

ABB

1 | 16  
es

# review

---

**Avalancha de innovaciones 6**

La electrificación rural, transformada 12

**Prueba de accionamientos 30**

Visualización 3D 49

---

La revista técnica  
corporativa

## Innovación



Power and productivity  
for a better world™





ABB Review dedica habitualmente el primer número del año a la innovación y a la celebración de los frutos más recientes del esfuerzo de investigación y desarrollo de la empresa. La portada ilustra las hélices de un Azipod. Las unidades de propulsión Azipod permiten a los buques navegar con mayor precisión y eficiencia de uso del combustible (véase también la página 11). La portadilla interior ilustra un centro de transformación de 50 MVA (que también se trata en el artículo de las páginas 12–17).

---

## Lo más destacado en innovación

- 6 Lo más destacado en innovación**  
Las mayores innovaciones de ABB para 2016

---

## Las caras de la distribución

- 12 Una pequeña maravilla**  
Transformadores de tensión de servicio para necesidades de poca potencia
- 18 Un amigo elástico**  
El concepto de depósito elástico de ABB para transformadores reduce el riesgo de rotura
- 23 Proteger y sobrevivir**  
Análisis de la protección de fallos en microrredes de CC de baja tensión con generadores fotovoltaicos

---

## Accionamientos en marcha

- 30 Prueba de accionamientos**  
El nuevo laboratorio de prueba de ABB permite a los clientes optimizar combinaciones motor-accionamiento
- 34 Fuerza impulsora**  
Los motores eléctricos sin tierras raras y ultraeficientes ofrecen soluciones sostenibles y fiables

---

## Domeñar la fuerza

- 41 Sin torsión**  
Amortiguar las oscilaciones torsionales en la unión entre accionamiento y sistema mecánico

---

## Conocimiento para la producción

- 49 Visionario**  
La visualización 3D mejora las operaciones de producción
- 53 Optimizar la producción de pasta ya no es “pulp fiction”**  
Producción constante de pasta de papel de calidad con un proceso de control avanzado
- 60 Descubrimientos alarmantes**  
Mejorar la efectividad del operador con asistencia durante el ciclo de vida de las alarmas
- 65 De papel a formato digital**  
Proyecto de investigación para la extracción de descripciones orientadas a objetos a partir de esquemas de tuberías e instrumentación

---

## Encuesta a los lectores

- 70 Nuestros lectores han hablado**  
Resultados de nuestra encuesta a los lectores

# Innovación



Bazmi Husain

## Estimado lector:

Estoy encantado de presentarle el primer número de ABB Review bajo mi mandato como Director de Tecnología. Soy lector ávido de ABB Review desde que me incorporé a ABB en 1981, y me siento honrado de formar parte del consejo editorial de esta respetada publicación tecnológica.

La investigación que hacemos en ABB está dirigida por las necesidades de nuestros clientes y de la sociedad. Entre estas necesidades destacan la reducción del impacto ambiental, la fiabilidad, la seguridad y la productividad.

La digitalización es una vía muy prometedora para atender estas necesidades mediante la interconexión de instrumentos y sistemas, y permite un grado de colaboración nunca visto entre las máquinas y las personas que las manejan. Por ello, ABB se ha puesto a la cabeza del desarrollo de tecnologías en el campo de lo que llamamos internet de las cosas, los servicios y las personas. Algunas se presentan en este número de ABB Review, en una serie de artículos cortos que recorren nuestros avances más recientes.

Otros artículos se centran en la innovación en los ámbitos de la electrificación rural, la protección de fallos en microrredes, la visualización tridimensional para mejorar las operaciones de un proceso, la efectividad del operador mediante el apoyo a la gestión de alarmas y la transferencia automatizada a formatos interpretables por un ordenador de diagramas antiguos.

El tercer artículo de nuestra serie de cuatro partes "Domeñar la fuerza" sobre la atenuación de oscilaciones se centra en los problemas planteados por los sistemas con accionamientos de velocidad variable y componentes mecánicos elásticos.

Su opinión es importante para desarrollar ABB Review, y quiero dar las gracias a todos los lectores que han participado en nuestra reciente encuesta a los lectores, cuyos resultados se recogen en la página 70.

Este año, ABB celebra dos importantes aniversarios. Han pasado 125 años desde la fundación de Brown, Boveri & Cie., una de las empresas predecesoras de ABB, y 100 desde que inauguramos nuestro primer laboratorio de investigación. A lo largo del año recordaremos estos aniversarios con artículos que rememorarán nuestra tradición de innovación y que mirarán hacia el futuro en busca de nuevas oportunidades de mantenernos a la cabeza del desarrollo tecnológico.

Recuerde que, además de la versión impresa, ABB Review se presenta en pdf y en forma de aplicación, y que podrá encontrar estas dos presentaciones en <http://www.abb.com/abbreview>.

Las innovaciones tecnológicas destacadas en este número de ABB Review son solo unos pocos ejemplos de las numerosas novedades que salen de nuestros laboratorios para resolver los problemas a los que se enfrentan hoy nuestros clientes. Si tiene alguna sugerencia de artículos o mejoras, estaremos encantados de escucharle.

Bazmi Husain  
Director de Tecnología y  
Vicepresidente Senior del Grupo  
Grupo ABB



# Lo más destacado en innovación

## Principales innovaciones de ABB para 2016

La investigación y el desarrollo giran en torno al descubrimiento y la conformación del futuro de la tecnología. Cada año salen de los laboratorios de ABB centenares de nuevos descubrimientos o mejoras de

descubrimientos existentes. Recogemos aquí una selección. Algunas de estas innovaciones se desarrollan por extenso en este mismo número o en números futuros de ABB Review.

### Una alternativa al SF<sub>6</sub> como medio de aislamiento y conmutación

Durante décadas, las propiedades únicas del hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) lo han convertido en el medio preferido de aislamiento de la aparata eléctrica. Pero el SF<sub>6</sub> es un gas de efecto invernadero y los costes de gestión del ciclo de vida aumentan.

El esfuerzo de muchos grupos de investigación por encontrar alternativas al SF<sub>6</sub> con menos impacto ambiental y con propiedades de aislamiento y de interrupción del arco similares a las del SF<sub>6</sub> han resultado, hasta el momento, infructuosas.

Pero ABB ha desarrollado una alternativa respetuosa con el medio ambiente de propiedades similares a las del SF<sub>6</sub> con una mezcla de gases basada en un producto de la empresa 3M llamado Fluido dieléctrico Novec 5110, una cetona perfluorada con cinco átomos de carbono.



La mezcla de gases de fluorocetona para aplicaciones de conmutación se desarrolló en colaboración con 3M. Esta molécula fluorada se descompone a la luz UV en la atmósfera baja y tiene una vida útil de unos 15 días, frente a los 3.200 años del SF<sub>6</sub>. El potencial de calentamiento global (GWP) de la mezcla de gases es inferior a 1. En un proyecto piloto conjunto con ewz, una importante

compañía eléctrica suiza, se acaba de entregar la primera central de aparata aislada en gas (GIS) con la nueva mezcla en una subestación de Zúrich, Suiza. En la subestación, situada junto a la fábrica de GIS de ABB, se montaron 8 bahías de alta tensión y 50 de media tensión, todas GIS, con una mezcla de gases basada en la cetona.

## Un UPS ligero que no se toma los cortes a la ligera

La cartera de protección de la alimentación de ABB para aplicaciones industriales abarca una gama de productos extensa: convertidores estáticos de frecuencia, acondicionadores de tensión y potencia y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS). El nuevo UPS industrial ligero PowerLine DPA es un UPS en línea de conversión doble para servicio ligero, como fábricas con condiciones no muy rigurosas.

PowerLine DPA se basa en la arquitectura paralela descentralizada (DPA) exclusiva de ABB: en este enfoque,

cada módulo UPS contiene todo el hardware y software necesarios para un funcionamiento autónomo. Los módulos UPS son intercambiables en línea, con un tiempo de parada nulo. PowerLine DPA ofrece una configuración redundante para compartir y proteger la carga. La solución es tolerante a fallos y carece de puntos de fallo únicos.

PowerLine DPA garantiza la alimentación a procesos industriales críticos que exigen un alto nivel de seguridad y protección. Su robusto diseño es adecuado para entornos industriales con valores elevados de temperatura, polvo, humedad y contaminantes corrosivos. La arquitectura modular de PowerLine DPA ofrece gran disponibilidad, mantenimiento sencillo, diseño eléctrico a prueba de fallos y coste total de propiedad reducido.



## Mecanismos para interruptores de alta tensión de tipo HM: la tercera generación

Desde su lanzamiento, ABB ha vendido más de 110.000 unidades de mecanismos HMA y HMB para interruptores de alta tensión. Ahora, la nueva familia HMC, la última generación, proporciona un rendimiento, una calidad y una fiabilidad aún mayores.

El objetivo del desarrollo de HMC era mejorar las características del producto existente, su alto nivel de funcionalidad y compacidad y la facilidad de adaptación al interruptor, creando una estructura y una tecnología de producto nuevas de mayor calidad y fiabilidad. Se dio gran importancia a la economía de escala y a la mayor capacidad de servicio.

La metodología de diseño se determinó en consonancia:

- Diseño modular
- Estrategia de piezas comunes

- Estandarización de opciones
- Simplificación de los grupos
- Diseño de excelencia (fabricación, montaje, servicio, protección frente al funcionamiento anómalo, etc.)

La familia HMC es adecuada para interruptores con tensiones nominales de hasta 550 kV. Los requisitos del cliente se atienden de forma flexible con opciones definidas. Además, la fiabilidad y la seguridad operativa aumentan con mejoras como un grupo de bombeo de accionamiento directo, un acoplamiento directo de los dispositivos de conmutación del módulo de control o un pasador de bloqueo automático integrado que se puede sobrepasar sin daños.

Una innovación destacada es la resistencia dependiente del recorrido del módulo de almacenamiento, que permite usar muelles helicoidales a compresión junto con características de conmutación optimizadas. Además, se utilizan los componentes y materiales hidráulicos más avanzados, como los sistemas de sellado protegidos frente al lavado.



## Control con voz

**ABB acaba de presentar el sistema de domótica inteligente activado por la voz más avanzado del mundo: ABB-free@home. La innovación permite controlar más de 60 funciones de automatización del hogar en un entorno residencial inteligente con órdenes de voz.**

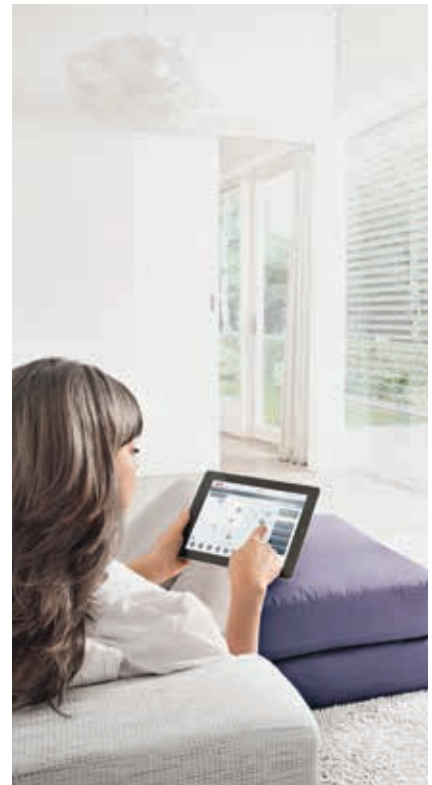
ABB-free@home es un sistema de control centralizado que vigila y controla la totalidad de una vivienda: atenuación y encendido de las luces, temporizadores, control de persianas, regulación de la temperatura y puertas de entrada. Ahora el sistema se puede controlar con órdenes de voz, como “Enciende las luces de la habitación de Juan” o “Habitación de Juan: encender

luces”. ABB-free@home confirma que la orden se ha ejecutado y responde a preguntas sobre el estado de sus funciones.

El procesador de diálogo del sistema de control por la voz, que combina reconocimiento de la voz y un modelo de habla estadístico, utiliza algoritmos para reconocer la intención del usuario y el contexto. El modelo de habla se adapta en función de las palabras programadas en el sistema. Si la orden no es completa, el sistema solicita más información.

La solución de domótica se vende con la marca Busch Jaeger en Alemania, Países Bajos y Austria, y con la marca ABB en el resto del mundo.

Encontrará más información sobre ABB-free@home, en “Vida inteligente”, ABB Review 3/2015, págs. 48-49.



## FlexFeeder ayuda a los robots a recoger cosas

**FlexFeeder, en combinación con la Visión Integrada de ABB, permite recoger piezas de entre 3 mm y 30 mm sin cambiar el alimentador cada vez que se introduce en el sistema un componente distinto.**

La automatización del montaje de piezas pequeñas exige flexibilidad, fiabilidad y rapidez. El nuevo FlexFeeder de ABB interactúa con el controlador del robot IRC5 de la empresa o con cualquier controlador PLC. Se ofrece en dos variantes de diferentes tamaños (un alimentador mayor prolonga el tiempo entre recargas). Los huecos internos reducidos y la opción de retroiluminación integrada incrementan la flexibilidad en la alimentación de piezas pequeñas.

Ambas variantes están diseñadas para ahorrar espacio y acortar los ciclos. Además, dos o más alimentadores pueden trabajar lado a lado



sin necesidad de sistemas de visión distintos. Accionado con cilindros neumáticos, FlexFeeder extrae piezas de un depósito desordenado y las coloca en pequeñas cantidades sobre la superficie plana de selección en el campo de visión del robot. Los sensores detectan cuándo hay que recargar el depósito. El depósito se

purga sin alimentación y cambiar las piezas es fácil y seguro. El montaje en el suelo y en rack simplifican la instalación del FlexFeeder. Los asideros ayudan a desplazar y levantar estos equipos fácilmente. La GUI permite probar el FlexFeeder con un solo clic y vigilar el estado de la producción.



## Motores que saben cuándo necesitan atención

Una funcionalidad remota, nueva y fácil de usar, permitirá en breve ahorrar costes gracias a la mejora de la planificación del mantenimiento y las paradas no planificadas. Etiquetas inteligentes con sensores vigilan parámetros clave, identifican el equipo “problemático” e indican qué motores se deben reparar o reemplazar. La herramienta está en una fase de desarrollo avanzada.

Determinadas gamas de motores ABB de baja tensión saldrán de fábrica con etiquetas inteligentes con sensores. Las etiquetas también se pueden instalar en otros motores. Los motores se conectan de forma inalámbrica a internet con un smartphone o una pasarela. Los parámetros operativos clave que se vigilan con regularidad y precisión son los siguientes:

- Información de funcionamiento
- Consumo eléctrico (dentro del 10%)
- Sobrecarga
- Horas de funcionamiento y arranques
- Vibración y temperatura del cuerpo del motor
- Información sobre el estado
- Estado del devanado del rotor
- Desalineación interna

- Estado de los cojinetes
- Estado de la refrigeración

El usuario podrá consultar estos datos con una aplicación para smartphone. El servicio apoyará al usuario detectando posibles problemas y planificando el mantenimiento en consonancia; así se reducen los costes de mantenimiento globales y se eliminan o se limitan las paradas no planificadas.

También se puede optimizar el consumo eléctrico de los motores: combinando datos de consumo eléctrico de los motores individuales con información del funcionamiento de la planta será posible formular mejores estrategias de carga orientadas a reducir la factura eléctrica.



## El primer motor IE5 sin imanes del mundo para aplicaciones de velocidad fija

Durante este decenio, la eficiencia mínima para motores de baja tensión se armonizará en la mayoría de las regiones del mundo con un nivel superior llamado IE3 (definido en IEC60034-30). IE3 se considera el nivel máximo de eficiencia práctica para motores de inducción. Una vez armonizada la eficiencia del motor, la atención se centra en las máquinas. Los fabricantes de máquinas deben afrontar dos grandes cuestiones: cómo aprovechar mejor la eficiencia

energética en el conjunto de la máquina y cómo diferenciarse de la competencia en cuanto a eficiencia energética.

En los últimos cinco años, las iniciativas para superar los límites prácticos de la tecnología del motor de inducción han popularizado los motores con imanes permanentes de tierras raras. Pero hay que tener en cuenta los costes y la sostenibilidad de estos materiales. ABB se propone ofrecer alternativas de gran eficiencia, sostenibles y asequibles para aplicaciones de velocidad variable y velocidad fija.

Conozca la tecnología SynRM (motor síncrono de reluctancia). SynRM está disponible sin imanes o con imanes de ferrita sostenibles. La última incorporación a la familia SynRM es el primer motor IE5 sin imanes con capacidad de



arranque en línea: DOLSynRM. Un motor DOLSynRM IE5 de 1,5 kW presentado en EEMODS, en Helsinki, en septiembre de 2015, llamó mucho la atención. Los motores ultraeficientes, sostenibles y asequibles se han hecho realidad. Ahora toca a los fabricantes sacarles partido. DOLSynRM es un ejemplo de la manera en que ABB ayuda a sus clientes a mantener una ventaja competitiva y a responsabilizarse del futuro.

## Aplicaciones de smartphone para accionamientos

Los usuarios de accionamientos necesitan información sobre sus equipos para vigilarlos, controlarlos y ponerlos en marcha. Lo importante es poder hacerlo de manera intuitiva. ¿Qué mejor para ello que un smartphone? ABB ha lanzado dos aplicaciones para operarios de accionamientos: Drivebase y Drivetune.

Drivebase es una aplicación de seguimiento de accionamientos. Identifica el accionamiento con un código QR y lo usa para análisis de fallos, recomendaciones de revisión, notificaciones sobre acciones de revisión, acceso fácil a los manuales del

producto y búsqueda de contactos de ABB. También sirve para registrar un accionamiento y obtener garantías complementarias.

Drivebase ayuda a realizar un seguimiento de la base instalada de accionamientos y proporciona ayuda rápida y acceso fácil a los servicios de ABB. La aplicación se puede descargar gratuitamente de App Store de Apple, Google Play y Windows Store.

Drivetune es una aplicación móvil avanzada para el seguimiento y control de accionamientos. Presenta el estado de los accionamientos y ayuda a su puesta en marcha con una interfaz intuitiva. La aplicación se conecta al accionamiento con Bluetooth e intercambia datos en ambas direcciones.

Drivetune es gratuita y está disponible en Google Play. Pronto estará disponible en versión IOS.



## Reacciona a la luz solar

El uso optimizado de la energía solar generada localmente es uno de los factores impulsores de los sistemas fotovoltaicos (FV) de nueva generación. Resolver el desajuste entre el perfil de energía solar diaria y la demanda doméstica es uno de los problemas que deben resolverse para impulsar nuevas soluciones que atiendan las necesidades de los clientes, tanto domésticos como de la red. REACT de ABB se ha creado para ofrecer a los clientes el equilibrio óptimo entre coste de la solución de almacenamiento y tamaño de los paneles FV.

REACT (siglas en inglés de acumulador de energía renovable y tecnología de conversión) consta de un inversor FV (hasta 5 kW) conectado a la red y alimentado con un enlace de CC al que se acoplan un cargador de baterías bidireccional y los MPPT (dispositivos de seguimiento del punto de máxima potencia), conectados a los



paneles FV. Su arquitectura de enlace CC integrada ofrece la mejor rentabilidad en instalaciones nuevas, pero también sirve para actualizar plantas FV, como un cargador de baterías con enlace de CA, simplemente no conectando los paneles FV a su entrada. El componente de almacenamiento de REACT está formado por baterías de

iones de litio de arquitectura modular ampliable desde los 2 kWh originales hasta 6 kWh. Un sistema de gestión de cargas integrado, sencillo y eficaz, permite la interacción con cargas o aparatos seleccionados y aumenta la independencia energética de la vivienda hasta un 60% con la configuración básica del sistema.

## Un océano de ahorros con Azipod D

El sistema de propulsión Azipod sin engranajes de ABB es aplicable a barcos de crucero, rompehielos y barcos de alojamiento para plataformas. El nuevo miembro de la familia Azipod, Azipod D, amplía la gama para segmentos como la perforación marina, los barcos de construcción y apoyo y los ferries. Estas aplicaciones exigen maniobrabilidad (como el modo de posicionamiento dinámico) y fiabilidad elevadas.

Azipod de ABB es una cápsula direccional hidrodinámica para propulsar y dirigir embarcaciones. La hélice de la cápsula se acciona con un sistema de propulsión eléctrica alojado en la cápsula. Orientando la cápsula de una

manera flexible, el barco consigue una gran maniobrabilidad.

La última incorporación a la familia Azipod, Azipod D, aumenta la rentabilidad del barco reduciendo los costes de mantenimiento y el consumo. Otras ventajas son maniobrabilidad superior, coste de inversión competitivo, facilidad de reparación y mantenimiento y aumento sustancial del rendimiento en comparación con propulsores mecánicos.

Azipod D ofrece a los diseñadores y constructores navales mayor flexibilidad, pues se adapta a muchas formas de casco y tamaños de hélice y es sencillo de montar. El Azipod D reduce la potencia instalada hasta en un 25%, gracias en parte a su nueva refrigeración híbrida que incrementa el rendimiento del motor eléctrico hasta en un 45%.



Según Clarkson's Research, el número de embarcaciones con propulsión eléctrica ha crecido en todo el mundo a un ritmo del 12% anual durante la última década, tres veces más deprisa que la flota.

## La integración ya no depende de las piezas

El enorme número de dispositivos inteligentes de medida y accionamiento de las plantas de proceso hace tiempo que complica la vida a los jefes de planta. Estos dispositivos suelen proceder de distintos proveedores y se comunican mediante diferentes protocolos. Hay normas para accionamientos con el fin de integrarlos en las herramientas de mantenimiento o los sistemas de control. Lamentablemente, cada norma solo está optimizada para un subconjunto de tareas típicas de una planta y pone de relieve los problemas de compatibilidad e interoperabilidad. ABB lidera un consorcio industrial que ha desarrollado una nueva norma única, la FDI (siglas en inglés de Integración de dispositivos de campo), que combina todas las ventajas de las normas actuales y admite una interoperabilidad inigualable.



Pero ABB fue más allá y realizó un estudio para determinar lo que preocupa a los usuarios que trabajan con instrumentos de proceso. Sobre este estudio, la empresa ha creado una nueva herramienta de gestión de dispositivos diseñada para ayudar tanto al técnico de planta como al jefe de mantenimiento centrándose en la información y las funciones esenciales de los dispositivos. La nueva herramienta tiende un puente sobre la división clásica entre herramientas basadas en ordenador, que ofrecen gráficos de gran

calidad, y herramientas a la medida utilizadas en la planta, con funciones e interfaces gráficas de usuario limitadas. El nuevo software está listo para la nueva generación de equipos informáticos móviles de diseño resistente y adecuados para trabajar en entornos con riesgo de explosión, como las plantas químicas, de petróleo y gas. La combinación de una norma de integración avanzada y un diseño de software moderno creará una nueva área de gestión instrumental en las plantas de proceso.



# Una pequeña maravilla

Transformadores de tensión de servicio para necesidades de poca potencia

MATHEW PAUL – Se estima que en todo el mundo hay 1.300 millones de personas que no disponen de acceso a la electricidad. En comunidades pequeñas, esto suele deberse al coste de instalación de una subestación. ABB puede ahora aliviar esta situación con su micro-subestación, una subestación de bajo coste que aprovecha los transformadores de tensión de servicio (SSVT) para suministrar electricidad localmente con un desembolso de capital pequeño, un diseño fácil y un mantenimiento reducido. Los SSVT son transformadores de potencia monofásicos en su configuración más simple: con conexión a tierra en el lado del primario y montados sobre un pedestal, bajan desde alta a media o baja tensión en un solo salto. Al evitar dos o más saltos, los SSVT reducen costes, mejoran la eficiencia y aumentan la fiabilidad. Los SSVT abaratan el suministro eléctrico a lugares que no pueden justificar el gasto de una subestación normal, como estaciones de bombeo de petróleo y gas, proyectos mineros, torres de telefonía móvil y hospitales.



Muchas comunidades pequeñas carecen de acceso a la electricidad por el coste de instalación de una subestación. ABB puede ahora aliviar esta situación con su micro-subestación.

Un SSVT combina las características de un transformador de potencia y uno de medida en un solo producto de alta fiabilidad, bajo coste, sencillez y tamaño reducido ideal para aplicaciones de poca potencia. Las capacidades de un SSVT –o las de un SSMV, que es un SSVT para media tensión (MT)– le permiten satisfacer las necesidades eléctricas de una comunidad o una subestación aisladas con un solo equipo. El SSVT ocupa poco espacio y se configura fácilmente gracias a su diseño monofásico.

#### Estructura

Un SSVT o un SSMV presenta una configuración monofásica de tipo acorazado y se conecta entre la línea del primario y tierra, con un blindaje del devanado puesto a tierra interpuesto entre los devanados de alta (AT) y baja tensión (BT) para proteger el secundario de las subidas transitorias de tensión. Un SSVT o un SSMV suelen fabricarse generalmente según las normas ANSI C57.13 [1] e IEC 61869-3 [2], y satisfacen las C57.12.00 [3] e IEC 60076 [4] → 1. Se está preparando una nueva norma –C57.13.8, IEEE Station Service Voltage Transformers (IEEE para transformadores de tensión de servicio)– que incorporará las partes importantes de las C57.12.00 y C57.13.

#### Protección

En el esquema de protección del SSVT, un transformador de intensidad (CT) en la conexión de AT neutra o de tierra detectará cualquier defecto a tierra en el devanado secundario → 2.

El SSVT ocupa poco espacio y se configura fácilmente gracias a su diseño monofásico.

Un CT en la toma de tierra del depósito detectará un defecto a tierra del primario. Un relé opcional en baño de aceite de aumento brusco de presión detecta asimismo fallos internos, igual que en un transformador de potencia.

En el caso de un fallo en el lado del primario, la protección de línea puede aislar el SSVT. Puesto que la línea de transporte

#### Imagen del título

Los SSVT son una forma sencilla y económica de tomar electricidad de una línea de alta tensión donde no se justifica una subestación normal. La imagen ilustra un SSVT en baño de aceite.

La microsubestación es una subestación de bajo coste que utiliza un SSVT para suministrar electricidad local con un desembolso de capital pequeño, un diseño fácil y un mantenimiento reducido.

## 1 Comparación de normas ANSI

Transformador de potencia de clase II	Transformador de medida SSVT/SSMV
ANSI C57.12.00	ANSI C57.13
BIL de 115 – 450 kV (opción de 550 kV)	BIL de 115 – 550 kV
BIL de 138 – 550 kV (opción de 650 kV)	BIL de 138 – 650 kV
BIL de 161 – 650 kV (opción de 750 kV)	BIL de 161 – 750 kV
BIL de 230 – 750 kV (opción de 825 kV)	BIL de 230 – 900 kV
BIL de 345 – 1050 kV (opción de 1.175 kV)	BIL de 345 – 1.300 kV
Descarga parcial: 500 pC	Descarga parcial: 10 pC, tensión de extinción de descarga parcial (PDEV) 135% de la tensión nominal
Factor de sobretensión: sobretensión continua máxima (MCOV) 105%, sobretensión instantánea máxima (MMCV) 110%	Factor de sobretensión: MCOV 115%, MMCV 125%
	Bobina de protección

es un elemento crítico, muchos usuarios desean un mecanismo de aislamiento de la subestación de SSVT. Actualmente, se dispone de una protección con fusible de corte de AT de nivel de impulso básico (BIL) de hasta 750 kV para aislar un SSVT/SSMV defectuoso de la línea de transporte → 3.

Por encima de 750 kV se puede emplear un interruptor automático monofásico → 4. Hay unidades SSVT con aislamiento de gas con un interruptor automático o un seccionador incorporado como protección adicional.

### Nivel de fallos y capacidad para soportar sobretensiones

Un SSVT/SSMV tiene cerca de un 5 al 10 por ciento de impedancia en su propia base. Gracias al tamaño de su bastidor con pocos kVA, la corriente de fallo del secundario está limitada a un nivel seguro. Un fusible o un interruptor automático en miniatura (MCB) pueden proteger al SSVT de sobrecargas en el secundario durante el funcionamiento normal. Un interruptor automático de MT podría llevar a cabo la misma función en un SSMV. Si la tensión nominal de AT del primario es de 230 kV, la intensidad a plena carga es de 1,5 A con 200 kVA y el fallo más grave en el secundario induciría 30 A en el primario.

### Impacto ambiental

Al eliminar uno o más transformadores intermedios, se reducen las pérdidas en

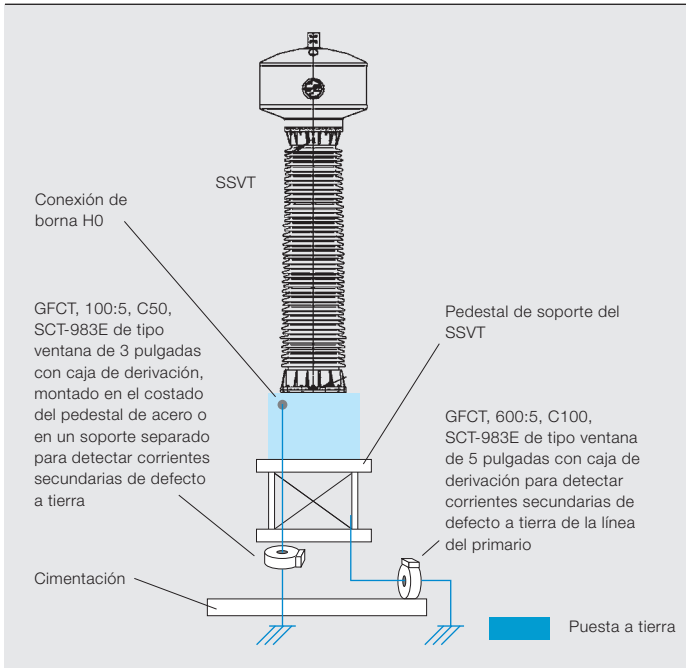
ausencia de carga y en el cobre, por lo que el sistema es más eficiente. Además, el volumen de aceite del SSVT es una fracción del de un transformador de potencia comparable, por lo que las consecuencias de un vertido son mucho menos graves y tanto las necesidades de reposición como las medidas contra incendios y de contención son menores. Asimismo, los SSVT son casi inaudibles, pues sólo emiten unos 30 dBA en comparación con los 70 dBA de un transformador grande.

