

IMPLEMENTACIÓN DE LA FUNCIÓN DE SEGURIDAD PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN EN SALAS DE BATERÍAS EN PIC BUILDINGS 44-45



LAURA JURADO LLAMAS
Ingeniera Especialista
EMPRESARIOS AGRUPADOS



IGNACIO RODRIGUEZ RIVAS
F4E Technical Project Officer
FUSION FOR ENERGY



JAMES NEWTON
Technical Contract Manager
ATKINS RÉALIS

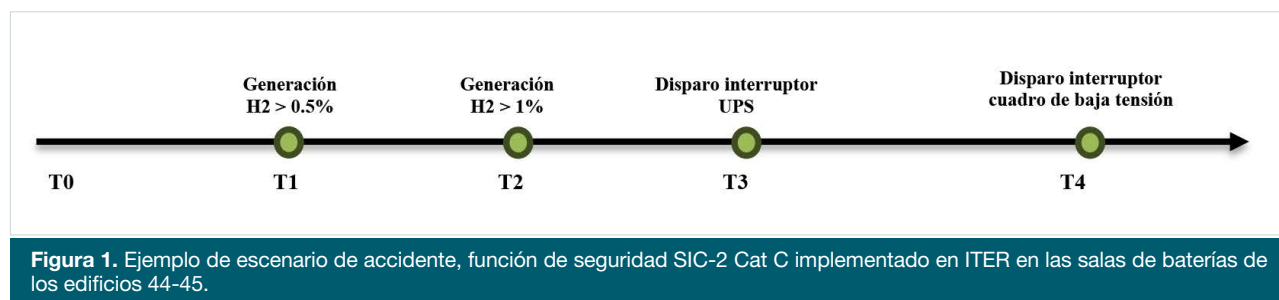
Desde hace 15 años, Empresarios Agrupados forma parte del consorcio ENGAGE, Architect Engineer de F4E, agencia doméstica europea del proyecto ITER. En este marco se han desarrollado actividades de diseño, suministro, instalación y comisionado de funciones de seguridad asociadas al sistema de distribución de potencia de emergencia del PBS 43. Este sistema de emergencia incorpora fuentes de energía (generadores diésel, UPSs, baterías de corriente continua, etc.) para alimentar los componentes relevantes en caso de necesitar llevar la planta a parada segura ante corte de suministro eléctrico, black out. Sin embargo, estos sistemas tan importantes para la seguridad, implican el uso de salas de baterías instaladas en los edificios redundantes 44 (Tren A) y 45 (Tren B), lo que conlleva un riesgo de explosión por emisión de hidrógeno que hay que gestionar.

Este artículo presenta una **visión integral de la implementación técnica de la función de I&C de**

seguridad 'Ventilación/prevencción de acumulación de H_2 ', clasificada como PIC/SIC-2 Cat. C desarrollada en ITER dentro del alcance de F4E bajo el contrato TB13 (consorcio formado por Ansaldo y Monsud).

El propósito de esta función de seguridad es poner los medios necesarios para a mitigar el escenario accidental de explosión de H_2 . El principio seguido para que no se inicie el evento consiste en mantener la concentración de H_2 en aire por debajo del nivel de inflamabilidad (4% vol.), para lo cual se prevén medidas de actuación automática de desconexión de la carga de baterías al alcanzar 1% vol.

En este artículo se presentan el marco normativo, los requisitos de diseño dados por ITER, la arquitectura y los sistemas clave (HVAC, detectores de H_2 y circuitos de desconexión de carga), mencionando la importancia del proceso de cualificación del lazo completo que confirma la fiabilidad de la instalación y la seguridad del personal.



