Bloomfield,  
Connecticut,  
Estados Unidos

gregory.a.cole@  
us.abb.com  
harshang.shah@  
us.abb.com

**Craig Stiegemeier**  
ABB Transformer  
Remanufacturing and  
Engineering Services  
St. Louis, Missouri,  
Estados Unidos

craig.stiegemeier@  
us.abb.com

**Jamie Stapleton**  
ABB Transformers  
Business Unit Worthing,  
Reino Unido

jamie.stapleton@  
gb.abb.com

A pesar del uso de técnicas no invasivas de control de las condiciones para determinar posibles fallos y evitar averías en transformadores sumergidos en aceite [1], existen situaciones rutinarias y de emergencia en las que es preciso realizar costosas inspecciones internas que entrañan un gran riesgo, tanto para la estructura del transformador como para los inspectores humanos. Actualmente, las

Habitualmente, el tiempo de inactividad del transformador durante estas inspecciones es de tres días (considerado en términos generales, ya que la inspección interna por parte del inspector conlleva altos costes humanos y de capital).

compañías eléctricas realizan inspecciones visuales internas después de que hayan caído rayos y cuando es necesario aislar la ubicación exacta o la gravedad de uno o varios fallos o efectuar una reparación planificada [2]. En estos casos, el aceite mineral debe retirarse y almacenarse para que un inspector de transformadores altamente cualificado pueda entrar en el peligroso espacio cerrado del depósito del transformador, lo que supone un gran riesgo tanto para el inspector como para el propio transformador. El proceso de inspección también requiere la presencia de equipos médicos y personal especializado. Habitualmente, el tiempo de inactividad del transformador durante estas inspecciones es de tres días, por lo que la inspección humana interna conlleva altos costes humanos y de capital.

—  
01 El robot TXplore accionado a distancia se sirve de hélices y control de flotabilidad para navegar libremente; por otro lado, las fuentes de luz y las cámaras proporcionan imágenes de alta calidad.



01

Con más de 200 000 proyectos completados, ABB es líder mundial en la producción, el control y el mantenimiento de transformadores. Se ha reflexionado mucho sobre las inspecciones

—  
En 2012, ABB propuso un sistema robótico accionado a distancia para realizar de manera fiable y eficaz operaciones en el entorno tóxico y frágil de una unidad de transformación.

internas de estos dispositivos con el objetivo de reducir los costes de capital, mejorar la eficacia de los datos de inspección, reducir el riesgo para la seguridad de las personas y los transformadores, y reducir el tiempo de inactividad.

A finales de 2012, ABB propuso un diseño para desarrollar un sistema robótico accionado a distancia para realizar de manera fiable y eficaz operaciones en el entorno tóxico y frágil de una unidad de transformación y eliminar la necesidad de la inspección humana. A fin de resultar una opción viable para las compañías eléctricas, el sistema robótico accionado a distancia debe inspeccionar el transformador, navegar eficazmente y mantener la integridad tanto del transformador como de su aceite. Los datos y las imágenes de alta calidad deben recogerse y transmitirse a sistemas externos para su evaluación. Para diseñar dicho sistema, se creó un equipo multidisciplinar de científicos e ingenieros de ABB. El resultado de sus esfuerzos es el robot sumergible de inspección de transformadores conocido ahora como TXplore →1.

### Desarrollo técnico y homologación de TXplore

Los transformadores de potencia son máquinas de elevado coste pero imprescindibles que se diseñan y fabrican utilizando métodos complejos de ingeniería

—

**TXplore se diseñó para navegar y recoger datos de inspección de alta calidad de manera segura y sencilla sin atascarse ni dañar el transformador.**

y construcción para hacer frente a los problemas que se encontrarán durante su vida útil, como la sobretensión, las corrientes de cortocircuito, la alta temperatura de los bobinados y los contaminantes. La circulación del aceite aislante permite disipar el calor de los bobinados y es crucial para el buen funcionamiento del transformador. Cualquier objeto, incluido un robot, que entre en el transformador debe preservar la integridad del aceite. Por este motivo, ABB diseñó el sistema TXplore desde cero →1-2.

### Diseño del sistema TXplore

El nuevo sistema de inspección diseñado para transformadores desactivados solo requiere la intervención de dos personas una vez que la unidad está preparada: un técnico del equipo para configurar y manejar el robot, y un piloto del robot para navegar, recoger datos y comunicarse con expertos y clientes →3. El operador del equipo es responsable de las tareas de instalación y colocación del robot dentro o fuera del sistema →3.

TXplore está diseñado para navegar y recoger datos de inspección de alta calidad de manera segura y sencilla. Puede tomar fotos y realizar vídeos sin atascarse ni dañar el transformador o sus componentes →4. El robot inalámbrico tiene la forma y el tamaño justos para equilibrar la facilidad de navegación con la resistencia, lo que permite al robot sumergible inspeccionar todas las zonas de interés, como los casquillos, los cables, el cambiador de tomas, la parte superior del núcleo, el soporte y el aislamiento del núcleo, etc. Además, los sistemas de seguridad redundantes y las pruebas exhaustivas de seguridad térmica y medioambiental verifican que el sistema TXplore está listo para inspeccionar transformadores en las condiciones más exigentes.

02



—  
02 El robot TXplore accionado a distancia navega de manera libre y segura dentro de un transformador de aceite desactivado.

—  
03 Una inspección interna in situ de un transformador que muestra al piloto del robot, al operador del equipo y al propio robot.



Controlador de equipos



Inspección de dispositivos



Control por robot



03

Es vital preservar la calidad del aceite mineral, por lo que la construcción del robot se optimiza para no dejar huella detectable, ya sea química o física, mientras actúa dentro del transformador. El armazón exterior del robot está hecho de un plástico de alto rendimiento que minimiza el riesgo de acoplamiento eléctrico y de daños estructurales al transformador, a la vez que permite que el dispositivo funcione con seguridad en entornos exigentes a altas temperaturas.

—  
**Durante la inspección con TXplore solo se requiere la intervención in situ de dos empleados, un piloto del robot y un operador del equipo (parte superior).**

Las imágenes de inspección de alta calidad pueden tomarse en el transformador y transmitirse a cualquier lugar del mundo. Los sistemas de radio redundantes garantizan la navegación aunque se produzca un fallo en las comunicaciones. La arquitectura exclusiva del sistema permite añadir futuros avances tecnológicos según aumenten las exigencias de los usuarios finales →5. De este modo, el sistema TXplore proporciona apalancamiento digital.

#### Humano frente a robot

La seguridad de las personas responsables de la inspección y la integridad del transformador son fundamentales, y el diseño del sistema garantiza una navegación y una comunicación óptimas. Esto se corrobora al comparar el flujo de trabajo propuesto para realizar una inspección mediante robot con una inspección invasiva humana →6. TXplore navega en el aceite, eliminando así la necesidad de equipos de tratamiento, como camiones cisterna, plataformas de procesamiento y llenado al vacío o personal para retirar y almacenar el aceite, una práctica común durante las inspecciones humanas. Y al ser un robot el que entra en la unidad, en lugar de una persona, no se requiere ningún equipo médico o de seguridad ambiental durante la inspección. Cabe destacar que durante la inspección con TXplore solo es necesaria la intervención in situ de dos empleados, un piloto del robot y un operador del equipo (parte superior), una vez que el transformador ha sido preparado →3. En general, la inspección robótica puede completarse en menos de un día con solo dos empleados, una gran reducción tanto de personal como de tiempo y coste en comparación con una inspección humana estándar, que requiere un equipo numeroso y dura tres días o más.



**Homologación**

Antes de realizar estudios piloto en instalaciones similares a las reales, se llevaron a cabo investigaciones de sistemas y subsistemas completos en el laboratorio y en los centros de pruebas. Se realizaron pruebas de fugas, capacidad de navegación, temperatura, estabilidad química y posible contaminación del aceite.

—  
**La inspección robótica se puede llevar a cabo en menos de un día con solo dos empleados.**

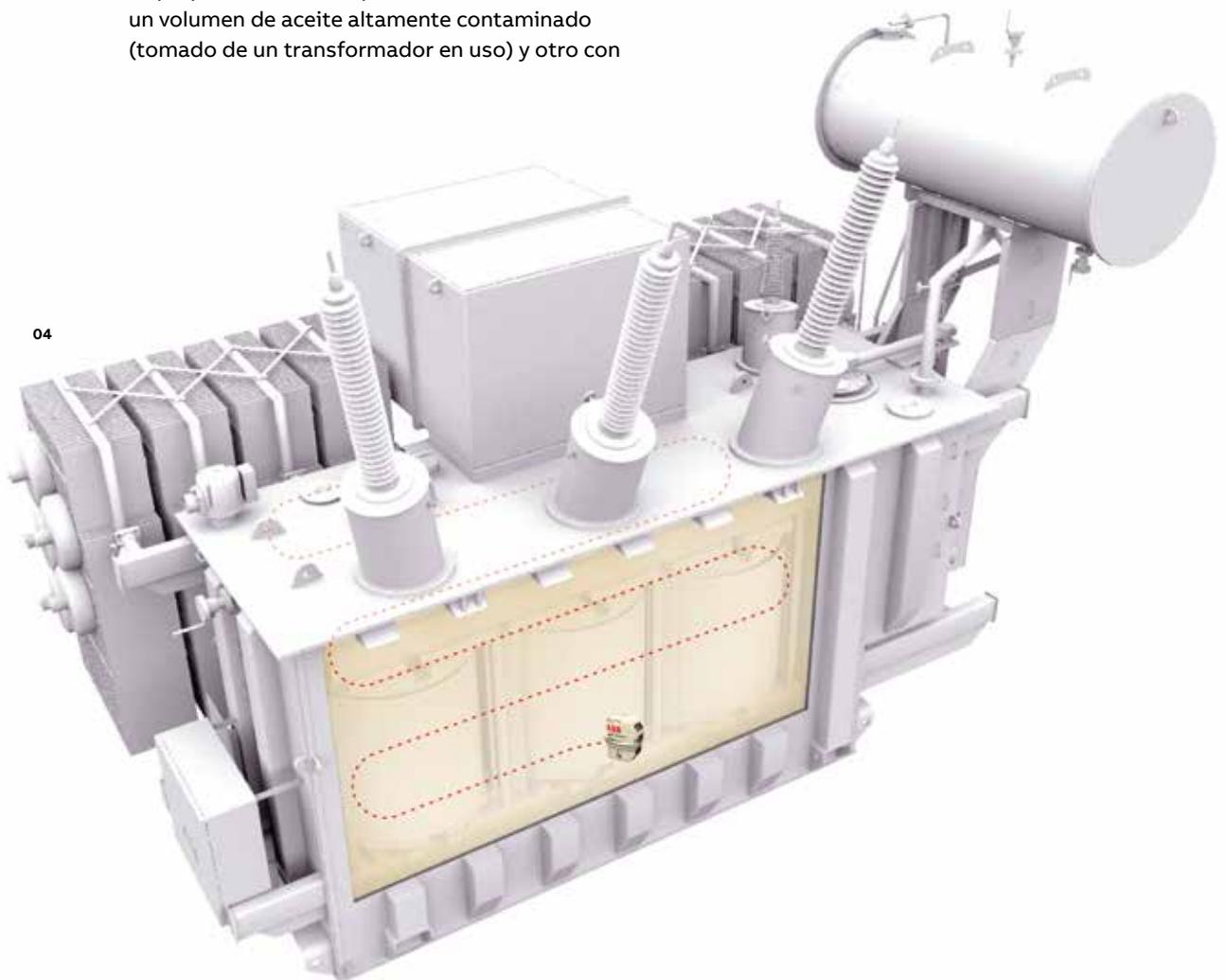
Se analizaron prototipos para detectar fugas a diferentes temperaturas durante más de 96 horas en condiciones de presión que alcanzaron hasta más del doble de las previstas sobre el terreno. Se evaluaron las capacidades de navegación espacial y profunda en siete tanques llenos de aceite a fin de determinar la estabilidad del robot y garantizar que el sistema visual pudiera estabilizarse para proporcionar imágenes de alta calidad.

El impacto del prototipo del robot en el aceite mineral se evaluó de una manera inteligente: se prepararon dos tanques de aceite, uno con un volumen de aceite altamente contaminado (tomado de un transformador en uso) y otro con

cerca de 380 litros de aceite limpio. Se realizaron una serie de mediciones de referencia para los volúmenes de aceite.

El robot se introdujo en el tanque de aceite altamente contaminado durante 6 horas. A continuación se extrajo y se reacondicionó utilizando técnicas de limpieza y preparación in situ homologadas por ABB. Después, el robot accionado a distancia fue introducido en el depósito de aceite limpio durante un período prolongado. En este punto se extrajeron muestras de este tanque de aceite y se analizaron para determinar si el robot contaminaba o no el segundo tanque de aceite. A continuación, los resultados se compararon con las mediciones de referencia. Se examinaron el nivel de contaminación del aceite (desde limpio y nuevo hasta prácticamente negro y muy contaminado con presencia de partículas) →7, la temperatura (de -5 °C a 27 °C) y el impacto del robot sobre el aceite. Los resultados demostraron que el aceite mantiene su integridad durante todo el proceso de inspección si se siguen los procedimientos establecidos.