### Alimentación para control de subestaciones

Las subestaciones se presentan en muchos tamaños para aplicaciones muy variadas. En una subestación de distribución, se reduce la tensión de alta a media tensión o de media a baja para alimentar diversas arterias de distribución. Una subestación de conmutación sirve para interconectar transformadores de potencia de AT en una red de AT o simplemente para conectar líneas de transporte que se encuentran al mismo nivel de tensión. Otras subestaciones están conectadas a centrales de generación a menudo remotas para extraer su producción.

Cualquiera que sea su tipo, todas las subestaciones disponen de sistemas de medida y protección que controlan una fuente de alimentación de BT, la denominada alimentación de control. Por razo-

## 2 Protección del SSVT



nes de fiabilidad, todas las subestaciones necesitan dos fuentes de alimentación de control redundantes. Normalmente, el transformador principal de la subestación es la fuente primaria de alimentación de control. Pero, por varias razones, hace falta una segunda fuente. Por ejemplo, en una subestación de generación, en que la alimentación del primario se suele derivar de los propios generadores, éstos pueden tener que pararse para mantenimiento o suspender su producción durante mucho tiempo o, en una planta solar o eólica, la fuente es fluctuante.

En ausencia de generación, la alimentación de control se toma de la red. Hay varias formas de hacerlo: puede mantenerse activado un gran transformador de potencia para alimentar el control del secundario, pero es un método muy ineficaz porque las pérdidas son elevadas en comparación con la carga (por no hablar del coste de capital). Otra opción es tomar la energía de una arteria conectada a una red local de distribución de BT o de un generador de reserva, pero es cara y proclive a sufrir cortes debidos a factores externos.

Los diseñadores de subestaciones pueden, a falta de otras opciones, emplear una arteria procedente de otro lugar para conseguir una fuente de alimentación de control redundante, una medida costosa que puede presentar problemas de

calidad y fiabilidad y abierta a influencias perturbadoras fuera del control del operador.

En algunos casos, el transformador de AT principal está equipado con un tercer devanado que proporciona la alimentación de control. Pero ésta no es una solución ideal, ya que limita el margen de diseño del transformador de potencia. En la mayoría de los casos, complica también el diseño de forma desproporcionada, disminuye la fiabilidad del transformador y añade costes por pérdidas y por el mayor depósito y la mayor cantidad de aceite necesarios. También deben ser mayores los tamaños de los conductores y las bobinas. Otro inconveniente de emplear el terciario es la necesidad de mantener activado el transformador de potencia incluso si se desconecta la carga del secundario.

Otra posible fuente de alimentación secundaria es un generador de reserva. Esta opción es probablemente la de menor coste inicial, pero la de costes más altos a lo largo del ciclo de vida, en comparación con un SSVT o un transformador de potencia. Los generadores que emplean combustible presentan problemas de fiabilidad, riesgo de incendio y mantenimiento, y preocupaciones ambientales como contaminación acústica, riesgo de vertido de combustible, etc.

## 3 SSVT en baño de aceite con fusible de corte



Un SSVT combina las características de un transformador de potencia y uno de medida en un solo producto de alta fiabilidad, bajo coste, sencillez y tamaño reducido ideal para aplicaciones de poca potencia.



Al eliminar uno o más transformadores intermedios, se reducen las pérdidas en ausencia de carga y en el cobre, por lo que el sistema es más eficiente.



Como alternativa a estos métodos, en muchos casos puede emplearse un SSVT/SSMV como fuente de alimentación de control por un coste menor y con mucha mayor sencillez.

#### El concepto de microsubestación

Muchas comunidades de todo el mundo han renunciado a la electricidad por el coste de instalar una subestación. Las líneas de transporte de AT pueden pasar cerca, pero no se pueden derivar para alimentar un sistema de suministro de agua, un centro comunitario, una escuela o un centro de atención primaria. Un SSVT o un SSMV no sustituye a una subestación completa, pero sí puede llevar la electricidad a esas comunidades desfavorecidas → 5. Cuando mejora la calidad de vida en la zona, la demanda de energía puede aumentar lo suficiente para justificar una subestación grande. En ese momento, el SSVT/SSMV puede trasladarse a otro lugar.

Los costes iniciales y los del ciclo de vida de un SSVT lo convierten en una propuesta atractiva para aplicaciones como las mencionadas → 6 y contraportada.

Los transformadores de potencia no son sólo más costosos, sino que también requieren una atención y un mantenimiento considerables para mantenerlos en servicio. Por ejemplo, el líquido dieléctrico de un transformador de potencia debe renovarse a lo largo de su vida, y

un transformador de 230 kV / 100 MVA puede contener 25.000 kg de aceite, frente a los 2.000 kg de un SSVT de 230 kV / 200 kVA.

Además, una subestación con un SSVT o SSMV monofásico no necesita empleados fijos y es muy sencilla, pues solo tiene un supresor, un interruptor de AT, un seccionador, un embarrado de puesta a tierra y una placa de distribución de BT, todo en configuración monofásica. Esta sencilla disposición reduce también el espacio ocupado.

La configuración monofásica permite además conectar el SSVT / SSMV en estrella o triángulo en el lado del secundario. En una configuración secundaria trifásica en triángulo, dos SSVT / SSMV proporcionan alimentación trifásica (en triángulo abierto) de capacidad reducida, con mayor flexibilidad que un transformador de potencia trifásico → 7. Alternativamente, en una emergencia puede tomarse un SSVT de un sistema trifásico para alimentar otro lugar.

Las unidades de SSVT / SSMV son considerablemente más ligeras y pequeñas que un transformador de potencia, perfectas para transportarlas a lugares de acceso difícil.

Se pueden utilizar como fuente de alimentación durante la construcción de la instalación antes de ser configuradas



6 Una instalación con SSVT de 100 kVA / 220 kV cuesta unos 200.000 dólares y se instala en 12 meses.



7 SSVT en una configuración trifásica



como fuente de alimentación de control para la fase de explotación.

### Aplicaciones

En muchas aplicaciones, como estaciones de bombeo de petróleo y gas, plataformas petrolíferas, minería, torres de telefonía móvil, proyectos de defensa, hospitales, subestaciones para ferrocarril y alumbrado de torres de transporte, es necesario alimentar cargas aisladas. Pueden diseñarse SSVT / SSMV para tratar la diversidad de condiciones ambientales encontradas en esos lugares: gran altitud, temperaturas altas o bajas, actividad sísmica o contaminación salina o de polvo. Pueden entregar entre 25 kVA y 333 kVA, con ciertas limitaciones de tensión, a 50 Hz o 60 Hz. En caso necesario, se puede probar la resistencia sísmica de los SSVT / SSMV en una mesa vibratoria.

Un SSMV, con un secundario de MT, puede enviar electricidad a cargas alejadas mediante una arteria de MT. Puede reducirse la tensión en el punto de la carga con transformadores de distribución montados en un poste. Esto reduce las pérdidas de distribución y mejora la regulación de la tensión.

Los SSVT pueden ofrecerse con devanados de medida para que cumplan un objetivo doble. Se están desarrollando SSVT con valores nominales de kVA mayores, que constituirán microsubestaciones aún más atractivas y que permitirán que aplicaciones y comunidades aisladas mayores se beneficien de la comodidad de la electricidad distribuida a través de la red.

### Mathew Paul

ABB Power Grids, High Voltage Products  
Lexington, KY, Estados Unidos  
mathew.paul@us.abb.com

### Referencias

- [1] *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*, IEEE C57.13, 1993.
- [2] *Instrument Transformers*, IEC 61869-3:2011.
- [3] *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE C57.12.00, 2010.
- [4] *Power Transformers*, IEC 60076, 2011.



# Un amigo elástico

El concepto de depósito elástico de ABB para transformadores reduce el riesgo de rotura

SAMUEL S. BRODEUR, YASSER S. SALMI, ANDREW COLLIER – Las explosiones en transformadores aislados en aceite se deben sobre todo a la formación de un arco entre componentes internos del depósito situados a diferentes potenciales eléctricos. Este fallo provoca la formación rápida de gas acompañada del aumento sustancial de la presión en el interior del depósito. El depósito metálico empieza a expandirse, se deforma y puede llegar a romperse. Las consecuencias de la explosión pueden incluir vertidos de aceite y grandes daños por incendio del transformador y de los equipos próximos. Los métodos de mitigación tradicionales, como interruptores automáticos, alivio mecánico y cámaras de expansión, tienen inconvenientes por ineficacia, tamaño y coste. El concepto del depósito elástico de ABB constituye una forma sencilla y rentable de mitigar el riesgo de rotura del depósito que no tiene ninguna de las desventajas de los métodos tradicionales.



Pese a las precauciones tomadas en la fase de diseño para evitar la formación de arcos internos en los transformadores y reactores en baño de aceite, siempre hay un riesgo residual de que se produzcan, con la posibilidad de rotura del depósito seguida de incendio y, posiblemente, explosión. Este riesgo es muy preocupante para la seguridad de los empleados, el público y el medio ambiente. Un estudio estadístico de transformadores de 735 kV reveló que aproximadamente el 32% de las explosiones se debieron a fallos de las bornas y casi la mitad acabaron en incendio [1]. Este riesgo de incendio se reduce sensiblemente utilizando papel impregnado en resina (RIP) o bornas sintéticas impregnadas en resina (RIS).

El estudio también reveló que el 54% de los incendios se debe a la rotura del depósito o las torretas de las bornas. Otro estudio [2] de más de 47.000 trans-

formadores concluyó que los provistos de cambiadores de tomas de carga (OLTC), los de tensión superior a 300 kV, los autotransformadores y los transformadores elevadores para generador tienden a presentar índices de fallo más altos que otros tipos de equipos. Además, la probabilidad media de que se produzca un fallo explosivo durante la vida útil de 40 años de un transformador es del 40%; en el 4% de estos casos el incendio es catastrófico, y en el 22% se produce un vertido grave de aceite. Por tanto, el fallo catastrófico de un transformador no es un riesgo insignificante → 1.

#### Técnicas tradicionales de mitigación del riesgo

La energía potencial liberada por un fallo de baja impedancia en un gran transformador de transporte llega hasta 147 MJ. Pero diferentes técnicas de protección mecánica y eléctrica evitan la mayor parte de los daños graves causados por arcos, de forma individual o en conjunto.

Los métodos de protección eléctrica son:

- Interruptores rápidos. Es el tipo de protección eléctrica más importante, ya que minimiza la duración del fallo, que es linealmente proporcional a la energía generada por el arco.
- Relés Buchholz, que detectan la acumulación de gas en el aceite. Pero estos se colocan a cierta distancia de la fuente potencial de fallos de alta

energía y solo se activan después de que la onda de presión se ha propagado.

Pese a las medidas de diseño orientadas a evitar arcos internos en los transformadores en baño de aceite, siempre hay un riesgo residual de que se produzcan y de que se rompa el depósito.

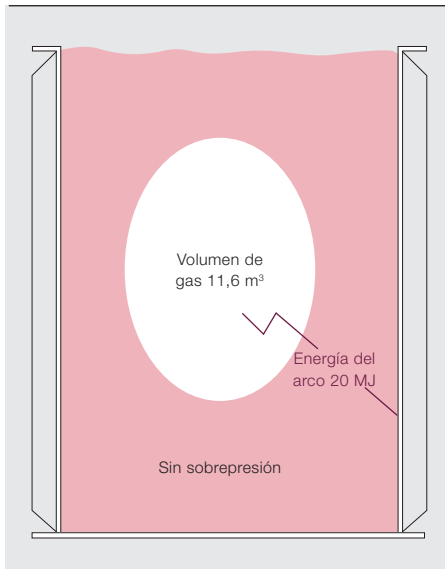
- Técnicas de protección de circuitos como la protección diferencial o la detección de defectos a tierra. Estas técnicas deben tener la solidez suficiente para hacer frente a las exigencias diarias de sobrecargas de conexión, desequilibrio de fase y fluctuaciones de carga y la tolerancia suficiente para que no se produzcan cortes molestos.

Incluso con las herramientas de puesta en servicio modernas, en la determinación final de los parámetros de muchos de estos dispositivos persiste un elemento humano.

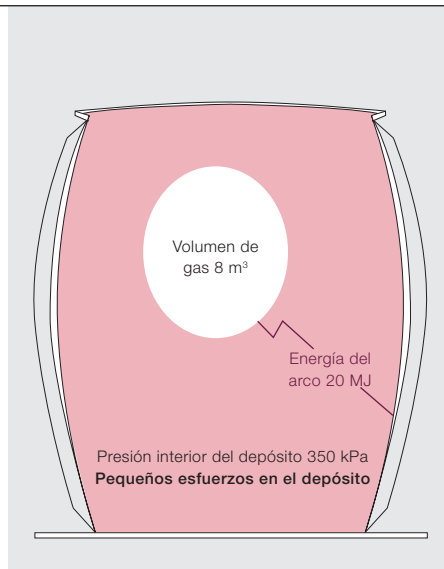
Hay varios métodos mecánicos, como una simple válvula de alivio de presión. El disco de rotura, otro método mecánico con un tiempo de apertura más breve y menor resistencia en la vía de ventilación, requiere un sistema de contención que complica la instalación. Una alternativa es una cámara de expansión de gran volumen. Aquí, un amplio conducto conecta el depósito a una cuba de expansión o un depósito ampliado para

#### Imagen del título

Por muy buenos que sean el diseño y la construcción, siempre hay un riesgo residual de que un transformador se incendie o estalle. Los métodos tradicionales para mitigar los efectos de un suceso de estas características tienen sus inconvenientes. ¿Cómo los evita el concepto de depósito elástico de ABB?



2a Depósito abierto



2b Depósito elástico



2c Depósito rígido

el aceite del transformador. Estos absorben cualquier expansión súbita.

Los transformadores aislados en gas (GIT) evitan el problema del aceite utilizando gas inerte SF<sub>6</sub> para la refrigeración y el aislamiento. Pero el SF<sub>6</sub> es un gas de efecto invernadero muy potente, y el riesgo de fugas es muy preocupante.

#### Concepto de depósito elástico

ABB empezó a estudiar la mitigación del riesgo de incendio en grandes transformadores de potencia en el decenio de 1990. Después de una amplia evaluación en 2007 de los diferentes métodos tecnológicos, se tomó la decisión de profundizar en el concepto de depósito elástico.

La idea es absorber parte de la energía del arco por medio de la deformación del depósito → 2. El depósito está diseñado para romperse por encima de este nivel de energía definido. Por razones de seguridad, el punto de rotura suele estar en el borde de la tapa para reducir el riesgo de proyecciones peligrosas y grandes vertidos de aceite.

El depósito elástico es una solución mejor que el alivio de presión con un disco de rotura o una cámara de expansión

de gran volumen, pues los estudios demuestran que incluso una gran zona de alivio de 1,0 a 1,5 m<sup>2</sup> reduciría la presión máxima solo de un 10 a un 30% durante un fallo de arco, insuficiente para mitigar el riesgo de rotura del depósito en circunstancias normales [4].

#### Resistencia del depósito

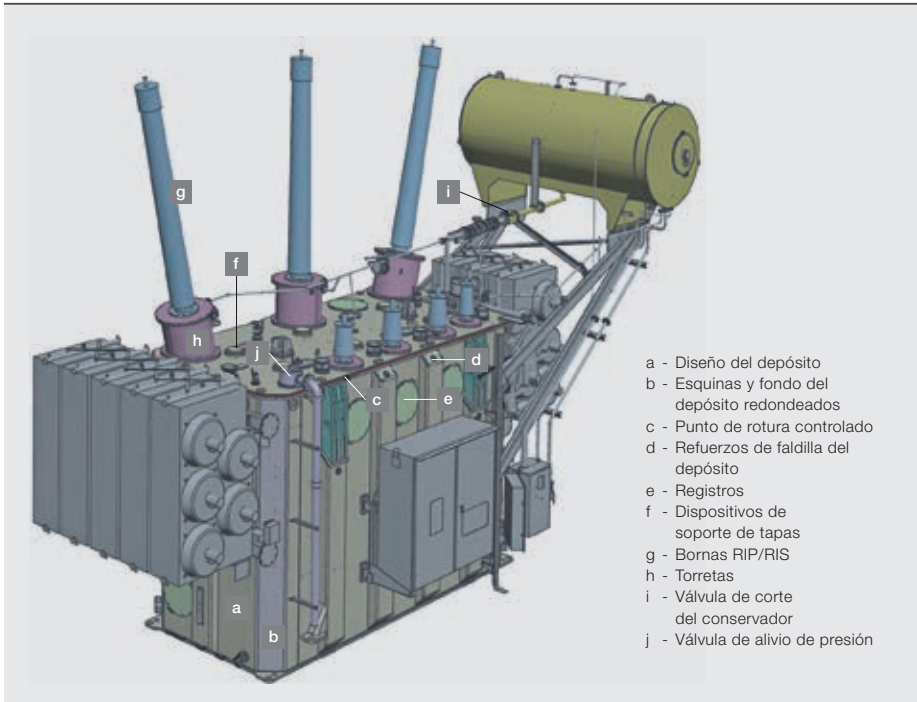
El concepto de depósito elástico incluye muchas características de seguridad que reducen el riesgo de incendio del aceite o de vertido grave durante un fallo interno → 3.

Después de una amplia evaluación en 2007 de los diferentes métodos tecnológicos, se tomó la decisión de profundizar en el concepto de depósito elástico.

#### Diseño del depósito y punto de rotura controlada (→ 3, a y c)

Se realizó una simulación numérica tridimensional para verificar la resistencia teórica del depósito. Este análisis de elementos finitos (FEA) incluyó propiedades no lineales del material, el gran efecto de deflexión, un cuidadoso refinamiento del mallado y un análisis de los resultados realizado por un ingeniero experimentado. Aplica el modelo de estado cuasi estacionario, basado en la hipótesis conservadora de expansión isotérmica de la

### 3 Resistencia del depósito



Por razones de seguridad, el punto de rotura suele estar en el borde de la tapa para reducir el riesgo de proyecciones peligrosas y grandes vertidos de aceite.

#### 4 Fallo de los refuerzos del reborde del depósito



#### 5 Prueba experimental del registro



burbuja de gas y distribución uniforme de la presión amplificada por un factor dinámico. La resistencia del depósito es una función de la predicción controlada del punto de rotura predefinido en la soldadura de la tapa. Los resultados de la evaluación se detallan en un informe técnico que se entrega en la etapa de pedido del transformador.

#### Esquinas y fondo del depósito redondeados (→ 3, b)

Las uniones soldadas de las esquinas de las paredes del depósito y las que unen las paredes a la placa de la base son los puntos de fallo más probable durante un arco interno. El diseño de depósito elástico incluye esquinas redondeadas para alejar la unión soldada de este punto de esfuerzo elevado. Además, una conexión elástica entre la pared del depósito y la placa inferior reduce el riesgo de

rotura. Para mayor seguridad, todas las uniones soldadas de la pared del depósito son de penetración completa certificadas con ultrasonidos durante la fabricación.

#### Refuerzos del reborde del depósito y dispositivos de soporte de la tapa (→ 3, d y f)

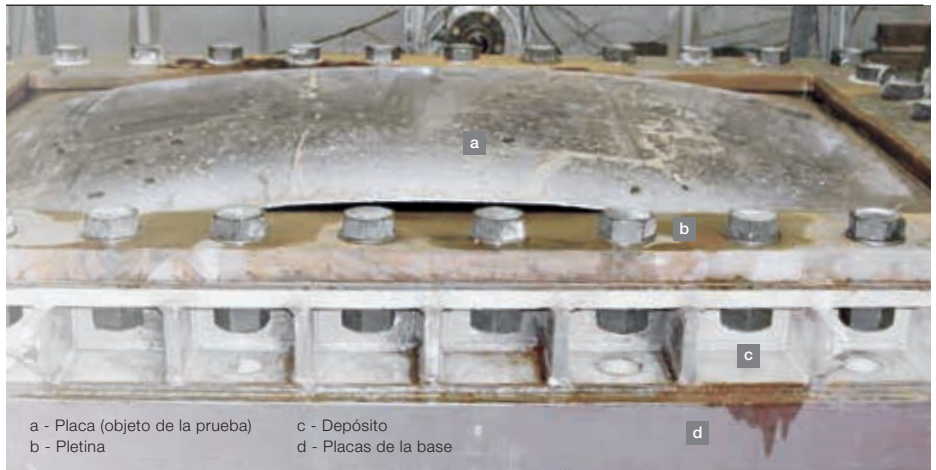
Los refuerzos del reborde del depósito y los soportes de la tapa reciben una carga elevada y serán los que primero fallen durante un arco → 4. Este comportamiento se observó durante las investigaciones de fallo del transformador y se incorporó a la rutina de evaluación FEA para mejorar la precisión del resultado.

#### Registros y torretas (→ 3, e y h)

La resistencia del registro del depósito bajo sobrepresión ha superado satisfactoriamente la prueba en el laboratorio del IREQ (Institut de recherche d'Hydro-Que-



Para mayor seguridad, todas las uniones soldadas de la pared del depósito son de penetración completa certificadas con ultrasonidos durante la fabricación.



bec) [5] → 5. Este mismo sistema de pernos con juntas tóricas se aplica a las torretas, las válvulas y las conexiones de bornas.

#### Bornas RIP y RIS (→ 3, g)

Las bornas RIP y RIS mitigan el riesgo de vertidos graves de aceite, incendios y roturas del revestimiento porcelánico durante un arco interno. Contienen, como mucho, una pequeña cantidad de aceite.

#### Válvula de corte del conservador y válvula de alivio de presión (→ 3, i y j)

La válvula de corte del conservador se monta en el tubo de aceite que une el conservador al depósito → 6. La válvula de corte permite el flujo de aceite en ambas direcciones, pero para mitigar el riesgo de vertido de aceite desde el conservador, se cierra y activa una alarma si el caudal supera un límite determinado.

#### Experiencia de ABB

Como ya se ha dicho, ABB empezó a estudiar la limitación del riesgo de rotura del depósito en el decenio de 1990, y ha acumulado abundantes conocimientos sobre el particular. En 2007, la fábrica de ABB en Varennes, Canadá, empezó a diseñar depósitos con arreglo al concepto de depósito elástico. Durante los últimos cinco años, hemos diseñado, analizado y entregado más de 20 depósitos elásticos, incluidos autotransformadores, elevadores para generador, reactancias shunt y transformadores trifásicos y monofásicos, y hemos aprendido mucho con este trabajo. El desarrollo continuo de ABB ha culminado en una buena correlación

entre las predicciones de fallo del FEA y las pruebas experimentales, y ha demostrado que el método de mitigación del riesgo de rotura más eficaz y más sencillo es el depósito elástico → 7.

#### Samuel S. Brodeur

#### Yasser S. Salmi

ABB Power Grids,  
Large and Medium Power Transformers  
Varennes, Canadá  
samuel.s.brodeur@ca.abb.com  
yasser.s.salmi@ca.abb.com

#### Andrew Collier

ABB Power Grids,  
Large and Medium Power Transformers  
Bad Honnef, Alemania  
andrew.collier@de.abb.com

#### Referencias

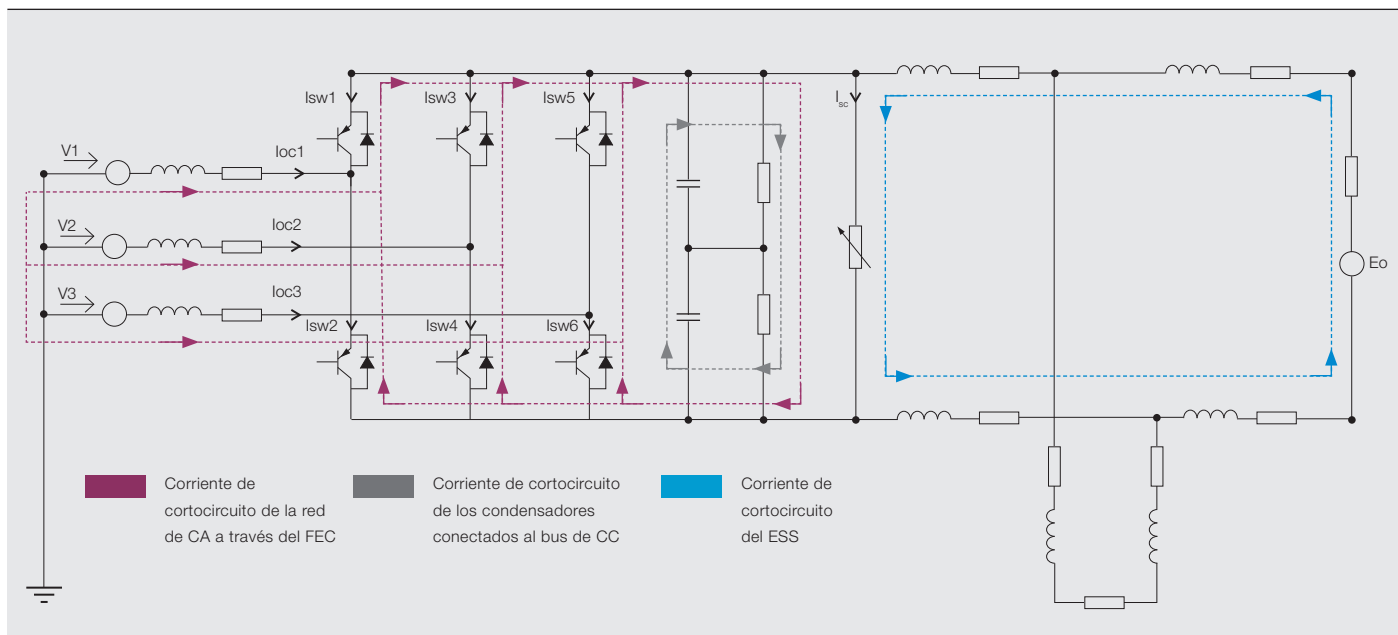
- [1] M. Foata and J.-B. Dastous, "Power transformer tank rupture prevention," Cigré, Paris, 2010.
- [2] Cigré, "Guide for transformer fire safety practices – Working Group A2.33," Cigré – Technical Brochure 537, 2013.
- [3] J.-B. Dastous *et al.*, "Numerical method for the investigation of fault containment and tank rupture of Power Transformers," IEEE Transactions on power delivery, vol. 25, pp. 1657–1665, July 2010.
- [4] M. Foata, "Transformer fire risk and mitigation," in Cigré Session 2010, Paris.
- [5] S. Beauregard *et al.*, "Essai en pression du trou d'homme sur enceinte rigide," IREQ report EMMH-2013-015, Varennes, 2013.



# Proteger y sobrevivir

Análisis de la protección de fallos en microrredes de CC de baja tensión con generadores fotovoltaicos

MARCO CARMINATI, ENRICO RAGAINI – La conexión de microrredes basadas en energías renovables a redes eléctricas nacionales presenta muchas ventajas. No obstante, hay que tener cuidado al unir estos dos mundos eléctricos tan distintos para manejar adecuadamente las condiciones de fallo, en particular cuando una microrred con una instalación fotovoltaica (FV) o un sistema de almacenamiento de energía (ESS) se conecta a la red con un convertidor “front-end” (FEC). Esta configuración puede dejar que corrientes de fallo de la red de CA pasen directamente a través del convertidor y agraven el fallo. La mayoría de los FEC de uso general se basan en transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) combinados con diodos supresores y no son capaces de cortar las corrientes de fallo en todas las situaciones. Por lo tanto, hace falta un sistema de protección específico para asegurar la eliminación de fallos y la seguridad, especialmente con ESS o generadores de CC.



La conexión a sistemas de CA de microrredes de corriente continua de baja tensión (CC BT) que incluyen plantas FV está cobrando mucha importancia, ya que cada vez hay más fuentes renovables conectadas a redes nacionales. Aparte de las consideraciones eléctricas usuales sobre la conexión de estos dos mundos, debe prestarse atención a las condiciones de fallo ya que, dependiendo de los distintos esquemas de conexión a tierra, las plantas FV y ESS y sus electrónicas asociadas pueden comportarse de forma distinta durante los fallos, con distintas consecuencias para el funcionamiento de la red y el comportamiento de fallo.

**Imagen del título**  
 Cuando se conectan microrredes con fuentes renovables a la red nacional hay que adoptar medidas especiales para proteger los equipos de aquellas de los fallos de la red.