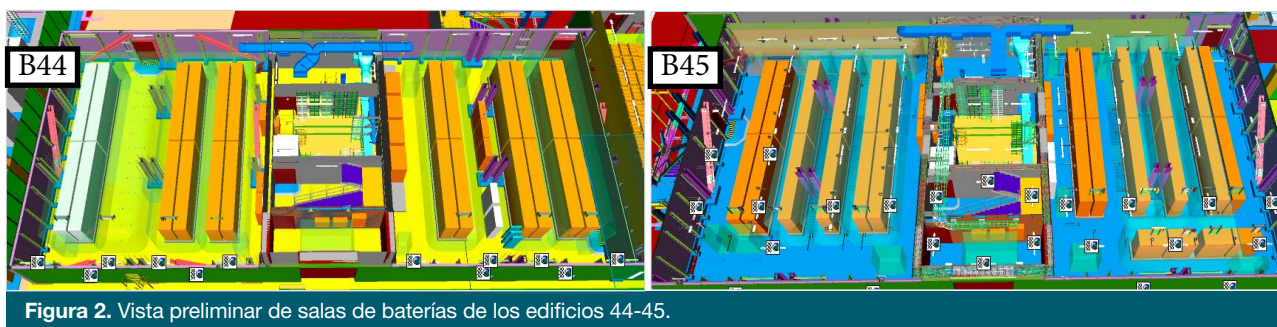


Figura 2. Vista preliminar de salas de baterías de los edificios 44-45.

INTRODUCCIÓN

Las salas de baterías de los edificios 44 y 45 representan un área de especial atención debido a la generación de hidrógeno como subproducto del proceso de carga. Durante la operación normal, las baterías transforman energía química en eléctrica, agotando progresivamente el ácido sulfúrico de su electrolito. Para garantizar su uso continuo, requieren un proceso de carga que produce electrolisis, liberando hidrógeno y oxígeno. Cuando la concentración de hidrógeno en el aire supera el 4% en volumen, la mezcla se vuelve inflamable y, por lo tanto, constituye un riesgo significativo para la seguridad de las instalaciones y del personal.

En este contexto, resulta indispensable contar con medidas específicas que eviten la acumulación de gases y prevengan explosiones. El proyecto TB13 contempla la implementación de una **función de seguridad para la mitigación del H₂** basada en requisitos técnicos y normativos, y sustentada en una estrategia global que integra ventilación redundante, detectores de hidrógeno, cargadores de baterías, sistemas de protección contra incendios, controladores de seguridad y cuadros de distribución de baja tensión.

El artículo que presentamos tiene como objetivo **explicar cómo se han definido y coordinado en nuestro proyecto las respuestas automáticas ante distintos escenarios de riesgo**, entre ellos: pérdida total de ventilación, detección de concentraciones críticas de hidrógeno y ocurrencia de incendios en áreas asociadas. Cada situación desencadena acciones específicas, como la interrupción inmediata del proceso de carga de baterías, con el propósito de mantener el riesgo en niveles aceptables y garantizar la integridad de los equipos y de la seguridad del personal.

Además, la solución implementada para mitigar este riesgo debe asimismo asegurar el mantenimiento del suministro continuo de potencia a los componentes SIC durante una hora, función de seguridad que está clasificada como SIC-1.

CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS Y REQUISITOS DE DISEÑO APLICADOS

El diseño de la ventilación en las salas de baterías debe garantizar la prevención de riesgos derivados de la generación de hidrógeno durante el proceso de carga. Los requisitos se fundamentan en **reglamentación nacional, exigencias del proyecto, códigos y normas industriales** aplicables, convergiendo todos en el mismo objetivo: mantener la concentración de hidrógeno en niveles seguros. En los siguientes apartados se identifican los de obligado cumplimiento por normativa y los definidos por el cliente, el operador nuclear.

Las baterías instaladas en este proyecto son de **plomo-ácido ventiladas**. Cada sala alberga **tres bancos de 192 celdas**, es decir, un total de **576 celdas**, y cuentan además con un **sistema de recombinación de gases** destinado a reducir significativamente la emisión de hidrógeno durante el proceso de carga.

Regulaciones, Códigos y Normas Industriales Aplicables

Orden francesa del 29/05/2000 relativa a instalaciones clasificadas para la protección del medio ambiente, **NF C15-100** (específicamente la sección 554.2.3) son obligatorias. Aunque otras como EN 50272-2, IEEE 484, NUREG-1805, API-505, establecen criterios comunes. Estas normas requieren:

- Instalación de sensores de hidrógeno en las zonas afectadas.
- Umbral máximo permitido: **1% de H₂ en aire (25% del límite inferior de inflamabilidad)**. Superar este umbral debe detener automáticamente la carga de baterías y activar una alarma.
- Capacidad de ventilación: expresada como función del número de celdas, corriente de carga y capacidad de batería. En caso de insuficiencia de flujo de aire, desconexión inmediata del cargador.