04

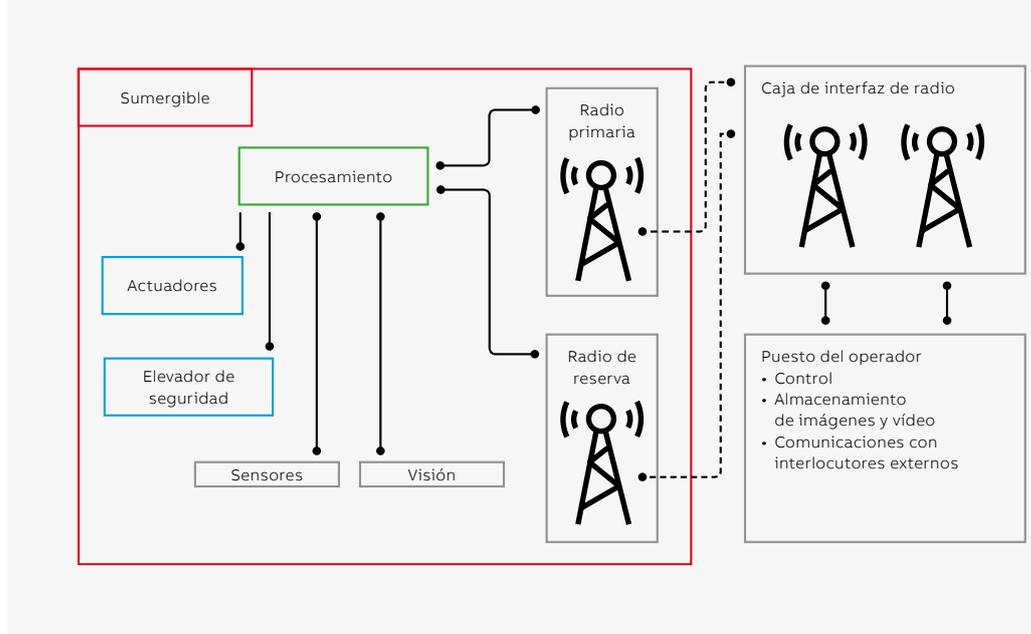


04 Esquema que muestra el recorrido del TXplore dentro del transformador sumergido en aceite.

05 La arquitectura del sistema muestra los sistemas mecánicos y eléctricos de control y los sistemas de recopilación de datos.

06 Flujo de trabajo humano actual frente al flujo de trabajo del robot propuesto para la tarea de inspección de transformador.

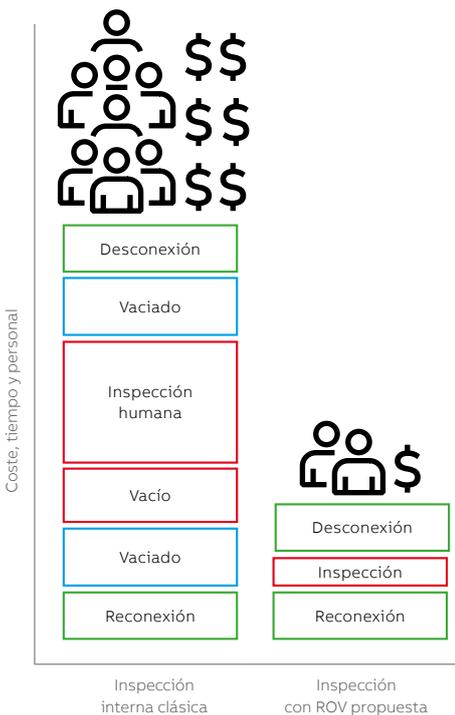
07 Ejemplo de los resultados de las pruebas de contaminación por partículas del aceite no contaminado tras la introducción del robot en el transformador sumergido en aceite.



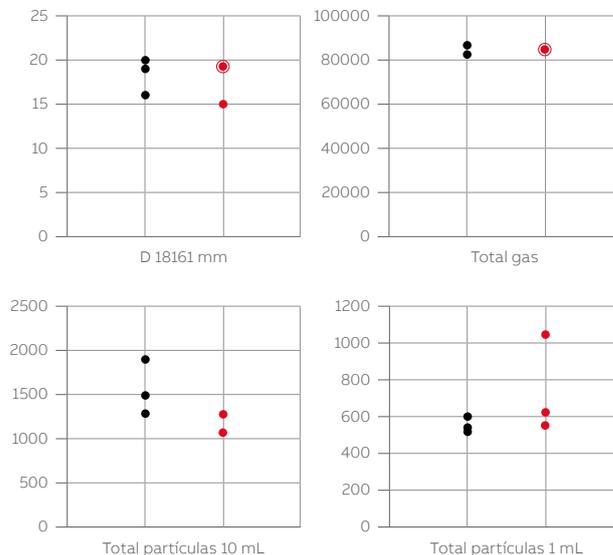
05

Es sabido que los sistemas de propulsión de los vehículos accionados a distancia (ROV) a menudo generan burbujas por cavitación. Para evitarlo se introdujeron elementos específicos en el diseño. Por ejemplo, el sistema de propulsión del robot puede ser una fuente de cavitación. Para evaluar este proceso, se realizó una investigación estroboscópica de la hélice en todas las posibles frecuencias de rotación. No se detectaron burbujas de gas, ni siquiera en las zonas susceptibles de actuar como núcleos de cavitación, por ejemplo, el borde superior de la hélice o el espacio de separación entre la hélice y la cubierta.

Las inspecciones del sistema piloto se llevaron a cabo en diversas condiciones y temperaturas; el resultado fue una reducción sensible del tiempo de inspección a menos de dos horas. Se tomaron imágenes claras y precisas →8, grabadas y entregadas al cliente en forma de informe detallado que documenta la inspección. Toda la información pertinente puede compartirse con expertos de todo el mundo en tiempo casi real. Esta capacidad permite que el cliente cuente con los mejores diagnosticadores para tratar cualquier problema que presente el transformador. La inspección de TXplore permite volver al servicio con la confianza de que se puede mantener el futuro plan de funcionamiento o reparación del transformador.



06



07



08a



08b

### Caso práctico

Los resultados de las pruebas de inspección robótica se han visto corroborados por las inspecciones realizadas en 2016 en la fábrica de transformadores de potencia de San Luis relativas a los transformadores de producción, y a la importante subestación que proporciona electricidad a las instalaciones de prueba de alta tensión →9.

—  
**En 2017, ABB realizó con éxito la inspección interna de un transformador en una estación de American Electric Power (AEP) sin necesidad de manipular el aceite.**

Además, AEP, que es una gran compañía eléctrica de Estados Unidos, presenció una demostración de una inspección de un tanque realizada por robots a distancia en ABB Customer World en marzo de 2017. AEP planteó a ABB la posibilidad de realizar una inspección de uno de sus grandes transformadores de potencia que se pondría fuera de servicio. Durante el verano de 2017, el equipo de desarrollo de ABB llevó el robot y los equipos de control y registro a la estación de AEP, y realizó con éxito la inspección interna de un transformador

que tenía más de 50 años sin necesidad de manipular el aceite. TXplore inspeccionó con éxito el transformador y ABB pudo verificar los beneficios de la movilidad efectiva del robot, la capacidad de visualización y el potencial de colaboración, tanto a escala remota como local, así como la eficiencia en el funcionamiento general.

### Lanzamiento del producto

Tras estas inspecciones piloto se revisaron los datos del prototipo y la información sobre el rendimiento. Como resultado, se hicieron modificaciones en el diseño de cara a mejorar la fiabilidad, la vida útil y la capacidad de TXplore para realizar inspecciones en aceite caliente. Los primeros robots de producción se sometieron a pruebas iniciales y se realizaron inspecciones de prueba en febrero de 2018. El robot se presentó en la Feria de Hannover y los primeros pedidos para pruebas piloto del diseño final se empezaron a recibir el 1 de marzo. Las inspecciones de servicio de producción están previstas para mayo de 2018. A partir de ese momento, los robots permitirán a ABB realizar inspecciones en cualquier transformador sumergido en aceite lo suficientemente grande como para introducir el robot patentado. La producción continuará de modo que ABB dispondrá de una flota de robots de apoyo en las operaciones de servicio.

—  
08 Imágenes tomadas por TXplore durante la inspección de un transformador con 20 años de servicio, que se había apagado.

08a El cliente pensaba que la causa del fallo podría ser el cambiador de tomas, pero la imagen de TXplore mostró que no era así.

08b La imagen de TXplore indica claramente que la causa del problema fue un fallo de disco a disco.

—  
09 Se muestra el proceso de inspección de un transformador con TXplore.

09a Demostración de una inspección robótica a distancia dentro de un tanque lleno de aceite.

09b La inspección utiliza a un técnico del equipo (parte superior), que configura y gestiona la inspección, y un piloto del robot, que se encarga de la navegación.

09c Un técnico coloca el TXplore de forma segura en el transformador con aceite. 09d TXplore navega libremente y de forma segura dentro del transformador sumergido en aceite sin riesgo para los empleados.

09d TXplore navega con libertad y seguridad en el interior del transformador sumergido en aceite, sin riesgo para los empleados.

#### Referencias

[1] L. Carlzon, A. Fazlagic, P. Lorin, Service Handbook for Transformers, P. Boss, D.G. Frimpong, y M. Turner, dirs. ABB, 2007.  
[2] H.C Sun, Y.C. Huang, C.M. Huang, "A review of dissolved gas analysis in power transformers", Energy Procedia, volumen 14, pp. 1220-1225, 2012.

### El futuro es seguro y digital

La inspección robótica elimina la necesidad de transportar equipos pesados, reduce el tamaño del equipo de supervisión y el tiempo de inactividad, generalmente a menos de un día, y resulta muy rentable.

—  
**Lo más importante es que el sistema TXplore navega en el aceite y reproduce visualmente el interior de la unidad de transformación.**

Además, la capacidad del sistema para proporcionar un conjunto integral de datos de inspección hace que la inspección robótica sea rentable. No obstante, la ventaja más importante

de utilizar un robot accionado a distancia para navegar por el aceite es la capacidad de representar visualmente el interior de la unidad de transformación y ver a distancia los resultados de la inspección con total seguridad y sin necesidad de que tengan que entrar personas en el espacio confinado del transformador. ABB llevará esta ventaja un paso más allá e integrará el robot y el sistema en la plataforma ABB Ability™. Las próximas soluciones y servicios digitales se crearán partiendo de los datos de inspección.

Con la revolución sucedida en el ámbito de la inspección de los transformadores sumergidos en aceite, ABB no solo se ha anticipado al deseo de los clientes de mejorar la seguridad y reducir los costes, sino que ha transformado la recogida y la gestión de los datos de inspección para proporcionar apalancamiento digital y una importante ventaja competitiva a los clientes. ●

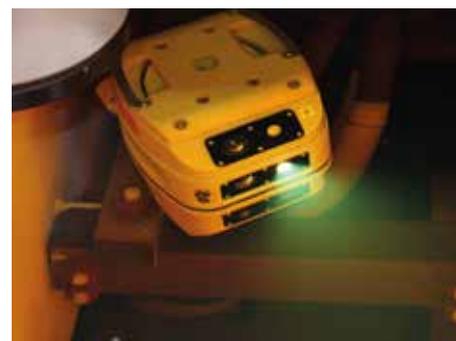
09a



09b



09c



09d

## TENDENCIAS DE TRANSFORMACIÓN

# La tecnología HVDC para el sector de energía eólica marina está madurando

La energía eólica marina constituye el segmento de energía renovable con un crecimiento más rápido. La conexión de los parques eólicos marinos alejados de las redes nacionales terrestres requiere tecnología de corriente continua de alta tensión (HVDC), en la que ABB tiene una vasta experiencia. ¿Qué retos se han superado para desarrollar esta energía en la última década?



**Athanasios Krontiris**  
HVDC Connections,  
ABB Power Grids  
Mannheim, Alemania

athanasios.krontiris@  
de.abb.com

Con una tasa de crecimiento anual media del 13 % en los últimos cinco años y una capacidad instalada total que llegó a los 540 GW en 2017, la energía eólica ha experimentado un rápido desarrollo →1-2. Aunque de momento la energía eólica marina solo aporta el 3,5 % de la energía eólica instalada total, se está expandiendo a un ritmo cada vez mayor: 28 % →3. La energía eólica marina se concentra en el Mar del Norte, pero se está expandiendo a Norteamérica, Asia Oriental, India y otros lugares.



**Peter Sandeberg**  
HVDC Connections,  
ABB Power Grids  
Ludvika, Suecia

peter.sandeberg@  
se.abb.com

Además de crecer en términos de potencia nominal, las centrales eólicas marinas también se encuentran más lejos de las costas y los puntos de entrada a la red.

Además de crecer en términos de potencia nominal, las centrales eólicas marinas también se encuentran más lejos de las costas y los puntos de entrada a la red. Estos factores plantean desafíos técnicos significativos.



—  
01 En 2017, la generación de energía eólica marina creció casi un 30 %.

### CA frente a CC para conexiones en alta mar

Al elegir entre CA o CC para conectar parques eólicos marinos a la red, los principales parámetros que deben considerarse son la potencia nominal, la distancia a la costa y la distancia de la costa al punto de conexión de red fuerte más cercano, que puede estar a 100 km de distancia, ya que la entrada a la costa se encuentra a menudo en zonas poco pobladas donde la red de transporte de electricidad es débil.

Una ventaja importante de la CA es el bajo coste de la estación. Sin embargo, en la transmisión de CA las pérdidas aumentan con la tensión, la capacitancia y la longitud del cable. Más allá de la denominada longitud crítica (de 100 a 150 km, dependiendo del tipo de cable) no quedará capacidad para la transmisión eléctrica activa. La forma clásica de elevar la capacidad de transporte es aumentar el nivel de tensión, pero como la potencia reactiva aumenta con el cuadrado de la tensión, el aumento de tensión conlleva una reducción de la longitud crítica.

Una conexión de CC tiene la ventaja de tener menores costes de cableado. Y dado que los cables solo se cargan cuando están activos, y la capacidad completa de transporte de corriente puede utilizarse para la transmisión de electricidad, las pérdidas del cable por encima de una determinada distancia son inferiores a las de su equivalente de CA. Estos factores compensan los mayores costes de conversión de CC.

