

CIS: LA ESTRATEGIA PARA PROTEGER ITER

Las futuras plantas de fusión dependen de la capacidad de ITER de demostrar que el reactor y sus sistemas asociados pueden operar de manera fiable plasmas de deuterio-tritio.

Para dar soporte a ITER el sistema de protección de la inversión, los *Interlocks*, debe ser capaz de asegurar la integridad de la máquina, maximizando el tiempo de operación; pero también debe anticipar y probar soluciones de protección para los futuros reactores industriales de fusión.

Iberdrola colabora con ITER desarrollando la arquitectura de control del CIS, definiendo procedimientos de análisis de riesgos y dando soporte al *Machine Protection Panel*.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del programa de fusión ITER es producir una ganancia neta de energía, demostrando que se pueden operar de manera fiable plasmas de deuterio-tritio. El proyecto representa un reto técnico incomparable, y también de gestión, ya que la estrategia de suministro contempla componentes procedentes de más de 35 países participantes.

Estas condiciones están en oposición con la simplicidad tradicional de los sistemas de protección, o de Interlock, de los Tokamak actuales. El sistema de Interlock en ITER está formado por 18 *plant systems*, que incluyen más de 40 contratos de suministro, coordinados desde el sistema central, el *Central Interlock System* (CIS). Siendo el primer sistema de protección de un proyecto científico en el que la mayoría de sus componentes son suministrados *in-kind* por 35 países diferentes, esta complejidad requiere de un esfuerzo adicional para asegurar que todos los actores alrededor del mundo diseñen, construyan y configuren sus partes del puzzle de manera que se puedan operar de manera conjunta.

LA OPERACIÓN DE ITER

La escala del proyecto lo posiciona como la empresa científica más ambiciosa de nuestra era; sólo la producción de los filamentos superconductores, requeridos para la construcción de las bobinas toroidales encargadas del confinamiento del plasma, ha requerido aumentar 10 veces la producción mundial de niobio-estaño (Nb_3Sn). La fuerza que debe soportar la estructura del Tokamak es dos veces el empuje generado por la lanzadera espacial, 60 meganewtons y la temperatura que alcanzará el plasma en condiciones de fusión es de 150 millones de grados, 10 veces la del centro de nuestro Sol.

Estos impresionantes números se combinan en una diversidad de sistemas y una complejidad de tecnologías que van desde sistemas con amplia experiencia operativa, como pueden ser los sistemas de agua de enfriamiento, vacío y criogenia; a sistemas que son demostradores tecnológicos, como los sistemas de calentamiento del plasma y de inyección de combustible.



IGNACIO PRIETO DÍAZ

Desplazado en ITER, IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN. DEPARTAMENTO DE GENERACIÓN NUCLEAR.

Ingeniero industrial por la U. Carlos III de Madrid y máster en Tecnología Nuclear por el Ciemat.



GUSTAVO MARTÍNEZ MIGUEL

Responsable de Ingeniería Eléctrica. IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN. DEPARTAMENTO DE GENERACIÓN NUCLEAR.

Ingeniero de Minas por la U. Politécnica de Madrid.



CARLOS LÓPEZ ALONSO

Responsable del Grupo Instrumentación y Control. IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN. DEPARTAMENTO DE GENERACIÓN NUCLEAR.

Ingeniero industrial por la U. Pontificia de Comillas.

CIS: THE STRATEGY TO PROTECT ITER

Future fusion power plants will be only possible if ITER proves that the reactor and associated systems can run long plasma discharges reliably.

The ITER interlocks shall protect the Tokamak integrity, maximizing scientific operation time; but at the same time it shall anticipate and test interlock solutions for future industrial fusion reactors. IBERDROLA provides support to ITER developing the CIS control architecture, the risk assessment's procedures and supporting the Machine Protection Panel.



El sistema de Interlock debería ser un mero observador en la fase de operación, sin embargo durante la puesta en marcha se espera que sea bastante activo, por lo que la transparencia y una adecuada documentación son críticas. A pesar de la rigidez de los sistemas de protección, se deben incorporar mecanismos que aporten cierta flexibilidad, además de medidas de protección contra errores de operación, pues la máquina no es la única en fase de pruebas, sino que los operadores también son parte muy sensible en la fase de aprendizaje.