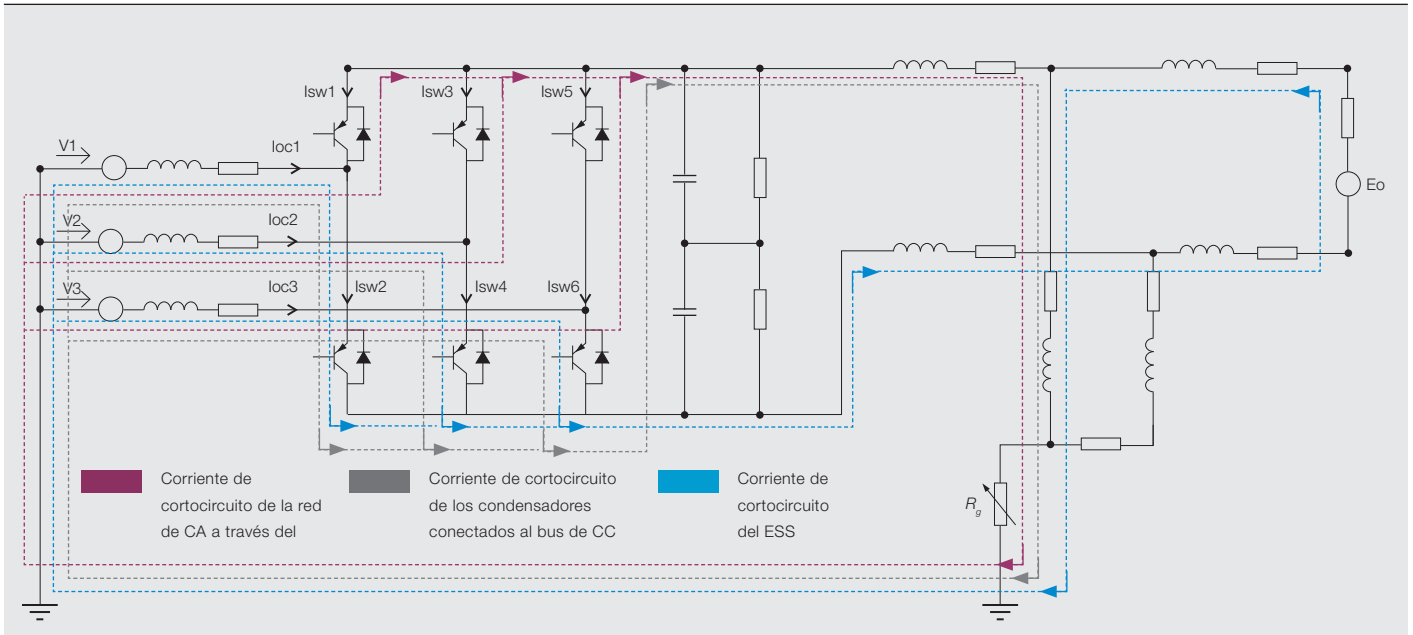
En una microrred CC BT, la sección de CC está separada normalmente de la red de CA mediante un FEC que vierte cualquier exceso de potencia de la microrred en la red de CA.

La cuestión más crítica es que cuando se producen cortocircuitos y defectos a tierra en el lado de CC, la mayoría de los convertidores de tipo general son incapaces de limitar las corrientes de fallo. Esto ocurre en convertidores basados en IGBT con diodos supresores antiparalelos.

## Hay que pensar cómo tratar las condiciones de fallo, pues las plantas FV y los ESS y sus electrónicas asociadas pueden comportarse de forma distinta durante los fallos.

los, el diseño más común → 1. Los diodos supresores del FEC permiten el paso de grandes intensidades de la red de CA. Por lo tanto, hacen falta diseños de protección especiales. (Conviene señalar que no se pueden emplear rectificadores de tiristores como convertidores “front-end”, porque cuando se invierte el sentido de la corriente hay que cambiar la polaridad de la tensión, con graves consecuencias, obviamente, para los dispositivos conectados a la barra de CC.)





Si se han instalado interruptores de dimensiones adecuadas, aunque la energía que circula por ellos haga que se sobrecalienten los semiconductores, se limita la intensidad, se mantiene la seguridad y se evitan otros daños a la instalación.

Los dos tipos principales de fallos que tienen que proteger estos diseños son cortocircuitos de CC y defectos a tierra.

#### Lado de CC: cortocircuito

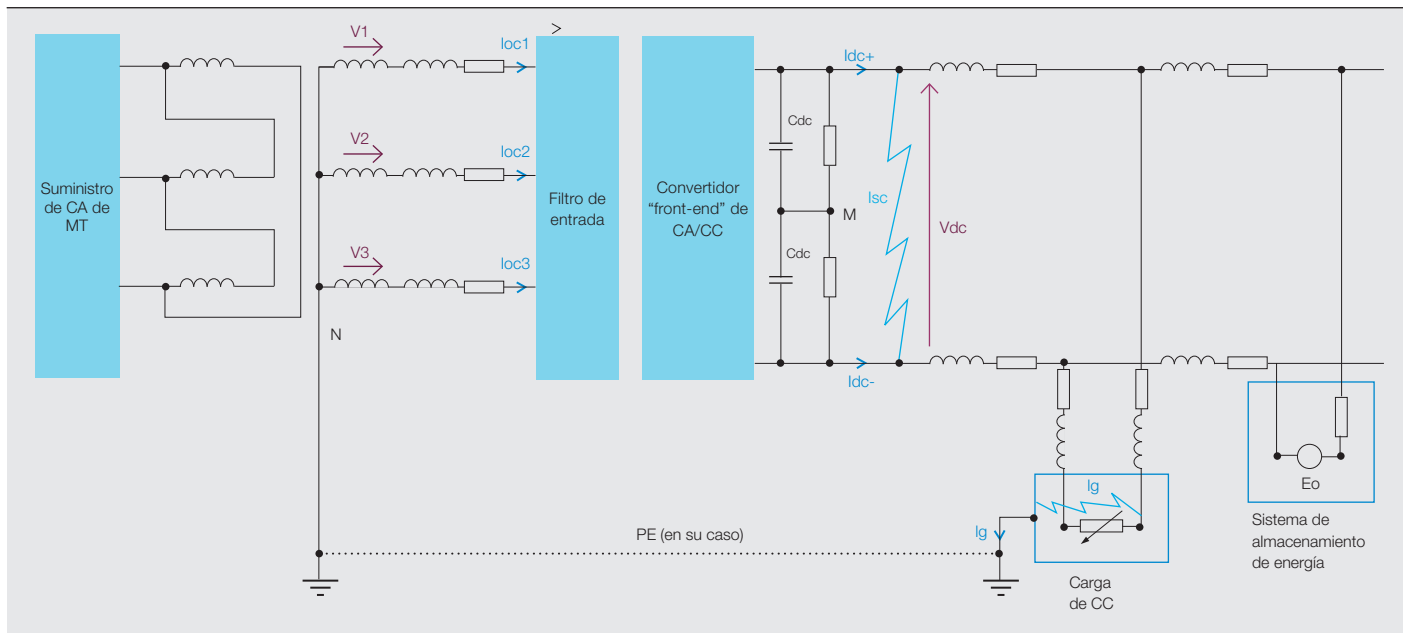
Cuando se produce un cortocircuito entre los terminales de una barra de CC de una microrred sin ninguna fuente en el lado de CC, pueden presentarse diversas situaciones, que dependen del valor de la resistencia de fallo: para valores altos de la resistencia de fallo, el FEC puede mantener la tensión de CC en su valor nominal, pero por debajo de cierto valor, el FEC empieza a trabajar en modo de sobremodulación.

La condición límite se produce cuando la resistencia de cortocircuito es muy pequeña, casi nula. En este punto, como la corriente circula en los diodos supresores, el FEC trabaja como rectificador en estado de cortocircuito. En este caso, la intensidad ya no se ve limitada por el FEC. La corriente de cortocircuito es la suma de las contribuciones de la red de CA a través del FEC, desde los condensadores conectados a la barra de CC y desde los generadores de CC o el ESS, si los hay → 1.

Si está instalada una planta FV o un ESS en el lado de CC, el generador activo proporciona una corriente de fallo adicional, y cada contribución depende de la estructura de la microrred. Por otra parte, el componente activo, que incluye

Cuando se producen cortocircuitos y defectos a tierra en el lado de CC, la mayoría de los convertidores de tipo general son incapaces de limitar las corrientes de fallo.

un controlador con su propio bucle de realimentación de tensión, también ayuda a mantener la tensión de CC en un valor mayor que en una red de CC pasiva. Por tanto, los valores de la resistencia de cortocircuito para la que el convertidor comienza a limitar la corriente absorbida del lado de CA, y en los que el control empieza a trabajar en condiciones de sobremodulación, son menores que en una red de CC pasiva.



## Los dos tipos principales de fallos contra los que deben proteger los diseños son cortocircuitos de CC y defectos a tierra.

Esto significa que, en sistemas equipados con una planta FV o un ESS no es posible calcular la corriente de fallo superponiendo los valores que se obtendrían de cada fuente, porque cada una de ellas afecta a las demás de formas que no son evidentes. Deben calcularse entonces en cada caso las corrientes de fallo, teniendo en cuenta la totalidad del sistema.

### Lado de CC: defecto a tierra

Las secciones de CC de las instalaciones eléctricas están generalmente aisladas de tierra. Por otra parte, por razones de seguridad, el transformador del lado de CA del FEC está normalmente puesto a tierra.

Cuando se produce un defecto a tierra en el lado de CC, pueden circular corrientes de fallo a través del convertidor, con resultados inesperados.

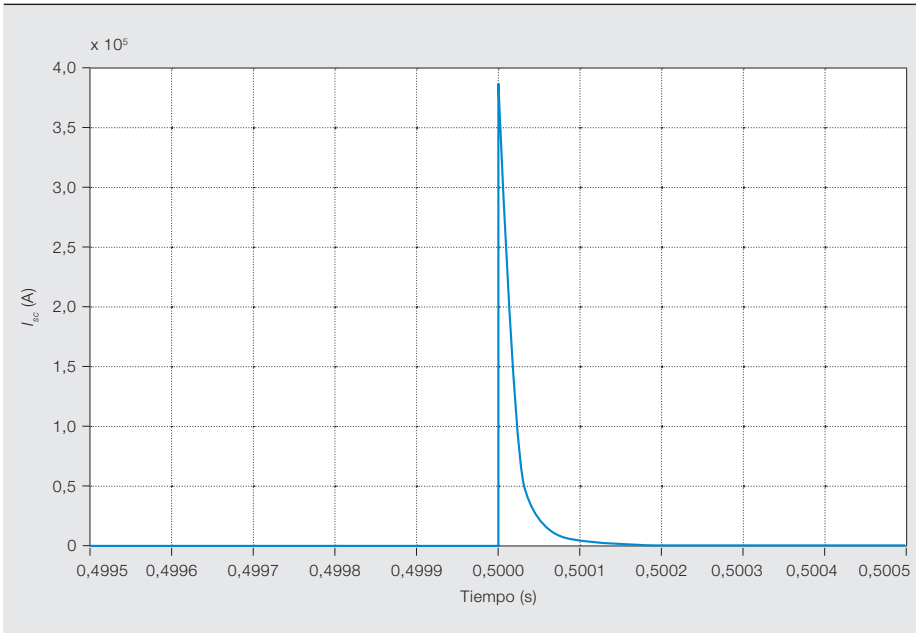
En una red de CC pasiva, dependiendo de la resistencia de fallo, pueden también presentarse situaciones similares a las descritas, con el convertidor pasando al modo de sobremodulación y, finalmente compor-

tándose como un rectificador. Un generador FV, o un ESS, aunque contribuyen a mantener la tensión de CC en un valor mayor que una microrred pasiva comparable solo de CC, proporcionan una vía de retorno para una componente de corriente unidireccional con valores bajos de resistencia de fallo.

De hecho, un defecto a tierra en uno de los dos polos de la red de CC genera una vía de retorno para la corriente hacia el punto neutro de CA. Para valores bajos de resistencia de fallo y si el fallo se produce en el polo positivo, la contribución al fallo de la red de CA pasa por los diodos supresores de la estrella catódica del FEC, mientras que la contribu-

## En sistemas equipados con una planta FV o un ESS no es posible calcular la corriente de fallo superponiendo los valores que se obtendrían de cada fuente, porque cada una de ellas afecta a las demás de formas que no son evidentes.

ción del ESS pasa por los IGBT de la estrella anódica del FEC → 2.



En caso de cortocircuito de CC con baja resistencia de fallo, la corriente de fallo entra en los diodos supresores sin que los IGBT puedan limitarla en forma alguna.

La situación se invierte si el fallo se produce en el polo negativo de la CC.

Esto puede hacer que salgan corrientes de ambos terminales de CC del FEC en vez de sólo uno, como es lo normal. Dichas corrientes pueden ser suficientes para dañar el FEC, pese a lo cual es un error frecuente despreciarlas cuando se calcula la corriente de defecto a tierra en la fase de diseño.

En aplicaciones reales, el sistema de protección electrónica integrado en el convertidor mide la tensión a través del IGBT cuando se activa su puerta. Si su tensión es superior a un umbral dado, el circuito de control apaga el IGBT desactivando la puerta. Esta protección, llamada DESAT (desaturación), bloquea los IGBT pocos microsegundos después de que la corriente que los atraviesa supera un límite prefijado. Por tanto, la contribución de la corriente de fallo de la planta FV, o del ESS, se corta desactivando la modulación de la señal que regula los IGBT del FEC. No obstante, la contribución del fallo de la red de CA sigue siendo alimentada por el FEC a través de sus diodos supresores no controlados. Por tanto, debe instalarse un dispositivo externo de protección adecuado que interrumpa la corriente de fallo y proteja el FEC.

#### Estudio de un caso

Se llevaron a cabo varias simulaciones para analizar el comportamiento de la microrred de → 3 durante cortocircuitos

de CC y defectos a tierra. Normalmente, el punto neutro se conecta directamente a tierra para evitar una transferencia de tensión peligrosa al lado de baja tensión (BT) en caso de fallo entre los devanados del primario y el secundario.

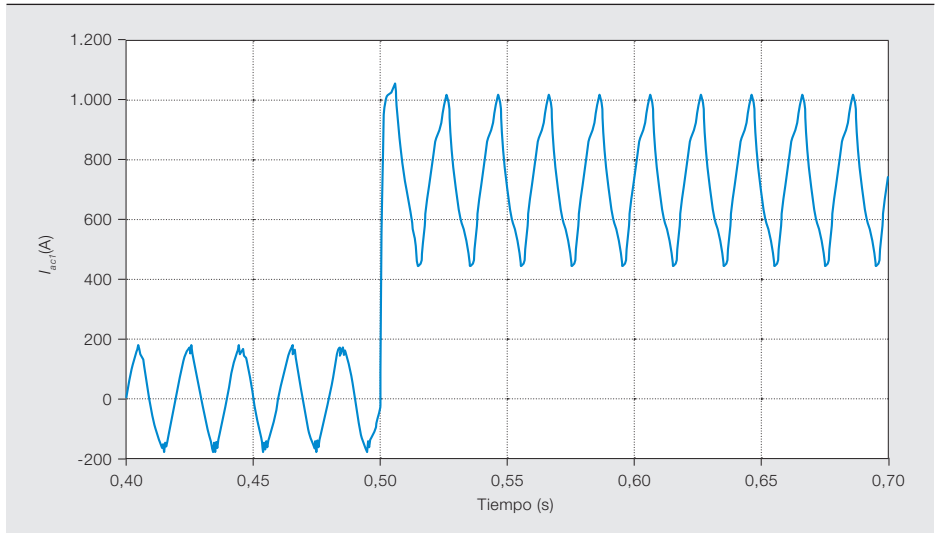
En caso de cortocircuito de CC con baja resistencia de fallo, la corriente de fallo entra en los diodos supresores sin que los IGBT puedan limitarla en forma alguna, ni siquiera si el sistema de control envía una señal de bloqueo del IGBT. En este caso, apagar la modulación del IGBT es inútil, porque el diodo conectado en antiparalelo al IGBT hace que el FEC trabaje como rectificador de diodos trifásico. Las intensidades en juego pueden ser varias veces superiores a la intensidad nominal del FEC en el lado de CC (125 A, con  $R_{sc} = 1 \text{ m}\Omega$ ) → 4.

Con bajas resistencias de fallo, la contribución del FEC a la corriente de cortocircuito puede alcanzar valores de hasta 16 veces la intensidad nominal del FEC en el lado de CC.

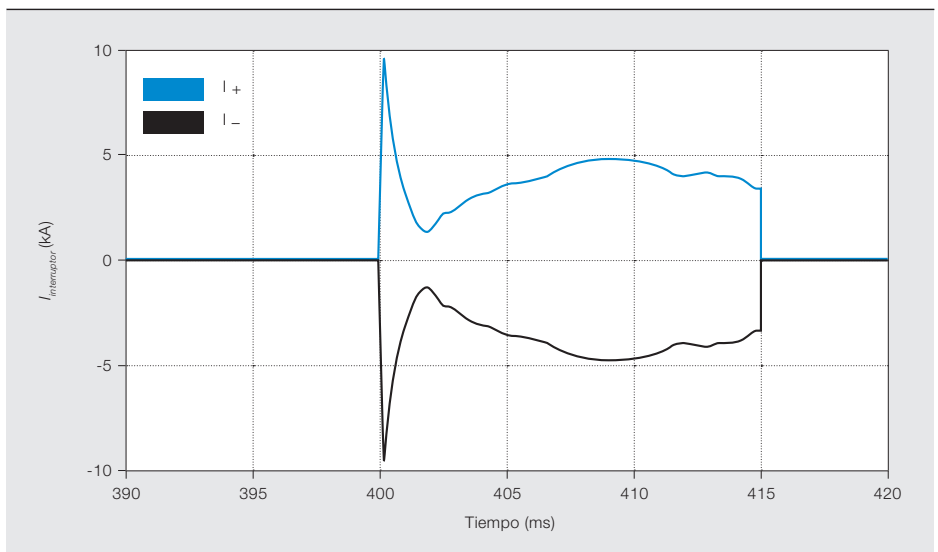
En caso de derivación a tierra de CC con baja resistencia de fallo, la corriente de fallo entra en los diodos supresores de la estrella catódica sin que los IGBT puedan limitarla en forma alguna, y también en los IGBT de la estrella anódica. Las intensidades alcanzan valores varias veces el de la nominal del FEC en el lado de CC (125 A,  $R_g = 100 \text{ m}\Omega$ ) [1]. El apagado de la modulación del IGBT puede

Con el creciente número de interconexiones entre microrredes de CC BT y redes de CA, las protecciones sofisticadas frente a fallos serán una parte esencial del diseño de sistemas eléctricos.

5 Tendencia de la corriente  $I_{ac1}$  durante un defecto a tierra en el lado de CC con ESS y  $R_g = 100\text{ m}\Omega$



6 Corrientes que circulan en los dos polos del interruptor



interrumpir únicamente la contribución del ESS.

Dependiendo del valor de R, la corriente en el lado de CA puede ser completamente positiva y todo el componente de CA que es absorbido por el convertidor durante un fallo alimenta el fallo [1] → 5.

Con la disminución de R, la contribución del FEC a la corriente de cortocircuito puede alcanzar valores de hasta 27 veces la intensidad nominal del FEC en el lado de CC. Una contribución de ese tipo no puede ser eliminada por el bloque de IGBT, pues atraviesa los diodos supresores.

#### Análisis de la protección de fallo

Conviene señalar que, mientras para la protección de cortocircuitos de CC se puede emplear un interruptor unipolar, para los defectos a tierra es necesario uno bipo-

lar, porque el sistema FV y el ESS pueden alimentar el fallo a través del polo de CC en buen estado y, además, las probabilidades de que el defecto afecte a los polos positivo y negativo de CC son iguales.

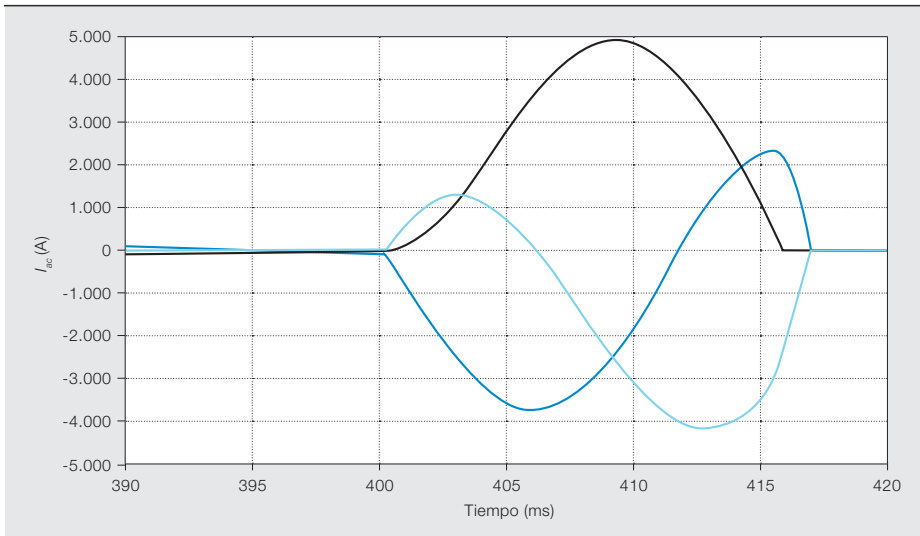
#### Análisis de cortocircuitos de CC

Para simular cortocircuitos de CC, se apaga la modulación tras un tiempo de protección DESAT típico (2  $\mu\text{s}$ ), mientras se retrasa el disparo 15 ms para simular un interruptor de CC → 6 [2].

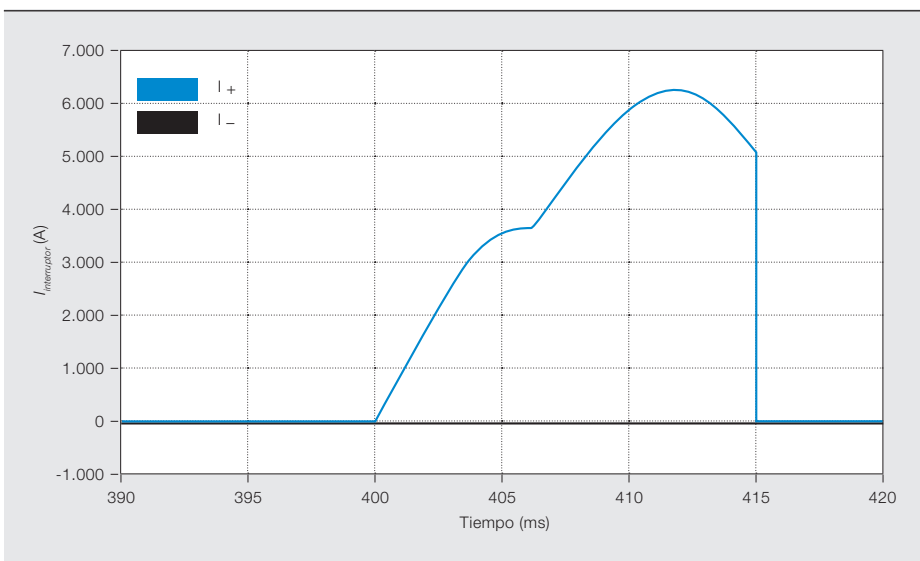
Para reducir la sobretensión, el interruptor se sitúa después de las capacitancias de la barra de CC. Debido a la protección DESAT, las intensidades indicadas en → 7 entran en los diodos del FEC.

El contenido de energía de un transitorio (el  $I^2t$ ) durante una interrupción es de unos 170 kA<sup>2</sup>s. Este valor es excesivo

## 7 Corrientes de CA en las tres fases durante el disparo del interruptor



## 8 Corrientes que circulan en los dos polos del interruptor



para el FEC utilizado. Para los semiconductores considerados en la simulación, el valor de  $I^2t$  admisible es de 42 kA<sup>2</sup>s. Por lo tanto, hay que sobredimensionar los diodos para que el FEC sea capaz de soportar los transitorios.

### Análisis del defecto a tierra

Se simuló el mismo fallo descrito anteriormente entre el polo positivo de CC y tierra, con interrupción mediante un interruptor de CC [2]. Las corrientes de CA resultantes fueron similares a las del cortocircuito entre polos. Por otra parte, las corrientes que circulan por los polos de CC del FEC son muy distintas → 8. En efecto, la corriente a través del polo defectuoso aumenta mientras la otra permanece próxima a cero, gracias a la protección DESAT. La  $I^2t$  es de unos 157 kA<sup>2</sup>s y es comparable a la del cortocircuito. Una vez más, hay que sobredimensionar los diodos.

En resumen, no pueden ignorarse los defectos entre polos y entre polo y tierra en las redes de CC alimentadas por un FEC y equipadas con sistemas de generación FV y/o ESS. Además, la protección DESAT no basta para proteger los componentes de conmutación del FEC, puesto que el apagado de la modulación IGBT no limita las corrientes que atraviesan los diodos supresores. Por ello hay que incorporar y dimensionar con cuidado aparatos de protección especiales para interrumpir de forma segura las corrientes de fallo y limitar los daños consiguientes.

Con el creciente número de interconexiones entre microrredes de CC BT y redes de CA, las protecciones sofisticadas frente a fallos serán una parte esencial del diseño de sistemas eléctricos.

**Marco Carminati**

**Enrico Ragaini**

ABB Electrification Products,  
Protection and Connection  
Bérgamo, Italia  
marco.carminati@it.abb.com  
enrico.ragaini@it.abb.com

### Referencias

- [1] M. Carminati *et al.*, "DC and AC ground fault analysis in LVDC microgrids with energy storage systems," in *Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Rome, 2015, pp. 1047–1054.
- [2] M. Carminati *et al.*, "Fault protection analysis in low-voltage DC microgrids with PV generators," in *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact*, Taormina, 2015, pp. 190–197.



# Prueba de accionamientos

El nuevo laboratorio de prueba de ABB permite a los clientes optimizar combinaciones motor-accionamiento

JUKKA JUOTTONEN – Situado junto a la fábrica de accionamientos de ABB en Helsinki, este laboratorio es uno de los pocos centros de pruebas de ABB destinados principalmente a clientes externos. Proporciona mediciones de alta precisión del rendimiento dinámico, la capacidad de carga y la eficiencia de accionamientos y motores para que el cliente determine el sistema óptimo para su

aplicación y reduzca los costes, el tamaño del equipo y el consumo de electricidad. Las mediciones se obtienen con un sistema de precisión extrema. Además, en el laboratorio se prueba el control del motor y se emparejan accionamientos de ABB con motores de los clientes para que éstos determinen con rapidez y exactitud si quieren a ABB como nuevo proveedor.



En las últimas décadas, el número de motores diseñados para trabajar con accionamientos ha aumentado sustancialmente. Además, el precio de los accionamientos no ha dejado de bajar y su calidad ha mejorado considerablemente. Al mismo tiempo, los fabricantes de máquinas y otros usuarios han percibido el atractivo económico de los accionamientos.

En el nuevo laboratorio de prueba de accionamientos de ABB → 1, los clientes pueden verificar a ABB como nuevo proveedor con un trabajo mínimo. Antes de que un nuevo producto de ABB entre en la producción en serie, se puede probar en el laboratorio una combinación de motor y accionamiento. Para el cliente, es una forma fácil y fiable de determinar un sistema de accionamiento óptimo para su aplicación.

#### Imagen del título

El nuevo laboratorio de ABB permite al cliente controlar sus motores con accionamientos de ABB y cerciorarse de que han elegido el accionamiento idóneo.

(Para ir sobre seguro, el cliente elige a veces un accionamiento mayor de lo necesario, con una protección y un cableado igualmente sobredimensionados.)

#### Ventajas para el cliente: optimización y verificación

Este laboratorio de ABB es un concepto totalmente nuevo dirigido sobre todo a clientes de gran volumen, como OEM (fabricantes de equipo original), integradores de sistemas y socios relevantes de ABB del sector de la construcción de maquinaria, por ejemplo.

Antes de realizar una inversión sustancial en accionamientos, el cliente quiere ver mediciones objetivas y pruebas de funcionalidad.

Antes, el cliente no podía probar –al menos no a este nivel– sus motores en instalaciones de ABB, pero ahora tiene la oportunidad de obtener mediciones precisas del comportamiento dinámico, la respuesta a la carga y la eficiencia y utilizar estos datos para verificar sus accionamientos.

El laboratorio verifica también el comportamiento del control del motor y asocia los motores del cliente con accionamientos de ABB. Esto es particularmente útil cuando el cliente toma decisiones sobre un nuevo producto. Los clientes llevaban años demandando un servicio de este tipo, y meses antes de inaugurar el laboratorio, ya había lista de espera.