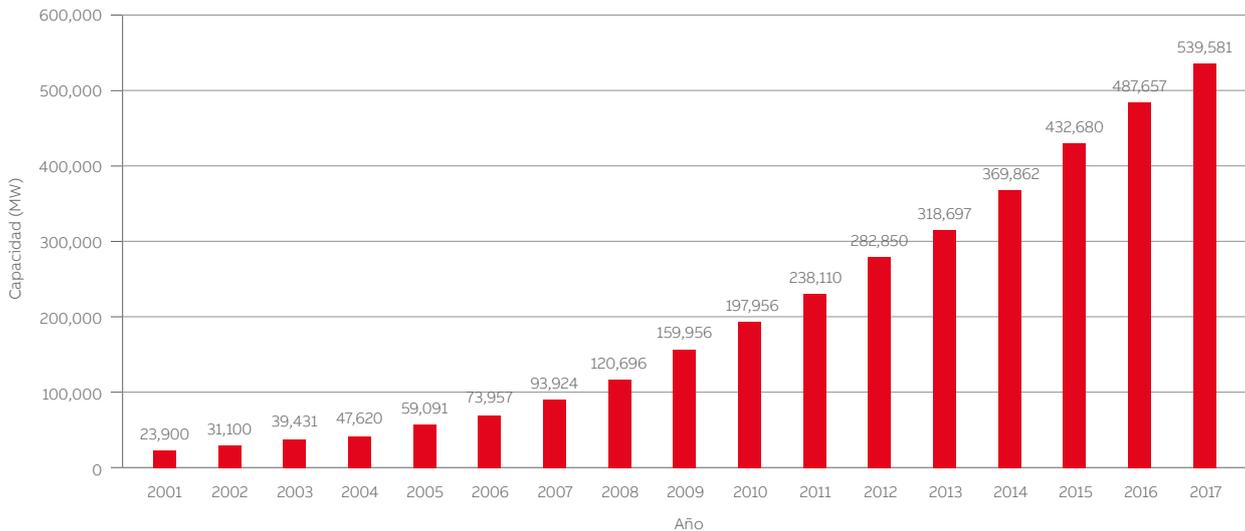
Además, los cables HVDC con aislamiento XLPE son más ligeros que otros cables, lo que hace que su instalación en alta mar sea más sencilla y más barata. Su menor peso por unidad de longitud permite el transporte de secciones más largas, lo que se traduce en menos empalmes de cable, menor tiempo de instalación y menor riesgo de fallo.

La alternativa de la CC, por lo tanto, resulta competitiva, tanto desde la perspectiva de los costes de inversión como de los costes operativos, con una distancia de transporte y un índice de potencia cada vez mayores.

### La actual HVDC en alta mar

Actualmente, 40 de los más de 90 parques eólicos marinos de Europa tienen una capacidad nominal (producción sostenida a plena carga prevista) superior a 200 MW y cerca de un tercio de ellos están conectados a la red mediante transmisión HVDC, individualmente o en grupo. Hasta ahora, hay siete sistemas de conexión eólica de alta mar HVDC en funcionamiento y otros tres en construcción. Todos ellos están situados en la zona del Mar del Norte conocida como Bahía Alemana y su gestión depende de la operadora de sistemas de transmisión TenneT Offshore. Con nuevos proyectos en desarrollo en todo el mundo, las perspectivas a corto y medio plazo para la conexión HVDC eólica marina son brillantes.





02

### Posibles configuraciones para la conexión HVDC

La configuración más sencilla del parque eólico marino HVDC es una conexión punto a punto de un convertidor marino, instalado sobre una plataforma, y un convertidor terrestre →4a. Hasta el momento, todas las conexiones HVDC eólicas marinas en funcionamiento son de este tipo.

—  
Un nudo de enlace en alta mar situado en una plataforma se conecta a través de “radios” a varias redes en la costa en las mismas zonas o en diferentes áreas síncronas.

Un diseño cada vez más utilizado es el sistema híbrido, es decir, una combinación de interconectores submarinos entre redes marinas y la conexión de estas a tierra →4b-4d. Estos diseños han sido propuestos recientemente para el Mar del Norte y se denominan «disposición radial»: un nudo de enlace en alta mar situado en una plataforma, o incluso en una isla artificial, se conecta a través de “radios” a varias redes en la costa en las mismas o en diferentes áreas síncronas. Este diseño puede utilizarse tanto para conexiones de CA como para conexiones de CC a la costa, aunque las distancias a la costa en el Mar del Norte son prohibitivas para la opción de CA. Para la opción CC, el conector puede estar interconectado con múltiples enlaces HVDC punto a punto paralelos o con un sistema HVDC multiterminal.

### Ventajas de la disposición radial

La interconexión con otras redes aumenta en gran medida la utilización de los enlaces, ya que la utilización de los enlaces de una conexión eólica marina única depende exclusivamente del carácter intermitente del viento local.

Además, si se adopta un planteamiento coordinado a escala internacional respecto a la instalación de la infraestructura de transmisión, los costes se reducirán. Se crearán beneficios adicionales provenientes del intercambio de energía entre los mercados internacionales.

Por último, la disposición radial permite una expansión gradual, con capacidad de transmisión añadida en etapas, lo que permite una mayor disponibilidad de energía en menor tiempo. El planteamiento gradual también permite efectuar cambios e introducir nuevas tecnologías según evolucione la energía eólica, y la inversión puede realizarse de manera paulatina.

El primer proyecto de este tipo está actualmente en desarrollo en el Mar Báltico. En el proyecto Kriegers Flak Combined Grid Solution, se ha establecido un interconector de CA entre Dinamarca y Alemania a través de los parques eólicos marinos Kriegers Flak A y B, y Baltic 1 y 2. Para facilitar el desacoplamiento de frecuencia entre las zonas síncronas de la Europa nórdica y continental, ABB suministra un convertidor HVDC (back-to-back) en el punto de entrada en Alemania (Bentwisch) y un controlador maestro que utiliza mejor los activos híbridos de interconector. Se espera que la experiencia operativa de este proyecto desempeñe un papel importante en el ulterior despliegue de la disposición radial.

02 Capacidad eólica global acumulada instalada entre 2001 y 2017.

03 Capacidad eólica marina instalada en todo el mundo.

03a Capacidad eólica marina acumulada en 2016 frente a 2017 por países.

03b Capacidad acumulada anual de 2011 a 2017.

**Conexiones eólicas marinas HVDC de ABB**

ABB ha entregado con éxito tres enlaces HVDC para conexión eólica marina →5-7. Estos proyectos no habrían sido posibles sin los grandes avances realizados en el diseño de plataformas por los socios de ABB y en la tecnología HVDC por parte de ABB.

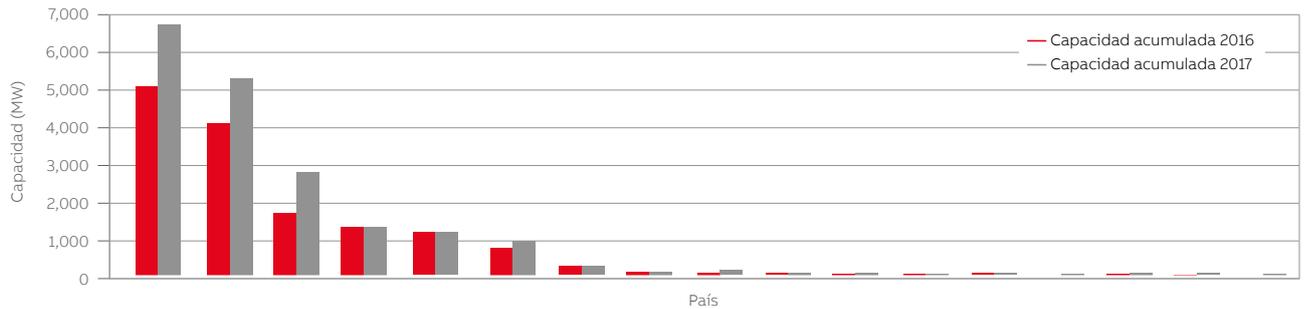
**El diseño compacto del equipo HVDC Light permite una implementación rentable en una plataforma marina.**

La tecnología del convertidor de fuentes de tensión, lanzada por primera vez por ABB como HVDC Light®, ha sido el factor clave para permitir los enlaces HVDC marinos. Al controlar la tensión y la frecuencia en la red de CA marina en una isla,

la estación convertidora marina automáticamente transmite toda la electricidad activa que producen los parques eólicos hacia la red de CA marina mientras mantiene una tensión y una frecuencia de CA estable en la red de CA marina. Al mismo tiempo, el diseño compacto del equipo HVDC Light permite una implementación rentable en una plataforma marina.

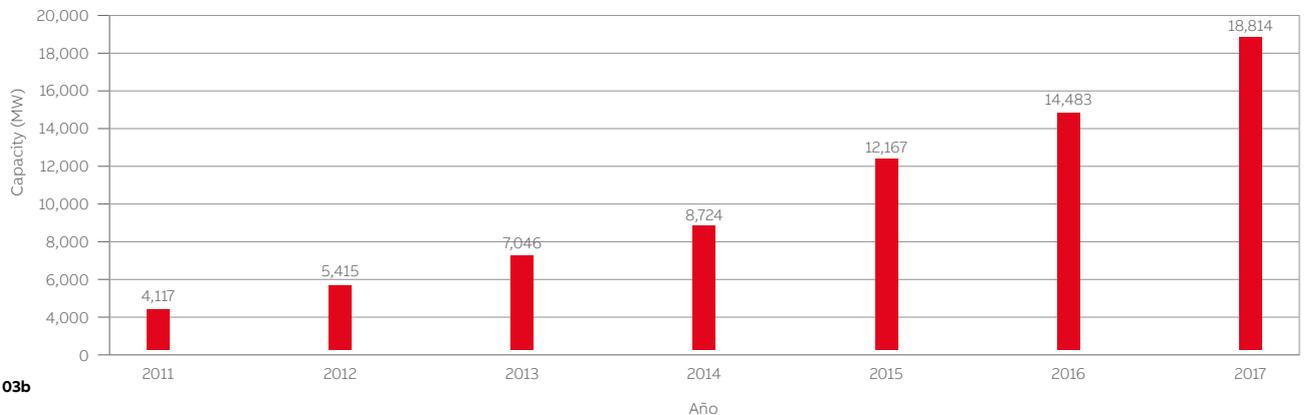
**Trabajo pionero de HVDC para la conexión eólica marina**

En comparación con otros escenarios HVDC, la implementación marina presenta algunos requisitos de diseño únicos. Algunos de los principales retos provienen de las condiciones medioambientales en el mar, la falta de normas estandarizadas para los sistemas y componentes HVDC en alta mar, las limitaciones de accesibilidad y operación en el mar y la difícil gestión de la interfaz. Al mismo tiempo, el comportamiento del sistema de una red de CA marina en una isla es muy diferente al de las redes de transporte típicas.



03a

	Reino Unido	Alemania	R.P. China	Dinamarca	Países Bajos	Bélgica	Suecia	Vietnam	Finlandia	Japón	Corea del Sur	Estados Unidos	Irlanda	Taiwán	España	Noruega	Francia	Total
<b>Total 2016</b>	5,156	4,108	1,627	1,271	1,118	712	202	99	32	60	35	30	25	0	5	2	0	<b>14,483</b>
<b>Nueva 2017</b>	1,680	1,247	1,161	0	0	165	0	0	60	5	3	0	0	8	0	0	2	<b>4,331</b>
<b>Total 2017</b>	<b>6,836</b>	<b>5,355</b>	<b>2,788</b>	<b>1,271</b>	<b>1,118</b>	<b>877</b>	<b>202</b>	<b>99</b>	<b>92</b>	<b>65</b>	<b>38</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>18,814</b>



03b

**Condiciones medioambientales en alta mar**

Los sistemas de transmisión HVDC marinos normalmente se enfrentan a condiciones ambientales duras, como carga mecánica por vibración, temperaturas extremas, humedad excesiva y contaminación salina. Además, las condiciones meteorológicas y marítimas y la manipulación en el mar afectan al transporte y almacenamiento de los equipos. Sin embargo, la experiencia demuestra que, con un diseño adecuado se pueden superar estos desafíos.

—

ABB ha desarrollado e implementado con éxito conceptos innovadores para el control de redes marinas en islas en condiciones normales y también en caso de perturbaciones.

**Diseño de plataformas y códigos de diseño**

Las dos primeras plataformas construidas para subestaciones de conversión de HVDC para parques eólicos marinos utilizaron una solución de estructura base (jacket) y estructura superior

(topside). Para el proyecto DolWin2, ABB desarrolló, en estrecha colaboración con un astillero noruego, una plataforma flexible, innovadora, robusta y ampliable para conseguir una mayor eficiencia de producción y facilitar la instalación (no se precisan gabarras de elevación de cargas pesadas ni operaciones de elevación hidráulicas) →7-8.