LOS INTERLOCKS EN ITER

Los sistemas de I&C en ITER se estructuran en tres capas. Codac agrupa la parte convencional, que se encarga de la operación normal de ITER. El sistema de Interlock tiene el objetivo de maximizar la disponibilidad operacional del Tokamak, protegiendo la máquina frente a fallos en componentes esenciales o la operación indebida de los sistemas. El sistema de seguridad nuclear constituye la última barrera, encargado de la protección tanto de las personas como del medio ambiente.

Las funciones de Interlock agrupan la protección en tres grandes grupos: protección frente a la energía de los imanes, protección del Tokamak y protección y mitigación de escenarios donde el plasma traspase los límites de operación. La protección de la inversión en ITER siempre se ha tratado de una manera secundaria en el proyecto, debido a que no se incluye en el proceso de licenciamiento nuclear de la instalación. Sin embargo, el objetivo científico de ITER sólo puede alcanzarse con una completa identificación de riesgos y una adecuada protección que maximice el tiempo de operación.

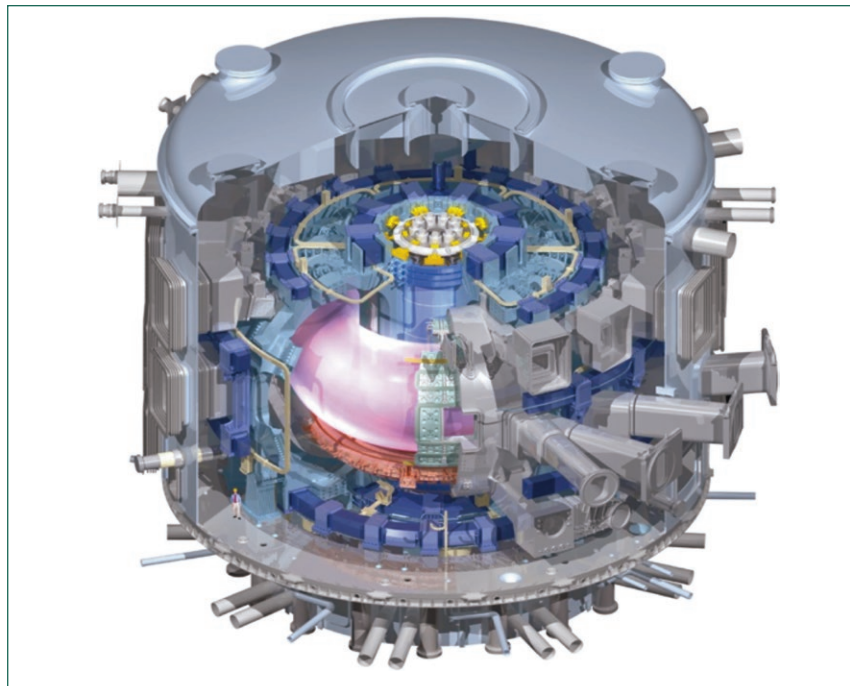
Desde el equipo encargado de la coordinación de los sistemas de protección se han definido una serie de arquitecturas estándar de sistemas de control y guías para el desarrollo de los sistemas de protección local. De manera adicional se colabora con los diseñadores, promoviendo la utilización de técnicas formales para la identificación de riesgos en los sistemas, como son los análisis disponibilidad (RAMI), de integridad (SIL) y metodologías HAZOP.

Estas soluciones han demostrado su utilidad en infinidad de proyectos, sin embargo, no son suficientes para reali-

zar una adecuada caracterización de ITER debido tanto a la incertidumbre tecnológica como a la compleja organización.

La protección del Tokamak debe considerar a todos los actores que intervienen en la operación de la máquina. La necesidad de un análisis transversal y cualitativo que identifique posibles debilidades en el diseño se está resolviendo con el *Machine Protection Panel* (MPP), promovido de manera inicial desde el sistema de Interlock. El trabajo del panel es necesario entenderlo en el largo plazo, siendo el grupo encargado de identificar e informar a la dirección de proyecto de las mejoras y procedimientos necesarios para asegurar una alta disponibilidad de la máquina.

Figura 1. Representación artística de la vasija de vacío y el criostato del Tokamak.



NUEVOS METODOS DE ANALISIS – STPA

Otra técnica desde la que se está enfrentando a la complejidad de ITER para la identificación de amenazas es *System Theoretic Process Analysis* (STPA), una nueva metodología basada en la teoría de sistemas con un enfoque descendente *Top-down*.