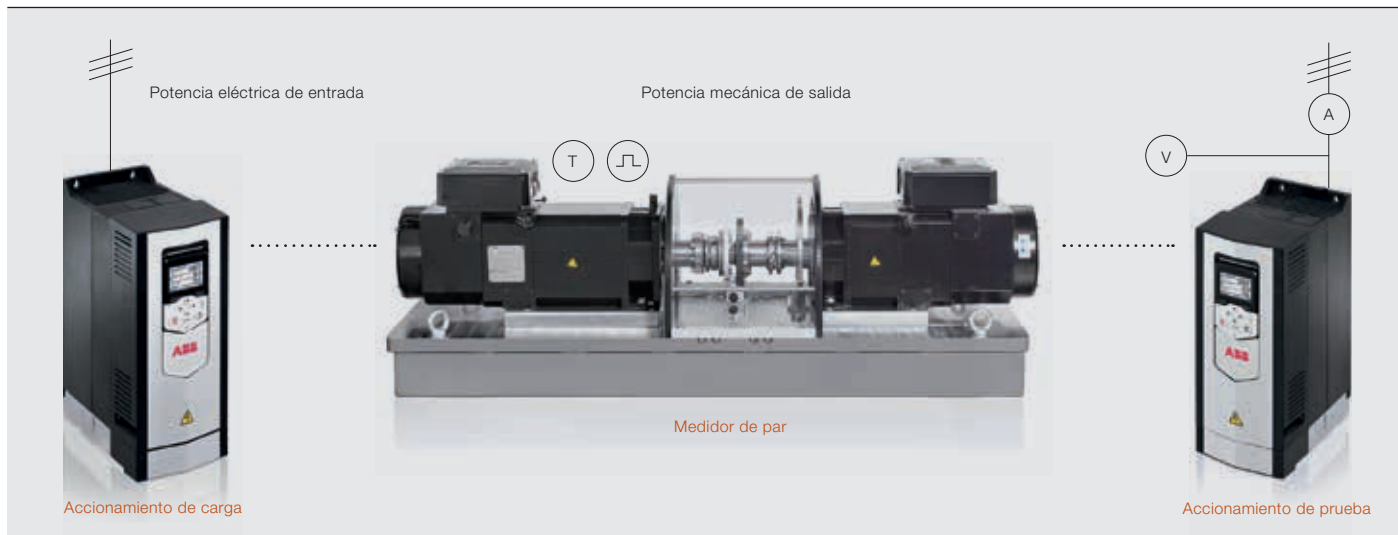
El cliente suele enviar el motor al laboratorio con algunas semanas de antelación para preparar el entorno de prueba adecuado. Un equipo del cliente presencia

---

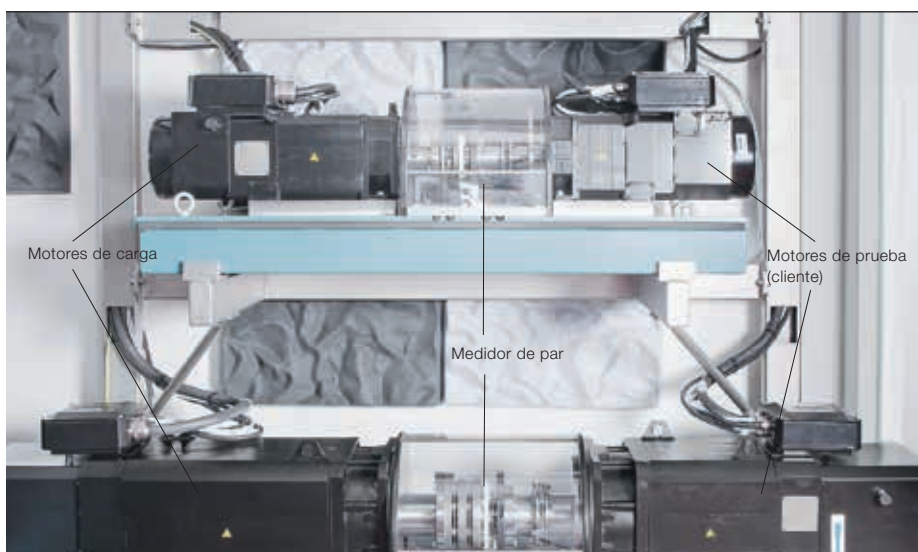
Este laboratorio es un concepto totalmente nuevo dirigido sobre todo a clientes de gran volumen, como OEM, integradores de sistemas y socios relevantes de ABB.

la prueba y asiste a la recopilación de datos en tiempo real. Estas mediciones extremadamente precisas garantizan que el sistema funciona tal como se especifica.

## 2 El accionamiento de carga simula la carga de la aplicación del cliente y mide el comportamiento del accionamiento probado.



## 3 Motores de prueba (derecha) y de carga (izquierda)



Así se conoce el comportamiento del sistema de accionamiento necesario y se puede elegir el más adecuado y adaptarlo a la aplicación del cliente.

Las mediciones exactas, objetivas y verificadas así obtenidas permiten al cliente fundamentar su decisión y acortar el proceso de compra.

### Mediciones de alta precisión

Un elemento clave del laboratorio es un equipo de medición del par preciso y fiable válido para casi

cualquier motor de hasta 385 kW → 2-4. Hay tres configuraciones para tres

diferentes alturas de eje (100, 160 y 250 mm).

Los motores de carga son modelos HDP (alto rendimiento dinámico) de ABB. El motor de carga y el de prueba están conectados a un accionamiento de ABB.

En el nuevo laboratorio de prueba de accionamientos de ABB, el cliente puede verificar un sistema de accionamiento con un trabajo mínimo.

El de carga simula la carga real en la aplicación del cliente. Así se puede veri-



#### 4 Transductor de par digital con un sistema magnético de medición de la velocidad de giro



El laboratorio verifica el comportamiento del control del motor y asocia los motores del cliente con accionamientos de ABB.

#### 5 Laboratorio del cliente – perspectiva técnica

##### Pruebas y parámetros

- Parámetros: medidas eléctricas y mecánicas
- Pruebas: dinámica, capacidad de carga, eficiencia en distintos puntos de carga, puntos de carga adaptables
- Trabajo de los accionamientos de ABB con distintos ajustes de velocidad y par

##### Métodos

- Se mide la potencia eléctrica en la red antes del accionamiento de prueba de ABB.
- Se mide la potencia mecánica entre los motores de prueba y de carga.
- Una vez medidas las potencias eléctrica y mecánica, se puede calcular la eficiencia del sistema.

##### Equipamiento

- Analizador de potencia de precisión WT3000 de Yokogawa
- Medidor de par HBM T40B
- Sistema de medida de intensidad de alta precisión HiTec MACC Plus

##### Valores mínimo y máximo que se pueden comprobar

- Tres configuraciones: la mayor hasta 385 kW; la menor hasta 8,2 kW (el punto de carga menor es del 25 por ciento)
- Medidor de par: hasta una velocidad de 20.000 rpm

ficar y optimizar la combinación de motor y accionamiento.

Además de los motores del cliente, se pueden probar todos los motores de ABB.

También se pueden medir la velocidad, el par y la eficiencia en cualquier punto operativo, y el cliente puede definir sus propios puntos de prueba → 5.

Se espera que este nuevo laboratorio refuerce a ABB como socio ágil y flexible. Este centro subraya la importancia vital de este tipo de colaboración con los clientes, especialmente con los del sector de la construcción de máquinas.

Antes de añadir un proveedor nuevo a la producción en serie, el cliente puede probar en el laboratorio una combinación de motor y accionamiento para asegurarse de que es la idónea para su aplicación.

##### Jukka Juottonen

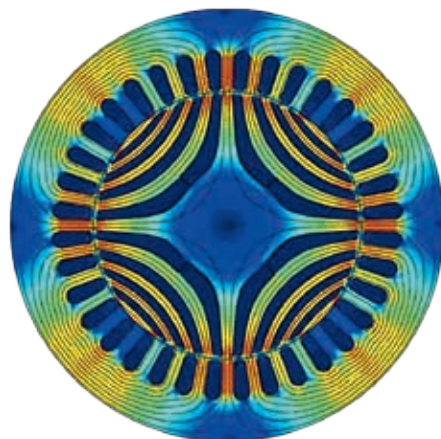
ABB Discrete Automation and Motion,  
Drives and Controls  
Helsinki, Finlandia  
jukka.juottonen@fi.abb.com



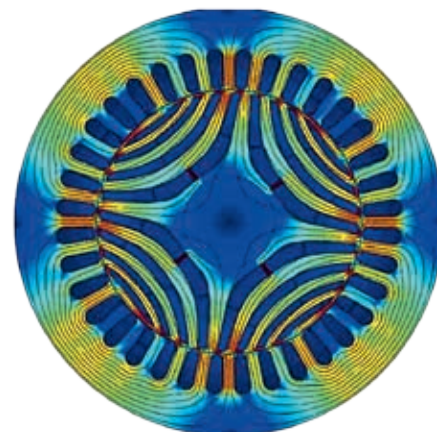
# Fuerza impulsora

Los motores eléctricos sin tierras raras y ultraeficientes ofrecen soluciones sostenibles y fiables

FREDDY GYLLENSTEN, PETER ISBERG, ALESSANDRO CASTAGNINI, GIULIO SECONDO, JOUNI IKÄHEIMO, ARI TAMMI – En los motores eléctricos de alta eficiencia utilizados en aplicaciones industriales se suelen emplear imanes permanentes que contienen tierras raras (REE), como el neodimio y el disprobio. Estos elementos están sujetos a las variaciones de precio propias de la demanda cambiante del mercado. Avances recientes de la tecnología de motores con accionamiento de velocidad variable (VSD) permiten ahora construir motores de alto rendimiento sin REE. Uno de ellos es el motor de reluctancia síncrono (SynRM), caracterizado por la elevada eficiencia energética, la fiabilidad y el excepcionalmente sencillo mantenimiento. Otro es el motor de reluctancia síncrono (SynRM<sup>2</sup>) con ferrita, más eficiente y potente que el SynRM.



1a El rotor está alineado con el campo magnético, por lo que no se produce par.



1b El rotor no está alineado con el campo magnético y se produce par (en sentido contrario a las agujas del reloj).

Si bien existen desde hace más de un siglo, los motores eléctricos continúan experimentando saltos innovadores y, en los últimos años, se observa un notable progreso en su eficiencia.

Dado que intervienen en una parte considerable de la conversión de energía (el 28–30% de toda la electricidad se convierte en energía mecánica en motores eléctricos), se presta una atención especial a su eficiencia y, en todas las regiones industrializadas, hay normas de eficiencia mínima (MEPS). Para reducir aún más el consumo y las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria, la legislación regional establece en ocasiones un nivel mínimo más elevado. En breve se adoptará en todas las regiones industrializadas el llamado nivel de clasificación IE3 como requisito mínimo para casi toda la gama de potencias de los motores eléctricos de baja tensión directos-en línea (DOL) de 0,12 a 1.000 kW y de 50 a 1.000 V. Por ahora no hay requisitos similares para los motores VSD, pero probablemente no tardará en haberlos.

#### Imagen del título

Los nuevos SynRM y SynRM<sup>2</sup> de ABB suponen un gran paso adelante en la tecnología de motores eléctricos sostenibles en términos de eficiencia y densidad de potencia. La imagen recoge el rotor único del SynRM.

### Motores de inducción

El motor de inducción (IM) es, con diferencia, el más común en la industria. Este motor potente y eficiente no dispone de conmutador ni escobillas, por lo que resulta fiable y fácil de mantener. Se encuentra en desarrollo permanente para mejorar su eficiencia.

Pese a su uso universal, los IM presentan algunos inconvenientes debidos al giro asíncrono, que causa pérdidas de conducción en el rotor que afectan negativamente a la eficiencia, generan más calor y recalientan los cojinetes, con el consiguiente acortamiento de la vida útil.

### Motores de imán permanente

Aunque se conocen desde hace tiempo, los motores de CA de imán permanente (PM) no fueron competencia para los IM hasta el decenio de 1980, con la creación de una nueva generación de imanes permanentes basados en materiales como el neodimio-hierro-boro (NdFeB), que desarrollaron independientemente General Motors y Sumitomo Special Metals en 1982. El requisito para la introducción de estos nuevos imanes en los motores fue el avance paralelo de los accionamientos de CA necesarios para controlarlos.

Los motores PM tienen imanes montados en la superficie del rotor o integrados en él. Además, a diferencia del motor de inducción asíncrono, en el que el rotor “resbala”, es decir, tiene una frecuencia rotacional más baja que el campo magnético que lo impulsa, el motor PM es síncrono, y gira en sincronismo con el campo magnético. Esto ofrece un control de la velocidad más preciso, más eficiencia y una temperatura inferior del rotor/cojinete. Los motores PM eliminan las pérdidas por conducción del rotor, reducen las pérdidas por conducción y efecto Joule del estátor (debido principalmente a la menor corriente) y muestran una curva de eficiencia más plana. También trabajan a menor temperatura que los IM, lo que prolonga la vida útil del aislamiento y los cojinetes. Además, los motores PM ofrecen más par con el mismo tamaño o el mismo par en un paquete más pequeño.

El 28–30% de toda la electricidad se convierte en energía mecánica en motores eléctricos.

Pero el uso de tierras raras (REE), como el neodimio o el disprosio, presenta inconvenientes. Los REE son caros y están sujetos a variaciones del precio. Además, el intenso campo magnético

La norma IEC 60034-30-1 define los límites mínimos para distintas clases de eficiencia de motores que trabajan en línea: motores de inducción y motores con capacidad de arranque en línea, como los PM de arranque en línea (con jaulas como el IM para permitir el arranque) [2]. El problema de definir la eficiencia de los MR sinc y otros conceptos de VSD puro es que actualmente no existen para ellos normas de eficiencia. Pero la normalización está en marcha y una futura IEC 60034-30-2 incluirá estos tipos de motores. La definición de la clase de eficiencia de los SynRM de ABB ha utilizado los valores límite de la IEC 60034-30-1, aunque hayan trabajado con un VSD durante la pruebas de clasificación. El trabajo con un VSD dará lugar siempre a pérdidas mayores del motor para el mismo punto de trabajo que con el régimen sinusoidal propio del trabajo en línea, puesto que el VSD induce altas tensiones armónicas en el motor por conmutación de modulación de amplitud de impulsos (PWM), que se asocia con mayores pérdidas. Las eficiencias declaradas para los SynRM son, por lo tanto, conservadoras.

La temperatura de trabajo más baja de un SynRM tiene muchas ventajas: mayor vida útil del aislamiento e intervalos mayores de engrase o mayor vida útil de los cojinetes.



del rotor puede dificultar el mantenimiento, un aspecto clave para un motor industrial.

Las aplicaciones y los clientes que actualmente se decantan por motores PM pueden buscar alternativas en el futuro, dependiendo de la evolución de los precios y los mercados.

#### Motores sin REE

Una futura solución económica y ecológicamente sostenible puede estar en los motores sin REE. ABB acaba de presentar dos motores de este tipo para ofrecer más eficiencia, densidad de potencia elevada y ausencia de las complicaciones propias de los materiales con REE. Se trata del motor síncrono de reluctancia (SynRM) y del motor síncrono de reluctancia con imán permanente (SynRM<sup>2</sup>) con imanes de ferrita.

#### Motores síncronos de reluctancia para aplicaciones VSD

Los SynRM son supereficientes y se basan en un elegante principio conocido desde hace tiempo, pero que no se ha podido explotar plenamente hasta la reciente aparición de la sofisticada electrónica de control VSD. En los SynRM, el rotor está diseñado para generar una reluctancia magnética (resistencia al flujo de un campo magnético) mínima en una

dirección y máxima en la dirección perpendicular → 1. El rotor gira a la misma frecuencia que el campo del estátor (como en el motor PM). Presentados en la Feria de Hannover de 2011 (ese mismo año, el SynRM obtuvo el Automation Award en la Feria SPS de Alemania), los primeros SynRM de ABB se diseñaron exclusivamente para su funcionamiento a velocidad variable.

Los SynRM funcionan mejor que los IM convencionales. Se pueden diseñar para un rendimiento elevado o para una densidad de potencia elevada con un tamaño menor al de un IM equivalente. Requieren menos mantenimiento, tienen una inercia reducida y son extremadamente fiables.

Sin imanes ni jaula, la construcción del rotor es más sencilla que la de los motores IM o PM.

La temperatura de trabajo más baja de un SynRM tiene muchas ventajas: mayor vida útil del aislamiento e intervalos mayores de engrase o mayor vida útil de los cojinetes (el fallo de los cojinetes es una importante causa de rotura del motor).



Los supereficientes motores SynRM se basan en un elegante principio conocido desde hace tiempo, pero que no se ha podido explotar plenamente hasta la reciente aparición de la sofisticada electrónica de control VSD.

El hardware de un SynRM de ABB es idéntico al de un IM equivalente de ABB. Solo el rotor es diferente. Esto simplifica

se entiende en el marco de referencia utilizado para los motores DOL, que no refleja fielmente el funcionamiento con

VSD; por ejemplo, el excelente rendimiento de los VSD con carga parcial y las pérdidas por armónicos sustancialmente menores que las de los IM con VSD.

En 2014 se amplió la gama de productos SynRM (SynRM<sup>2</sup>) con el modelo de 15 kW, presentado en Hannover como primer representante de ABB de una tecnología IE5.

el suministro de recambios y el mantenimiento. Además, la sustitución de un IM existente por un SynRM es sencilla.

Los avances recientes en la eficiencia de los SynRM de ABB han sido tan rápidos que se han superado las clasificaciones de eficiencia IE vigentes → 2. Si bien la UE requiere IE3 como mínimo, ABB ya tiene un catálogo de SynRM IE4. El potencial de los SynRM no se ha explorado plenamente, y parece muy viable aumentar la eficiencia.

Es importante señalar que la clasificación de eficiencia afecta solo a los motores DOL, no a los VSD. Por tanto, la “clasificación” de los motores VSD de ABB

Hay dos gamas de SynRM: SynRM IE4 (de 5,5 a 315 kW)

y SynRM compactos de alto rendimiento (de 1,1 a 350 kW). Se ofrecen en varias combinaciones de motor/accionamiento → 3-4:

- SynRM IE4 y ACS880 para usuarios industriales y finales
- SynRM IE4/HO y ACS850 para fabricantes de maquinaria y de equipos originales (OEM)
- SynRM IE4 y ACQ810 para los segmentos del agua y las aguas residuales
- SynRM IE4/HO y ACH580 para aplicaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC)

Como ya se ha dicho, la eficiencia se está convirtiendo en una cuestión crítica para los fabricantes de motores y siste-

Los SynRM se pueden diseñar para un rendimiento elevado o para una densidad de potencia elevada con un tamaño menor que el de un IM equivalente.

## 5 Comparación de IM, SynRM y SynRM<sup>2</sup> de clases IE diferentes

Clase de eficiencia <sup>2</sup>	IE2	IE3	IE4	IE5 <sup>3</sup>
<b>Datos de motores<sup>1</sup> (a partir de pruebas en funcionamiento de convertidores de frecuencia)</b>				
Producto de ABB	M3BP (160)	M3BP (160)	M3BL (160)	N.A. (160)
Tipo	IM	IM	SynRM	SynRM <sup>2</sup>
Potencia de salida (kW)	15	15	15	15
Velocidad (rpm)	1.500	1.500	1.500	1.500
Tensión (V)	380	380	380	380
Intensidad (A) <sup>4</sup>	29,9	29,5	31,5	25,2
Factor de potencia (-)	0,845	0,838	0,763	0,949
Eficiencia (%)	90,6	92,2	94,7	95,2
<b>Datos del convertidor (tensión de red 400 V)</b>				
Producto convertidor de ABB en pruebas	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS880-087A
Convertidor de ABB propuesto para los usuarios finales	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A
Tipo de control	DTC	DTC	DTC	DTC
<b>Casos de comparación con motor IE2 y sistema de accionamiento como referencia</b>				
Par constante (75%) (con 8.585 horas de trabajo anual en ciclo de servicio según el gráfico)				
Consumo anual de electricidad (kWh)	74.846	73.536	71.924	70.745
Ahorro anual de electricidad (kWh) <sup>5</sup>	0	1.310	2.922	4.100
Ahorro anual del coste de electricidad (\$)	0	210	470	658
Potencia de salida media (kW)	7,6	7,6	7,6	7,6
Eficiencia media del sistema (%)	87,1	88,7	90,6	92,2
Tiempo de amortización (meses)	-	< 10	< 10	< 11
<b>Carga de par cuadrático (con 8.585 horas de trabajo anual en ciclo de servicio según el gráfico)</b>				
Consumo anual de electricidad (kWh)	56.386	55.335	54.089	53.275
Ahorro anual de electricidad (kWh)	0	1.050	2.296	3.110
Ahorro anual del coste de electricidad (\$) <sup>5</sup>	0	168	368	500
Potencia de salida media (kW)	5,7	5,7	5,7	5,7
Eficiencia media del sistema (%)	86,7	88,4	90,4	91,8
Tiempo de amortización (meses)	-	< 12	< 13	< 15

1 Datos de motores probados en el punto nominal de trabajo

2 Límites de eficiencia mínima según la IEC 60034-30-1.

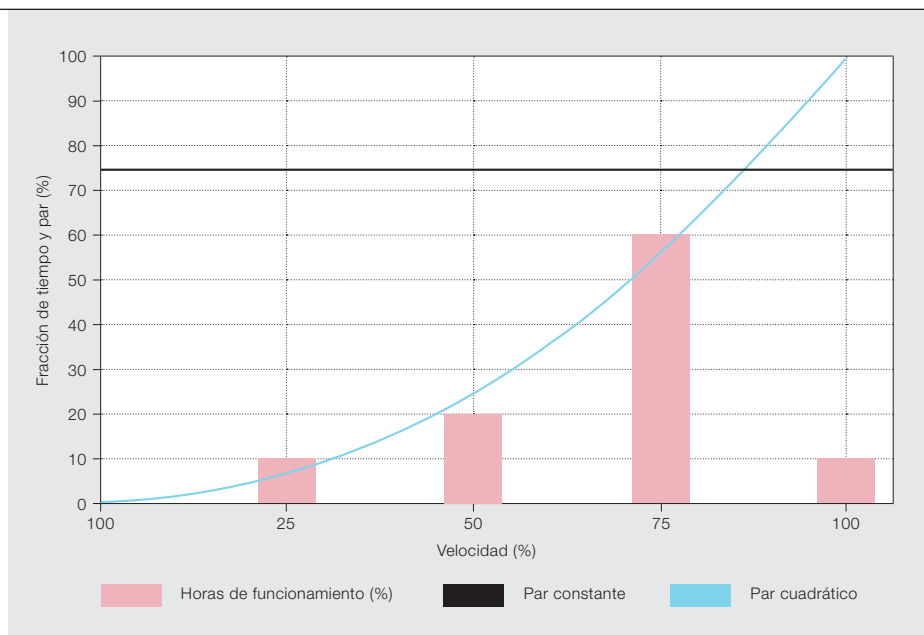
3 Todavía no se ha definido una clase de eficiencia IE5, pero se calcula que tendrá un 20 por ciento menos pérdidas que la IE4.

4 Intensidades extrapoladas a partir de valores medidos para armonizar con una tensión igual de 380 V, por simple comparación.

5 Las comparaciones se hacen con Alemania como ejemplo con un coste de la electricidad industrial de 0,16\$/kWh.

### 5a Resumen de los datos de prueba

Después de 10 años de funcionamiento, el precio de compra inicial correspondiente, para todos los sistemas VSD comparados, solo al 2–3% del coste de la electricidad.



5b Base para los cálculos de energía

mas de motores: la tendencia en la UE, Estados Unidos y Asia va hacia una legislación más exigente, tanto para los motores, como para el sistema en el que se integran. Y ABB va un paso por delante con la tecnología SynRM<sup>2</sup>.

### SynRM<sup>2</sup>

En 2014 se amplió la gama de productos SynRM (SynRM<sup>2</sup>) con un modelo de 15 kW y una altura de eje IEC de 160 mm (“SH160”) que se presentó en Hannover como primera demostración pública de una tecnología “IE5” de ABB. Se prevé que la norma IE5, por ahora no definida en la IEC 60034-30-1, imponga unas pérdidas un 20% más bajas que la clase IE4. (Esta disminución en las pérdidas es típica entre las clases IE.)

Una característica exclusiva de este motor es que utiliza imanes de ferrita (óxido de hierro, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), normalmente más baratos y fáciles de adquirir que los imanes permanentes de tierras raras. Su uso da lugar a un producto más económico y ecológicamente sostenible.

Las ferritas se han utilizado en aplicaciones de baja potencia pero, en la industria, un motor basado en ferrita no podría competir con un IM. Un motor debe generar una reluctancia dominante, respaldada por imanes de ferrita, para tener potencia suficiente. Con el rápido desarrollo y la creciente inteligencia de los accionamientos VSD, ahora es posible el

control pleno y el uso de estos motores, como en el caso de los SynRM.

El SynRM<sup>2</sup> IE5 está diseñado para clientes que persiguen niveles de eficiencia y densidad de potencia cada vez mayores. Además, con factores de potencia equivalentes a los de los motores PM y excelentes propiedades de atenuación de campo, el SynRM<sup>2</sup> IE5 permite paquetes de motor+accionamiento más compactos. ABB está trabajando en una gama SynRM<sup>2</sup>, de 0,55 a 15 kW para el mercado de HVAC, por ejemplo. Basándose en las atractivas propiedades de la tecnología de motores, ABB propone esta tecnología en otros campos de aplicación a los grandes OEM, para quienes sería de gran interés y beneficio.

### Pruebas comparativas para diferentes tipos de motores con VSD

Las clases IE de eficiencia energética se definen para motores DOL en la norma IEC 60034-30-1 y se clasifican en el punto de trabajo nominal (a plena carga y velocidad máxima). Naturalmente, la eficiencia relativa de los motores y accionamientos VSD no quedan determinados solo por esta definición de clase de motores, pues no se tienen en cuenta los rendimientos con carga parcial y velocidad del punto de trabajo ni las pérdidas por armónicos debidas al convertidor de frecuencia y las del propio convertidor. Por lo tanto, las eficiencias del sistema con diferentes tipos de motores y clases

# ABB está preparada para hacer frente a los requisitos de los motores DOL con el nuevo miembro de la familia SynRM (SynRM DOL), una versión del prototipo presentado en la Feria de Hannover de 2015.

de eficiencia se han caracterizado en pruebas → 5a Se utilizan dos perfiles de carga industrial diferentes y típicos –par constante (p. ej., cinta transportadora) y par cuadrático (p. ej., bombas y ventiladores)– frente a velocidad, según la definición de → 5b, incluidos los ciclos de servicio.

El ahorro de energía también se calcula con el motor de inducción IE2 y el sistema de accionamiento, tomando como referencia Alemania, con un precio de la electricidad industrial de 0,16 \$/kWh. Dado que el coste de la electricidad es una parte tan importante del coste del ciclo de vida de los motores eléctricos industriales, el plazo de amortización cuando se adquiere un sistema VSD más eficiente es extraordinariamente corto. Los plazos de amortización en el caso del motor de inducción IE3, el SynRM IE4 y el SynRM2 IE5, utilizando convertidores ACS880-032A similares de ABB, en comparación con el sistema del motor de inducción IE2 de referencia, son inferiores a 10–15 meses, dependiendo del tipo de motor y el ciclo de trabajo. Tras estos plazos de amortización relativamente cortos, los sistemas más eficientes ahorran costes durante el resto de su vida útil. Después de 10 años de funcionamiento, el precio de compra inicial corresponde, para todos los sistemas VSD comparados, a solo el 2–3% del coste de la electricidad.

## Pruebas de campo/ejemplo de implementación

Las instalaciones de las compañías de suministro de agua se encuentran entre los usuarios de electricidad más eficientes del Reino Unido. La estación de bombeo Somerford de South Staffordshire Water no es una excepción; aún así, su factura de electricidad anual asciende a unos 13 millones de dólares, de los que el 90% corresponde al bombeo de agua. El empeño de la empresa en incrementar la eficiencia energética condujo a la decisión de sustituir un IM de 115 kW y 20 años de antigüedad, controlado por un convertidor de frecuencia ACS800 de ABB más moderno, por un nuevo paquete de SynRM IE4 de 110 kW y un accionamiento ACS850. El accionamiento controla una bomba de pozo que extrae 2,5 millones de litros de agua al día. Las expectativas del cliente eran que la eficiencia mejoraría y que los costes de mantenimiento disminuirían con la utilización de la última tecnología de accionamiento de motores. Los resultados superaron con creces estas expectativas: ahorro de energía del 6%; reducción del 58% en los puntos críticos de temperatura del bastidor; reducción del 28% en la temperatura del cojinete final del motor; y reducción del 75% de ruido audible, en comparación con el motor de inducción reemplazado.

## Motores para el futuro

En motores, ABB ofrece la solución adecuada para cualquier necesidad industrial y, como respuesta a la demanda del mercado de mayor producción, mayor eficiencia, intervalos de mantenimiento más prolongados y reducción del tamaño, ABB ofrece nuevos motores síncronos de reluctancia. Pero las ventajas ambientales del SynRM y el SynRM<sup>2</sup> no se limitan al ahorro de energía, ya que utilizan métodos de producción comunes y materiales abundantes de bajo impacto ambiental. Además, ABB está preparada para hacer frente a los requisitos de los motores DOL con el nuevo SynRM (SynRM DOL), una versión del cual se presentó en la Feria de Hannover de 2015. Esta tecnología, que combina una jaula especial (similar a la de los IM) con una estructura SynRM, está en desarrollo, pero ya ha demostrado que puede alcanzar niveles de IE4 (y, con una optimización meticulosa, de IE5) sin imanes REE ni materiales especiales.

El vanguardista diseño SynRM es la base de una tecnología de eficiencia sostenible para los motores eléctricos del futuro.

### Freddy Gyllensten

#### Peter Isberg

ABB Discrete Automation and Motion,  
Motors and Generators  
Vasteras, Suecia  
freddy.gyllensten@se.abb.com  
peter.j.isberg@se.abb.com

### Alessandro Castagnini

#### Giulio Secondo

ABB Discrete Automation and Motion,  
Motors and Generators  
Vittuone, Italia  
alessandro.castagnini@it.abb.com  
giulio.secondo@it.abb.com

### Jouni Ikäheimo

#### Ari Tammi

ABB Discrete Automation and Motion,  
Motors and Generators  
Vaasa, Finlandia  
jouni.ikaheimo@fi.abb.com  
ari.tammi@fi.abb.com

## Referencias

- [1] M. Meza, "Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS," presented at Motor & Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology, Orlando, FL, 2014.
- [2] *Rotating Electrical Machines – Part 30-1: Efficiency Classes of Line Operated AC Motors*, IEC Standard 60034-30-1:2014.