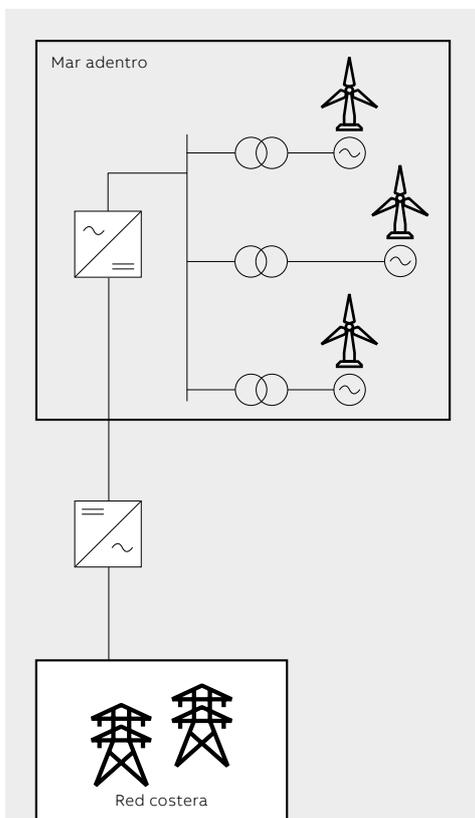
Esta plataforma se basa en una combinación de diseños semisumergibles de gravedad, es decir, actúa como una plataforma semisumergible durante el transporte y la instalación, tras lo cual se lastrada para que asiente firmemente sobre el lecho marino.

La industria eólica marina debe cumplir unos requisitos muy estrictos y los diseños deben ser homologados por un organismo de certificación. Una sólida asociación con un diseñador de plataformas experimentado es crucial para garantizar menores plazos de entrega del proyecto y reducir el riesgo.

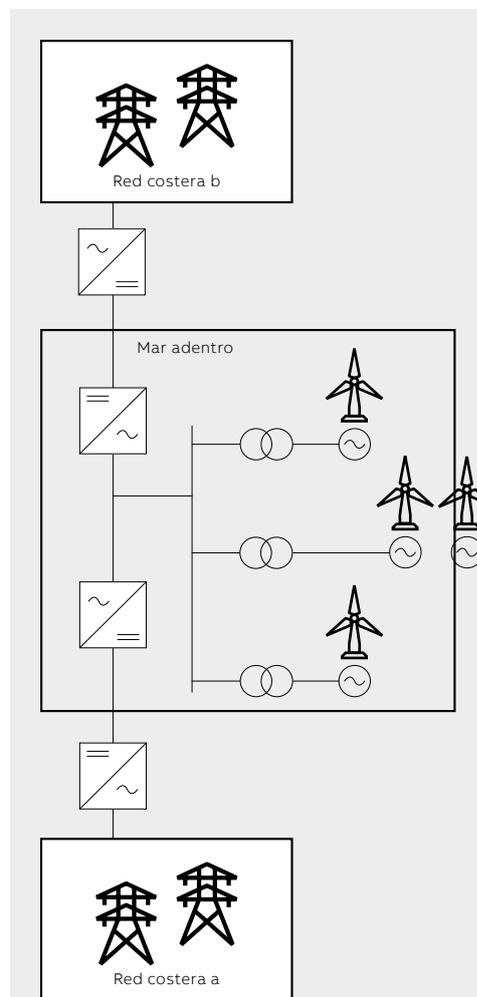
**Modos de funcionamiento**

ABB ha desarrollado e implementado con éxito conceptos innovadores para el control de redes marinas en islas en condiciones normales y también en caso de perturbaciones. Una de estas innovaciones es la instalación de un gran resistor de freno (chopper) controlado electrónicamente para mejorar la estabilidad de la red marina en caso de perturbaciones en la red terrestre.

04a



04b



04 Esquemas de conexión HVDC para el sector eólico marino.

04a Conexión punto a punto.

04b Disposición radial con múltiples enlaces HVDC.

04c Disposición radial con sistema HVDC multiterminal.

04d Disposición radial con enlaces de CA y subestación HVDC (back-to-back) como la instalada, por ejemplo, en el proyecto Kriegers Flak Combined Grid Solution.

Las lecciones aprendidas de las primeras conexiones eólicas marinas hicieron a TenneT ajustar los códigos de conexión de la red marina. El diseño del software de control modular y flexible utilizado por ABB para HVDC y FACTS (Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna) de ABB permitió la fácil implementación de los nuevos códigos de red en enlaces ya operativos.

El diseño del software de control modular y flexible utilizado para HVDC y FACTS permitió una implementación sencilla de los nuevos códigos de red en enlaces ya operativos.

**Características especiales de las redes de CA marinas**

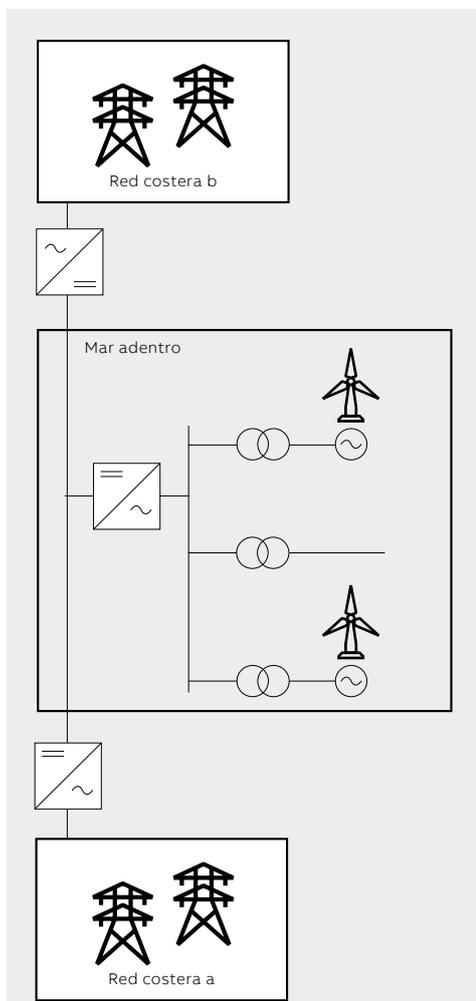
A diferencia de las típicas redes de transporte con líneas de transmisión, cargas y grandes unidades de generación basadas en máquinas síncronas, una red de CA marina comprende unidades generadoras no sincronizadas, cables submarinos, así como muchos transformadores en las subestaciones step-up de CA y los generadores de turbina eólica (WTG) próximos entre sí. Debido a la falta de máquinas síncronas, un sistema de CA marino tiene una inercia baja,

incluso nula. En dicho sistema puede tener lugar un salto transitorio de ángulo de fase y frecuencia en el caso de rechazo de carga causado por un fallo de CA marino o terrestre.

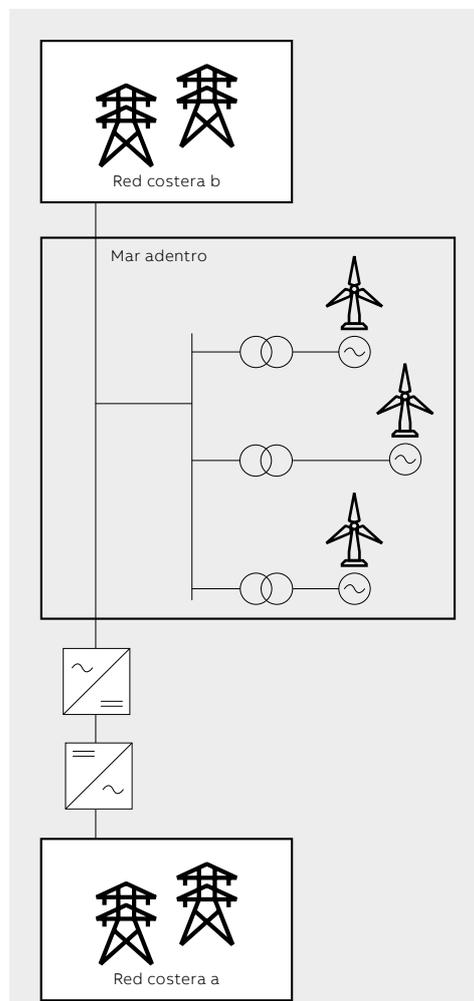
Esto dificulta que el bucle de seguimiento de fase (PLL) de los controladores de las WTG realice un seguimiento preciso de la tensión de la red. En el caso de fallos en la red en tierra, el chopper de CC mencionado anteriormente actúa como cortafuegos, absorbiendo el exceso de energía de los parques eólicos que no puede transmitirse a la red en tierra y, por tanto, evitando que la perturbación en esta entre en la red en alta mar. Junto con el control de frecuencia y tensión en el convertidor HVDC marino, el chopper garantiza la estabilidad de la red marina. Para fallos en la red marina se requiere un diseño de control adecuado para los HVDC y los WTG. Además, las resonancias generadas por la capacitancia y la inductancia de los cables y transformadores están mal amortiguadas, especialmente durante la fase inicial de activación del sistema de CA, cuando la generación de viento es escasa o nula.

Asimismo, debido a la cercanía eléctrica de los transformadores, puede esperarse una interacción simpática durante la activación del transformador en la puesta en marcha de un parque eólico en alta mar, causando sobretensiones armónicas temporales, mayor

04c



04d



	BorWin1	DolWin1	DolWin2
Ubicación del cliente	TenneT (Alemania)	TenneT (Alemania)	TenneT (Alemania)
En funcionamiento desde	2009	2013	2014
Potencia nominal (MW)	400	800	916
Tensión CA (mar adentro) (kV)	155	155	155
Tensión CC (kV)	±150	±320	±320
Tensión CA (línea de costa) (kV)	380	380	380
Longitud de cable en tierra (km)	2 x 75	2 x 90	2 x 90
Longitud de cable marino (km)	2 x 125	2 x 75	2 x 45
Proveedor de la plataforma	Heerema Fabrication Group	Heerema Fabrication Group	Aibel AS
Diseño de la plataforma	Superestructura tipo "jacket"	Superestructura tipo "jacket"	De gravedad
Parques eólicos marinos conectados	Bard Offshore 1	Borkum West II MEG Offshore 1 Borkum Riffgrund 1	Merkur Offshore Trianel Borkum Borkum Riffgrund 1

05

tensión en los devanados del transformador y un mal funcionamiento potencial del diferencial del transformador y la protección contra sobreintensidades. La puesta en marcha de una red de CA en alta mar no es en absoluto una tarea trivial. Entre las posibles medidas para evitar resonancias de excitación o la interacción simpática de los transformadores se incluyen la conmutación controlada (point-on-wave), el filtrado armónico mejorado con el convertidor HVDC marino o la instalación de filtros armónicos. Junto con TenneT, ABB ha desarrollado soluciones para abordar este tipo de inestabilidades.

— El chopper de CC absorbe el exceso de energía para evitar que las perturbaciones de la red en tierra entren en la red marina.

#### El valor de la estandarización

A lo largo de la última década, la industria ha recopilado una valiosa experiencia en el diseño y la operación de conexiones eólicas HVDC marinas. Las lecciones aprendidas y las mejores prácticas se recogen en las recomendaciones del sector y

06



—  
05 Sistemas HVDC para conexión eólica marina proporcionados por ABB.

—  
06 Plataforma DolWin2 en ruta hacia su lugar de instalación.

—  
07 Plataforma DolWin2 Beta HVDC.

los códigos de red. La estandarización del diseño del sistema es una forma poderosa de explotar las mejores prácticas y mejorar la armonización entre operadores.

—

**Un diseño robusto probado en la práctica y la apertura hacia innovaciones técnicas son factores importantes para reducir aún más el coste de la generación eólica marina.**

Sin embargo, la estandarización no debería obstaculizar las innovaciones técnicas, como el concepto, debatido actualmente de conexión directa de las turbinas eólicas al convertidor marino de HVDC sin subestaciones step-up de CA intermedias en plataformas independientes.

Mantener el equilibrio adecuado entre disponer de un diseño sólido ya probado en la práctica y abrirse a innovaciones técnicas con posibles ventajas es importante para reducir aún más el coste de la generación eólica marina.

### Vientos a favor del mercado

La industria eólica marina se ha expandido con rapidez durante la última década y seguirá haciéndolo, respaldada por la economía de escala en toda una cadena dedicada al suministro de unidades generadoras y parques eólicos con potencias nominales cada vez más altas. Este desarrollo creará más demanda de conexiones HVDC. La madurez tecnológica, junto con la creciente experiencia positiva de los sistemas ya operativos, ayuda a reducir el riesgo y a garantizar la implementación puntual y eficiente de las conexiones de red. Al mismo tiempo, ABB, con su compromiso a largo plazo con las conexiones eólicas marinas, seguirá introduciendo innovaciones en la tecnología HVDC con el fin de crear redes marinas más fuertes, más ecológicas y más inteligentes. ●

07





# Análisis

# digital





Mientras que el riesgo analógico se expresa como una probabilidad, las herramientas digitales permiten cuantificarlo y, por tanto, gestionarlo. ABB trabaja junto con sus clientes para mantener la estabilidad energética en procesos de fabricación, modelar inversores solares de ABB para realizar análisis de sistemas de energía y aplicar los últimos conceptos de ciberseguridad en el conjunto de sus unidades de negocio. El resultado es que se producen menos sorpresas, o ninguna.

- 46 Estabilidad energética para los fabricantes
- 52 Modelización de los inversores solares de ABB en simulaciones de sistemas de energía
- 58 La ciberseguridad en el punto de mira

---

 ANÁLISIS DIGITAL

# Estabilidad energética para los fabricantes

El sector manufacturero es crucial en numerosas economías. No obstante, la red energética es inestable en muchos lugares, lo que provoca interrupciones de la producción. La familia PCS100, de ABB, de productos para la protección de sistemas energéticos, garantiza un suministro continuo de energía de buena calidad a procesos industriales, incluso en casos de caídas drásticas de la tensión.



**Bruce Bennett**  
ABB Power Conditioning  
Napier, Nueva Zelanda

bruce.bennett@nz.abb.com

Las empresas llevan años aplicando diversas técnicas para mejorar la productividad y reducir los costes de fabricación. El éxito en este sentido dificulta el aumento de las ganancias: la ley del rendimiento decreciente. En consecuencia, muchas empresas están automatizando cada vez más procesos en un intento por cumplir los objetivos y seguir siendo competitivas. Este movimiento hacia la automatización generalizada está impulsando una indiferenciación de la maquinaria de fabricación y, en algunos casos, de plantas de fabricación enteras.