Esta metodología cambia el punto de vista de los análisis de riesgos, concibiendo la seguridad funcional como un problema dinámico don-

Figura 2. Sistema de calentamiento por haz de neutros.

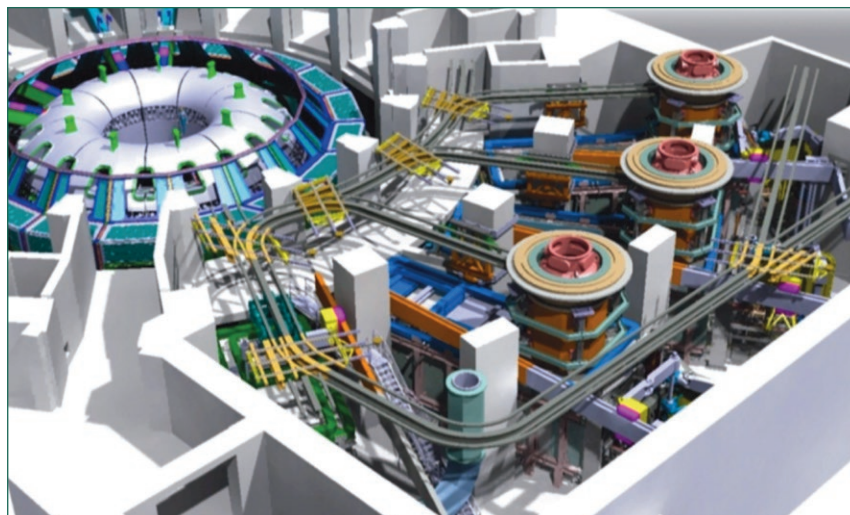


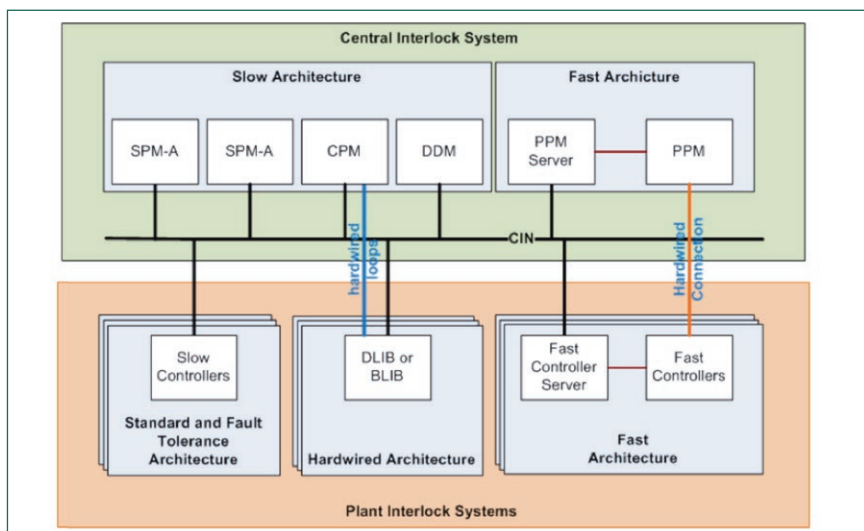


Figura 3. System Theoretic Process Analysis.

de los accidentes son el resultado de la falta de control sobre los límites de seguridad.

Desde la experiencia inicial de su aplicación se ha observado que es una buena metodología para definir condiciones de seguridad y establecer requisitos desde la fase conceptual de diseño de los sistemas, identificando relaciones de eventos no evidentes con otras técnicas. La aplicación secuencial definida en STPA estructura escenarios complejos de manera ordenada, pero se requiere un gran conocimiento de los sistemas para que su aplicación sea efectiva. Cuando se llega a niveles más detallados es necesario completar el análisis con métodos tradicionales, debido también a la falta de madurez de la metodología.

Figura 4. Arquitectura en dos capas: Central Interlock System y Plant Interlock Systems.



UNA ARQUITECTURA DE ALTA INTEGRIDAD

Las diversas características de los sistemas de ITER se traducen en funciones de Interlock con diferentes requisitos, por lo que, ante la imposibilidad de cumplir todos ellos con una única solución técnica, se imponen diferentes tecnologías que se pueden ajustar a la complejidad y el tiempo de respuesta requerido para cada función de protección. La Figura 4 representa la arquitectura de dos capas, la parte superior representa los diferentes módulos de protección del CIS y en la parte inferior, de manera genérica, los *Plant Interlock Systems*.