## DOMEÑAR LA FUERZA

ABB Review series,  
parte III

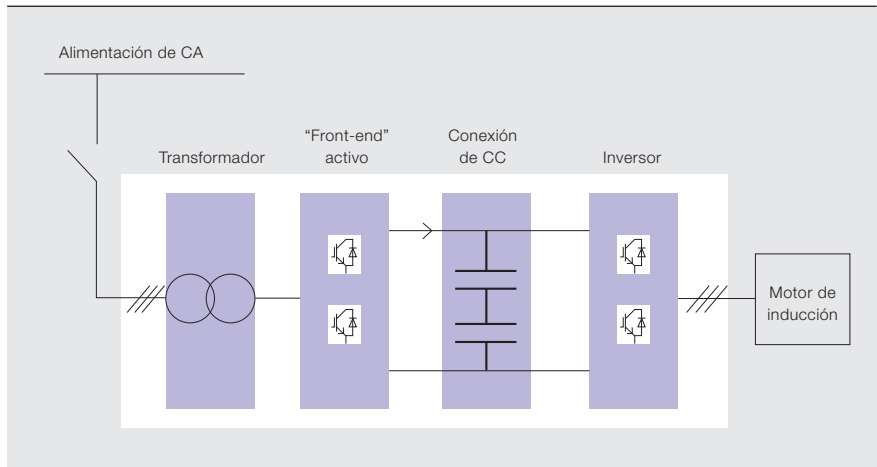


# Sin torsión

Amortiguar las oscilaciones torsionales en la unión entre accionamiento y sistema mecánico

MEHMET MERCANGÖZ, SILVIA MASTELLONE, STEFAN ALMÉR, THOMAS BESSELMANN, PIEDER JÖRG, JOUKO NIIRANEN, LUCA PERETTI, VELI-MATTI LEPPÄNEN – Al igual que el daño que causan los soldados que cruzan un puente marcando el paso o el efecto del viento en el desventurado puente Tacoma Narrows, la resonancia no amortiguada puede ser perjudicial en los accionamientos eléctricos: la resonancia puede amplificar los impulsos del par motor a una de las frecuencias propias de la transmisión y causar oscilaciones de torsión y grandes variaciones de par que acabarán dañando los engranajes y la transmisión. Hay tres formas de afrontar las vibraciones torsionales: eliminarlas en el diseño; limitar el funcionamiento a un margen de velocidades seguro y confiar en que la inercia del sistema atenúe cualquier excitación; y controlar y manipular activamente la transmisión para neutralizar las oscilaciones torsionales. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas, como puede verse en los estudios de casos.

**1 Ejemplo de un sistema eléctrico de accionamiento de CA**



Las transmisiones eléctricas son frecuentes en el mundo moderno; convierten la energía eléctrica en energía mecánica en muchas aplicaciones industriales y efectúan la conversión inversa en los generadores eléctricos. Todos estos sistemas rotativos de velocidad variable pueden experimentar vibraciones de torsión durante el arranque, la parada y el funcionamiento. En casos problemáticos, las vibraciones torsionales pueden aumentar hasta provocar el desgaste de los engranajes o la rotura de los ejes. En consecuencia, hay que analizar y evaluar las características de respuesta torsional de los equipos rotatorios y sus bucles de control para verificar el funcionamiento estable del sistema. Esto es especialmente importante con potencias nominales altas, porque el diámetro del eje, y por tanto, su resistencia mecánica, no puede aumentarse proporcionalmente a la potencia. Asimismo, las consecuencias de un fallo mecánico en un accionamiento de gran potencia son más graves.

La intensidad de las vibraciones torsionales depende de la magnitud de la excitación torsional y de la diferencia entre las frecuencias de excitación y las frecuencias naturales asociadas

con los modos del sistema del eje y su amortiguación. El objetivo es, naturalmente, evitar la coincidencia de una frecuencia de excitación torsional con una frecuencia torsional natural. Por lo tanto, deben calcularse las frecuencias torsionales naturales del sistema y definirse las fuerzas de excitación que se pueden producir y las frecuencias correspondientes. No es tarea fácil en sistemas complejos con muchos elementos en la transmisión. En ciertos casos, hay que tener en cuenta la rigidez finita de la bancada del motor y otras partes flexibles de las estructuras circundantes.

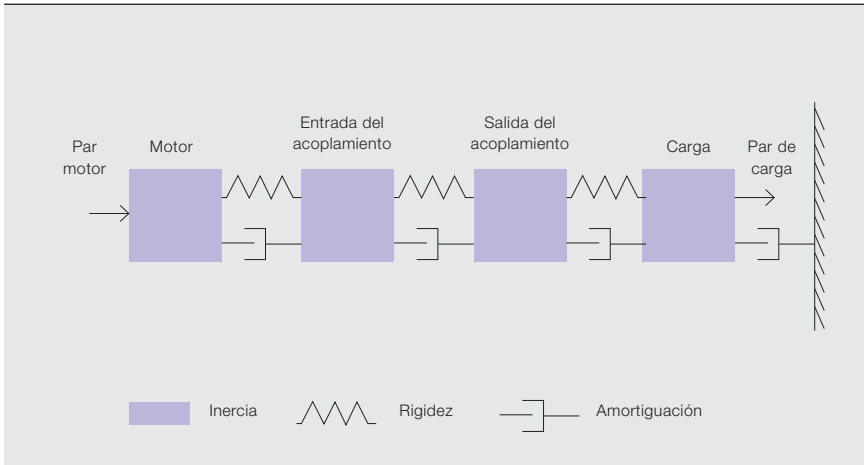
Una dificultad concreta en el caso de sistemas electromecánicos es que los componentes eléctricos y mecánicos normalmente se diseñan, analizan y controlan por separado, sin tener en cuenta su interacción mutua o con otros componentes. Además, hay casos en los que no se dispone de antemano de información precisa sobre el sistema. La forma de mantener el funcionamiento estable de la transmisión es limitar la incertidumbre definiendo límites para los parámetros del sistema y teniendo en cuenta el margen de resistencia a todos los regímenes mediante el control adecuado.

**Transmisiones**

Una transmisión electromecánica tiene tres componentes fundamentales: la red eléctrica, más posiblemente transformadores y filtros de entrada/salida; el convertidor eléctrico y el motor o generador; y la carga o turbina. Todos pueden contribuir a la diná-

**Imagen del título**

En la transmisión del motor eléctrico pueden surgir oscilaciones peligrosas. ¿Cómo pueden neutralizarse?



Los sistemas rotativos de velocidad variable pueden experimentar oscilaciones torsionales durante el arranque, la parada y el funcionamiento.

mica torsional. Las variaciones en la red afectan directamente al comportamiento torsional de la transmisión de un motor directo en línea. Un convertidor eléctrico puede aislar en gran medida el sistema torsional de las perturbaciones de la red pero, por la conmutación con semiconductores, se producen frecuencias de excitación que depende de la velocidad del motor. Casi todas las máquinas eléctricas de CA crean un par muy suave con una tensión sinusoidal, pero construcciones especiales como las de imán permanente pueden tener un par den-

elementos resistivos, inductivos y capacitivos discretos, y la transmisión mecánica con inercias discretas unidas a elementos elásticos sin inercia que representan ejes y acoplamientos → 1-2. Se verifica y optimiza la respuesta para varias excitaciones con las funciones de transferencia o ecuaciones diferenciales del sistema de control.

Idealmente, si el modelo cubre todo el comportamiento del sistema, se puede diseñar el control en consecuencia para garantizar el comportamiento; pero normalmente sólo se conocen con precisión razonable las grandes inercias concentradas y la elasticidad principal. Las inercias menores y distribuidas, como las de una caja reductora, son más difíciles de evaluar. Los coeficientes de amortiguación son otra fuente de imprecisión, pues es difícil o imposible obtenerlos para muchos elementos, por lo que suelen desestimarse, aunque una amortiguación fuerte puede tener un efecto notable sobre la frecuencia y, en especial, la amplitud de resonancia. Por el contrario, las características eléctricas del motor y de su control no pueden ignorarse en el modelo torsional de la transmisión, porque pueden modificar sustancialmente las frecuencias naturales y la amplificación de las excitaciones.

**En casos difíciles, las oscilaciones torsionales excesivas llegan a causar el desgaste de los piñones o la rotura del eje.**

tado importante. Finalmente, la carga mecánica de un motor o de una turbina puede variar con la aplicación y es, en ciertos casos, difícil de predecir.

Al estudiar las resonancias torsionales de la transmisión, se efectúa en primer lugar el llamado análisis modal y se comparan las frecuencias naturales con las posibles frecuencias de excitación. En estudios más detallados, se modeliza el sistema eléctrico con

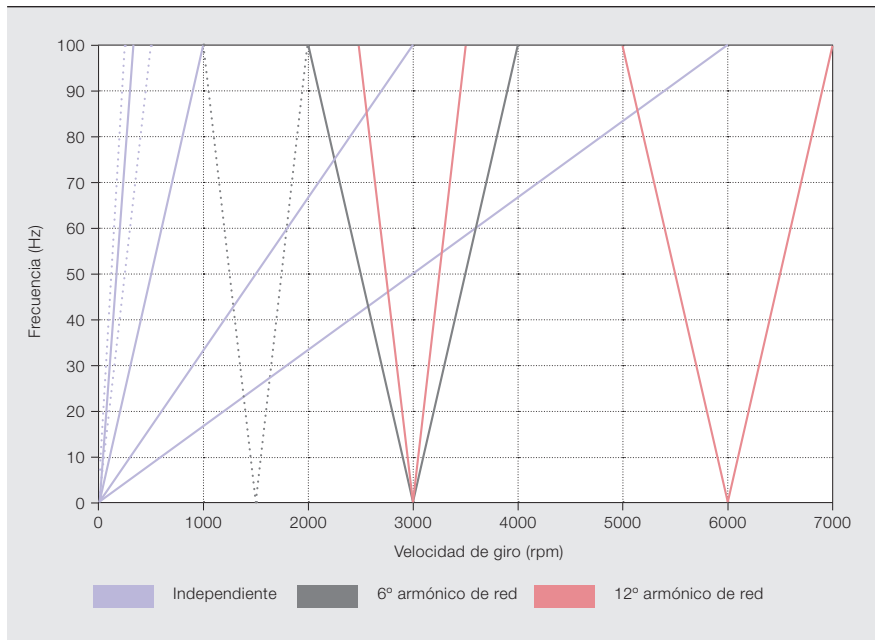
Como los componentes eléctricos y mecánicos de la transmisión están interconectados y las oscilaciones se propagan entre ellos, no puede limitarse siempre el análisis a uno o a

## DOMINAR LA FUERZA

ABB Review series,  
parte III

Deben calcularse las frecuencias torsionales naturales del sistema y definirse las fuerzas de excitación que se pueden producir en el sistema.

### 3 Ejemplo de un esquema de Campbell para un motor de dos polos, con frecuencias excitadas por un LCI a velocidades de giro dadas



otro, sino que debe extenderse desde el eje hasta la red eléctrica, incluyendo cualquier convertidor de frecuencia opcional. Hecho esto, se pueden formular las estrategias para la solución.

#### Estrategias para la solución

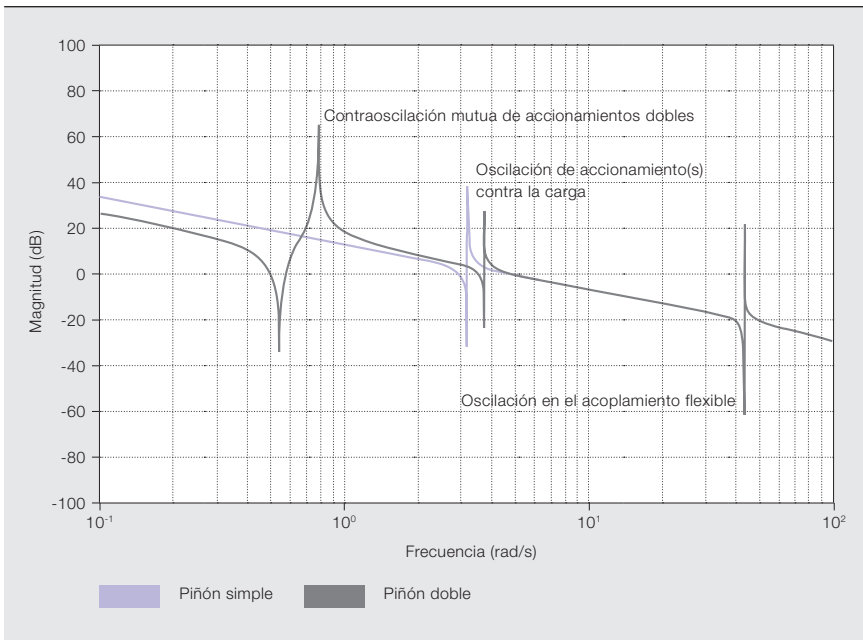
Dependiendo de la naturaleza de las vibraciones, se pueden aplicar distintas estrategias para reducirlas, limitarlas o evitarlas. Estas estrategias suelen pertenecer a una de tres categorías: diseño del sistema, funcionamiento del sistema y amortiguación activa.

La estrategia de diseño del sistema adopta medidas contra las vibraciones incorporando componentes disipadores como acoplamientos amortiguados con elastómero o hidrodinámicos que reducen la amplitud de la vibración convirtiendo la energía de excitación en calor, o conformando el espectro de excitación con filtros senoidales en la salida del convertidor. Estos métodos se denominan de amortiguación pasiva. Aunque prácticos en algunas aplicaciones, presentan el inconveniente de que la energía disipada se desperdicia y el filtrado mecánico o eléctrico ralentiza la dinámica del sistema. Suelen ser caros y los acoplamientos de elastómero envejecen.

El segundo método emplea el análisis modal para determinar márgenes de velocidad sin resonancia en los que es posible el funcionamiento continuo. Como el número de polos del motor afecta a esos márgenes, se elige el número que mejor se ajusta a las necesidades del proceso. El método es práctico y sencillo de aplicar. Pero no siempre es posible encontrar márgenes de velocidad suficientemente amplios, y no siempre son aceptables las rápidas aceleraciones y deceleraciones necesarias para cruzar los márgenes de velocidades prohibidos.

La tercera clase de estrategias se basa en la emulación del comportamiento físico de los amortiguadores. Los métodos de amortiguación activa de resistencias virtuales y basados en modelos son ejemplos de soluciones activas basadas en software. Los métodos de espacio de estados son especialmente útiles para sistemas de orden elevado y modelizan y controlan todo el sistema, incluyendo las interconexiones, y tienen en cuenta todas las variables no lineales, como fricción y retroceso. Por su parte, los métodos basados en la frecuencia son mejores para identificar los modos críticos.

También suelen emplearse métodos híbridos combinando dos o más de estas estrategias. Así, puede reducir-



se la rigidez de los ejes o los acoplamientos para desplazar la resonancia del sistema a un ancho de banda en que pueda aplicarse un método de amortiguación activa para contrarrestar las oscilaciones. Otro ejemplo es usar el análisis de frecuencias para determinar el espectro del sistema y el espectro deseado seguido de méto-

de las frecuencias y emplear técnicas de espacio de estados.

Algunos ejemplos prácticos ilustran los distintos métodos.

#### Estaciones de compresor accionadas eléctricamente

Se suelen utilizar accionamientos de velocidad variable (VSD) en estaciones compresoras de gas natural. La potencia de dichas estaciones suele ir de 10 a 70 MW, y el rotor gira a una velocidad de algunos miles de rpm. Un engranaje multiplicador y un eje de transmisión, relativamente largo y delgado, une el VSD con varias etapas de compresión en una estructura bastante flexible con una elevada inercia de carga y distintas frecuencias torsionales naturales. La excitación continua de estas frecuencias desde una de las etapas del compresor o el VSD puede provocar grandes amplitudes de oscilación torsional que el eje podría no soportar. Las consecuencias van desde el mayor desgaste y la menor vida útil del engranaje al fallo catastrófico de los acoplamientos o los ejes.

La respuesta torsional deseada suele ser la que evita cualquier coincidencia de un armónico de velocidad operativa o de excitación torsional con una frecuencia torsional natural.

dos de configuración de energía basados en el tiempo para conformar el espectro del sistema. Este ejemplo de métodos híbridos de tiempo y frecuencia consigue lo mejor de ambos mundos: captar el comportamiento

Por su probada fiabilidad y eficiencia, una configuración clásica del sistema VSD incluye una máquina síncrona alimentada por un inversor de carga conmutada (LCI), como el Mega-drive-LCI de ABB. Pero el LCI puede gene-

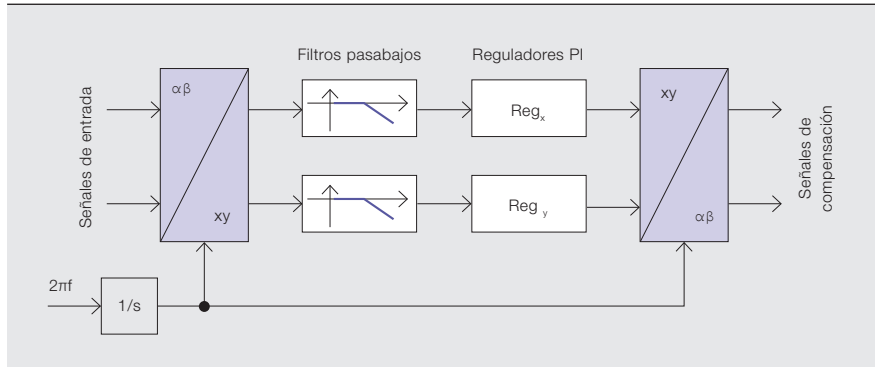
Se hace un análisis modal para determinar las frecuencias naturales en los accionamientos y compararlas con las posibles frecuencias de excitación.

## DOMINAR LA FUERZA

ABB Review series, parte III

Hay muchas estrategias de control activas para amortiguar las oscilaciones torsionales, y ABB ha patentado una formulación específica para accionamientos de piñón doble.

### 5 Algoritmo de compensación típico



rar armónicos en el par motor, cuyas frecuencias dependen del número de impulsos del accionamiento y su variación con la velocidad del rotor → 3. Para algunas velocidades, estas frecuencias coinciden con las frecuencias naturales del eje. Una medida fácil para reducir las oscilaciones torsionales es evitar determinados intervalos de velocidad, si es posible. Cualquier oscilación torsional residual, excitada por ejemplo por frecuencias naturales que se cruzan, son amortiguadas activamente o se deja que se amortigüen por sí mismas.

#### Accionamientos de molino de velocidad variable

Aunque se trata de un fenómeno raro en molinos trituradores, los efectos de los impulsos de par no amortiguados en resonancia con una de las frecuencias propias de la transmisión pueden ser graves.

Las soluciones con molinos movidos por piñón doble en corona dentada son muy atractivas para aplicaciones de molturación medias, pero su perfil de resonancia torsional supone un problema que puede exigir medidas preventivas. A simple vista, el sistema de accionamiento doble puede considerarse como un conjunto de elementos en acoplamiento flexible formado por los dos motores y el molino, que lleva a dos modos naturales de oscilación torsional → 4:

- Uno en el que los motores oscilan en fase contra el molino, por lo general a una frecuencia de 0,5 a 0,6 Hz.
- Otro en el que los motores oscilan uno contra otro: la velocidad de uno aumenta mientras que la del otro disminuye, después se invierte la

situación, y así sucesivamente. Los motores se alternan en accionar el molino, que mantiene una velocidad constante. Con ejes de accionamiento relativamente largos y acoplamientos flexibles, la frecuencia natural de este modo está entre 0,1 y 0,2 Hz.

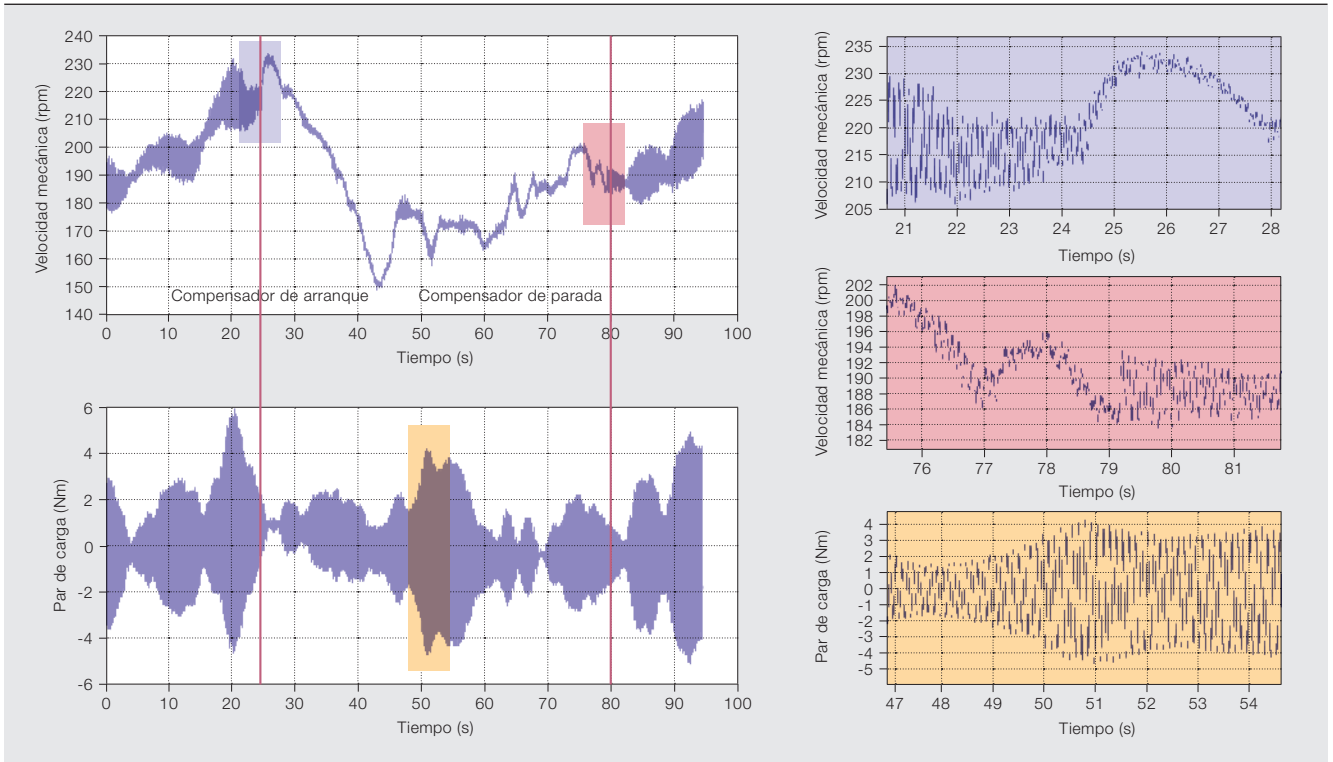
Hay que prestar especial atención al segundo modo, puesto que factores como un engranaje desgastado puede ocasionar excitaciones en el margen en cuestión. Hay muchas estrategias de control activo para amortiguar las oscilaciones torsionales, y ABB ha patentado una formulación específica para accionamientos de piñón doble (WO/2012/020031).

En ese método se emplean mediciones realizadas en ambos accionamientos para calcular distintas acciones de control en prealimentación y amortiguar ambos modos naturales, y la velocidad del molino se regula en una configuración clásica maestro-esclavo.

#### Turbina eólica

Describir las interacciones entre sistemas en una turbina eólica no siempre es fácil. La interacción aerodinámica entre el viento y las palas lleva a efectos como la cizalladura del viento y la sombra de la torre, que pueden ser percibidos como armónicos del par en el eje giratorio. Además, este último es un sistema multimasa con resonancias naturales que no se pueden ignorar. Incluso las resonancias naturales podrían contribuir a oscilaciones de par durante los transitorios. En el otro extremo del eje, el par en el generador podría asimismo no verse libre de efecto de rizado. Dependiendo del tipo y

## 6 Ejemplo de laboratorio de compensación de tercer armónico



Para todos los armónicos de par que se presentan en el eje rotatorio principal es posible efectuar un análisis de frecuencia de señal en tiempo real y clasificación y compensación del rizado.

la estructura del generador, el rizado puede tener distintos orígenes, como el dentado en generadores síncronos de imán permanente o la asimetría de tensión en la red en generadores de inducción doblemente alimentados.

Para amortiguar la oscilación torsional en estos sistemas no siempre basta el conocimiento previo de los armónicos, por lo que a veces se utiliza el

análisis en tiempo real de señales medidas o estimadas (intensidades, velocidad). Pero el análisis siempre ha de ir seguido de una clasificación automática (“¿De dónde procede el armónico?”) y, por supuesto, una acción compensadora por parte del control del accionamiento. Un algoritmo típico para compensar una frecuencia simple se presenta en → 5. En → 6 se ilustra una emulación en laboratorio de la compensación del tercer armónico en un banco de prueba de turbina eólica a pequeña escala, donde la turbulencia emulada del viento cambia el valor medio de la velocidad mientras que el par de generación carga con la magnitud variable.

El enorme número de aplicaciones que utilizan transmisiones electromecánicas y el posible daño debido a las oscilaciones torsionales sin neutralizar obliga a prestar mucha atención a la eliminación de esos efectos perjudiciales. El diseño y las técnicas de análisis rigurosos han demostrado su efectividad.

**Mehmet Mercangöz**

**Silvia Mastellone**

**Stefan Almér**

**Thomas Besselmann**

ABB Corporate Research

Baden-Dattwil, Suiza

mehmet.mercangoez@ch.abb.com

silvia.mastellone@ch.abb.com

stefan.almer@ch.abb.com

thomas.besselmann@ch.abb.com

**Pieder Jörg**

ABB Discrete Automation and Motion,

Drives and Controls

Turgi, Suiza

pieder.joerg@ch.abb.com

**Jouko Niiranen**

ABB Discrete Automation and Motion,

Drives and Controls

Helsinki, Finlandia

jouko.niiranen@fi.abb.com

**Luca Peretti**

ABB Corporate Research

Vasteras, Suecia

luca.peretti@se.abb.com

**Veli-Matti Leppänen**

ABB Oy

Helsinki, Finlandia

veli-matti.leppanen@fi.abb.com







# Visionario

## La visualización 3D mejora las operaciones de producción

MARIA RALPH, ALVARO ARANDA MUÑOZ, SUSANNE TIMSJÖ, MATS LUNDEMALM – A pesar de los cambios que la revolución de las TI ha provocado en el panorama industrial, persiste el predominio del papel en muchas operaciones de producción. Comunicar información en papel cuesta tiempo, y para muchos equipos de producción no es eficaz, pues hacer el seguimiento de las incidencias y mantener una visión actualizada del estado de la producción en este medio es muy difícil. ABB ha desarrollado el prototipo de una herramienta de visualización 3D que ayuda a los equipos de producción a superar este obstáculo y a aumentar la eficiencia. El prototipo salva las limitaciones de las operaciones con papel y amplía la capacidad de producción gracias a una herramienta que permite consultar e interpretar digitalmente la información esencial.

---

### Imagen del título

La presentación efectiva de información a las personas relevantes, como ocurre en esta línea de producción de aparata aislada en gas, contribuye a mejorar el rendimiento de los procesos de producción.

ABB se vale de entrevistas y de la observación directa para entender mejor la manera en que las personas llevan a cabo su trabajo.

1 El prototipo ofrece un panorama completo del estado de la producción. La información presentada puede filtrarse por criterios como seguridad, calidad, etc.



2 Se supervisa la conformidad con los objetivos



En los procesos de producción, el tiempo es esencial. Los productos deben entregarse a tiempo y dentro del presupuesto. Para alcanzar este objetivo, el personal de producción debe poder consultar fácilmente la información relevante para hacerse rápidamente una idea clara de la situación e intervenir eficazmente y sin demora para evitar cualquier problema. Por lo tanto, es fundamental mejorar la capacidad para detectar estas situaciones.

La tecnología puede proporcionar esta capacidad. Pero antes debe adquirirse un conocimiento profundo del propio proceso de producción. Con este fin, ABB realiza entrevistas y observaciones para estudiar cómo hacen las personas su trabajo. La información así obtenida arroja luz sobre los retos, objetivos, necesidades y preocupaciones del día a día y proporciona las principales ideas de diseño que se utilizarán para crear una interfaz hombre-máquina (HMI). Para desarrollar el prototipo 3D que se presenta aquí, se entrevistó y observó a diversos empleados de producción, tanto jefes de producción como trabajadores. Estas entrevistas y sesiones de observación permitieron identificar los requisitos de alto nivel. En resumen, el personal de producción debería:

- ser capaz de comprender e interpretar de manera rápida y precisa el flujo

- de producción (p. ej., la relación lógica entre las distintas líneas de producción);
- poder consultar la información esencial del estado de la producción en cada paso del proceso;
- disponer de medios para detectar, comprender y resolver los problemas rápidamente (p. ej., identificar y resolver cuellos de botella);
- conocer la producción del día y la situación del turno (p. ej., información sobre el ritmo y la producción);
- disfrutar de una mayor movilidad aplicada a la información (tableta, smartphone, etc.);
- contar con un sistema eficaz de seguimiento de órdenes de producción;
- disponer de datos de apoyo para los recorridos de la mañana (durante los cuales se decide la producción del día);
- ver el progreso en cada objetivo de producción.