Requisitos Específicos del Proyecto ITER

- **System Requirements Document , Informe Preliminar de Seguridad & Project Requirements:**

Las salas de baterías deben estar bien ventiladas para limitar la concentración de H₂. Esta ventilación debe garantizar la renovación de aire suficiente para evitar acumulaciones peligrosas de H₂, incorporando dispositivos de seguridad y asegurando el suministro de aire fresco mínimo necesario conforme a códigos y buenas prácticas.

- **Los requisitos definidos de seguridad nuclear aplicables**

QD0617b: PIC 1-PBS 43-Clase II – Distribución de Seguridad. El sistema de distribución de energía PBS 43 Clase II de seguridad deberá ser capaz de suministrar alimentación de CA ininterrumpida, fiable y regulada a diversos equipos de sistemas de planta SIC-1 y SIC-2 que requieren alimentación de CA ininterrumpida para su funcionamiento fiable.

QD0618A: Se deberá prevenir e imposibilitar una explosión en las salas de baterías en cualquier condición de diseño (normal, incidentes, accidentes, incluyendo todos los

Clase de seguridad de la función de I&C	Acción	Función o señales de actuación	Sistemas que generan la función	Sistema que realiza la función	Clase de seguridad de la función de I&C	Comentarios
PIC/SIC-2 Cat C	Alarma	HVAC no operativo	PBS63	PBS43	PIC/SIC-1	El estado del sistema HVAC se monitoriza continuamente en estas salas (encendido/apagado).
PIC/SIC-2 Cat C	Parar la carga de baterías	1% de hidrógeno en la sala. Ventilación parada	PBS63	PBS43	PIC/SIC-1	Monitorización: - Estado de detectores de H ₂ (detectado/no detectado). - Estado del circuito de carga (interruptor abierto/cerrado). - Estado de activación de la función en cada sala (activada/no activada).

Tabla 1. Ventilación del edificio/prevención de la acumulación de hidrógeno N-133.

peligros externos), incluyendo la aplicación del **criterio de fallo único**. El circuito de carga de la batería y su control deberán estar diseñados de forma que la carga de la batería pueda interrumpirse para no producir hidrógeno dada una concentración superior al 1% detectada por el PBS 63.

- **Definición de la Función de Seguridad de I&C.**
Los requisitos se pueden resumir en la Tabla 1.

SISTEMAS, EQUIPOS Y ESCENARIOS DE ACTUACIÓN

En cumplimiento de los requerimientos definidos en la sección 2, se define la estrategia global para la implementación de la función de seguridad con los siguientes equipos y escenarios de actuación.

Sistemas, Equipos y Arquitectura

La integración coordinada de diversos sistemas, cada uno con un papel específico en la detección, controlan y dan respuesta a las condiciones de riesgo:

- **Sistema HVAC:** cuenta con ventiladores de extracción redundantes en cada sala de baterías. Además, dos RTUs redundantes aseguran el suministro de aire.
- **Detectores de hidrógeno:** instalación de sensores redundante en cada sala, cableados al PSS-N SIC-2.
- **Cargadores UPS:** forman parte esencial de la infraestructura de respaldo energético, cuya operación debe ser controlada en función de las condiciones de seguridad detectadas.
- **Sistema de detección de incendios:** encargado de identificar escenarios de fuego que puedan comprometer la seguridad de los equipos y del personal.
- **PSS-N SIC-2:** Sistema de control de seguridad cuya arquitectura está basada en un dispositivo lógico programable failsafe encargado de gestionar las señales de detección y ejecutar las acciones de interrupción necesarias así como recoger todas las señales clasificadas SIC-2 para monitorización remota.
- **Cuadro de distribución de baja tensión:** asegura la alimentación de los sistemas asociados a la ventilación, sistema de baterías, detección y control.

