

Habitabilidad de Salas de Control en las centrales nucleares españolas

Francisco Mediavilla y Juan José Sierra

Desde que en el año 2003 la NRC publicara la Generic Letter 2003-01: "Control Room Habitability" y la Guía Reguladora 1.197 "Demonstrating Control Room Envelope Integrity at Nuclear Power Reactors", en donde se resalta la importancia de verificar la habitabilidad de la sala de control por métodos alternativos, las Centrales Nucleares Españolas vienen acometiendo las diferentes acciones necesarias para dar cumplimiento a los requerimientos del Órgano Regulador.

En este artículo se describen los principales mecanismos recogidos en la Guía Referencia NEI 99-03 "Control Room Habitability Assessment Guidance", del Nuclear Energy Institute, para demostrar y mantener la habitabilidad de las Salas de Control en Centrales Nucleares. Así mismo, se plantean los principios teóricos involucrados en las pruebas para la determinación de las entradas de aire a la envolvente de salas de control por medio de gases trazadores, y se exponen las diferentes actividades necesarias para llevar a cabo la prueba base de infiltración.

Desde 2006, Tecnatom, S.A. ha llevado a cabo las pruebas iniciales en cuatro unidades españolas, todas con resultados satisfactorios. El resto de centrales están planificadas durante el segundo semestre de este año. Finalmente, en este documento se resumen los aspectos más importantes a tener en cuenta en el desarrollo de Programas de Habitabilidad de Sala de Control, con los que se pretende asegurar el mantenimiento integral de la envolvente de Sala de Control a lo largo de la vida de la planta.

Since the NRC published in 2003 the Generic Letter 2003-01 "Control Room Habitability" and the Regulatory Guide 1.197 "Demonstrating Control Room Envelope Integrity at Nuclear Power Reactors", where it is emphasized the importance of verifying the control room habitability by means of alternative methods, Spanish Nuclear Power Plants are undertaking the different necessary activities to fulfill the requirements of the regulatory commission.

This paper describes the main mechanisms included in NEI 99-03 Nuclear Energy Institute publication "Control Room Habitability Assessment Guidance", to demonstrate and maintain Control Room Habitability. In addition, in this article it is shown the theoretical principle of the test used to quantify air in-leakage in a control room envelope by using tracer gas techniques. The necessary activities to perform the initial inleakage testing are also put forward.

Since 2006 Tecnatom, S.A. has performed the baseline testing in four Spanish Units, all of them with successful results. The rest of the Plants are scheduled to perform the tests during the second half of this year.

Finally, this document summarises the more important aspects to be taken into account in the development of Control Room Habitability Programs, which are expected to ensure the integral maintenance of the Control Room Envelope during the life of a plant.

INTRODUCCIÓN

La Sala de Control de una Central Nuclear es el área desde donde se llevan a cabo las acciones necesarias para operar y mantener el reactor en condición segura en cualquier modo de operación incluyendo situaciones de accidente.

Rodeando la Sala de Control se encuentran otras zonas a las que los operadores pueden acceder en caso de emergencia y en las que la permanencia es menos continua que en Sala de Control. Según el diseño específico de cada central, estas zonas pueden ser: sala de cables, sala de ordenadores, sala de reuniones,

cocina y aseos. El conjunto de estas zonas y la propia Sala de Control es lo que denominamos Envolvente de Sala de Control (ESC), y está diseñada para limitar la infiltración de materiales peligrosos y radiactivos desde el exterior.

El Sistema de Habitabilidad de Sala de Control (HSC) realiza las funciones de filtrado y acondicionamiento de aire. En caso de emergencia el sistema debe ser capaz de asegurar la permanencia del personal de operación a lo largo de todo el accidente. Así mismo, el sistema debe proteger a los operadores frente a escapes tóxicos, humo y otros subproductos del fuego.

DISEÑOS DE SALAS DE CONTROL

Existen dos diseños típicos que tienen por objeto limitar las infiltraciones de aire a una envolvente: presión positiva y presión neutra.

Una envolvente en modo de operación de presión positiva se aísla del suministro normal de aire y se presuriza intencionadamente con aire proveniente del exterior. De suponerse el contaminante en el ambiente, el aire de presurización es tratado por un filtro con la finalidad de eliminarlo, como muestra la figura 2. Este es el modo de operación del sistema de ventilación de emergencia de SC en caso de accidente radiológico.

Por el contrario, las envolventes en modo de operación de presión neutra no se presurizan intencionalmente pero se limita la infiltración de contaminantes aislando los caminos de flujo de aire conocidos que entran en ella. En la figura 3 se muestra el alineamiento en recirculación del sistema anterior. En caso de emergencia por gases tóxicos este es el modo de operación del sistema.