Aproximadamente el 80 % de las funciones de protección tienen requisitos temporales en el orden de los 300 ms, por lo que optar por una solución industrial, con una gran base de operación, simplifica en gran manera las tareas de integración. Se han seleccionado PLC con certificación SIL-3,

cuyas herramientas de desarrollo, junto con los procedimientos de validación y verificación, aseguran una calidad adecuada en la implementación de las funciones Interlock. La red Ethernet central (*Central Interlock Network - CIN*) sirve como medio para la transmisión de los eventos y acciones de protección, pero igualmente se utiliza para comunicar el estado de los diferentes elementos y la ejecución de los comandos del operador.

Debido a la ausencia de una solución comercial que cumpliera los requisitos con tiempos de respuesta por debajo del milisegundo, desde el equipo de Interlock en ITER se ha definido una arquitectura basada en el estándar IEC-61508 que utiliza un doble chasis FPGA. La plataforma *hardware* y un conjunto de aplicaciones, que permiten configurar los sistemas de Interlock local, asegurando de esta manera la correcta integración con el CIS. A nivel central, se utiliza la misma configuración, pero con una funcionalidad más específica, por lo que el nivel adecuado de integridad se asegura mediante un estricto control del desarrollo y el uso de procedimientos de verificación. La comunicación de los eventos y las acciones se realiza mediante fibra óptica en conexiones punto a punto, con una codificación Manchester. La trama de comunicación se ha definido siguiendo el concepto *white channel*, tal como se describe en la IEC 61508. Un servidor conectado a los chasis FPGA hace de enlace con las herramientas de supervisión y configuración del CIS, para informar sobre el estado de las funciones.

Para la coordinación del sistema de protección de los imanes superconductores se ha decidido utilizar una solución basada en lazos de corriente, los *hardwired loops*, que se encargan de ejecutar la descarga rápida de la energía almacenada. Este sistema, originalmente concebido para la protección de los imanes superconductores del LHC en el CERN, ha sido modificado para cumplir con los requisitos de integridad y disponibilidad de ITER. Los usuarios del lazo de corriente se conectan al mismo mediante unas cajas de interfaz que cumplen una doble función: proporcionar un medio común para la coordinación de la función,



y ser el mecanismo para activar la protección interrumpiendo el lazo de corriente desde los usuarios que detectan los eventos.

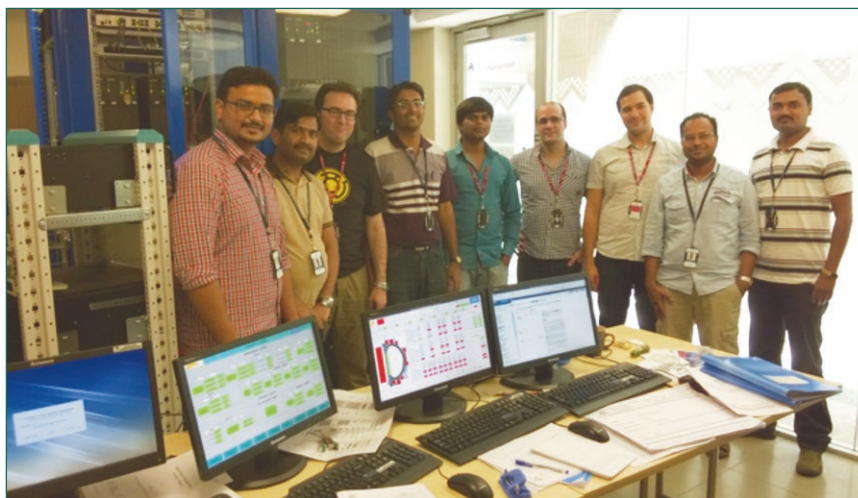
Durante la evaluación inicial realizada en el MPP se ha puesto de relieve la necesidad de considerar en las funciones de protección eventos generados por los sistemas de diagnósticos de ITER, que tienen en cuenta información de centenares de sensores a los que hay que aplicar medidas adecuadas de filtrado y compensación. La estrategia para incorporar la detección de este tipo de eventos se encuentra en proceso de definición entre el sistema de control del plasma (PCS) y el CIS. La propuesta actual considera una replicación de los modelos ensayados en PCS en el CIS una vez que estos han adquirido un nivel de madurez adecuado, añadiendo medidas adicionales para la implementación y el control de cambios, una vez que los algoritmos han sido ensayados.