---

Aunque posiblemente sean más eficientes, las nuevas máquinas pueden ejercer una presión aún mayor sobre las redes de generación, transporte y distribución de energía ya sobrecargadas.

### Una mayor automatización exige más energía

Los principios de la fabricación optimizada (lean manufacturing), demostrados a lo largo de décadas, como la reducción de residuos por

minimización de las averías de los equipos o la eliminación de actividades que no aportan valor, permanecen invariables. Pero la digitalización de la fabricación, posible gracias al aumento de la potencia informática, facilita análisis más avanzados, recopilación de datos de más sensores, mejores tecnologías de automatización (como la robótica interactiva al tacto) y más información sobre el rendimiento de las máquinas, que la empresa manufacturera puede utilizar para perfeccionar los procesos utilizados.





01

—  
01 Una alimentación fiable es crucial para las técnicas de producción modernas, en especial en los países en desarrollo, en los que la manufactura puede sacar a una economía de la subsistencia agrícola.

Además, incluso las variaciones mínimas en la alimentación pueden causar daños graves en la maquinaria o acabar con un proceso de fabricación o una instalación entera →1. Aparte de las pérdidas de producción, la no entrega del producto al cliente y los posibles daños en el equipo, las interrupciones no programadas pueden ser muy costosas de otras maneras. Por ejemplo, en entornos de producción higiénicos, como los lácteos o el procesamiento de alimentos, se pueden dedicar horas a despejar, limpiar, descontaminar y reiniciar.

A medida que aumentan las demandas de producción, se puede añadir más maquinaria, y más grande. Aunque posiblemente sean más eficientes, las nuevas máquinas pueden ejercer una presión aún mayor sobre las redes de generación, transporte y distribución de energía ya sobrecargadas. El resultado de esta carga adicional es una mayor reducción de la estabilidad con el consiguiente aumento del riesgo de interrupción debido a eventos en la red.

Se ha estimado que, para los fabricantes, el coste de las interrupciones no programadas de los procesos debidas a eventos relacionados con la energía representa hasta el 4 % de la facturación de las empresas [1]. Este impacto puede anular rápidamente cualquier beneficio relativo al rendimiento, el coste de producción unitario o la calidad, que se haya obtenido mediante la inversión.

#### Línea de productos PCS100 de ABB

Todas las redes eléctricas sufrirán en cierta medida problemas de calidad energética. Estas perturbaciones se materializan de muchas maneras: apagones, ruido, variación de frecuencia o armónicos, pero el 90 % de los casos de inestabilidad que afectan a las instalaciones de fabricación son caídas de tensión: la tensión de alimentación cae notablemente durante un período breve. La mayoría de las caídas de tensión se deben a factores externos, como vientos fuertes, lluvia intensa, acumulación de nieve y hielo, accidentes de tráfico y errores de cálculo en excavaciones. Tales eventos son ajenos al control del ingeniero de planta, por lo que es necesario planificar la protección contra los mismos.

—  
Desde la regulación continua de la tensión hasta el suministro de la carga durante los cortes eléctricos, pasando por la protección contra las caídas de tensión, la línea de productos PCS100 proporciona una tensión limpia, equilibrada y corregida por fases, que permanece dentro de las especificaciones.

ABB ofrece a los fabricantes una cartera de soluciones de acondicionamiento energético que protegen la maquinaria, las líneas de producción o la instalación en su conjunto frente a eventos

relacionados con la energía. Estas soluciones ofrecen un suministro de energía que está siempre dentro de las especificaciones y que reduce el riesgo de interrupción del proceso o de que la maquinaria sufra daños graves. Desde la regulación continua de la tensión hasta el suministro de la carga durante los cortes eléctricos, pasando por la protección contra las caídas de tensión, la línea de productos PCS100 proporciona a la carga del cliente una tensión limpia, equilibrada y corregida por fases, que permanece dentro de las especificaciones.

—  
El PCS100 AVC-20 de ABB regula la tensión de alimentación entrante hasta el 100 % del valor nominal incluso cuando la tensión suministrada por la red varía hasta  $\pm 20$  por ciento continuamente.



—  
02 PCS100 AVC-40.  
La familia PCS100 es adecuada no sólo para los países en desarrollo con infraestructuras más débiles, sino también para los países desarrollados, en los que incluso los aumentos marginales en la productividad pueden representar una ventaja competitiva importante.

### PCS100 AVC-20

Es un regulador de tensión continua en línea. Regula la tensión de alimentación entrante hasta el 100 % del valor nominal incluso cuando la tensión suministrada por la red varía hasta  $\pm 20$  % continuamente.

Por ejemplo, en una red en la que la capacidad de la infraestructura retrasa la demanda y se conectan grandes cargas de clientes, suele haber períodos de entre un minuto y varias horas en los que la tensión cae muy por debajo de la tensión nominal de suministro.

Estas subtensiones suelen producirse durante los tiempos de máxima demanda, cuando las plantas industriales alcanzan la carga máxima. En una red nominal trifásica de 400 V en la que se produzcan estas situaciones, el AVC-20 impulsará la tensión desde un valor tan bajo como 320 V hasta un valor nominal de 400 V mientras haya baja tensión lateral en la red, para que cualquier carga conectada aguas abajo del PCS100 AVC-20 no se vea afectada por la subtensión. De la misma manera, el PCS100 AVC-20 resistirá una sobretensión de hasta el 20 % cuando, por ejemplo, una gran carga de red deje de funcionar y la tensión se eleve rápidamente.

El PCS100 AVC-20 no sólo regula continuamente la tensión, sino que también lo hace con mucha rapidez: desde la detección de la inestabilidad hasta la regulación completa no suelen pasar 20 ms, es decir, menos de un ciclo en una red de 50 Hz.

### PCS100 AVC-40

En una planta en la que haya caídas de tensión graves, el PCS100 AVC-40 corregirá una caída del 40 % en la tensión nominal  $\rightarrow 2$ . Por ejemplo, si una tensión de red trifásica de 400 V descendiera a 240 V, el PCS100 AVC-40 restablecería al valor 400 V en menos de 18 ms. Para ofrecer este alto nivel de corrección de la tensión, este acondicionador limita la duración de la corrección a 30 s (por limitaciones térmicas). Su capacidad de regulación continua es del  $\pm 10$  %.

—  
El PCS100 AVC-40 corregirá una caída del 40 % en la tensión nominal.

Corrige asimismo las caídas monofásicas y bifásicas, al igual que cualquier cambio que se produzca en el ángulo de fase, en caso necesario. No es preciso utilizar baterías u otro tipo de almacenamiento de energía, ya que el PCS100 AVC-40 extrae energía de la compañía eléctrica conectada (y, por tanto, depende de que permanezca conectado).

### PCS100 UPS-I

Las plantas de fabricación conectadas a redes de suministro que sufren cortes o apagones frecuentes y que tienen una fuente de alimentación de reserva, p. ej., una conexión de segundo nivel de transporte o un generador, pueden protegerse de las interrupciones por medio del PCS100 UPS-I de ABB  $\rightarrow 3$ .





03

Diseñado para cubrir el periodo comprendido desde el momento en que la alimentación procedente de la compañía eléctrica cae por debajo de una tensión prefijada, o se desconecta completamente, hasta que se conecta el equipo de reserva, el PCS100 UPS-I suministra una carga industrial desde una fuente de almacenamiento de energía conectada al controlador UPS-I. Este controlador gestiona la transferencia a la fuente secundaria y la vuelta a la red una vez restaurado el suministro y dentro de las especificaciones. En función del tipo de fuente de reserva, el almacenamiento de energía del UPS-I puede realizarse por medio de baterías o de ultracondensadores. Cuando se realiza una transferencia a un generador de reserva, las baterías ofrecen una autonomía mínima de carga completa de 30 segundos, tiempo suficiente para iniciar y conectar la mayoría de los generadores.

— El PCS100 UPS-I cubre el periodo comprendido desde el momento en que la alimentación de la red eléctrica cae por debajo de una tensión prefijada, o se desconecta completamente, hasta que se conecta el equipo de reserva.

Si se trata de una planta a la que suministran dos sistemas por lo que se refiere al transporte –por ejemplo, dos alimentadores de 110 kV de dos centros de producción de energía–, los ultracondensadores se utilizan para suministrar la carga hasta 2 s mientras dure la operación de conmutación de transferencia automática.

En todos los casos, la carga se suministra continuamente desde el momento en que el suministro deja de cumplir las especificaciones hasta que el sistema de reserva está en perfecto funcionamiento. El UPS-I gestiona esta transferencia y sincroniza la producción del UPS-I y el suministro de red en consecuencia.

— El PCS120 MV UPS se conecta a una tensión de distribución de 11 kV o 22 kV para proporcionar protección por lo que respecta a suministro eléctrico de la planta.

**Protección a media tensión: el PCS120 MV UPS**  
La cartera de productos PCS100 de ABB ofrece protección frente a eventos comunes relacionados con la energía eléctrica a escala de herramienta, línea o planta, con modelos clasificados desde 150 kVA a 3600 kVA. A medida que aumenta la carga y la complejidad de la planta, se requieren estrategias de protección más amplias, así como sistemas de acondicionamiento de energía

—  
03 PCS100 UPS-I.

—  
04 PCS120 MV UPS.

—  
**Referencia**

[1] Copper Development Association, "The Cost of Poor Power Quality", publicación del ECI nº Cu0145, octubre 2015. Disponible en: <http://admin.copperalliance.eu/docs/librariesprovider5/power-quality-and-utilisation-guide/21-the-cost-of-poor-power-quality.pdf?sfvrsn=4&sfvrsn=4>

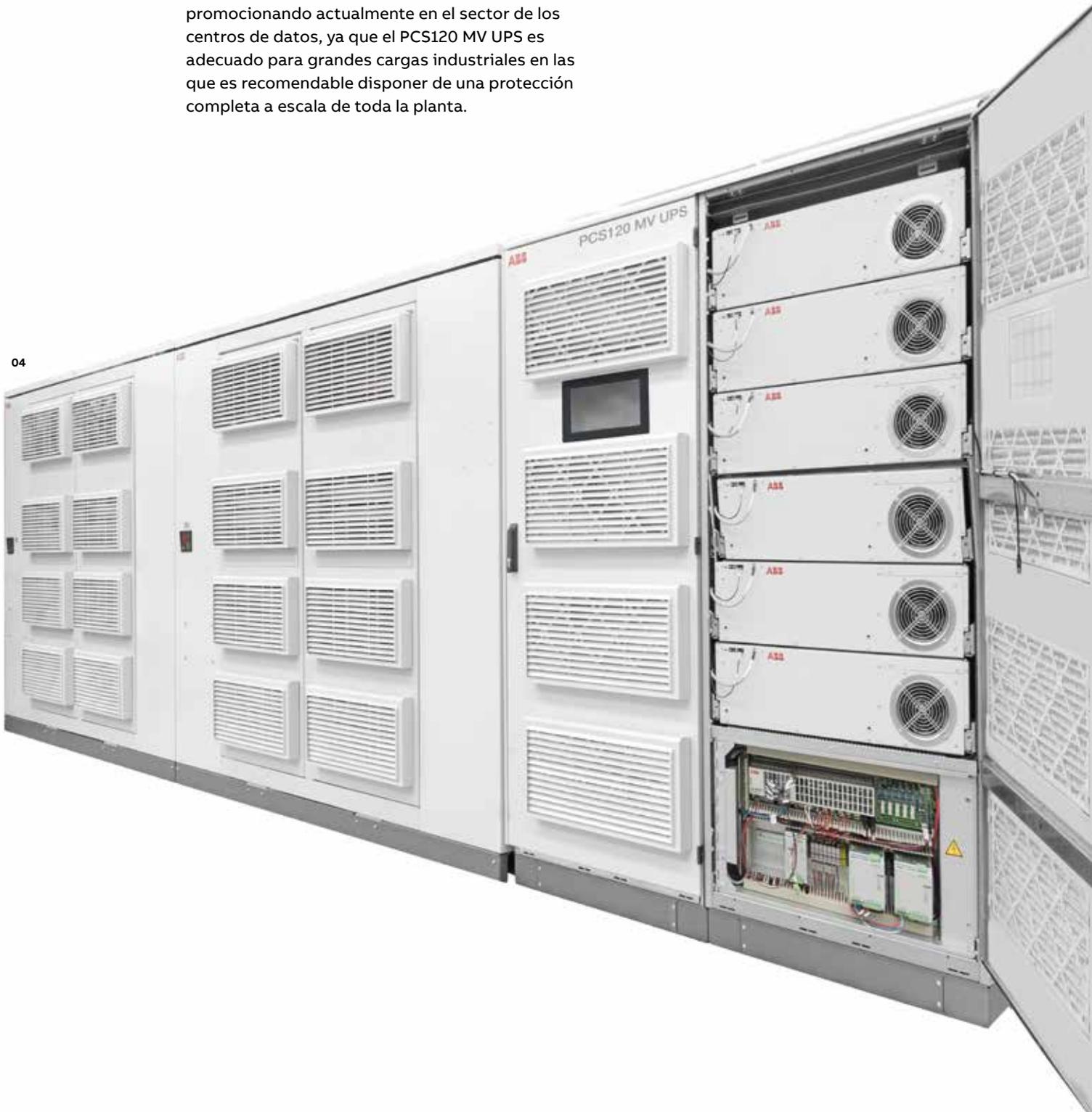
fiables en un nivel superior. A tal efecto, ABB ha introducido un producto de protección de sistemas de energía de media tensión: el PCS120 MV UPS →4. El PCS120 MV UPS, que proporciona protección a escala de suministro a la planta, se conecta a una tensión de distribución de 11 kV o 22 kV. Una unidad tiene una capacidad nominal de 2,25 MVA, y las unidades pueden conectarse en paralelo para proteger cargas hasta el límite de los dispositivos de protección contra fallos y de conmutación disponibles.