### Conceptos de diseño

Una vez identificados estos elementos clave, se desarrolló un prototipo 3D inicial (basado en el motor de videojuegos Unity 3-D) para apoyar al personal en su esfuerzo por mejorar el proceso de producción. Este prototipo se utilizó para recopilar información importante, como el número de piezas de entrada y de salida en una determinada línea de producción. El prototipo también ofrece un mapa de alto nivel que resume el proceso de producción y los lugares donde pueden producirse cuellos de botella, que pueden así identificarse fácilmente para atender con prontitud y mitigar los atascos de producción.

El diseño del prototipo está estrechamente relacionado con la tabla de colaboración ABB, que se conecta e interactúa con el sistema de automatización ampliado 800xA de ABB, una herramienta

3 El histórico de datos sigue el progreso de los KPI, en este caso del número de pedidos, modelos y clientes para el país seleccionado.



Es fácil navegar entre los distintos niveles de información, desde una visión general de alto nivel hasta la información detallada de cada línea de producción y cada depósito.

4 Información detallada del progreso del trabajo



El personal también ve el progreso de la producción para cada línea de producción en función de los objetivos del turno, el día o la semana → 4. El usuario puede comprobar así si alguna línea se demora o produce demasiado y detectar y evitar cuellos de botella → 5.

Los empleados pueden ver el progreso de la producción en función de los objetivos establecidos según el turno, día y semana para cada línea de producción.

con una interfaz KPI (indicador de rendimiento clave) 3D integrada. El prototipo propuesto, que se inspira en esta tabla de colaboración ABB, tiene una apariencia parecida y también se maneja con una gran pantalla táctil; la diferencia

radica en los detalles del proceso de producción. El prototipo 3D ofrece al usuario multitud de opciones.

#### Visión global

El usuario disfruta de una visión global con la información esencial de producción y la relación entre las líneas en términos de depósitos y trabajo en curso. Esto ayuda a los operadores a interpretar rápidamente el flujo de trabajo y a obtener un resumen del estado de la producción en la fábrica → 1-2.

Los pedidos del cliente pueden filtrarse por país, nombre de cliente, modelo o identificador de pedido → 3. El resultado de este filtro se visualiza en el flujo de producción y muestra el identificador de pedido y la línea de producción o el depósito en el que se encuentra. Este filtro puede afinarse para mostrar más información sobre un pedido concreto.

#### Navegación sencilla

Es fácil navegar entre los distintos niveles de información, desde una visión general de alto nivel hasta la información detallada de cada línea de producción y cada depósito. Esto permite al personal de producción realizar un seguimiento preciso de cada pedido de cliente hasta que se completa y envía. También se puede buscar y filtrar por pedido de cliente, por tendencias temporales para KPI concretos, etc.

#### Codificación con colores

La información se presenta con códigos de colores según umbrales predefinidos adaptados a cada KPI. De esta manera se identifican rápidamente las advertencias y las situaciones críticas conforme surgen durante la producción.

Las barras de colores en 3D crecen y decrecen según el progreso de la producción, la calidad de los pedidos en producción, los niveles de seguridad de la fábrica y la planificación de los pedi-

La información se presenta con códigos de colores según umbrales predefinidos adaptados a cada KPI.

## 5 Es posible visualizar un cuello de botella en el proceso



dos futuros. Las visualizaciones 3D ayudan a los gestores a detectar rápidamente los problemas actuales y potenciales. También proporcionan información sobre aspectos como las tendencias de los KPI o el historial de producción, lo que ayuda a entender la causa de los problemas y a reaccionar en consecuencia.

### Comunicación

El prototipo admite y promueve la comunicación y colaboración entre los empleados de la fábrica. Por ejemplo: diferentes filtros presentan datos útiles para las reuniones de recorrido de la mañana en las que se decide la producción del día en función de los valores de seguridad, calidad, progreso y KPI planificados de turnos anteriores.

### Resolución de problemas

La resolución de problemas como los cuellos de botella es más fácil gracias a marcadores que se insertan en distintos lugares del flujo y que permiten a los empleados señalar dónde puede estar la causa del problema.

El prototipo 3D ofrece una visión global del proceso de producción y mejora la percepción general del estado de la producción. Cuando el personal de producción de la fábrica dispone de la información necesaria en el momento adecuado y en un formato intuitivo y sencillo de comprender, percibe mejor el estado de la producción. También identifica mejor las partes del proceso de producción que exigen atención inmediata, lo que permite intervenir en el momento oportuno.

### Movilidad de los datos

La movilidad también se ve beneficiada. La aplicación se ha diseñado para funcionar tanto en PC como en tableta, lo que significa que se pueden consultar en todo momento los datos de la fábrica desde cualquier lugar que disponga de conexión a Internet y de una configuración de seguridad adecuada.

### Beneficios para la gestión de la producción

Hasta el momento, tan solo una parte de las funciones del prototipo se utilizan en procesos de producción reales. Entre estas funciones está la posibilidad de ver el lugar del flujo de producción donde se encuentra cada pieza del pedido de un cliente y de seguir los pedidos de clientes. En la actualidad, el proyecto continúa en desarrollo; las funciones nuevas del prototipo se incorporan iterativamente a un proceso de producción real y se evalúan.

#### Maria Ralph

#### Alvaro Aranda Muñoz

#### Susanne Timsjö

ABB Corporate Research  
Vasteras (Suecia)

maria.ralph@se.abb.com

alvaro.aranda@se.abb.com

susanne.timsjo@se.abb.com

#### Mats Lundemalm

ABB Discrete Automation and Motion, Robotics  
Vasteras (Suecia)

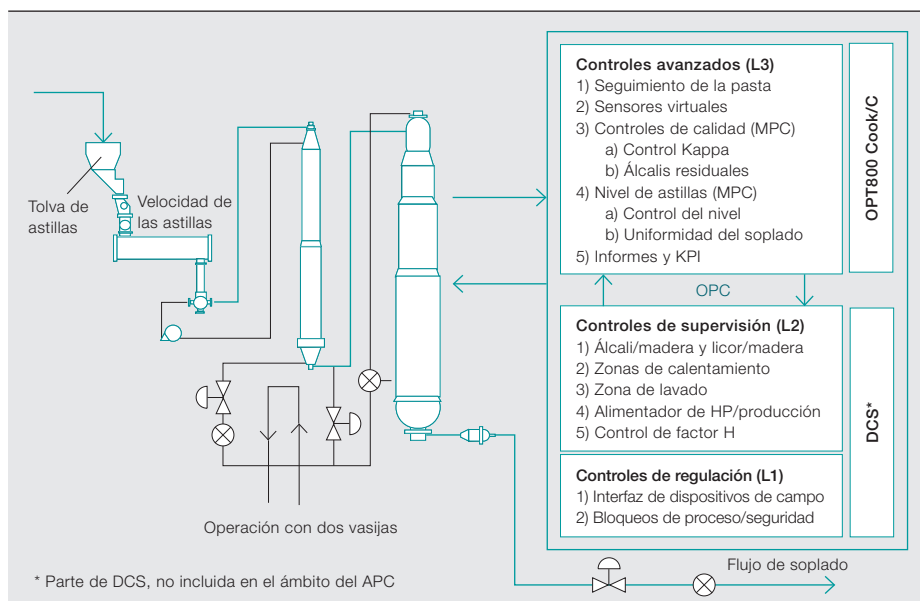
mats.lundemalm@se.abb.com



# Optimizar la producción de pasta ya no es “pulp fiction”

Producción constante de pasta de papel de calidad con un proceso de control avanzado

ABHIJIT BADWE, RAMESH SATINI – Cuando Mondi, el fabricante mundial de papel y cartón, decidió modernizar su mayor fábrica de pasta de papel de Polonia, escogió a ABB como socio para que le ayudara a mejorar y optimizar dos líneas de producción. Para ello, ABB desarrolló una solución avanzada de control de proceso basado en la predicción con un modelo y sensores virtuales. La modernización se tradujo en una mejora del 56 por ciento de la calidad de la pasta y en soluciones normalizadas que se pueden ofrecer ahora a otras plantas.



En 2011, Mondi se embarcó en un proyecto que buscaba formas de mejorar la calidad de la pasta y el empleo de productos químicos, aumentar la producción y disminuir el coste de sus dos líneas de producción de Mondi Swiecie. En esta búsqueda han intervenido varios factores. Uno era la política de la empresa de reducción del impacto ambiental, lo que en la producción de pasta significa reducir el uso de energía calorífica y de productos químicos. El segundo factor era mejorar la calidad del producto. Mondi Swiecie fabrica principalmente cartón para embalar y ondulado y bolsas industriales que, sorprendentemente, son productos de alta tecnología. En tercer lugar, estaban los objetivos universales de todos los procesos industriales: aumentar el volumen de producción y reducir los costes.

**Imagen del título**

El control avanzado del proceso de la mayor fábrica de pasta de papel de Polonia ha aumentado la productividad y estabilizado los procesos en las líneas de cocción y lavado de pasta en una forma inalcanzable con los métodos convencionales de control DCS.

En 2011, Mondi Swiecie adjudicó a ABB un contrato para mejorar la calidad y la eficiencia de su fábrica de pasta. Para entender mejor lo que esto supone, conviene examinar primero el proceso de producción de pasta.

**Separación de la celulosa**

La materia prima para el cartón y el papel es la madera. La finalidad del proceso de formación de pasta es separar las valiosas fibras de celulosa presentes en la madera de la lignina y los polímeros de hemicelulosa que las unen. Tradicionalmente, esto se hacía golpeando la madera, pero en la actualidad se usan métodos químicos, sobre todo porque conservan mejor la integridad de la celulosa.

El proceso empieza descortezando la madera, fragmentándola, clasificando las astillas para lograr un tamaño aproximadamente uniforme, impregnándolas con productos químicos y cargándolas en una olla a presión (el digestor).

En el proceso con sulfato empleado en Swiecie, se mezclan las astillas con una solución de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio ("licor blanco"), presurizado y calentado a unos 160°C con vapor de calderas de carbón. Tras unas pocas horas, el material adquiere la consisten-

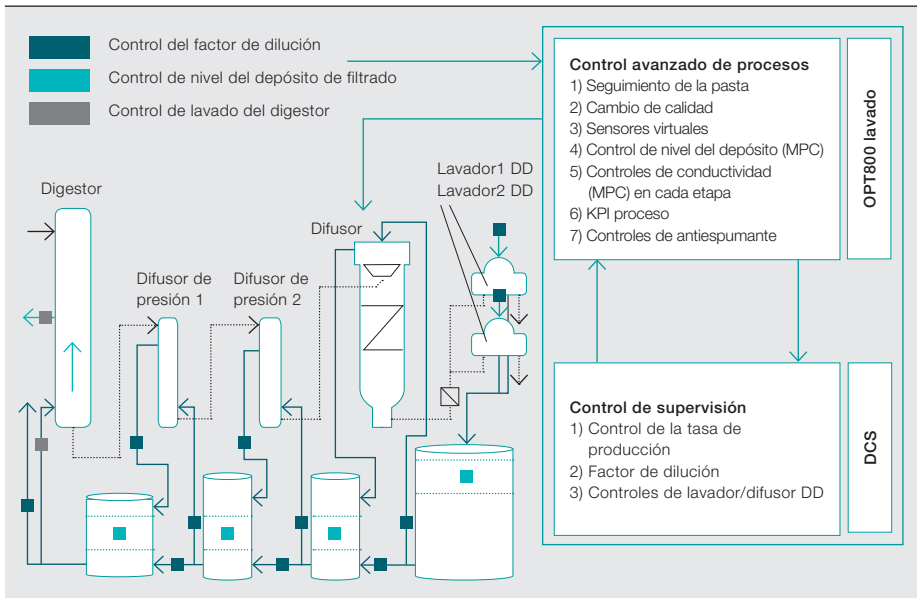
cia y el color de unas gachas y la cantidad de hidróxido de sodio alcalino disminuye a medida que se convierte en sulfatos y carbonatos como consecuencia de la reacción con la lignina de la madera.

Al final del proceso, la pasta se expulsa del digestor por una escotilla llamada línea de soplado. La repentina despresurización provoca la expansión rápida de las fibras de celulosa, lo que ayuda a

Una de las primeras cosas que hizo la nueva Mondi Swiecie fue buscar la forma de mejorar el proceso de producción de pasta.

separarlas. A continuación se suspenden en un líquido llamado "pasta parda".

El siguiente paso del proceso es "lavar" la pasta parda para eliminar los productos químicos de tratamiento (ahora llamados "licor negro") junto con la lignina degradada y la hemicelulosa. Tras pasar por varios depósitos, el líquido extraído se reduce y se recuperan sus compuestos de sodio y azufre para preparar más licor blanco. Mientras tanto, la pasta de celulosa limpia se blanquea, si es necesario, y luego se prensa y calienta para eliminar el agua, tras de lo cual queda lista para cortarla y enrollarla o embalarla para un proceso posterior.



En 2011, Mondi Swiecie adjudicó a ABB un contrato para mejorar la calidad y la eficiencia de su fábrica de pasta.

El problema era hacer que el proceso trabajara con eficiencia y tolerancias mayores sin cambiar nada, salvo el sistema de control del equipo existente.

### Cómo mejorar el proceso

El problema era hacer que el proceso trabajara con eficiencia y tolerancias mayores sin cambiar nada, salvo el sistema de control del equipo existente. La clave era optimizar el funcionamiento del digestor de las dos líneas y las etapas de lavado de pasta parda. El primer paso era auditar y analizar los bucles de control y después desarrollar un plan de acción del control de proceso avanzado (APC) basado en un control predictivo con modelos (MPC) y sensores virtuales.

### El proceso de cocción

Para el digestor, la variable fundamental para la calidad del producto es el número Kappa, que mide la concentración de lignina en la pasta e indica lo bien que se han cocido las astillas. Este número es difícil de controlar por dos razones. Pri-

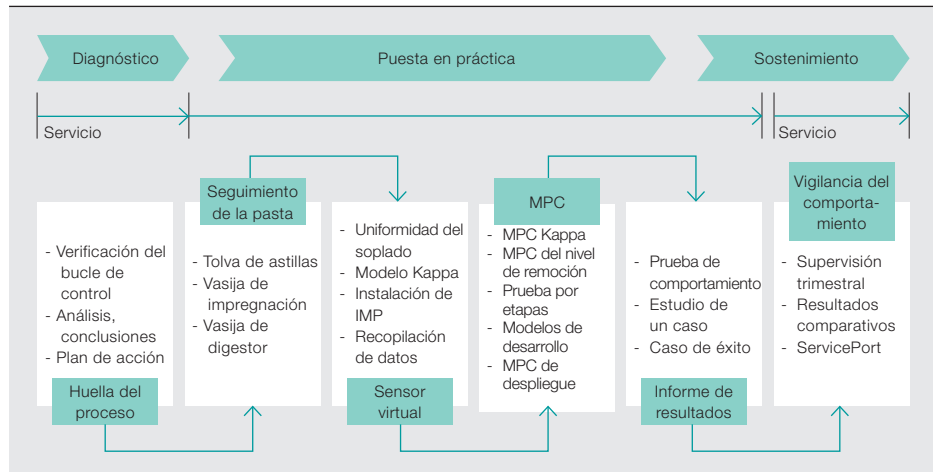
mero, porque todas las astillas que se cargan tienen distinto contenido de humedad y características físicas. Segundo, porque el número Kappa no puede medirse físicamente en el digestor, sino sólo después de que las astillas hayan entrado en la línea de soplado. Esto es un problema porque es esencial conocer el número Kappa antes de ese punto. Como cualquier otra cosa que entra en un horno, la pasta tiene que permanecer ahí sólo el tiempo adecuado, lo bastante para aportar toda la celulosa posible, pero no demasiado, para que no se rompa su estructura física.

Para mantener un proceso uniforme con variaciones mínimas en la calidad de la pasta, hay que determinar el número Kappa tomando medidas continuas de las diversas variables antes de que las astillas entren en el digestor e introducir los valores en un modelo matemático (o sensor virtual) que tenga en cuenta los múltiples efectos no lineales del proceso.

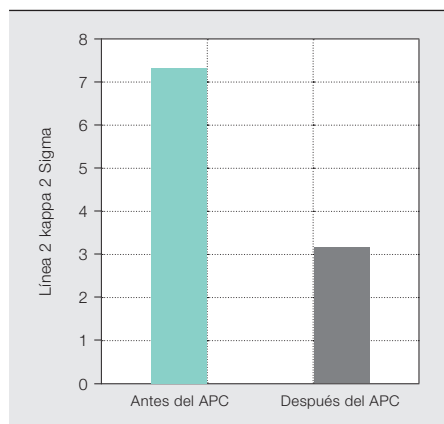
Esto es lo que hace la solución de ABB → 1. El esquema de control avanzado del proceso utiliza un sensor virtual basado en la plataforma Inferential Modeling Platform de ABB que proporciona mediciones virtuales del número Kappa a partir de determinaciones de las variables del proceso. Estas medidas se siguen con una función que crea un modelo virtual de las astillas en su recorrido a través del digestor. A lo largo del recorrido, se obtienen medidas de las características de las astillas que se car-

La solución APC de ABB mantiene el nivel de astillas mediante la manipulación óptima de la velocidad de la rasqueta del fondo del digestor y del caudal de pasta que sale del mismo.

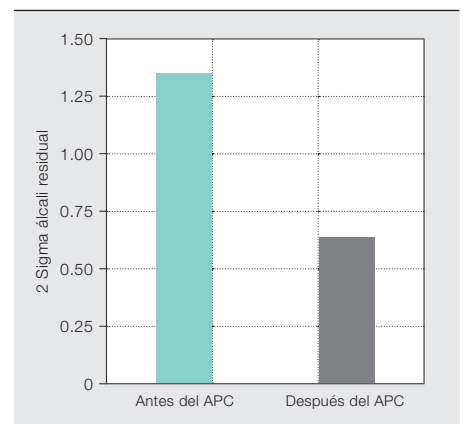
### 3 Método de aplicación del APC



### 4 Reducción de la variación de Kappa (2 Sigma)



### 5 Reducción de la variación de álcali residual (2 Sigma)



gan en el modelo para predecir el número Kappa en cada zona del digestor. El sensor virtual se despliega en línea y entrega medidas virtuales en tiempo real de variables de calidad (como el número Kappa) que se utilizan después en un controlador predictivo basado en modelo para optimizar el proceso de cocción, decidir el tiempo que se expondrán las astillas a una concentración determinada de álcali y mantener su concentración constante en todo el digestor. El APC también puede mantener un ritmo de producción de pasta constante. Por último, un registro de los datos recogidos se resume en informes concisos, con medidas de los indicadores principales de rendimiento.

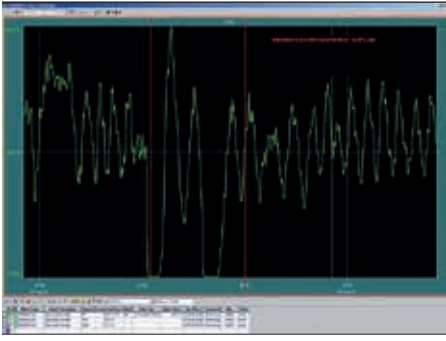
Otra variable importante del proceso de cocción continua es el nivel de astillas dentro del digestor. Las variaciones de este nivel ocasionan una cocción no uniforme, perturbaciones del equilibrio general del licor en el proceso y un cau-

**El primer paso era auditar y analizar los bucles de control y después desarrollar un plan de acción del control de proceso avanzado basado en un control predictivo con modelos y sensores virtuales.**

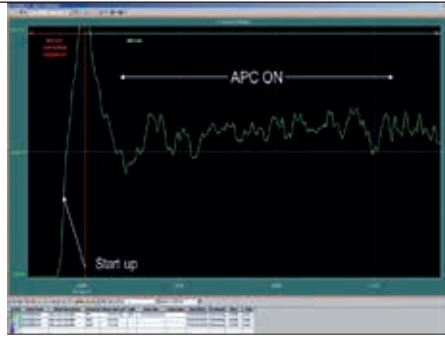
dal irregular de pasta en la salida del digestor. La solución APC de ABB mantiene el nivel de astillas mediante la manipulación óptima de la velocidad de la rasqueta del fondo del digestor y del caudal de pasta que sale del mismo.



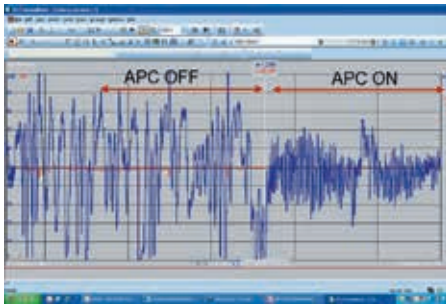
## 6 El APC estabiliza el nivel de astillas



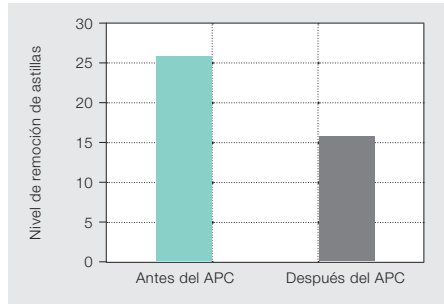
6a Nivel de astillas sin APC



6b Nivel de astillas con APC



6c La estabilidad del proceso es mayor cuando se aplica el APC.



6d El APC conduce a menores niveles de astillas en el digestor.

El método seguido para conseguir los objetivos de Mondi se basaba en la filosofía de Advanced Services de ABB: diagnóstico, aplicación y sostenimiento.

Mientras el APC maneja estas mediciones complejas haciendo predicciones del proceso en tiempo real y aplicando medidas de control óptimo, el sistema de control distribuido (DCS) de ABB, Extended Automation System 800xA, maneja los controles básicos, como caudales de astillas y licor, temperatura, presión, etc. También lleva a cabo la labor vital de controlar el factor H, que es la velocidad de disolución de la lignina. Como depende en gran medida de la temperatura, hay que controlar la cantidad de calor que se suministra al digestor. Una variación de sólo un par de grados respecto al valor óptimo puede causar una gran diferencia en la calidad de la pasta.

La ventaja obvia del APC y el DCS es que el resultado cumple todos los requisitos del cliente para este paso del proceso de fabricación de la pasta. Añadir sólo la cantidad correcta de vapor y sólo la cantidad correcta de licor blanco o de álcali significa que se han retirado del proceso tantos residuos como ha sido posible. Y como se ha producido la máxima cantidad de celulosa de la mayor calidad, se han cumplido también los criterios de calidad y cantidad.

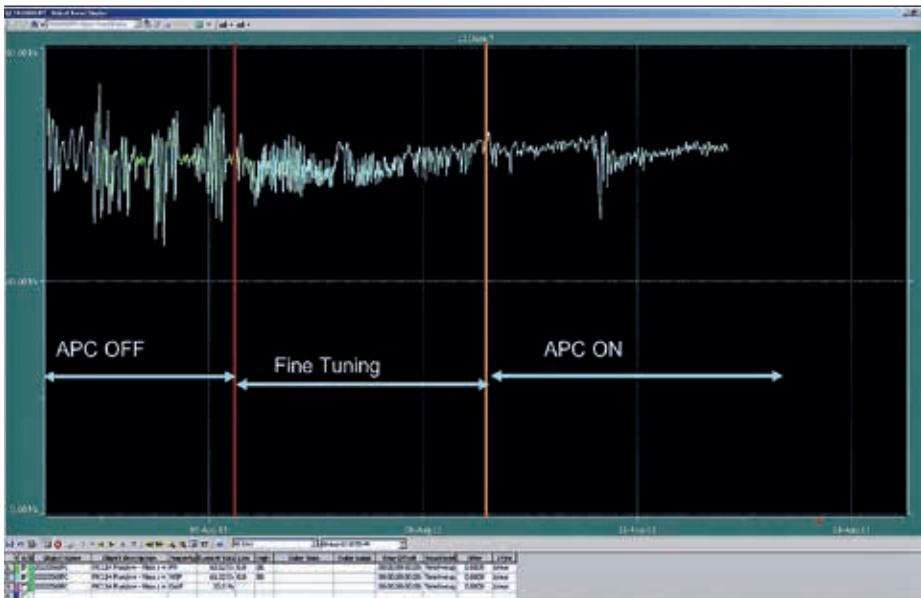
### Proceso de lavado de la pasta parda

El segundo aspecto importante optimizado mediante un sistema APC es el lavado de la pasta parda. Como en el digestor, se recogen datos continuamente para que los sensores virtuales proporcionen lecturas predictivas de lo que está ocurriendo.

La finalidad en esta etapa del proceso es controlar los niveles en los numerosos depósitos de filtrado para que sólo se añadan las cantidades correctas de agua dulce por cada tonelada de pasta parda lavada (esto se llama factor de dilución). Si se obtiene continuamente un valor óptimo para esta variable, se puede recuperar la máxima cantidad de productos químicos de la cocción y emplear en los evaporadores la mínima cantidad de energía. También se reducirán las pérdidas de álcali. Esto lo consigue el APC de lavado de pasta parda → 2, que calcula el factor de dilución óptimo en cada etapa de lavado basándose en mediciones de la conductividad de la pasta en diversos puntos del proceso; al mismo tiempo, asegura que los niveles en los depósitos de filtrado se mantienen dentro de los márgenes especificados. Como en el caso del digestor, la información recogida en toda la operación se presenta a la sala de control en forma de indicadores clave de rendimiento.

Mientras el APC maneja estas mediciones complejas haciendo predicciones del proceso en tiempo real y aplicando medidas de control óptimo, el System 800xA DCS de ABB maneja los controles básicos.

## 7 El APC estabiliza el caudal de soplado



### Metodología de aplicación

El método seguido para conseguir los objetivos de Mondi se basaba en la filosofía de Advanced Services de ABB: diagnóstico, aplicación y sostenimiento → 3.

La fase de diagnóstico implicaba la ejecución de una detallada auditoría del proceso y los bucles de control en Mondi Swiecie, que conducía al desarrollo de un plan de acción específico para la aplicación del sistema APC.

La fase de aplicación implicaba el despliegue de la función de seguimiento de la pasta en el DCS seguido por el desarrollo de sensores virtuales en línea para modelar el número Kappa. Luego se probaron los pasos del proceso para desarrollar modelos matemáticos para el controlador predictivo basado en modelos, que se puso después en servicio, se ajustó y se entregó a los operadores de la planta.

Los APC están ahora en la fase de sostenimiento, en la que ABB ayuda a Mondi a mantener el comportamiento óptimo de los APC con auditorías trimestrales, supervisión a distancia y reajuste en línea.

Un método similar se siguió para la implantación del APC en el área de lavado.

### El resultado

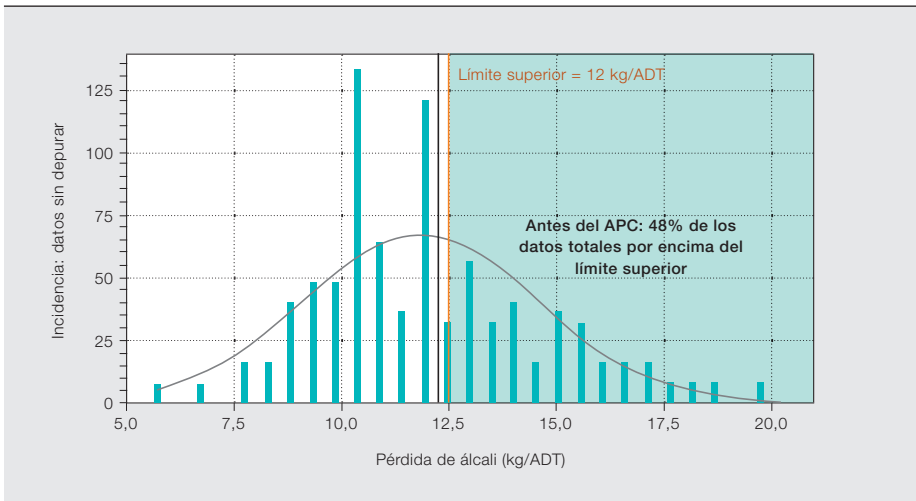
Este trabajo se ejecutó por fases entre agosto de 2011 y diciembre de 2013, fecha en que el sistema estaba totalmente instalado y probado. Durante este proceso, los ingenieros de la fábrica de pasta estuvieron totalmente comprometidos para confirmar que confiaban en el empleo del APC y que podían adaptar sus prácticas de trabajo y formación para hacer el mejor uso de él.

La ventaja obvia del APC y el DCS es que el resultado satisface todos los requisitos del cliente para este paso del proceso de fabricación de la pasta.

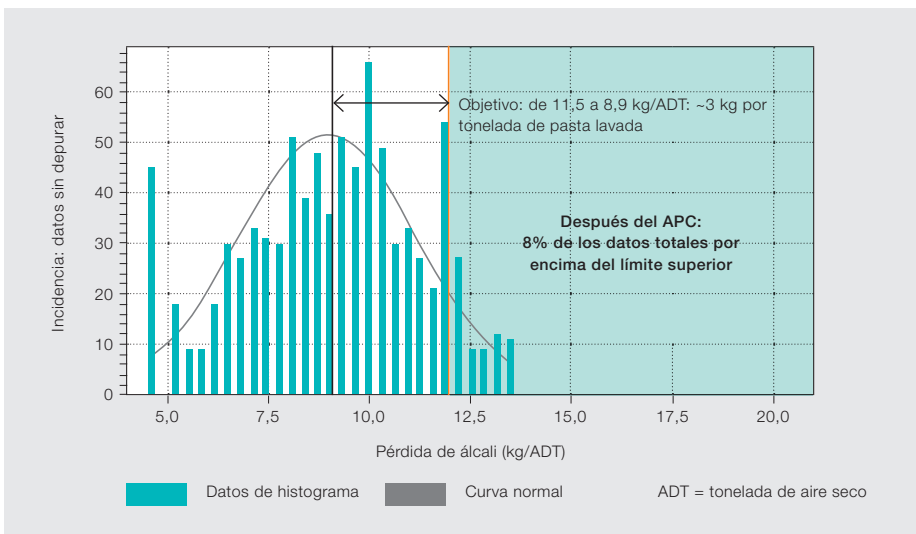
Cuando todo el sistema estuvo montado y en marcha, fue posible obtener algunas mediciones cuantitativas de la medida en que se había alcanzado el objetivo.