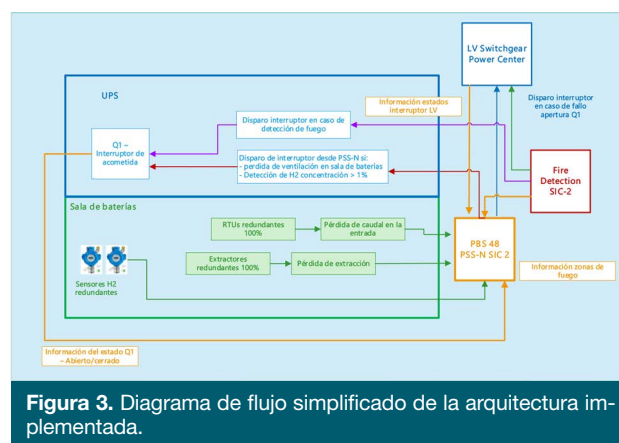


Figura 3. Diagrama de flujo simplificado de la arquitectura implementada.

En la **Figura 3** se presenta un diagrama simplificado incluyendo los sistemas, los equipos implicados y las interrelaciones entre ellos.

Escenarios de actuación

La estrategia de mitigación frente a la acumulación de hidrógeno contempla varios escenarios posibles. Dependiendo de la condición, se generan **alarmas al operador** y, en casos más graves, se ordena la **interrupción de la carga de las baterías**.

Fallo en el Sistema de Ventilación (HVAC/RTU)

Cada sala dispone de **ventiladores de extracción redundantes al 100%**, supervisados mediante presión diferencial. Ante una anomalía, **alta o baja presión diferencial**, el sistema conmuta automáticamente al ventilador de reserva y genera una alarma.

Si la anomalía persiste y se da también en el ventilador redundante, se considera pérdida total de extracción. En ese caso, se interrumpe la admisión de aire común a las salas para evitar sobrepresiones y se lanza una alarma de fallo de ventilación. Si en **2,5 horas*** no se restablece el servicio, el sistema procede a **detener la carga** de las baterías disparando el interruptor principal de la UPS y el del cuadro de baja tensión si el primero falla. La lógica y la actuación se ejecutan desde el **PSS-N, PLC SIC-2**.

La reanudación solo puede hacerse de forma **manual y local** tras resolver la anomalía

**2,5 horas es el tiempo necesario para alcanzar la concentración H₂ 1% vol sin ventilación. Este valor se introduce como retardo en el PLC del PSS-N. Este tiempo es seguro considerando las condiciones de operación en flotación de las baterías y el efecto del sistema recombinador de hidrógeno Aquagen.*

Detección de H₂ al 0,5% (alarma alta)

Las salas cuentan con detectores redundantes (lógica 1oo2, clasificación SIC-2 Cat C) que vigilan continuamente la concentración de hidrógeno. Si un detector alcanza el **0,5% vol de H₂**, se genera una **alarma de nivel alto** que alerta al personal. Sin embargo, no se interrumpe la carga de inmediato, ya que los estudios de acumulación demuestran un margen superior a 2,5 h antes de alcanzar el 1%. Este retardo permite la actuación operativa preventiva.

Detección de H₂ al 1% (alarma muy alta)

Cuando un detector registra **1% vol de H₂**, la situación se clasifica como crítica. El sistema emite una **alarma de nivel muy alto** y envía la orden de interrumpir inmediatamente la carga en la sala afectada. Un primer disparo al interruptor de acometida de la UPS, un segundo disparo al interruptor del cuadro de baja tensión aguas arriba en caso de que el primer disparo no funcione. La lógica y la actuación se ejecutan desde el **PSS-N, PLC SIC-2**.

Posteriormente, se debe proceder a la investigación de la anomalía y a la restauración de las condiciones de seguridad. La reanudación de la carga necesita un reseteo de manera **manual y local** en el edificio.

Detección de incendio

Ante detección de incendio, además de la transmisión inmediata de la alarma al sistema central y a la brigada de incendios, se envía la orden de **interrumpir la carga** de las baterías de la sala afectada.

El sistema de protección contra incendios actúa abriendo

los interruptores principales de la UPS y, en el caso de que estos no respondan, un segundo disparo es enviado al interruptor del cuadro de baja tensión aguas arriba. La orden es ejecutada directamente por la **centralita contra incendios**.