Se emplean estrategias de almacenamiento de la energía similares a las de la solución PCS100 UPS-I, y las fuentes de suministro secundarias las gestiona el MV UPS. Este producto se está promocionando actualmente en el sector de los centros de datos, ya que el PCS120 MV UPS es adecuado para grandes cargas industriales en las que es recomendable disponer de una protección completa a escala de toda la planta.

En sus esfuerzos por seguir siendo competitivas, las plantas de fabricación modernas están empleando más automatización, tecnología, y procesos y equipos impulsados electrónicamente.

Los productos de ABB para acondicionamiento de la energía brindan a los ingenieros y gerentes de planta una manera de evitar interrupciones costosas y no programadas, al tiempo que protegen las caras tecnologías de los daños causados por eventos repetidos, relacionados con la alimentación, y ajenos a su control. También permiten que los procesos de fabricación complejos y exigentes funcionen sin problemas, de manera continua y precisa, manteniendo así la ventaja competitiva de la empresa. ●

04



---

ANÁLISIS DIGITAL

# Modelización de los inversores solares de ABB en simulaciones de sistemas de energía

ABB ofrece inversores solares para numerosas potencias y tensiones nominales. Esta amplia cartera necesita una herramienta para realizar modelos de dispositivos de manera rápida, precisa y orientada al cliente. La herramienta de simulación Universal Framework de ABB puede utilizarse en varios paquetes de software de simulación aplicables a los análisis de sistemas eléctricos.

**Piotr Mars**  
**Miłosz Miśkiewicz**  
**Paweł Błaszczyk**  
**Tomasz Kuczek**  
ABB Corporate Research  
Cracovia, Polonia

piotr.mars@  
pl.abb.com  
milosz.miskiewicz@  
pl.abb.com  
pawel.blaszczyk@  
pl.abb.com  
tomasz.kuczek@  
pl.abb.com

La importante contribución que realiza la tecnología fotovoltaica (FV) a la generación de energías renovables va a continuar en los próximos años. En consecuencia, la oferta de una amplia gama de productos solares se considera un elemento crucial del crecimiento futuro de ABB.

---

ABB ofrece inversores solares para aplicaciones con una amplia gama de energías generadas con diferentes niveles de tensión.

Entre otros productos fotovoltaicos, ABB ofrece inversores solares para aplicaciones con una amplia gama de energías generadas con diferentes niveles de tensión:



—  
01 Inversor PVS980  
de ABB

- Inversores string monofásicos o trifásicos de entre 2 kW y 60 kW. Se utilizan en aplicaciones residenciales, pero pueden combinarse en una configuración más amplia destinada a centrales eléctricas fotovoltaicas descentralizadas de los ámbitos industrial o de servicios públicos.
- Inversores centrales con tensión nominal de 100 kW a 2300 kW y estaciones llave en mano (inversores y equipos afines), adecuados para grandes explotaciones de energía solar a escala comercial y de servicios públicos.

#### La herramienta de simulación Universal Framework

La amplia gama de posibles aplicaciones de los inversores solares de ABB plantea una pregunta: ¿es posible crear una herramienta universal que permita una modelización informática rápida, precisa y orientada al cliente sobre cómo se comportarán estos inversores en todas las posibles aplicaciones de sistemas de energía? La respuesta es “sí”, y este artículo describe tal herramienta: la herramienta de simulación Universal Framework de ABB, así como su uso para el inversor central PVS980 en varios paquetes de software de simulación que se utilizan para análisis de sistemas de energía →1-2.

La herramienta de simulación Universal Framework de ABB se basa en la generación de bibliotecas de enlaces dinámicos (DLL), que modelan el inversor central PVS980 por lo que respecta a algoritmos de control y conexión a un sistema de energía. Los análisis muestran que los modelos universales de tipo “caja negra” que genera la herramienta facilitan los mismos resultados cuantitativos para todos los paquetes de software considerados (PSCAD, Matlab, DigSILENT PowerFactory y PSS/E), lo que proporciona una gran flexibilidad para adoptar diferentes entornos de diseño de los clientes.

La herramienta de simulación Universal Framework de ABB ha ido evolucionando a lo largo de los años y ahora cubre todos los requisitos de diseño y análisis de los sistemas de energía. Es sencilla de usar y se adapta fácilmente a nuevos requisitos →2.

—  
¿Es posible crear una herramienta universal que permita una modelización informática rápida, precisa y orientada al cliente sobre el comportamiento de los inversores en todas las aplicaciones de los sistemas de energía?

#### Cumplimiento de los códigos de la red

Un aspecto crucial de la simulación de los inversores fotovoltaicos que cubre la herramienta es el cumplimiento del código de la red [1]. Los inversores conectados a una red eléctrica deben cumplir los requisitos (los denominados “códigos de red nacionales”), establecidos por el operador de la red, que definan el funcionamiento seguro y adecuado de todo el sistema eléctrico. Tales requisitos de conformidad pueden reflejarse actualmente en un modelo informático lo suficientemente preciso como para representar las características eléctricas de los dispositivos reales en diversas condiciones de trabajo.

01



Los códigos de red describen cómo deben funcionar los dispositivos y modelos de referencia durante las condiciones normales de la red y cómo deben comportarse, por lo que respecta al suministro de energía activa y reactiva, cuando se produce un fallo. El modelo de inversor que genera la herramienta de simulación Universal Framework debe contener información sobre las cantidades de energía activa aportadas a la red como función del suministro de energía primaria, tanto en un punto de consigna definido como en caso de cambio de frecuencia de la red. La regulación de la energía reactiva en diferentes puntos de consigna debe determinarse mediante una curva de calidad energética característica.

El modelo también debe reflejar también el comportamiento del inversor en relación con la resistencia a una desviación repentina de la tensión respecto a la amplitud nominal durante un período determinado y actuar en consecuencia cuando la duración de la desviación exceda el tiempo establecido en la especificación. Otro aspecto que debe cubrir el modelo es la corriente reactiva inyectada para prestar apoyo a la red durante una caída de tensión. El rendimiento satisfactorio de la herramienta de simulación Universal Framework en estas condiciones de fallo de la línea se ha validado mediante mediciones. Los clientes suelen exigir el certificado de esa validación, por lo que tiene un valor adicional importante.

—  
El modelo debe contener información sobre las cantidades de energía activa aportadas a la red como función del suministro de energía primaria.

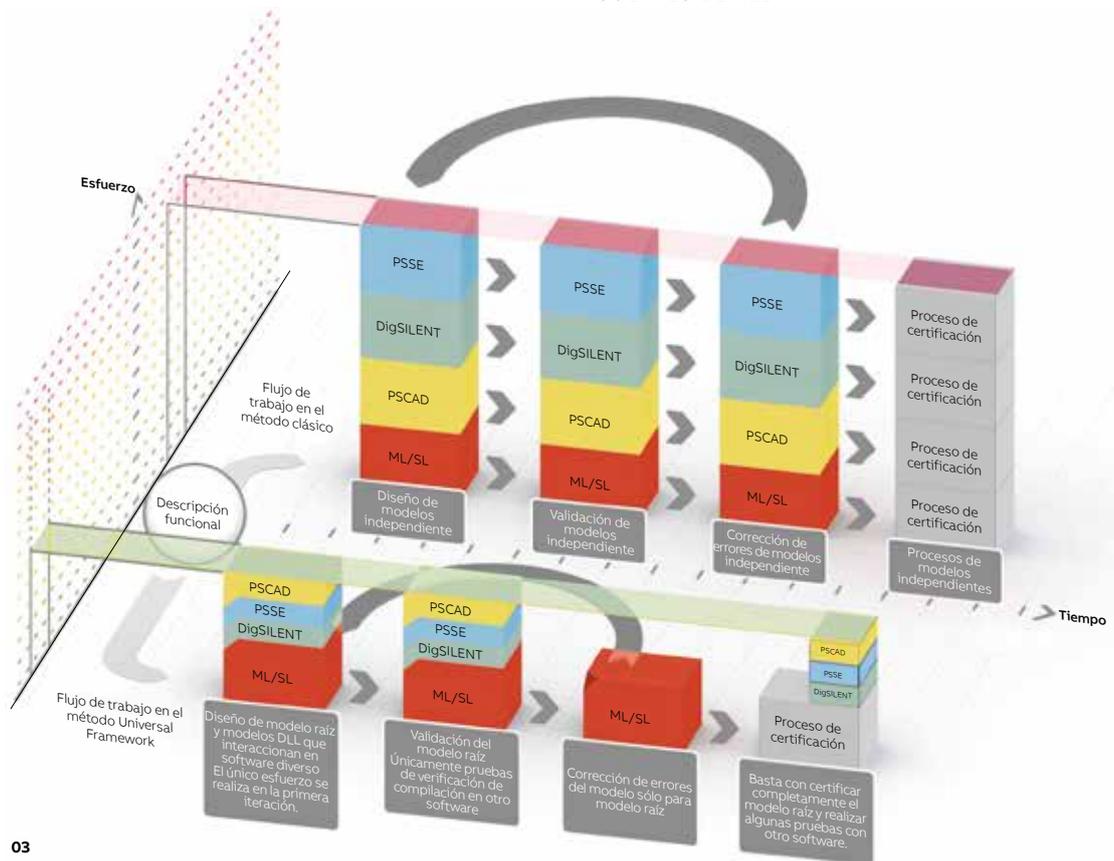
#### Principios del modelo universal

En primer lugar, la herramienta de simulación Universal Framework debe cumplir la función de simular todos los escenarios de códigos de la red. Los dos componentes más importantes de tal simulación son la fuente de energía fotovoltaica y el inversor.



—  
02 Logotipo de la herramienta de simulación Universal Framework.

—  
03 Comparación entre el enfoque clásico y el de Universal Framework con respecto al flujo de trabajo.



03

### Proceso de certificación

La simulación del componente de la fuente de energía fotovoltaica se basa en un modelo matemático o físico del panel solar, en el que la irradiancia y la temperatura son los parámetros básicos. Los usuarios pueden definir las características del panel en la herramienta a partir de la ficha de datos y crear, a voluntad, módulos solares virtuales para simular diversos niveles de potencia de entrada. Esta parte puede incluirse en una biblioteca DLL, pero no es obligatorio, ya que el cliente podría querer conectar un modelo externo de la central fotovoltaica.

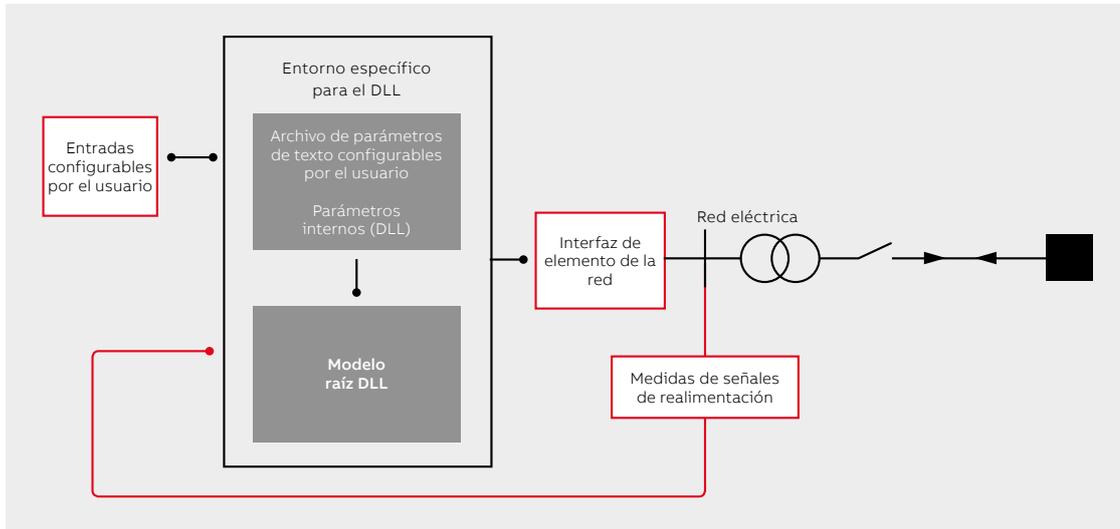
La simulación del componente inversor contiene una implementación matemática de este y algoritmos de control relacionados, que cubren lo siguiente: máxima extracción de energía de la central FV; sincronización y soporte de la red (por ejemplo, inyección de energía reactiva); control de la tensión; control del suministro de energía activa y reactiva o el funcionamiento ininterrumpido del inversor aunque se produzca una avería breve de la red. La herramienta de simulación Universal Framework admite interfaces de entrada-salida transitorios electromagnéticos y RMS (media cuadrática) para adaptarse a diferentes tipos de simulación utilizados por el cliente.

Dado que los clientes utilizan distintos entornos de simulación, es conveniente tener un modo de transferir un único modelo básico a diferentes módulos funcionales. Una forma de lograrlo es utilizar un modelo de raíz Matlab/Simulink para generar bloques de DLL, que posteriormente pueden servir como módulos externos independientes en el software de

—  
En primer lugar, la herramienta de simulación Universal Framework debe cumplir la función de simular todos los escenarios de códigos de la red.

terceros (como DigSILENT PowerFactory, PSCAD o PSS/E). La automatización completa de este proceso se realiza introduciendo un marco común responsable de la generación de códigos funcionales para el modelo. Se proporciona un código de interfaz para el software de simulación de terceros (denominado "wrapper"), que se integra en el modelo final.