- Las variaciones en el número Kappa en el digestor se redujeron en un 56 por ciento, lo que significa que el APC había ayudado a fabricar pasta de una calidad elevada y constante → 4.
- Las variaciones del álcali residual cayeron un 48 por ciento, lo que indica un mejor aprovechamiento del licor blanco en el proceso de cocción → 5.

## 8 El APC disminuye las pérdidas de álcali en el lavado de la pasta parda



8a Antes del APC



8b Posterior al APC

- Se recortaron las variaciones del nivel de astillas del digestor en un 40 por ciento → 6, lo que se tradujo en variaciones menores del caudal de soplado → 7. Esto ha aportado una estabilidad mucho mayor a los procesos de fabricación de pasta y lavado.
- Las pérdidas de álcali en el proceso de lavado se redujeron un 30 por ciento → 8.
- Se redujeron el volumen de agua dulce empleado en el área de lavado y el consiguiente consumo de vapor por los evaporadores.
- Se estabilizaron los niveles de los depósitos de filtrado de lavado y de soplado, con la consiguiente reducción del dióxido de carbono y de la carga de efluente.

El proceso de optimización y la validación de la solución por la propia fábrica ha permitido a ABB ofrecer soluciones normalizadas a otras plantas de pasta;

estas soluciones se llaman ahora OPT800 Cook/C para digestores continuos y OPT800 Wash para lavado de la pasta parda.

Por último, la solución APC ha abierto puertas no solo a otras oportunidades de APC, sino también para System 800xA DCS. Un ejemplo reciente es un pedido de DCS para la mayor planta de pasta y papel del mundo, que se está construyendo en Indonesia. Una de las exigencias principales del cliente era una solución de APC probada, además del DCS, y el proyecto Mondi Swiecie la proporcionaba.

Abhijit Badwe

Ramesh Satini

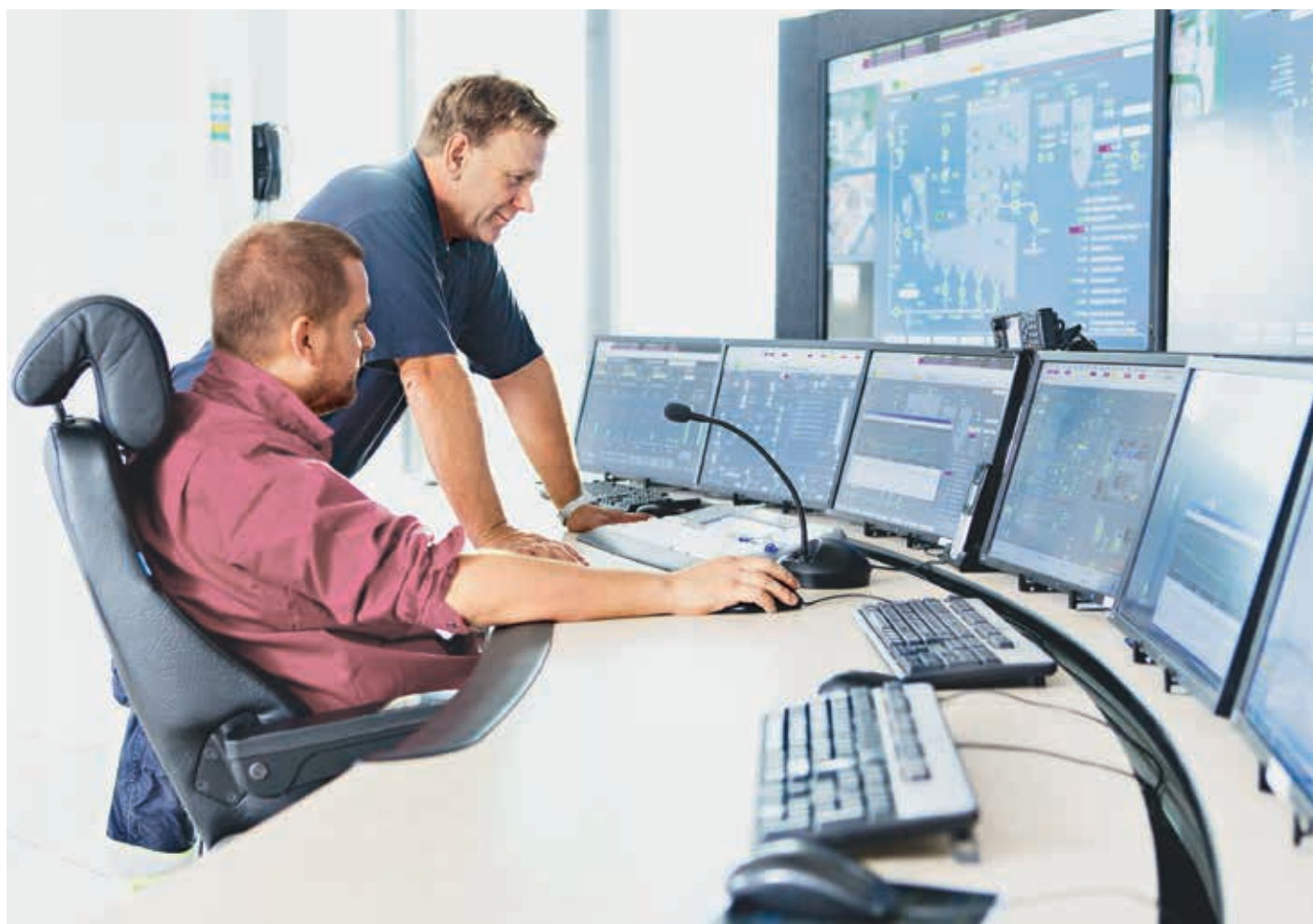
ABB Pulp and Paper Control Systems

Technology Center

Singapur

abhijit.badwe@sg.abb.com

ramesh.satini@sg.abb.com



# Descubrimientos alarmantes

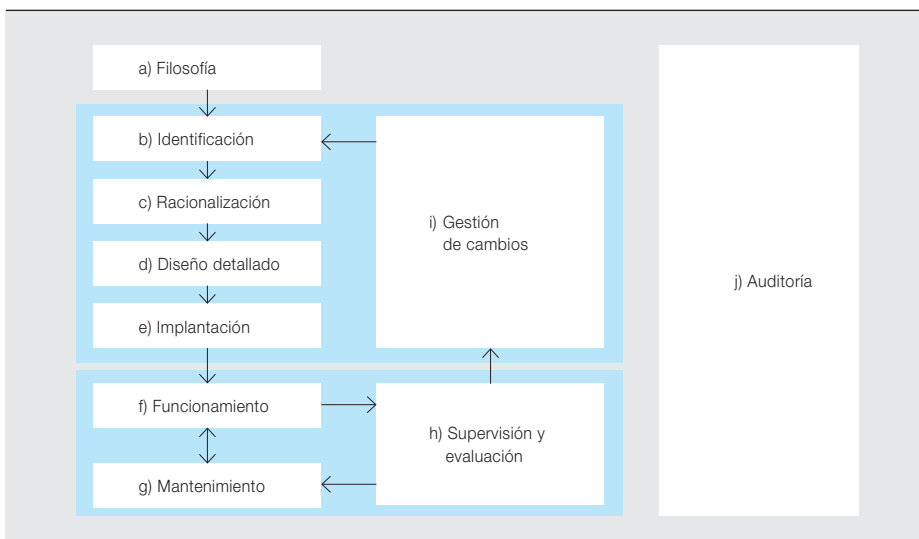
Mejorar la efectividad del operador con asistencia durante el ciclo de vida de las alarmas

MARTIN HOLLENDER, JOAN EVANS, THOMAS-CHRISTIAN SKOVHOLT, ROY TANNER – Antes de un reciente ejercicio de simulación en Star City, Moscú, preguntaron al astronauta británico Tim Peak qué era lo más difícil durante la simulación. “Lo más difícil es enfrentarse a varios fallos simultáneos” [1]. También en plantas industriales con sistemas de control distribuido, las “avalanchas” de alarmas siguen siendo uno de los mayores desafíos. Para controlar esta avalancha de alarmas, es necesario acceder en la fase operativa a los conocimientos adquiridos en las fases iniciales para poder tomar con confianza decisiones sobre métodos de alarma avanzados, como la supresión de alarmas. Disponer de una buena asistencia para la gestión del cambio y el ciclo de vida permite a ABB mantener un sistema de alarma acorde con la realidad cambiante en la planta y en mejora continua. Las normas de gestión de alarmas, como EN 62682:2015 o ISA 18.2, recalcan la importancia de la asistencia durante el ciclo de vida en la gestión de alarmas.

## 1 Pensamiento durante el ciclo de vida en seguridad funcional y gestión de alarmas

	Seguridad funcional		Gestión de alarmas
1996	ANSI/ISA 84.01	2009	ANSI/ISA 18.02
2003	IEC 61511	2014	IEC 62682

## 2 El ciclo de vida en la IEC 62682



Aunque ahora está aceptada la necesidad de una gestión de alarmas efectiva, accidentes como el de 2010 en la planta de DuPont en Belle, West Virginia [2], demuestran que incluso empresas líderes en seguridad como DuPont siguen sufriendo deficiencias. Como los sistemas de control distribuido (DCS) configurables por software se han convertido en los más utilizados, pueden añadirse alarmas con un coste mínimo o nulo para el usuario final. Esto ha dado lugar a sistemas de control de mala calidad debido a la necesidad de configurar demasiadas alarmas. Un ejemplo clásico es la explosión en la refinería de Texaco en Milford Haven en 1994 [3], donde dos operarios recibieron 275 alarmas en los 11 minutos previos a la explosión. Ahora esto se considera un sistema de alarma sobrecargado, que impide al operario percibir correctamente la situación, diagnosticarla y corregirla. Estos sistemas de alarma no son ni útiles ni aceptables y dieron lugar al desarrollo de métodos de gestión de alarmas sistemáticos, documentados por primera vez en la norma EEMUA 191 publicada en 1999.

### Imagen del título

Métodos de alarma avanzados que prestan un apoyo crítico a los operadores de plantas modernas.

Diez años después, la norma ISA 18.2 añadió un planteamiento de ciclo de vida para la gestión de alarmas similar al ya establecido con éxito en la comunidad de seguridad con las normas ISA 84 e IEC 61511. En resumen: garantizar un funcionamiento seguro y alarmas útiles exige un esfuerzo continuo.

La nueva norma IEC 62682 (publicada en 2014) [4], la primera norma internacional de gestión de alarmas, se basa en la ISA 18.2 → 1. Hace hincapié en la importancia de la gestión sistemática del ciclo de vida. La norma IEC 62682 exige, por ejemplo, compilar y documentar toda la información utilizada para diseñar alarmas (estudios de seguridad, especificaciones de los equipos, etc.). Luego, durante el uso de la planta, se puede recopilar más información o revisar las decisiones de diseño originales. Dicha revisión requiere que toda la información en la que se basó la decisión original esté disponible y sea comprendida perfectamente para evitar que los cambios tengan un efecto peligroso.

→ 2 captura la esencia de la norma IEC 62682 y se puede utilizar para desarrollar y mantener un sistema de alarma conforme con IEC 62682 y las buenas prácticas industriales.

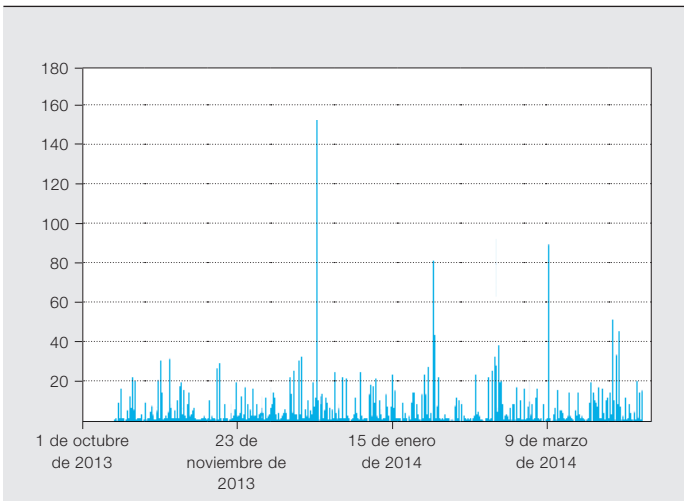
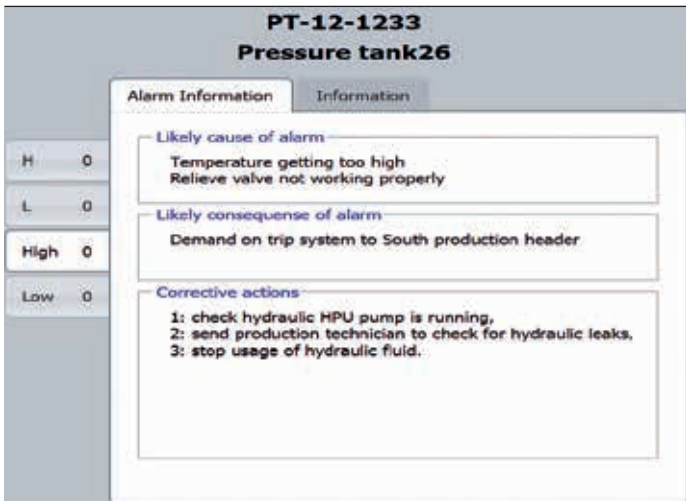
## Un ejemplo clásico de sistema sobrecargado es la explosión en la refinería de Texaco en Milford Haven, donde dos operarios recibieron 275 alarmas en los 11 minutos previos a la explosión.

### Filosofía de la alarma

El primer paso en el ciclo de vida del proyecto es la filosofía de alarmas. Se llama así al plan para gestionar las alarmas de la planta. Define lo siguiente:

- Funciones y responsabilidades
- Requisitos de alarma
- Procesos de trabajo y procedimientos para cumplir los requisitos acordados

La norma IEC 62682, entre otras, es una guía útil sobre el contenido y la estructura de una filosofía de alarmas adecuada.



## Los principios de gestión de alarmas deben traducirse en actividades concretas del proyecto.

Según la experiencia de ABB, el desafío no está en la autoría del documento sino en su aplicación al ciclo de vida del proyecto. La asistencia de consultoría de ABB para esta actividad se centra en la traslación de los principios de gestión de alarmas a actividades y documentos mientras se comunica el efecto de los requisitos de alarmas a todo el equipo del proyecto.

Esto es crucial para que el propósito y la intención del diseño de las alarmas se identifiquen y documenten durante revisiones del proyecto como los estudios sobre riesgos y operatividad (HAZOP), el análisis de capas de protección (LOPA) y el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).

A medida que surge esta información del diseño de alarma, el proyecto pasa a decidir cómo y dónde se almacenarán y gestionarán los datos de alarmas. A este fin, la norma IEC 62682 ha confirmado el concepto de base de datos maestra de alarmas, que se define como “una lista autorizada de alarmas racionalizadas y atributos asociados”. ABB la

ha implementado en la Herramienta de racionalización de alarmas (ART), que ofrece muchas ventajas:

- Funciones completas de base de datos para la captura y navegación rápida de todos los datos de configuración y diseño de alarmas.

- Formularios de entrada con todos los valores de configuración de una alarma en una única pantalla, diseñados para facilitar reuniones eficientes de racionalización de alarmas.
- Funciones de copia controladas para reutilizar configuraciones ya creadas para casos similares.

### Racionalización

La norma IEC 62682 [5] nos recuerda que en la fase de racionalización del ciclo de vida de la alarma es necesario identificar los siguientes elementos en cada alarma:

- Acción del operario recomendada
- Consecuencia de la inacción o de la acción incorrecta
- Causa probable de la alarma

Disponer de esta información permite adoptar medidas más coherentes y ayu-

## A medida que surge la información del diseño de alarma, el proyecto pasa a decidir cómo y dónde se almacenarán y gestionarán los datos de alarmas.

da a los operarios inexpertos a fortalecer su propia base de conocimientos y su seguridad. En casos de renovación de instalaciones, el personal de operaciones es la fuente de información más fiable. En una planta nueva, la definición completa de las alarmas necesarias es



más compleja, y se basa en gran medida en los datos de diseño y del proveedor.

Además de capturar los requisitos de alarma y los datos de diseño, la herramienta ART de ABB exporta los datos de respuesta del operario a la aplicación Alarm Helper online de ABB → 3. Alarm Helper proporciona toda esta información al operario del sistema de automatización ampliado 800xA. Tanto Alarm

la ha integrado en la tercera edición de EEMUA 191. La gestión de alarmas requiere un esfuerzo continuo para mantener buenas prácticas y garantizar la uniformidad.

Actualmente, muchas plantas tienen la tasa media de alarmas controlada, con pocas alarmas durante el funcionamiento normal. Pero las avalanchas de alarmas siguen siendo un problema.

– Avalancha de alarmas en la cadena causal después de un problema del proceso. Una única causa genera muchas alarmas derivadas. La primera alarma de la lista puede no ser la más cercana a la causa original; dependiendo de la dinámica del proceso y la configuración de los límites, es posible que se muestren primero alarmas secundarias que induzcan a error.

## Las avalanchas de alarmas no se evitan solo eligiendo buenos valores de configuración de límites, histéresis o temporizadores de retardo.

Helper como ART forman parte del paquete de gestión de alarmas integral de ABB AlarmInsight. AlarmInsight es un conjunto de herramientas de gestión de alarmas desarrollado y testado para trabajar con 800xA ahora y en el futuro.

Esta función de ayuda en línea es especialmente importante para alarmas críticas (según IEC, con un alto nivel de gestión [6]) y cada vez hay más reguladores de seguridad que la esperan. Las plantas que ya utilizan Alarm Helper también afirman que es una herramienta de asistencia al operario muy efectiva y popular.

### Esfuerzo continuo

En la fase de explotación, la gestión del ciclo de vida de la alarma es esencial en la norma IEC 62682, y también ISA 18.2

→ 4 muestra la tasa de alarmas de una planta petroquímica durante medio año. Aunque la tasa media de alarmas no llega a una cada 10 minutos y, por lo tanto, está controlada, se producen con regularidad avalanchas de más 100 alarmas cada 10 minutos y de unas 20 alarmas cada 10 minutos.

Estas avalanchas suelen ocurrir en las fases más exigentes, cuando los operarios más necesitan asistencia (p. ej., durante un arranque o parada). Los escenarios de avalancha de alarmas incluyen:

– Avalanchas por parada de secciones del proceso (flujo bajo de alarmas después de la parada de una bomba), funcionamiento en un modo diferente (limpieza) o calibración de instrumentos. Esto puede ser grave si coincide con un problema de proceso y las alarmas importantes quedan ocultas por una avalancha de alarmas innecesarias.

→ 4 muestra la tasa de alarmas de una planta petroquímica durante medio año. Aunque la tasa media de alarmas no llega a una cada 10 minutos y, por lo tanto, está controlada, se producen con regularidad avalanchas de más 100 alarmas cada 10 minutos y de unas 20 alarmas cada 10 minutos.

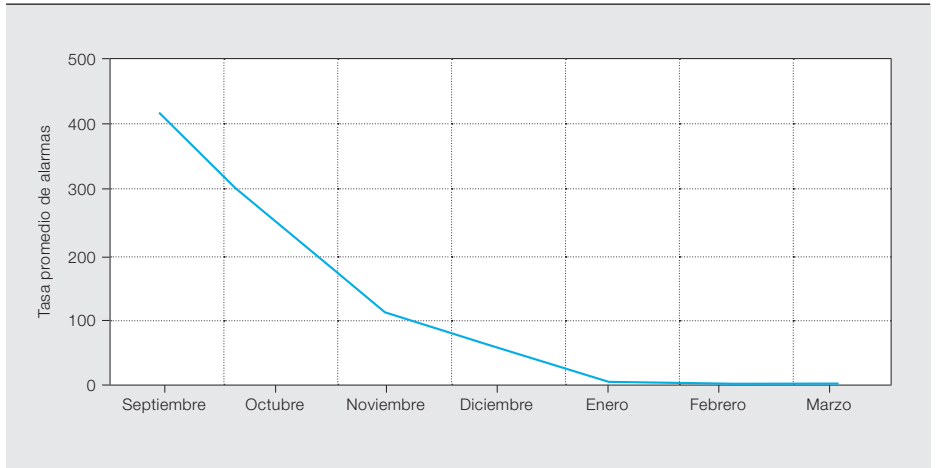
Estas avalanchas de alarmas no se evitan solo eligiendo buenos valores de configuración de límites, histéresis o temporizadores de retardo. Entran en juego técnicas de alarma avanzadas, como la ocultación (llamada supresión por diseño en IEC 62682) y la agrupación. El sistema 800xA de ABB es un potente juego de herramientas de gestión avanzada de alarmas a nivel de controlador, servidor y estación de trabajo, e incluye agrupación, ocultación (supresión dinámica) e inhibición de alarmas activada por el operario durante un tiempo limitado.

### Riesgo equilibrado

Al afrontar una avalancha de alarmas, la clave es encontrar el equilibrio entre el riesgo potencial de suprimir una alarma durante un escenario dado y la necesidad de atender picos de alarmas en condiciones anómalas. Estos riesgos se mitigan con un juego completo de herramientas de eficacia probada, como el sistema AlarmInsight → 5 de ABB, y un proceso robusto de gestión del cambio (MOC) con el nivel adecuado de revisión y aprobación.

# ABB redujo la tasa media de alarmas en la planta marina de gas de Rashpetco, y las paradas pasaron de 25 a seis al año.

## 6 Menor tasa de alarmas en la planta marina de gas de Rashpetco con AlarmInsight de ABB



Las revisiones de racionalización iniciales (prospectivas) pueden identificar candidatos para la supresión de alarmas básicas, como la agrupación para ocultar alarmas de equipos fuera de servicio. Los estudios posteriores de avalanchas de alarmas durante la fase de operaciones tratarán de ir más allá y hacer uso del catálogo completo de funciones de AlarmInsight:

- Comentarios del operador sobre las respuestas a las alarmas almacenados y presentados en Alarm Helper
- Datos detallados de análisis de alarmas con Expert Tool y Alarm Analysis
- Atributos actuales de alarma de la base de datos de ART

Estas herramientas combinadas ayudan a identificar posibles escenarios de supresión de alarmas basados en el análisis de datos reales de la planta. Al eliminar la necesidad de un análisis manual "ad hoc", el riesgo de error humano en la deducción de la causa y el efecto se reduce y las conclusiones pueden basarse en datos mucho más numerosos, de varios años si es necesario. Una vez identificado, revisado y confirmado un escenario concreto, se pueden usar las herramientas para explorar si hay otros casos en los que se aplique la misma lógica. La integración del producto entre el sistema 800xA de ABB y AlarmInsight permite optimizar, imponer y supervisar alarmas a lo largo del tiempo.

Este método ha demostrado su eficacia en muchos casos:

- Identificación de alarmas tras una parada concreta
- Análisis de incidentes críticos con indicación de activadores a los que el

operario puede responder precozmente (intervención) y mitigación de apagado de equipos / incidentes de planta

Las principales ventajas se logran con las herramientas de ciclo de vida, que definen un marco para la mejora continua, e incluyen:

- Reducción de paradas de la producción
- Reducción de riesgos legales: operaciones más ecológicas y seguras
- Mejora de la efectividad del operario

→ 6 muestra como ABB redujo la tasa media de alarmas en la planta marina de producción de gas de Rashid Petroleum Company (Rashpetco). A su vez, esto redujo las paradas en la planta de 25 a seis al año. Cada parada cuesta mucho dinero, por lo que el ahorro total es sustancial.

### Visión más clara

La gestión de alarmas preocupa a los reguladores, a otros organismos oficiales y al público en general, que reclaman un método de gestión del ciclo de vida y una mejora continua que aumenten la seguridad de las plantas. Con IEC 62682, las buenas prácticas de gestión de alarmas adoptan por fin la forma de una norma internacional. ABB mejora la gestión de alarmas con herramientas que logran ahorros sustanciales documentados y que las autoridades reguladoras aceptan como buena práctica.

Hay versión española de la norma IEC 62682, con el número EN 62682:2015.

#### Martin Hollender

ABB Corporate Research  
Ladenburg, Alemania  
martin.hollender@de.abb.com

#### Joan Evans

ABB Process Automation, Oil, Gas & Chemicals  
Billingham, Reino Unido  
joan.evans@gb.abb.com

#### Thomas-Christian Skovholt

ABB Process Automation, Oil, Gas & Chemicals  
Oslo, Noruega  
thomas-christian.skovholt@no.abb.com

#### Roy Tanner

ABB Process Automation, Control Technologies  
Wickliffe, Ohio, Estados Unidos  
roy.tanner@us.abb.com

#### Referencias

- [1] D. Shukman. (2015, November 11). *Tim Peake: British astronaut's training nears end*. Available: <http://www.bbc.com/news/science-environment-34788169>
- [2] S. Smith, "Did DuPont Prioritize Cost Over Safety at Belle, W.Va., Facilities? Chemical Safety Board Investigation Indicates It Did," *EHS Today*, July 2011.
- [3] "The explosion and fires at the Texaco Refinery, Milford Haven, 24 July 1994," Health and Safety Executive, Norwich, 1997.
- [4] *Management of Alarm Systems for the Process Industries*, IEC 62682, 2014.
- [5] *Required and Recommended Alarm Philosophy Content*, IEC 62682, section 6.2.1, Table 3, p. 36.
- [6] *Highly Managed Alarms*, IEC 62682, section 6.2.9, p. 38.



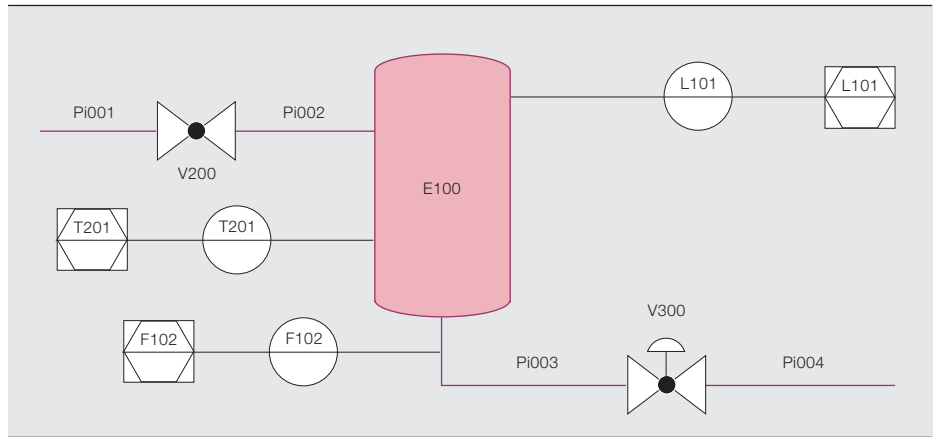


# De papel a modelos digitales

Proyecto de investigación para la extracción de descripciones orientadas a objetos a partir de esquemas de tuberías e instrumentación

ESTEBAN ARROYO, STEVE ROYSTON, ALEXANDER FAY, MARIO HOERNICKE, PABLO RODRIGUEZ – En las industrias de proceso, la documentación puede alcanzar volúmenes inmanejables. La diversidad de formatos, incluidos el papel y las representaciones digitales básicas, contribuyen a dificultar aún más el acceso a la información contenida en documentos existentes. Cuando el propietario de una planta decide consolidar esta información tan diversa –por ejemplo, para preparar un proceso de modernización–, convertirla a un formato único actuali-

zado y accesible puede exigir un esfuerzo desmesurado. Con el objetivo de disminuir el esfuerzo requerido durante este proceso, ABB ha explorado formas eficientes de extraer modelos a partir de documentos técnicos utilizando métodos automatizados. Un proyecto de investigación conjunto de ABB y la Helmut Schmidt University (HSU) de Hamburgo (Alemania) ha creado un método basado en reconocimiento óptico y análisis semántico capaz de transformar diagramas de proceso (P&ID, por sus siglas en inglés) en modelos orientados a objetos.



modelo de datos. Para resolver este problema, ABB, en colaboración con la HSU, ha creado un método para la extracción de representaciones orientadas a objetos (OO) a partir de documentos de diseño, en particular de P&ID [2].

Investigaciones previas han demostrado que el uso de P&ID puede mejorar diferentes tareas a lo largo del ciclo de vida de la planta, como

los estudios de riesgo y operabilidad automatizados (HAZOP) [3], la detección de pautas de diseño [4], la derivación de modelos de simulación [5] y la detección y diagnóstico de averías [6]. Todos los enfoques existentes tienen como

condición previa que los P&ID sean descritos en formatos orientados a objetos (p. ej., IEC 62424 CAEX/AutomationML [7,8] o ISO 15926 [9]). Desafortunadamente, esto no es lo habitual en plantas de proceso, donde casi todos los P&ID son archivados en formas que un ordenador no puede procesar.