La reanudación de la carga, como en los escenarios anteriores, debe realizarse de manera **manual** una vez restablecidas las condiciones de seguridad.

ARQUITECTURA DE I&C DE SEGURIDAD

La arquitectura de esta función de seguridad se basa en criterios de diseño robustos, enfocados en **maximizar la seguridad, fiabilidad y disponibilidad** de las funciones críticas. Los principios clave aplicados son los siguientes:

Criterio de fallo único

Para garantizar el cumplimiento del **criterio de fallo único** establecido en QD 0618-A, se ha implementado una **arquitectura redundante** en el sistema de disparo de los equipos. En particular, se definen **dos rutas de señal independientes**: una dirigida a la UPS para la apertura del interruptor principal y otra al cuadro de distribución de baja tensión aguas arriba para la apertura del interruptor de salida.

Failsafe Principle

Se aplica el **principio failsafe**, pero en este caso garantizando que la arquitectura priorice la función de seguridad SIC-1 (alimentación de emergencia segura desde baterías) en cualquier condición para cumplir con QD 0617b. Esto se traduce en:

- Contactos normalmente abiertos.
- Energización de la señal solo cuando se activa el comando de seguridad.

Esta configuración, además, basada en el uso de bobinas de disparo tipo shunt coil en lugar de bobinas de mínima tensión, evita la necesidad de energización permanente del relé auxiliar y cuenta asimismo con contactos auxiliares que aseguran el retorno de información sobre el estado del interruptor principal.

Escenario	Detección / Evento	Acción automática	Acción del operador	Restablecimiento
Fallo en ventilación (HVAC/ RTU)	Anomalía en ventiladores de extracción o fallo en ambos RTUs	- Activación del ventilador en reserva (si aplica) - Tras 2,5 h sin recuperación → interrupción de la carga de baterías	Investigación y corrección del fallo de ventilación	Reconexión manual local de la carga de baterías
Alarma alta de H ₂	0,5% de concentración detectado por un sensor (1oo2)	- Emisión de alarma de hidrógeno (High) - No se interrumpe la carga	Investigación inmediata de la causa y corrección	No requiere maniobras: operación normal se mantiene
Alarma muy alta de H ₂	1% de concentración detectado por un sensor (1oo2)	- Emisión de alarma de H ₂ (High-High) - Interrupción automática de la carga de baterías	Investigación y resolución de la anomalía	Reconexión manual local tras normalización de concentración
Detección de incendio	Detección en sala de baterías	- Transmisión de alarma a CSS y brigada de incendios - Interrupción automática de la carga	Investigación y resolución del incidente	Reconexión manual local tras restablecer condiciones de seguridad

Tabla 2. Resumen escenarios y actuaciones previstas.

Defensa en profundidad

El sistema aplica un esquema de doble capa de protección:

Primera capa: apertura directa del interruptor principal de la UPS en caso de evento de fuego o pérdida de ventilación en la sala de baterías.

Segunda capa (back-up): en caso de fallo en la apertura del interruptor principal, el PSS-N-PLC o el sistema de detección de incendios comandan también la apertura del interruptor aguas arriba en el cuadro de distribución. Esto asegura la detección de la carga de la batería se logre incluso si la primera barrera no funciona.

Arquitectura cableada

Se ha optado por una arquitectura **basada en cableado directo**, sin depender de redes de comunicación para funciones críticas. El núcleo del sistema está implementado con **PLCs de seguridad Siemens S7-400 F/FH**, reconocidos por su robustez en aplicaciones nucleares y de seguridad, capaces de trabajar en modo Fault tolerant y alta disponibilidad.

Condiciones Ambientales y Cualificación

Todos los equipos partícipes del lazo de control han seguido un proceso de cualificación completo bajo la **IEC 61513 y RCC-E 2016**, que asegura el funcionamiento del sistema bajo las condiciones ambientales específicas, incluyendo temperatura, humedad, sismo y EMC, asegurando que el sistema esté **totalmente cualificado y certificado** para su funcionamiento seguro.