Otras funciones que se exigen a la herramienta son: admisión de pruebas automatizadas, elaboración de informes y pruebas de regresión de modelos. Son funciones que ayudan a los desarrolladores en el proceso de creación de modelos, realización de pruebas y corrección de errores.



04

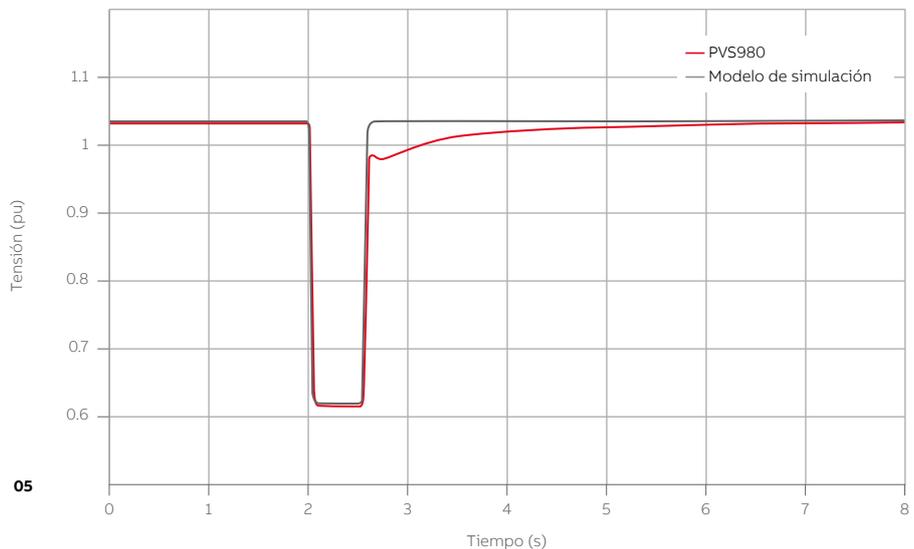
La herramienta también admite las pruebas retrospectivas de DLL en el entorno Matlab/Simulink (las denominadas pruebas de “software-in-the-loop”), lo que es crucial para demostrar que el código se ha generado correctamente. El bloque de DLL puede probarse en el mismo entorno que el modelo básico. Además, los modelos generados pueden ofrecerse como “modelo de caja negra” a clientes que utilicen un entorno de simulación Matlab/Simulink.

La mayor ventaja de las pruebas tipo “caja negra” es que la propiedad intelectual interna bibliotecas DLL de ABB está protegida. De este modo, el modelo en su conjunto puede enviarse al cliente en PSCAD, PowerFactory o PSS/E sin necesidad de revelar los algoritmos internos. A partir de los manuales facilitados, el cliente puede reproducir fácilmente los resultados para validar el comportamiento del inversor solar en relación con el código de la red. Todo el proceso de desarrollo y certificación de modelos puede mejorarse de manera significativa utilizando la herramienta de simulación Universal Framework, en lugar de un enfoque clásico →3.

El proceso de implementación del modelo DLL depende normalmente del software de simulación utilizado, y no es tan sencillo como parece. Los diferentes paquetes de simulación utilizan distintos solucionadores,

— La herramienta ABB Universal Framework para la modelización de inversores solares abre la posibilidad de reducir notablemente los costes por su sencillez, flexibilidad, adaptabilidad y reutilizabilidad.

métodos computacionales, interfaces de señal y bibliotecas de elementos. La herramienta de simulación Universal Framework supera todos los inconvenientes relacionados con el proceso de implementación mediante la creación de un entorno intermedio específico de DLL que establece una interfaz específica del software.



05

04 Interfaz del modelo DLL en varios paquetes de software de simulación.

05 Tensión de secuencia positiva, valor línea a línea de RMS durante un fallo simétrico: comparación entre los resultados de las mediciones y los de la simulación.

06 Secuencia positiva, corriente de línea RMS durante un fallo simétrico: comparación entre los resultados de las mediciones y los de la simulación.

07 Ejemplo de diseño de referencia con ocho inversores solares.

#### Referencia

[1] I. Romero, J. Daniel, D. Pereira, et al., "Asesoramiento sobre el código de red: ABB y sus consultores expertos en electricidad ayudan a integrar las energías renovables y a cumplir los códigos de red", *ABB Review* 4/2015, pp. 50-55.

Esta solución permite al modelo DLL cooperar con la red mediante el control del elemento de red específico del software basándose en las mediciones de realimentación y las señales de entrada configurables por el usuario. Los parámetros específicos del modelo raíz de DLL pueden configurarse a través del archivo de texto de parámetros externo, que es común para todos los paquetes de software de simulación →4.

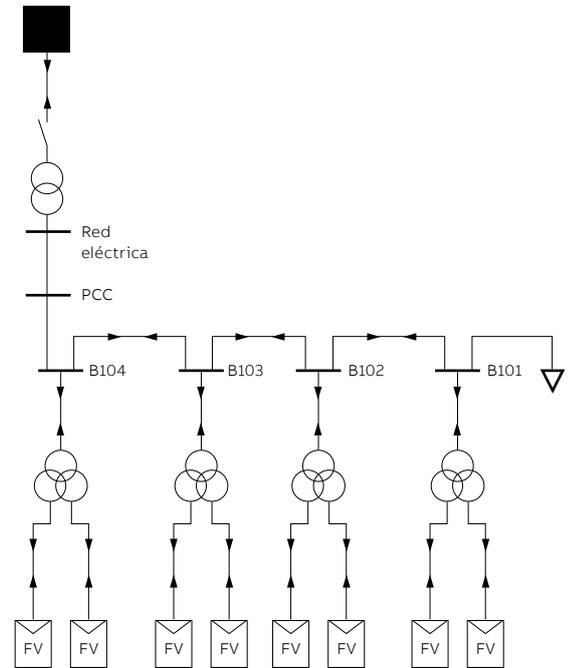
#### Validación del modelo

Para demostrar que el modelo desarrollado ofrece una respuesta correcta en diversos escenarios de código de red, se sometió a pruebas de laboratorio. Los ejemplos de tensión y corriente del inversor solar durante la prueba se ilustran en →5-6. Se observa un alto nivel de convergencia entre las curvas en la situación estacionaria previa al fallo y durante el mismo; las zonas transitorias también son convergentes. Las diferencias se producen después de la fase de fallo, debido a la corriente de arranque del transformador, que no se tuvo en cuenta durante la modelización de la red. No obstante, el error está dentro del margen de tolerancia.

Estos modelos validados pueden utilizarse para estudios posteriores en los que se incluya toda la red eléctrica de los clientes. Dicho diseño de referencia se muestra en →7. La parte relativa a la red eléctrica utiliza bibliotecas específicas de software y normalmente contiene transformadores de distribución y de potencia, cables e impedancias de la red en el punto de acoplamiento común (PCC).

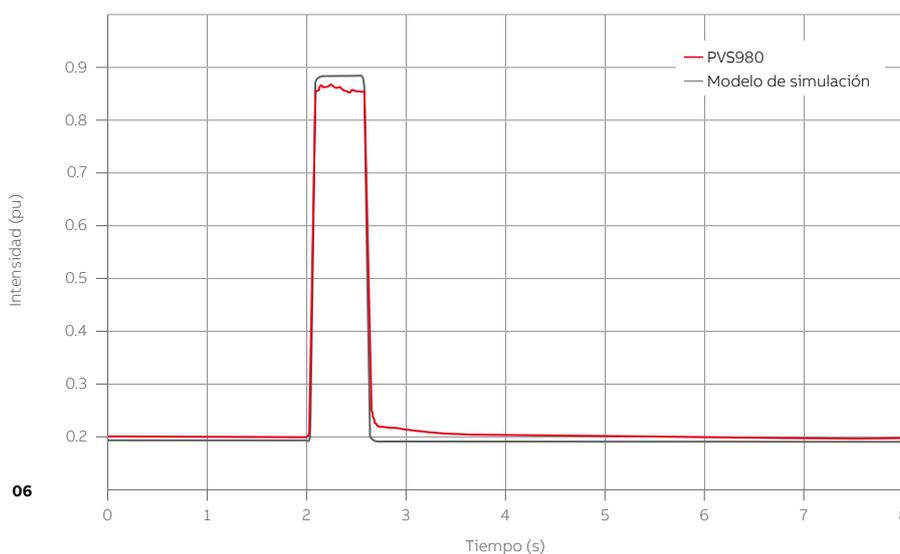
#### Una herramienta verdaderamente universal

El enfoque que adopta la herramienta Universal Framework se ha verificado con éxito en otros productos de la familia de inversores solares, lo que subraya sus credenciales de reutilización.



07

La herramienta también es compatible con una serie de paquetes de software de análisis de sistemas de energía y también podría reutilizarse en diferentes grupos de productos como inversores de turbina eólica, STATCOM (compensadores estáticos) e inversores de accionamientos de media tensión. Además, el enfoque del modelo universal puede ampliarse a otros paquetes de software de simulación que admiten una interfaz DLL, si algún cliente planteara esta demanda. En comparación con el enfoque clásico, la herramienta Universal Framework de ABB para la modelización de inversores solares abre la posibilidad de reducir notablemente los costes por su sencillez, flexibilidad, adaptabilidad y reutilizabilidad. ●



06

## ANÁLISIS DIGITAL

# La ciberseguridad en el punto de mira

A medida que las empresas intentan integrar sistemas nuevos y heredados –sin que se suela adoptar un enfoque integral de la seguridad de las redes–, está previsto que el precio mundial que habrá que pagar por la ciberdelincuencia casi se duplique en los próximos cinco años. Dado que ABB tiene una base instalada de 70 millones de dispositivos conectados, 70 000 sistemas de control digitales y 6000 soluciones de software empresarial, no es de extrañar que se tome muy en serio esta tendencia. El Consejo de Ciberseguridad del Grupo ABB reúne a expertos de toda la organización para elevar al máximo la sensibilización sobre posibles amenazas y garantizar que se adoptan medidas conformes con las mismas normas en toda la empresa.



**Satish Gannu**  
ABB Industrial Automation  
San José, California,  
Estados Unidos

satish.gannu@us.abb.com

Según un estudio reciente realizado por Juniper Research –empresa de investigación tecnológica con sede en el Reino Unido–, las infracciones relacionadas con los datos digitales podrían costar a las empresas un total de ocho billones de dólares a escala mundial en los próximos cinco años. El creciente tamaño de tales infracciones está impulsado en gran medida por el aumento constante de la conectividad a Internet y por los retos a los que se enfrentan las empresas al tratar de contrarrestar tal tendencia con la aplicación de nuevas medidas de ciberseguridad.

Las infracciones relacionadas con los datos digitales podrían costar a las empresas un total de ocho billones de dólares a escala mundial en los próximos cinco años.

En su estudio [1], Juniper Research estima que el número de registros de datos personales robados por los ciberdelincuentes es probable que se duplique, alcanzando casi los 5000 millones en 2020, en comparación con los 2800 millones estimados en 2017.



Esta tendencia indica que los problemas de ciberseguridad se están agravando, en especial porque las empresas intentan integrar sistemas nuevos y heredados sin adoptar un enfoque holístico de la seguridad de las redes.

#### **Una enorme base instalada**

ABB se toma muy en serio esta tendencia. La empresa cuenta con una base instalada de 70 millones de dispositivos conectados, 70.000 sistemas de control digitales y 6000 soluciones de software empresarial. Como líder en el ámbito industrial, ABB tiene cuatro décadas de experiencia en el desarrollo de soluciones digitales seguras para clientes de segmentos comerciales cruciales, como el petróleo y el gas o la generación y distribución de energía. La menor interrupción en estos ámbitos puede tener consecuencias enormes para la actividad económica y el medio ambiente.

#### **Llamada de atención mundial**

El caso de violación de la ciberseguridad sucedido en 2010 en la central de enriquecimiento de uranio de Natanz, en Irán, que se conoció con el nombre de "Stuxnet", fue una llamada de atención para toda la industria, y para todo el mundo.

---

ABB tiene cuatro décadas de experiencia en el desarrollo de soluciones digitales seguras para clientes de segmentos comerciales cruciales.

Aunque el equipo de ABB no corrió peligro, el incidente dio lugar a un proceso de reflexión e investigación a escala interna.



## ABB Group Cyber Security Council

## Divisiones



Productos de electrificación



Redes eléctricas



Robótica y movilidad



Automatización industrial

## Digital ABB



## Gestión de programas de ciberseguridad



## Funciones transversales



Seguridad de TI



Jurídico



Comunicación



Seguridad de la compañía



Servicio



Gestión del seguro de riesgos



Investigación

ABB ha establecido formalmente la organización de la ciberseguridad, que depende jerárquicamente de la dirección

01

El caso de vulneración de la seguridad por Stuxnet dejó claro que cualquier compañía podría sufrir un ataque, y expuso las vulnerabilidades potenciales de una amplia gama de dispositivos.

#### Refuerzo de la disponibilidad operativa

Habida cuenta de lo anterior, ABB inició un proceso de ampliación de las iniciativas locales y divisionales a la escala del grupo. Como resultado se creó el Consejo de Ciberseguridad del Grupo. Como se indica en el apartado →1, el Consejo se convirtió en un organismo diseñado para garantizar un refuerzo continuo de la disponibilidad operativa de ABB.