DEMOSTRADORES TECNOLÓGICOS

Debido a la complejidad del sistema de protección de la inversión de ITER, los requisitos que se exigen a las diferentes tecnologías están más allá de los empleados en las plantas industriales, por lo que se ha procedido a una campaña intensiva de análisis de fiabilidad y evaluación de las soluciones seleccionadas con un nivel de exigencia similar o superior al del sistema final.

Las campañas de prototipos han servido para dos objetivos: la validación de las tecnologías y el conocimiento en detalle del funcionamiento de estas plataformas. Gracias a estos prototipos se han podido definir las guías de diseño y se posee el conocimiento técnico necesario para dar soporte en la definición y diseño de los *Plant Interlock System*.

Las capacidades adquiridas desembocaron en 2014 en la plataforma CIS v0, que integró por primera vez de manera conjunta las soluciones para la protección de imanes. Esta plataforma considera la operación conjunta de un sistema basado en PLC con los *hardwired-loops*. Asimismo, se definieron unas pantallas de operación y una estación de ingeniería que se utiliza para realizar la supervisión y configuración de los diferentes elementos.



El CIS v0 ha puesto de relieve la complejidad del sistema y la necesidad de definir unos procedimientos rigurosos para reducir los tiempos de puesta en marcha y aumentar la fiabilidad de la operación.

La primera aplicación real del sistema de Interlock se ha producido en las instalaciones de *High Temperature Superconductor Current Leads*, en China, donde se construyen y prueban los alimentadores de los imanes. Estos dispositivos hacen de interfaz entre las bobinas superconductoras y los sistemas de criogenia y potencia.

El diseño del Sistema Central de Interlock de ITER se terminará en marzo de 2016, momento en el que comenzará la construcción del CIS v1 en Corea del Sur, extendiéndose hasta 2017. El traslado a Cadarache se espera en 2019. Pero antes el CIS será adaptado para realizar una campaña de ensayos con K-STAR, el Tokamak superconductor de Corea del Sur. La configuración de las funciones de Interlock se irá adaptando de manera gradual en diferentes versiones del CIS, teniendo en cuenta la llegada de los sistemas a ITER y el nivel de definición de las funciones, fruto de la labor del MPP.

IBERDROLA INGENIERÍA EN EL PROYECTO ITER CIS

Iberdrola Ingeniería lleva proporcionando soporte técnico para el sistema de Interlock desde 2010, inicialmente colaborando en la definición de las funciones de protección y realizando los estudios de fiabilidad, análisis de Integridad SIL, FMECA, HAZOP y factores humanos. Más tarde, definiendo la estrategia de instalación y puesta en marcha y colaborando en la supervisión de los diferentes suministradores del sistema.

Figura 5. Desarrollo multinacional de prototipos.

La experiencia internacional y en grandes proyectos nucleares que aporta Iberdrola Ingeniería es muy relevante en proyectos de la envergadura de ITER, donde el desarrollo se realiza de manera muy deslocalizada, con suministradores y sistemas de las 35 nacionalidades que participan en el proyecto ITER.

En la actualidad, se continúa dando soporte al CIS desde Cadarache, finalizando el desarrollo del sistema hacia su fase final (*Final Design Review*) y coordinando todo el trabajo técnico y de I+D realizado en EE.UU., Corea, India, China y Europa. En España se colabora con la Universidad Politécnica de Madrid/ *National Instruments* y el CIEMAT en los desarrollos de controladores rápidos, y con *Alter Technology* / *EIT* en la evolución de los *hardwired-loops*.

De manera adicional, Iberdrola Ingeniería participa en foros técnicos adquiriendo conocimiento sobre la operación y experiencias en sistemas de Interlock de grandes instalaciones científicas: CERN, ESS, SNS, DESY, SLAC, etc.

La evolución del sistema descrita en el presente artículo ha sido fruto de la colaboración de Iberdrola Ingeniería que aporta los métodos y *know-how*, en combinación con un conocimiento detallado de las particularidades de ITER proporcionado por el personal del CIS. Asimismo, cabe resaltar que la colaboración de las empresas privadas en proyectos de investigación facilita una mejor definición de los sistemas y un intercambio de conocimiento que beneficia a ambos mundos. ■