REQUISITOS DE VIGILANCIA

En Junio de 2003, la NRC publicó una Generic Letter dirigida a todos los propietarios de reactores PWR y BWR en operación, con el objeto de alertarles acerca de posibles deficiencias en el cumplimiento de las Bases de Diseño, Licenciamiento, y requisitos reguladores aplicables a Salas de Control. También informaba del hecho de que los requisitos de Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF's) existentes pueden no ser adecuados e igualmente subrayaba la importancia de encontrar una prueba de vigilancia fiable para la verificación de la Habitabilidad de Sala de Control.

Entre 1991 y 2001 se llevaron a cabo pruebas de integridad de las ESC's de aproximadamente el 30% de las centrales nucleares de Estados Unidos usando como método de prueba el descrito en el American Society for Testing and Materials (ASTM), estándar E741 "Método de prueba para determinar intercambio de aire en una zona mediante dilución de gas trazador". A grandes rasgos, la prueba consiste en dispersar homogéneamente un gas trazador no tóxico en la atmósfera de la ESC y medir la dilución causada por las infiltraciones.

Los resultados de las pruebas según ASTM E741 indicaron que la vigilancia por presión diferencial (ΔP)



Figura 1. Sala de Control de una central nuclear. Simulador alcance total de Tecnomat

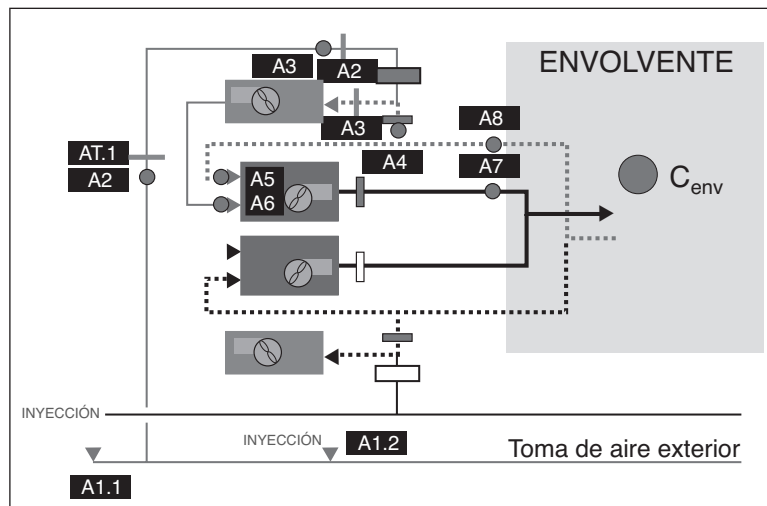


Figura 2. Modo de presión positiva. Filtración.

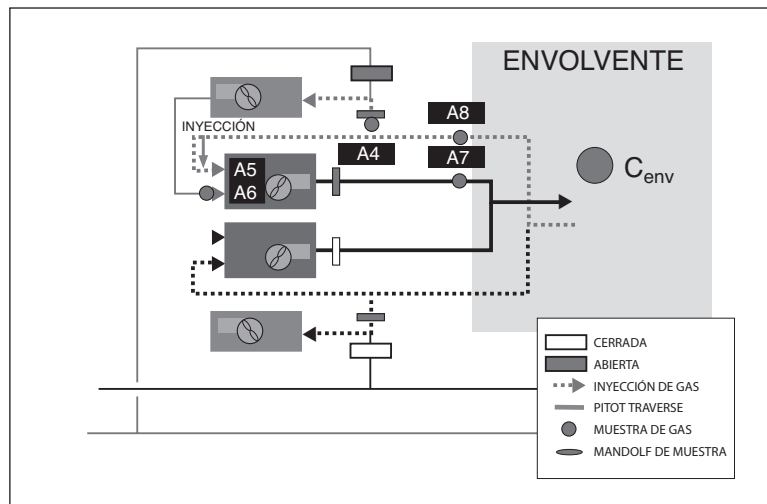


Figura 3. Modo de presión neutra. Recirculación.

entre la ESC y áreas adyacentes, no es un método fiable para demostrar la integridad de la ESC. Este método de vigilancia de ΔP como indicador de la integridad de la ESC presenta dos deficiencias intrínsecas. En primer lugar, no mide la infiltración en la ESC, y asume que la única fuente de presurización es el caudal de presurización a través de la unidad de filtración, no pudiendo entrar contaminación a la ESC si ésta se mantiene a una presión mayor que las áreas adyacentes. En segundo lugar, la vigilancia del ΔP no puede determinar si existen fuentes de presurización no reconocidas. Estas fuentes están normalmente contaminadas en caso de accidente y sin embargo, no son contabilizadas en los análisis de la Instalación.

Debido a que la infiltración depende de las presiones diferenciales entre la ESC y las áreas adyacentes, cambios en la presión de estas áreas pueden afectar a las infiltraciones en la ESC. Estos cambios pueden ser debidos a una modificación de diseño, a la degradación de sistemas de ventilación que funcionan en estas áreas, o a programas de mantenimiento preventivo y correctivo inadecuados.