CONCLUSIONES

- La implementación de la función de seguridad **“ventilación y prevención de acumulación de hidrógeno”** en las salas de baterías de los edificios 44 y 45 constituye un elemento esencial para la gestión del riesgo de explosión en el marco del proyecto ITER.
- La estrategia adoptada integra detección temprana, ventilación redundante y desconexión automática de carga de baterías, cumpliendo con normativas internacionales y criterios de seguridad nuclear en un entorno altamente sensible y regulado como es ITER.
- El diseño sigue los principios de defensa en profundidad, redundancia y cualificación ambiental, garantizando que el sistema responda de manera segura incluso en escenarios de fallo único o condiciones extremas.
- Es fundamental la gestión de interfaces. La coordinación entre subsistemas (HVAC, detectores de H₂, cargadores UPS, PSS-N, sistemas de incendios y cuadros de distribución de baja tensión) asegura la robustez de la función de seguridad y minimiza el riesgo para las instalaciones y el personal.
- La arquitectura cableada, basada en PLCs de seguridad y en protocolos failsafe, ofrece una solución fiable y de alta disponibilidad, adecuada para la operación a largo plazo en un entorno nuclear.

En conjunto, el sistema desarrollado establece un marco de referencia replicable para instalaciones críticas con

riesgo de generación de hidrógeno, aportando lecciones aprendidas aplicables a otros sectores industriales y energéticos.

ACRÓNIMOS

- [1] **CSS** → Central Safety System
- [2] **F4E** → Fusion for Energy
- [3] **HVAC** → Heating, Ventilation and Air Conditioning
- [4] **ITER** → International Thermonuclear Experimental Reactor
- [5] **PBS** → Plant Breakdown Structure
- [6] **PIC** → Protection Important Component
- [7] **PLC** → Programmable Logic Controller
- [8] **PSS-N** → Plant Safety System – Nuclear
- [9] **RTU** → Remote Terminal Unit
- [10] **SIC*** → Safety Important Component
- [11] **SSC** → Structures, Systems and Components
- [12] **UPS** → Uninterruptible Power Supply

**Nota aclaratoria:*

SIC-1 SSCs son aquellos necesarios para llevar a ITER y mantenerlo en un estado seguro.

SIC-2 SSCs son aquellos utilizados para prevenir, detectar o mitigar incidentes o accidentes, pero no son SIC-1 (no son necesarios para que ITER alcance un estado seguro).

Cat C según la IEC 61226: denota funciones que desempeñan un papel auxiliar o indirecto en la consecución o el mantenimiento de la seguridad de la central nuclear.

REFERENCIAS

- [1] Arrêté du 29/05/00, Prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement.
- [2] French Standard NF C 15-100 Low-voltage electrical installations.
- [3] Electric Power Research Institute (EPRI). (2024). The evolution of battery energy storage safety codes and standards (EPRI report). EPRI. https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002028521/0/Product?utm_source=https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Incident_Database?utm_source
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2023). Guidance on installation design and installation of vented lead-acid storage batteries (regulatory guidance / technical note). NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML2327/ML23277A276.pdf?utm_source
- [5] IEEE Std. 1635-2012 / IEEE 484 (referencias sobre baterías estacionarias). Guide for ventilation and thermal management of batteries for stationary applications /

IEEE 484 guidance on battery installation.

[6] EN 50272-2 Safety requirements for secondary batteries and battery installations - Part 2: Stationary batteries.

[7] Hoppecke - Data sheet Grid Power Series OSP.HC/OSP. HB Vented Lead Acid battery.

[8] IEC 61513:2011, Nuclear power plants—Instrumentation and control for systems important to safety.

[9] RCC-E 2016, Design and construction rules for electrical equipment of nuclear islands. ■

AGRADECIMIENTOS

Expresar especial agradecimiento a la **Sociedad Nuclear Española (SNE)** por la oportunidad de presentar este trabajo en el marco de sus jornadas técnicas.

Se reconoce asimismo el apoyo de **Fusion for Energy (F4E)** e **ITER** por dar la oportunidad y depositar la confianza en las actividades que **Empresarios Agrupados** desarrolla en el marco de las actividades asociadas a la función de seguridad presentada.

Especial agradecimiento a mi **familia**, mis hijos **Isabel y Francisco** y a mi marido **Francisco**, por su empuje y apoyo constante.