—

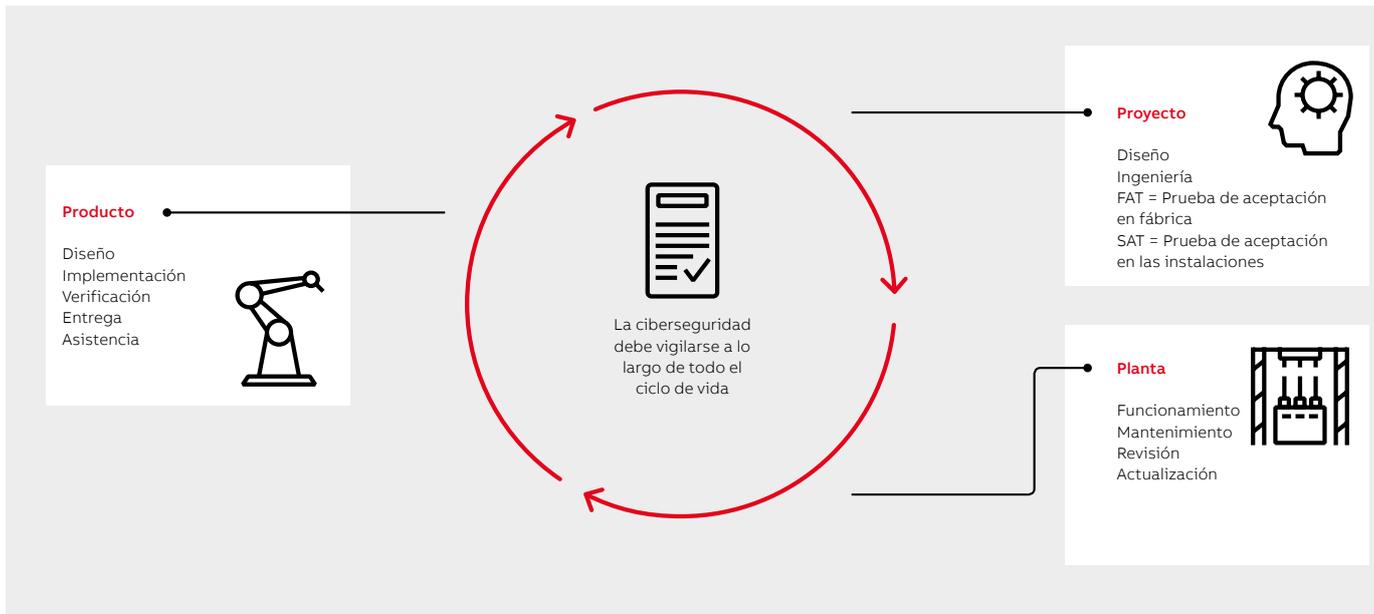
El Consejo de Ciberseguridad del Grupo trabaja para mantener la sensibilización interna en relación con la seguridad cibernética en un nivel elevado en toda la organización.

Dado que está compuesto de una amplia gama de expertos en ámbitos como la I+D, las infraestructuras de SI, los asuntos jurídicos y las comunicaciones, el Consejo trabaja activamente para mantener la sensibilización interna en relación con la seguridad cibernética en un nivel elevado en toda la organización.

El Consejo también participa en iniciativas de normalización, como Platform Industrie 4.0 y el Industrial Internet Consortium, además de colaborar estrechamente con decenas de universidades. Por otra parte, el Consejo garantiza que las medidas se apliquen con arreglo a las mismas normas en el conjunto de la empresa →2, y que los proveedores cuenten con el mismo nivel de seguridad que la propia ABB.

#### Ciberseguridad: una posición central

A lo largo de los años, la ciberseguridad se ha convertido en una parte integral de la cartera de productos de ABB. En la actualidad ocupa un lugar central en todas las fases, desde el diseño y el desarrollo hasta el mantenimiento y la asistencia en relación con el producto.



## 02

— 01 El Consejo de Ciberseguridad del Grupo está diseñado para garantizar un refuerzo continuo de la disponibilidad operativa de ABB.

— 02 El enfoque de ABB respecto a la ciberseguridad es holístico: se ocupa de todo, desde el diseño y el desarrollo hasta el mantenimiento y la asistencia en relación con el producto.

— **Referencia**  
 [1] Juniper Research, "Cybercrime to cost global business over \$8 trillion in the next 5 years" (La ciberdelincuencia costará a las empresas mundiales más de ocho billones de dólares en los próximos cinco años". Disponible en: [https://www.juniperresearch.com/press/press-releases/cybercrime-to-cost-global-business-over-\\$8-trn](https://www.juniperresearch.com/press/press-releases/cybercrime-to-cost-global-business-over-$8-trn)

He aquí algunos ejemplos de lo que hace ABB para aumentar la fiabilidad y la seguridad de sus soluciones:

- Modelización de amenazas y revisiones del diseño de seguridad
- Formación sobre seguridad para desarrolladores de software
- Pruebas de seguridad internas y externas como parte de los procesos de aseguramiento de la calidad.

Lo que ya ha sucedido en el sector de las TI está ocurriendo ahora en la ciberseguridad de los sistemas de control industrial. En efecto: la ciberseguridad se está convirtiendo en una parte integral de la vida diaria, con actualizaciones automáticas del software, parches de seguridad y actualizaciones de antivirus cuyo fin es frustrar el cada vez mayor número de amenazas. ABB está preparada para mejorar las características de seguridad de manera constante a través de innovaciones, y para ofrecer los productos adecuados que satisfagan las necesidades de seguridad de las infraestructuras cruciales de sus clientes. ●

— ABB está preparada para mejorar las características de seguridad de manera constante a través de innovaciones, y para ofrecer los productos adecuados que satisfagan las necesidades de seguridad de las infraestructuras cruciales de sus clientes.

DESMITIFICACIÓN DE TÉRMINOS TÉCNICOS

# Cifrado basado en la física cuántica

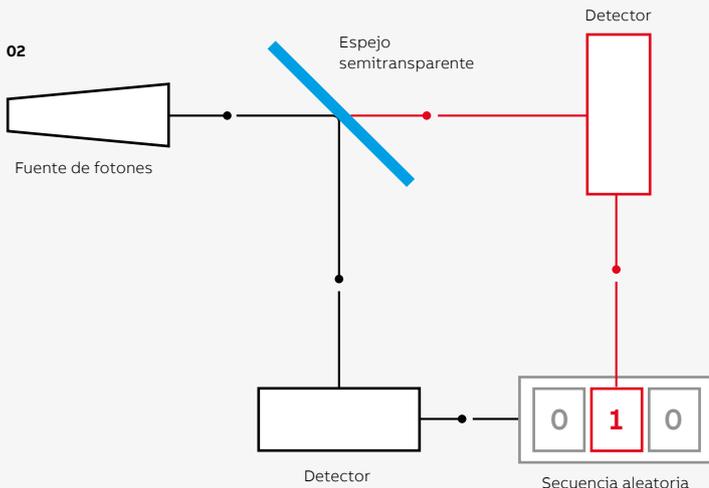
Los sistemas con una misión crucial, como el control del tráfico aéreo o las redes eléctricas, requieren un cifrado extremadamente seguro y que ofrezca una protección a largo plazo de los datos en un mundo poscuántico. La física cuántica proporciona esta solución.



**Rouven Floeter**  
ABB Power Systems,  
Grid Automation  
Baden, Suiza

rouven.floeter@  
ch.abb.com

La industria se está volviendo cada vez más digital y está cada vez más conectada. El volumen de datos que se transmite no deja de aumentar. Algunos de estos datos requieren un alto nivel de seguridad e incluso protección a largo plazo frente a eventos futuros, en especial en procesos cruciales para la misión de que se trate. Ni siquiera los enlaces de comunicación físicamente protegidos y cifrados son invulnerables a los ataques. La seguridad física se puede esquivar, y existen métodos que permiten acceder a los datos de una línea de comunicación sin necesidad de contacto físico.



01

La criptografía gira en torno a claves de cifrado. Una clave de cifrado es, en esencia, un número largo que se utiliza para cifrar datos. Si un tercero accede subrepticamente a la transmisión, podrá observar y registrar los bits individuales del mensaje, pero si no conoce la clave, el proceso numérico para descifrar el código es tan largo, que no resulta viable.



—  
01 La física cuántica permite la creación de sistemas verdaderamente no deterministas.

—  
02 La tarjeta de cifrado SECU1 de ABB utiliza la física cuántica para crear claves de cifrado de una manera verdaderamente no determinista.

La transmisión segura tiene dos fases: el cifrado de los datos y el intercambio de las claves necesarias. Los métodos convencionales basados en números aleatorios generados matemáticamente dejarán de ser suficientes en breve para generar claves de forma segura, ya que los ordenadores en los que se ejecutan son en sí deterministas y que los ordenadores cuánticos pronto podrán descifrar este tipo de cifrado asimétrico. La criptografía cuántica segura abre caminos nuevos y utiliza un método que usa las propiedades físicas de la luz para generar números verdaderamente aleatorios.

Una manera simple de lograrlo es considerar un fotón que incide sobre una superficie semitransparente. Un solo fotón puede reflejarse en la superficie o transmitirse a través de ella, pero no ambas opciones al mismo tiempo. Si un detector está colocado para registrar un fotón transmitido y otro detector para un fotón reflejado, la combinación de lo que producen ambos detectores forma una secuencia binaria realmente aleatoria →1.

La segunda fase es la transmisión de claves. En la distribución de clave cuántica, la idea básica es que para transmitir las claves se usa la orientación del campo eléctrico de un fotón. Para transmitir las claves hay un transmisor que genera fotones con una orientación aleatoria. En cuanto un pirata

informático intenta averiguar la clave, se cambian los bits del código cuántico.

El proceso de lectura ya cambia el estado. El emisor y el receptor lo detectan, y se hace evidente que hay alguien intentando realizar alguna actividad de manera subrepticia. La generación y la transmisión de claves comienza de nuevo desde el principio. El método cuántico para la distribución de claves se ha comprobado ya con resultados satisfactorios y permite que la transmisión de datos sea mucho más segura.

La mejor criptografía tiene escaso valor en un sistema con una misión crucial si los requisitos especiales de las aplicaciones con una misión crucial en relación con el rendimiento de las comunicaciones (p. ej., inestabilidad, migración, latencia) –aunque también en relación con la disponibilidad de la infraestructura de las comunicaciones– no se tienen en cuenta mediante mediciones exhaustivas de estos parámetros cruciales.

En 2017, ABB adquirió el negocio de redes de Keymile y ahora ofrece una solución de comunicación segura basada en el cifrado cuántico. Instalando dispositivos como la tarjeta de cifrado SECU1 →2 entre un dispositivo y la red, las comunicaciones pueden protegerse sin aumentar la latencia. ●

## Consejo editorial

### Consejo de redacción

**Bazmi Husain**  
Director de Tecnología I+D y tecnología del Grupo

**Adrienne Williams**  
Asesor Jefe de Sostenibilidad

**Christoph Sieder**  
Responsable de comunicaciones corporativas

**Reiner Schoenrock**  
Comunicaciones de Tecnología e Innovación

**Roland Weiss**  
Director de Estrategia de I+D I+D y tecnología del Grupo

**Andreas Moglestue**  
Jefe de redacción de ABB Review andreas.moglestue@ch.abb.com

### Editorial

ABB Review es una publicación de I+D y tecnología del Grupo ABB.

ABB Switzerland Ltd.  
ABB Review  
Segelhofstrasse 1K  
CH-5405 Baden-Daettwil  
Suiza  
abb.review@ch.abb.com

ABB Review se publica cuatro veces al año en inglés, francés, alemán y español. ABB Review es una publicación gratuita para todos los interesados en la tecnología y los objetivos de ABB.

Si desea suscribirse, póngase en contacto con el representante de ABB más cercano o suscríbese en línea en [www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview)

La reproducción o reimposición parcial está permitida a condición de citar la fuente. La reimposición completa precisa del acuerdo por escrito del editor.

Editorial y copyright ©2018  
ABB Switzerland Ltd.  
Baden, Suiza

### Impresión

Vorarlberger  
Verlagsanstalt GmbH  
6850 Dornbirn/Austria

### Diseño

DAVILLA AG  
Zúrich, Suiza

### Ilustraciones

Konica Minolta  
Marketing Services  
WC1V 7PB Londres  
Reino Unido

### Cláusula de exención de responsabilidad

Las informaciones contenidas en esta revista reflejan el punto de vista de sus autores y tienen una finalidad puramente informativa. El lector no deberá actuar sobre la base de las afirmaciones contenidas en esta revista sin contar con asesoramiento profesional. Nuestras publicaciones están a disposición de los lectores sobre la base de que no implican asesoramiento técnico o profesional de ningún tipo por parte de los autores, ni opiniones sobre materias o hechos específicos, y no asumimos responsabilidad alguna en relación con el uso de las mismas.

Las empresas del Grupo ABB no garantizan ni aseguran, ni expresa ni implícitamente, el contenido o la exactitud de los puntos de vista expresados en esta revista.

ISSN: 1013-3119

[www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview)



**Edición para tablet**  
ABB Review también en su tablet.

Visite [abb.com/abbreviewapp](http://abb.com/abbreviewapp)

### Manténgase informado

¿Alguna vez se ha perdido un número de ABB Review? Regístrese para recibir un aviso por correo electrónico en <http://www.abb.com/abbreview> y no vuelva a perderse ningún número.

Cuando se registre para recibir este aviso, recibirá también un correo electrónico con un enlace de confirmación. No olvide confirmar el registro.



---

Próximo número 04/2018  
**Sistemas autónomos**

**Las fábricas han sido siempre lugares físicos donde se hacen cosas, pero la digitalización las está transformando en conjuntos de habilidades, capacidades y sistemas cuya inteligencia aumenta con el tiempo, lo que permite a las empresas innovar el qué, el cómo, el quién y el dónde se realiza la fabricación. El próximo número de ABB Review informa por primera vez cómo están aplicando estas ideas de vanguardia sus clientes.**