Las pruebas de infiltración llevadas a cabo según ASTM E741 han ayudado a identificar una serie de deficiencias en los sistemas de HSC:

- Diseño, construcción y calidad del sistema.
- Construcción e integridad de la frontera del sistema.
- Requisitos de vigilancia de las ETF's.

Basándose en la guía NEI 99-03 "Guía de Análisis de la Habitabilidad de Sala de Control" que proporciona una guía general a la industria sobre HSC, la NRC publicó la Regulatory Guide 1.196 "Habitabilidad de Sala de Control

en Reactores de Agua Ligera" aportando información adicional e indicando como método aceptado el descrito en ASTM E741. Esta guía de la NRC aunque no es de obligado cumplimiento, sirve de ayuda para dar respuesta a la Generic Letter 2003-01.

TÉCNICA DE MEDIDA DE INFILTRACIÓN MEDIANTE GASES TRAZADORES

Los gases trazadores han sido utilizados para medir infiltraciones de aire y determinar características de ventilación durante más de 30 años. En el ámbito de la energía nuclear, las técnicas relacionadas con los gases trazadores se han venido utilizando desde comienzos de los años 80.

El método integrado mediante gases trazadores utiliza la medida de la dilución de un gas trazador para medir el intercambio de aire entre la ESC y el exterior.

Son varios los gases trazadores empleados en la industria para la evaluación de sistemas de ventilación. Los grandes volúmenes a probar en el caso de las salas de control, y el nivel de detección necesario en las pruebas de infiltración hacen que sea seleccionado como gas trazador para la evaluación de integridad de ESC's el Hexafluoruro de Azufre (SF_6) que en conjunción con los equipos de medida, bien sea por cromatografía de gases o por fotoacústica, permite la detección de valores de concentración muy bajos (órdenes de ppb's).

El método descrito en ASTM E741 es aplicable a todos los diseños y proporciona el valor de la fuga total por medio de una de las siguientes tres técnicas:

- Decaimiento de concentración: es un método directo en el que se mide el decaimiento de la concentración con el tiempo en el volumen probado.
- Inyección constante: es un método indirecto mediante el cual se debe establecer una concentración de equilibrio del gas trazador dentro del área ventilada. Esta concentración puede ser relacionada con el caudal de aire, si el caudal de gas inyectado es conocido.
- Concentración constante: método también indirecto que determina la cantidad de gas necesaria para mantener una concentración constante a lo largo del tiempo dentro de la zona o zonas ventiladas. Este método requiere equipos más complejos y su aplicación se limita a largas tomas de datos en edificios.

Para configuraciones específicas de sistemas puede aplicarse una combinación de los tres métodos, pero se ha comprobado que el método de decaimiento es el más efectivo cuando no hay caudal de presurización, siendo el de inyección

constante el más efectivo para modos de operación basados en la presurización de la zona.

A continuación se muestra la base teórica de las medidas de infiltración a la Envolvente de Sala de Control:

Balance de masas en el volumen de prueba

Desde un punto de vista teórico los métodos basados en gases trazadores se interpretan haciendo uso del balance de masas de gas siguiente:

$$V \times \frac{dC(t)}{dt} = F(t) - q(t) \times C(t) \quad (1)$$

donde:

V: es el volumen de prueba

C(t): es la concentración de gas trazador en la zona. Como concentración representativa de la zona se tomará la presente en el conducto principal de retorno, lo más cerca posible de la frontera.

F(t): es el caudal de inyección de gas trazador

q(t): es el caudal de aire hacia el exterior del volumen, que debe ser igual al que entra

Obtención de una concentración objetivo uniforme inicial en la zona

Para alcanzar una concentración de trabajo Target en la zona en un tiempo razonable t , se calculará la cantidad de gas a inyectar F_{puff} en función del volumen V de la zona y el caudal q de aire saliente, de la forma:

$$F_{\text{puff}} = \frac{V \times C_{\text{target}}}{t} + \frac{1}{2} \times q \times C_{\text{target}} \quad (2)$$

Además, este tipo de prueba depende de la obtención de una concentración uniforme de gas trazador en todo el volumen de prueba, por lo que el primer paso es realizar una prueba de caracterización de la envolvente en la que se mide la concentración en una red de puntos distribuidos comprobando que ninguno se aleja más de un 10% respecto a la media. La inyección del gas trazador en varios puntos del sistema y la utilización de ventiladores auxiliares mejoran la precisión de los resultados de la prueba.