### De los píxeles al significado

El método propuesto extrae modelos OO a partir de documentos con texto e imágenes, en concreto de P&ID → 1, mediante reconocimiento de texto, símbolos y elementos de conexión. Este enfoque se basa en la noción de que los documentos analizados constan de cuatro componentes fundamentales, a saber: formas paramétricas, formas no paramétricas, anotaciones de texto y contenido semántico subyacente → 2.

El proceso de conversión asume que los P&ID se guardan en archivos PDF (pdf/bitmap o pdf/SVG), de los que pueden extraerse imágenes rasterizadas. En algunos casos es necesario un tratamiento previo para poder obtener la imagen rasterizada, sobre todo cuando se trata de documentos en papel o archivos CAD → 3. A partir de aquí, el método ejecuta tres procedimientos para gene-

## Los documentos de entrada contienen cuatro componentes fundamentales: formas paramétricas, formas no paramétricas, texto y contenido semántico subyacente.

rar un modelo que pueda procesar un ordenador:

- Reconocimiento óptico: OSR y OCR → 4, para la identificación de símbolos y texto, respectivamente.
- Análisis semántico: interpretación de la connotación funcional de las formas gráficas para mejorar el procedimiento de reconocimiento y aumentar la capacidad de expresión en la descripción del modelo.
- Representación y verificación: descripción de la información capturada como un modelo OO, que finalmente se inspecciona por medios visuales.

### Reconocimiento óptico (OR)

El OR emplea técnicas eficientes de procesamiento de imágenes para identificar formas geométricas y anotaciones de texto. El proceso se ejecuta mediante la

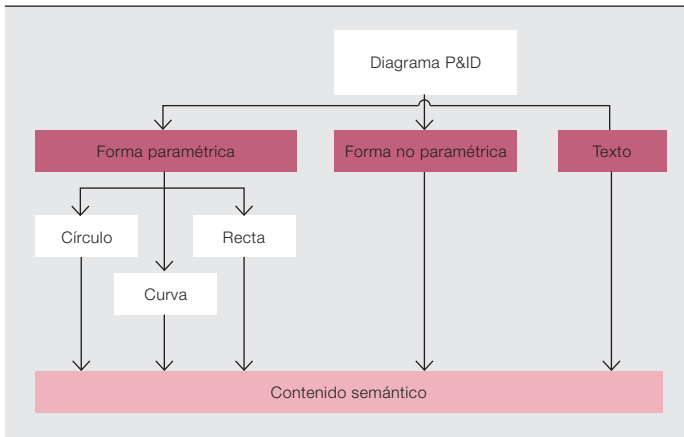
**E**l enorme tamaño y la complejidad de las plantas industriales de proceso, junto con las numerosas modificaciones y adiciones que se realizan a lo largo de su ciclo de vida, se plasman en grandes cantidades de documentos, incluyendo modelos estructurales, descripciones funcionales, P&ID y especificaciones de equipamiento. Aunque estos documentos constituyen una valiosa fuente de información que debería ser aprovechada en las actividades de planificación y operación de la planta, esta posibilidad se ve limitada en la práctica por la dificultad de localizarla cuando se necesita y extraer los datos que contiene [1].

En la práctica industrial actual, la documentación técnica se digitaliza manualmente mediante escaneado, almacenaje e indización. Los archivos resultantes contienen información no estructurada que no puede explotarse plenamente para tareas de automatización ya que su contenido no se adapta a la forma de un

### Imagen del título

La documentación utilizada en las industrias de proceso se presenta en distintas formas, que incluyen el papel y los formatos electrónicos básicos. ¿Cómo pueden convertirse dichos documentos a un estándar moderno orientado a objetos?

## 2 Composición de un P&ID típico



aplicación recursiva de dos métodos: OSR y OCR.

### Reconocimiento óptico de símbolos (OSR)

En el primer paso del OSR, se localizan los símbolos no paramétricos (formas con varias curvas), como el “Tanque E100” o la “Válvula V300” → 1, y se comparan con bibliotecas predefinidas de patrones. Una biblioteca puede representar, por ejemplo, catálogos de elementos de planta o conjuntos de símbolos de uso común en la representación de dispositivos o procesos concretos en P&ID. La definición de bibliotecas no solo garantiza modularidad, que a su vez resulta en procedimientos de búsqueda más eficaces, sino también captura y reutilización efectivas de conocimiento estructural generado durante distintos proyectos. El criterio de coincidencia empleado durante la identificación se basa en las características estructurales de las formas examinadas. Tres propiedades geométricas clave → 5 son soportadas para garantizar una búsqueda exhaustiva de posibles coincidencias. Estas son: rotación, escalado y oclusión.

El método utiliza indicadores numéricos o métricas para cuantificar la medida de la similitud entre los candidatos identificados y los patrones, permitiendo así la definición de niveles de confianza en el método de reconocimiento. Como última fase de este proceso, los objetos encontrados se eliminan de la imagen para facilitar el reconocimiento de los componentes restantes.

En un segundo paso, se identifican símbolos paramétricos (formas que pueden ser descritas matemáticamente, como círculos o líneas), p. ej., la “Tubería Pi002” o el “Sensor L101” en → 1. Los métodos

de reconocimiento usados en este procedimiento son capaces de identificar posibles candidatos independientemente de su tamaño y orientación. Se pueden fijar umbrales para definir las dimensiones mínimas de las formas paramétricas y evitar así que los caracteres se identifiquen erróneamente como símbolos. Al igual que en el caso de los símbolos no paramétricos, la fiabilidad del proceso de reconocimiento puede ajustarse en función de métricas de similitud. También aquí se eliminan los objetos hallados para facilitar la identificación de los componentes restantes.

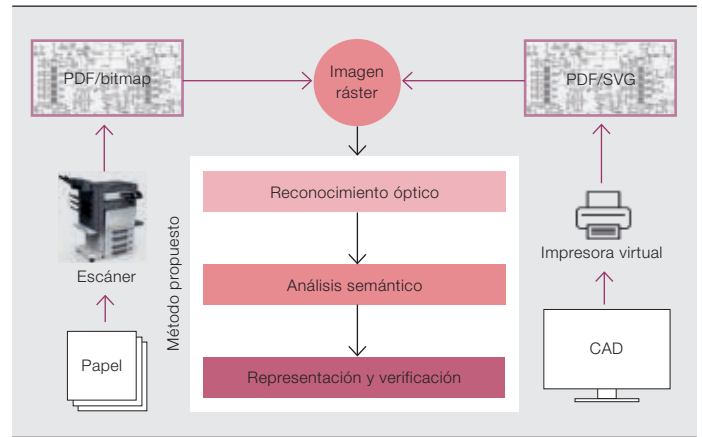
### Reconocimiento óptico de caracteres (OCR)

Partiendo de la idea de que la etiqueta con el nombre de un objeto se encuentra cerca o dentro de él, se utilizan las coordenadas de las formas identificadas para generar ventanas de búsqueda → 6. El tamaño de una ventana es normalmente proporcional a las dimensiones de la imagen analizada. También puede definirlo el usuario. Un algoritmo OCR busca texto dentro de la ventana definida. Si se encuentra más de una etiqueta, se aplican reglas de nomenclatura (p. ej. expresiones regulares) para descartar cadenas erróneas y de esta manera asignar una única etiqueta a cada objeto. Las identificaciones ambiguas (debido a caracteres en contacto, por ejemplo) se comunican oportunamente al usuario para que este las resuelva manualmente.

### Análisis semántico (SA)

En el contexto del método desarrollado, SA hace referencia a la incorporación de conocimiento específico del campo o área, en particular contenido funcional y estructural, al reconocimiento de formas gráficas y sus interrelaciones. El SA se utiliza, entre otras cosas, para detectar la

## 3 Resumen del flujo de trabajo de digitalización



## 4 Glosario de términos

AML	Lenguaje de marcado para automatización
CAD	Diseño con ordenador
CAEX	Intercambio informatizado de documentación técnica
PDF	Formato independiente de la plataforma
DTI	Esquemas de conducciones e instrumentación
OCR	Reconocimiento óptico de caracteres
OO	Orientado a objetos
OR	Reconocimiento óptico
OSR	Reconocimiento óptico de símbolos
SA	Análisis semántico
SVG	Gráfico vectorial escalable

Tras la detección de la conectividad, se prueban otras reglas para que las detecciones equivocadas puedan corregirse automáticamente o bien para advertir al usuario.

conectividad y para afinar la capacidad de expresión del modelo mediante la definición de tipos de conexión específicos.

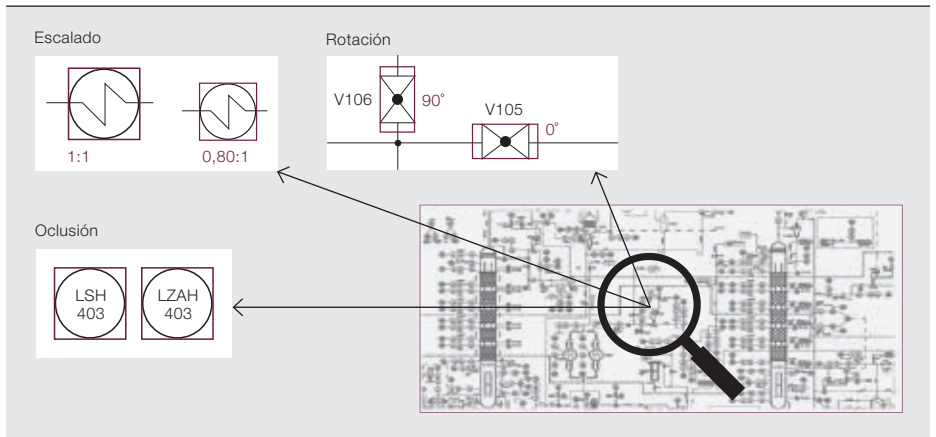
#### Mejora de la detección de la conectividad

En los diagramas técnicos se representan las conexiones entre elementos con polilíneas. Por consiguiente, la detección de la conectividad exige un primer paso en el que se agrupan las líneas contiguas en elementos de enlace o conexión simples. En un segundo paso, se analiza la proximidad de estos elementos a las formas estructurales previamente identificadas, con lo cual es posible deducir la conectividad subyacente del diagrama. Con el fin de garantizar la consistencia de los enlaces, se aplican reglas semánticas que consideran la naturaleza del diagrama analizado. Una regla semántica válida para un P&ID puede establecer, por ejemplo, que una tubería puede conectarse como máximo a otros dos elementos, uno en cada extremo. Si hay casos en los que se han detectado elementos que no cumplan con las reglas establecidas, se podría corregir automáticamente o informar al usuario.

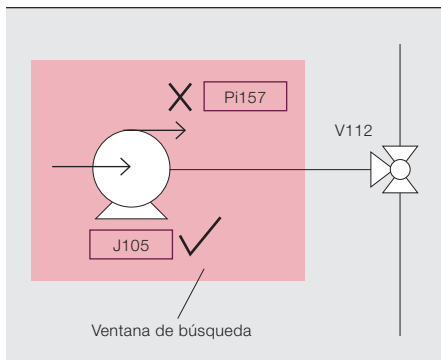
#### Definición de tipos de conexión

Para generar modelos OO detallados, es necesario distinguir entre los diferentes tipos de conectividad. Por ejemplo: la semántica (funcional y física) de una conexión Tanque-sensor es intrínsecamente diferente a la de una conexión Tanque-tubería → 1. La primera transmite información y normalmente se representa con una conexión cableada; la segunda transporta material y representa una tubería.

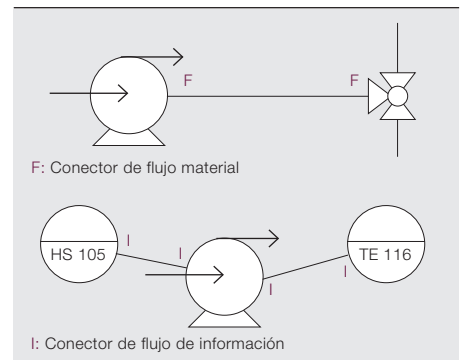
### 5 Características del proceso de coincidencia geométrica



### 6 Ventanas de búsqueda y asignación de identificadores de etiqueta



### 7 Tipos específicos de conexión



### 8 Ejemplo de matriz de conectividad

	Vasija E100	Tubería Pi002	Sensor L101
Vasija E100		F	I
Tubería Pi002	F		
Sensor L101	I		

### 9 Ejemplo de tabla de coordenadas

Recurso de planta	Coordenadas (X,Y) de P&ID	Dimensiones (L, A)
Vasija E100	(81,123)	(123, 57)
Tubería Pi002	(59,142)	(22,1)
Sensor L101	(105, 126)	(18,18)

Esta distinción es fundamental en diversos casos, como la detección y el diagnóstico de averías, donde el análisis de posibles causas subyacentes depende en gran medida del medio de propagación de las perturbaciones a través de la planta → 7.

#### Representación y verificación (R&V)

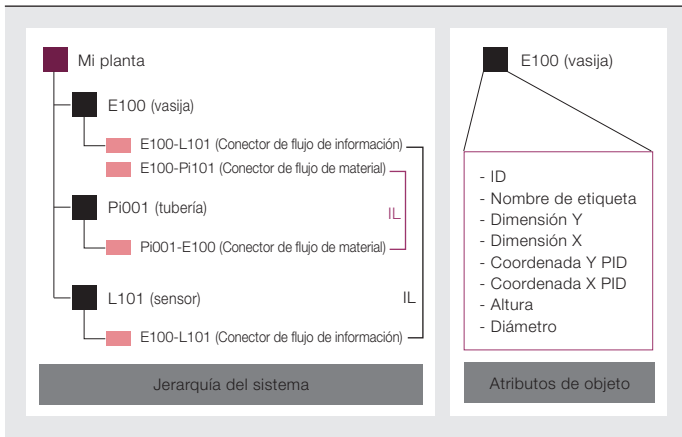
En la fase de R&V, la información extraída por los algoritmos de procesamiento de imagen se transfiere a una descripción estructural intermedia y, por último, a un modelo OO. El proceso termina con una inspección visual en la que el usuario verifica en una interfaz la coherencia de los componentes digitalizados.

#### Descripción estructural intermedia

Para crear una primera representación de la información recopilada, la conectividad, la posición y las dimensiones de los elementos encontrados se almacenan en una matriz de conectividad y una tabla de coordenadas, respectivamente.

La matriz de conectividad → 8 contiene, como primera fila y columna, la lista de los elementos reconocidos. Estos reciben un nombre según su clase de identificador (ID). Por ejemplo: Tanque E100. Las entradas internas de la matriz representan la conectividad entre elementos (fila, columna). Los tipos de conectividad se indican

## 10 Ejemplo de modelo OO derivado



con nombres característicos: F para flujo de material; I para flujo de información.

La tabla de coordenadas → 9 guarda la posición de los objetos dados y sus respectivas dimensiones.

Las descripciones estructurales intermedias pueden codificarse como hojas de cálculo (p. ej., en Microsoft Excel o en tablas de datos en Windows Forms) a las que se accede recursivamente para derivar los modelos OO deseados. Asimismo, estas descripciones pueden emplearse para realizar tareas básicas, como generar listas de equipos o responder consultas sobre la presencia de un objeto o un tipo de objeto determinado.

### Modelado OO

A partir de los datos recopilados, se genera un modelo OO, en concreto un modelo CAEX/AutomationML conforme con IEC 62424 [7,8]. El procedimiento empieza creando un objeto por cada entrada de la primera columna de la matriz de conectividad. A continuación se añaden las conexiones. Por ejemplo: para el Tanque E100 se crean dos conexiones, una del tipo Flujo de material (F) y otra del tipo Flujo de información (I) → 10. El procedimiento finaliza con la asignación de atributos (p. ej., posición y dimensiones). De esta forma se obtiene un modelo OO que describe la conectividad y la información semántica del P&ID.

### Inspección visual

Como último paso del procedimiento, se genera una representación gráfica de la información extraída → 11. Sobre el P&ID original en blanco y negro se superponen formas en color que representan los objetos identificados. Los usuarios pue-

den ver estos objetos y compararlos con el esquema original y efectuar cambios en caso de ser necesarios. Las correcciones efectuadas en la interfaz gráfica se aplican directamente al modelo OO, lo que evita el uso adicional de otras herramientas. Las advertencias generadas previamente pueden utilizarse para priorizar el procedimiento de cotejo.

### Obtener el máximo beneficio de la documentación

El mejor aprovechamiento de la información existente por medio de la conversión automatizada de documentación antigua en modelos de planta digitales puede aumentar significativamente la eficiencia de las tareas de proyectos de ingeniería y de renovación. El método descrito en este documento puede aplicarse en diversos campos de la industria de proceso incluyendo los sectores químico, farmacéutico, petroquímico y de generación eléctrica.

#### Esteban Arroyo

**Alexander Fay**  
Helmut Schmidt University  
Hamburgo, Alemania  
esteban.arroyo@hsu-hh.de  
alexander.fay@hsu-hh.de

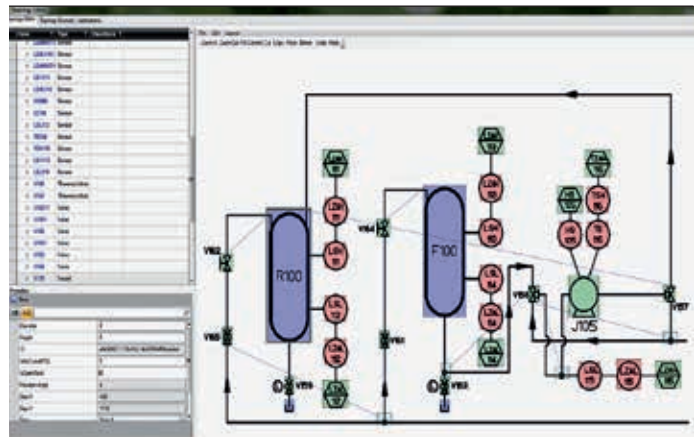
#### Mario Hoernicke

**Pablo Rodríguez**  
ABB Corporate Research  
Ladenburg, Alemania  
mario.hoernicke@de.abb.com  
pablo.rodriguez@de.abb.com

#### Steve Royston

ABB Process Automation,  
Oil, Gas & Chemicals  
Saint Neots, Reino Unido  
steve.royston@gb.abb.com

## 11 Proceso de inspección visual



### Referencias

- [1] E. Arroyo *et al.*, "Integrating Plant and Process Information as a Basis for Automated Plant Diagnosis Tasks," IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Barcelona, Spain, 2014.
- [2] *Diagrams for the chemical and petrochemical industry*, DIN EN ISO 10628:2001.
- [3] A. Fay *et al.*, "Knowledge-based support of HAZOP studies using a CAEX plant model," *Inside Functional Safety*, vol. 2, pp. 5–15, 2009.
- [4] R. Drath *et al.*, "Computer-aided design and implementation of interlocking control code," in *IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design (CACSD)*, 2006, pp. 2653–2658.
- [5] M. Barth *et al.*, "Object-oriented engineering data exchange as a base for automatic generation of simulation models," IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Porto, Portugal, 2009.
- [6] S.Y. Yim *et al.*, "Using process topology in plant-wide control loop performance assessment," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 31, pp. 86–99, 2006.
- [7] *Representation of process control engineering – Requests in P&ID diagrams and data exchange between P&ID tools and PCE-CAE tools*, IEC 62424 (2008-08).
- [8] R. Drath, *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*, Germany: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [9] T. Holm *et al.*, "ISO 15926 vs. IEC 62424 – Comparison of Plant Structure Modeling Concepts," IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Kraków, Poland, 2012.

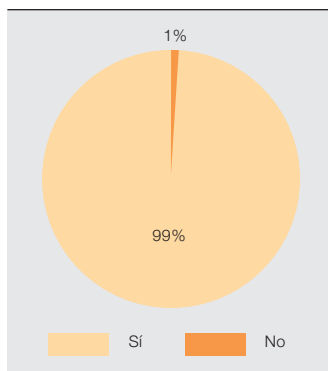
# Nuestros lectores han hablado

## Resultados de nuestra encuesta a los lectores

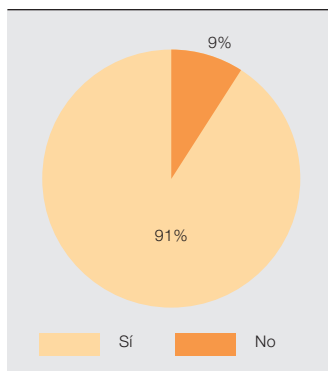
En el número 3/2015 de ABB Review invitamos a los lectores a participar en una encuesta; en → 1-7 recogemos los resultados. El equipo editorial de ABB Review desea dar las gracias a todos los que han participado en esta encuesta. Entre los participantes

elegimos por sorteo a cinco que recibirán una mochila y una gorra Solar Impulse. Enhorabuena a Isidro Fraga Hurtado de Cuba, John Grant y Nasos Bardis de Estados Unidos, Tamer Mahmoud de Egipto y Walter Heinrich de Alemania.

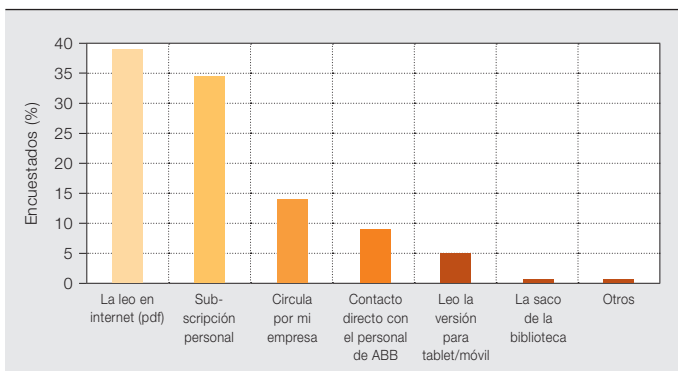
### 1 ¿Lee los artículos de la Revista ABB que no pertenecen a su especialidad?



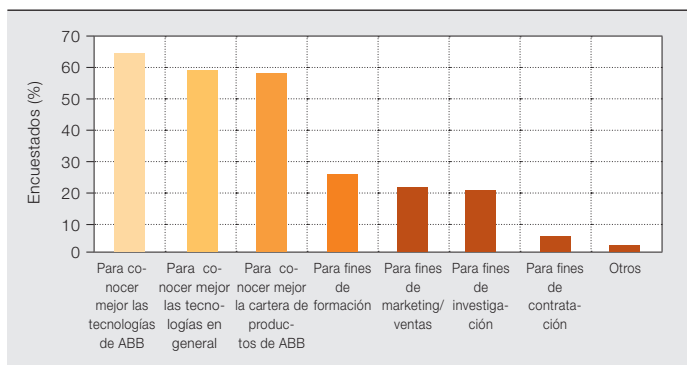
### 2 ¿Recomendaría la Revista ABB a un colega?



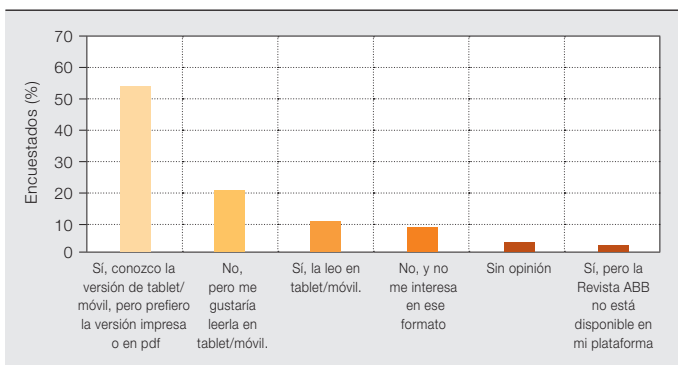
### 3 ¿Cómo recibe la Revista ABB?



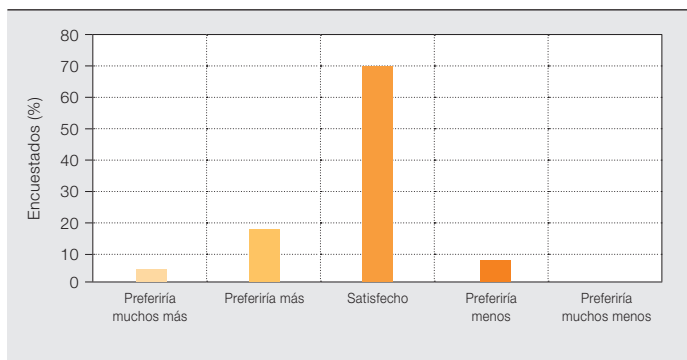
### 4 ¿Cómo usa la Revista ABB? (Se admiten varias respuestas)



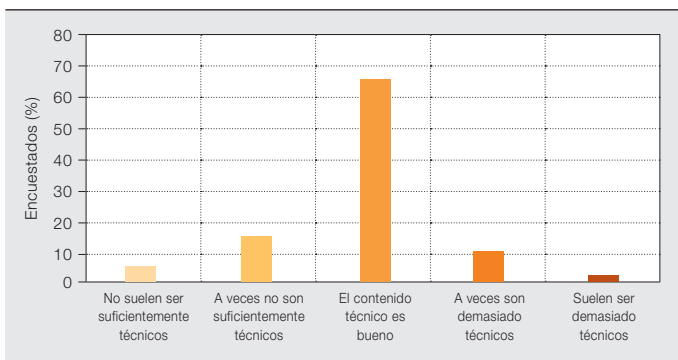
### 5 ¿Sabe que la Revista ABB está disponible en versión de tablet/móvil?



### 6 ¿Le parece bien el número de artículos por número de la Revista ABB?



### 7 ¿Está de acuerdo con el nivel técnico de los artículos de la Revista ABB?



## Consejo de redacción

### Bazmi Husain

Director de Tecnología  
I+D y tecnología del Grupo

### Ron Popper

Jefe de Responsabilidad empresarial

### Christoph Sieder

Responsable de comunicaciones corporativas

### Ernst Scholtz

Director de Estrategia de I+D  
I+D y tecnología del Grupo

### Andreas Moglestue

Jefe de redacción de la ABB Review  
andreas.moglestue@ch.abb.com

## Editorial

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

ABB Technology Ltd.  
ABB review  
Affolternstrasse 44  
CH-8050 Zúrich  
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 reimpression parcial está permitida a condición de citar la fuente.  
La reimpression completa precisa del acuerdo por escrito del editor.

Editorial y copyright © 2016  
ABB Technology Ltd.  
Zúrich, Suiza

## Impresión

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH  
AT-6850 Dornbirn/Austria

## Diseño

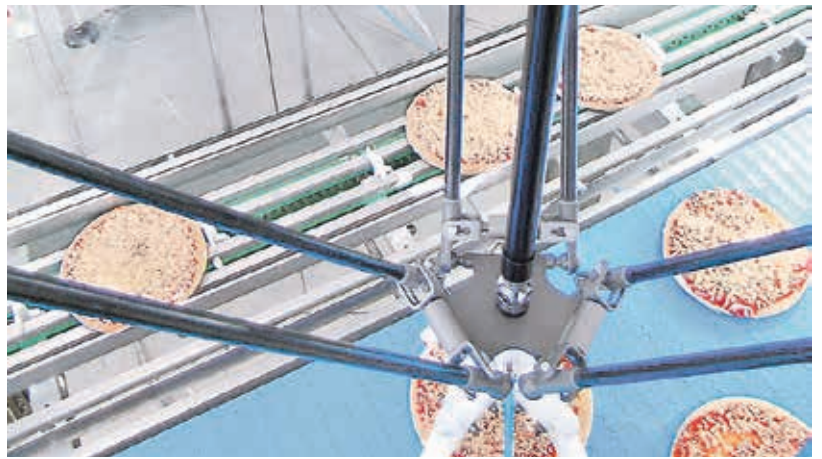
DAVILLA AG  
Zúrich, Suiza

## Cláusula de exención de responsabilidad

Las información contenida en esta revista refleja el punto de vista de sus autores y tiene 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)



Avance 2|16

# Comida y bebida

A lo largo de los años, ABB Review ha abordado muchos aspectos esenciales para la existencia humana, como la energía, la fabricación, la minería o el transporte. La comida y la bebida guardan una relación aún más directa e inmediata con las necesidades humanas, pero pocos lectores las asociarán inmediatamente con ABB.

Los productos y tecnologías de ABB forman una parte importante de la producción de muchas comidas y bebidas. La participación de ABB va desde instrumentos hasta sistemas de control de toda una planta, pasando por motores, robots y otros equipos de manipulación. La empresa ha señalado la comida y la bebida como un objetivo estratégico de crecimiento.

En el número 2/2016 de ABB Review sabrá más sobre las contribuciones de ABB a la comida y la bebida.



## Edición para tablet

ABB Review también en su tablet. La encontrará en <http://www.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.



### Totalmente cargada

Puede buscar en el contenido en cuatro idiomas

### Acceso sin conexión

En el tren, en avión, en la cumbre del Kilimanjaro o en cualquier sitio donde no tenga conexión a internet

### Sin escatimar medios

Una imagen vale más que mil palabras, pero a veces no basta. Vea películas y animaciones y amplíe las fotos que prefiera en la galería de imágenes.

# Al alcance de sus dedos. Cuando la necesite, cuando quiera.

Consulte la app ABB Review con montones de funciones útiles. Accesible inmediatamente en cuatro idiomas, con funciones interactivas para tablets y smartphones, con funciones de búsqueda de todo el contenido y galerías de imágenes, películas y animaciones. Bájese la de la app store que prefiera.

<http://www.abb.com/abbreviewapp>