Método de decaimiento de la concentración

Es la técnica más simple. Partiendo de una concentración inicial de gas trazador, y tras detener la inyección de gas, la entrada de aire se cuantifica midiendo el decaimiento exponencial de la concentración del gas trazador dentro del volumen de prueba. Para $F(t)=0$ la solución del balance de masas expresado en la ecuación (1) queda:

$$C = C_0 \times e^{-At} \quad (3)$$

La constante de tiempo A se define como el número de renovaciones de aire en el volumen por unidad de tiempo. Por lo tanto, para la obtención de un caudal de fugas es necesario el dato del volumen, afectando su incertidumbre a la del resultado final notablemente. Cuanto mayor sea A , más rápidamente decaerá la concentración debido a la entrada de aire del exterior, y el método más apropiado será el de inyección constante.

Como se observa, a priori sólo se requieren dos medidas de concentraciones dejando un intervalo de tiempo t entre ellas, sin embargo, en la práctica se irán midiendo concentraciones de gas trazador a lo largo del tiempo de la prueba. Representando el logaritmo del cociente de concentraciones, $\ln(C/C_0)$, frente al tiempo t , los puntos describen una recta de pendiente A , la cual se calcula mediante regresión lineal. El error estadístico dependerá de: tiempo total de la prueba, número de muestras tomadas en el periodo t y tiempo entre muestras.

Así, el número de renovaciones de aire por unidad de tiempo se calcula a partir de la tasa de decaimiento de la concentración, y multiplicada por el volumen de la envolvente proporciona la entrada de aire exterior total a la sala q_{in} .

$$q_{in} = A \times V \quad (4)$$

Asegurando una mezcla uniforme de gas en la envolvente (diferencia menor de un 2% entre cada punto y la media), realizando una prueba de 4 horas de tiempo de muestreo a intervalos de 15 minutos, y suponiendo errores de medida del volumen en torno al 3% se pueden obtener errores del 10% en la determinación del caudal de aire fugado hacia la envolvente.

Método de inyección $F(t)=\text{constante}$

Es un método que evita el cálculo preciso del volumen de la envolvente, y es el más eficaz para el caso de envolventes de presión positiva con un caudal de presurización elevado.

La solución del balance de masas (1) es:

$$C(t) = \frac{F}{q} + \left(C_0 - \frac{F}{q} \right) \times e^{-At} \quad (5)$$

Para tiempos elevados, el caudal total de aire exterior que entra a la envolvente queda:

$$q = \frac{F}{C} \quad (6)$$

Donde q representa el total del caudal de aire exterior que entra a la envolvente, incluido el filtrado, que habrá que restarlo.

$$q_{in} = q - Q_{\text{presurización}} \quad (7)$$

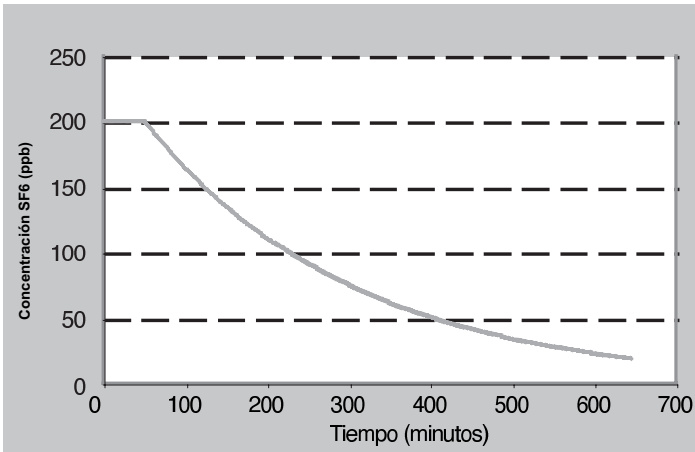


Figura 4. Decaimiento de la concentración

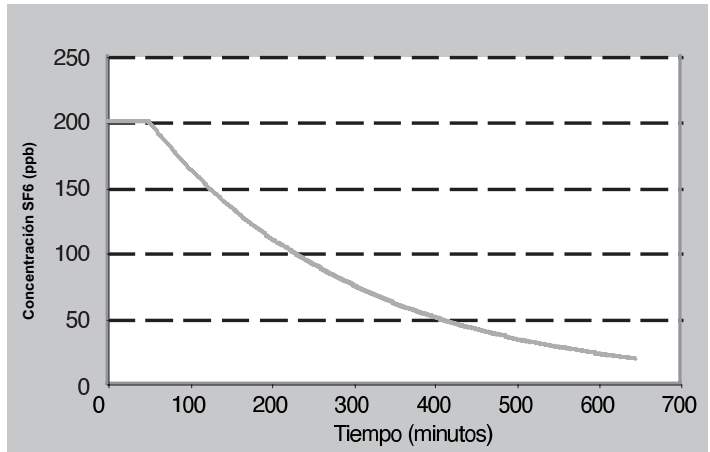


Figura 6. Establecimiento de la concentración objetivo

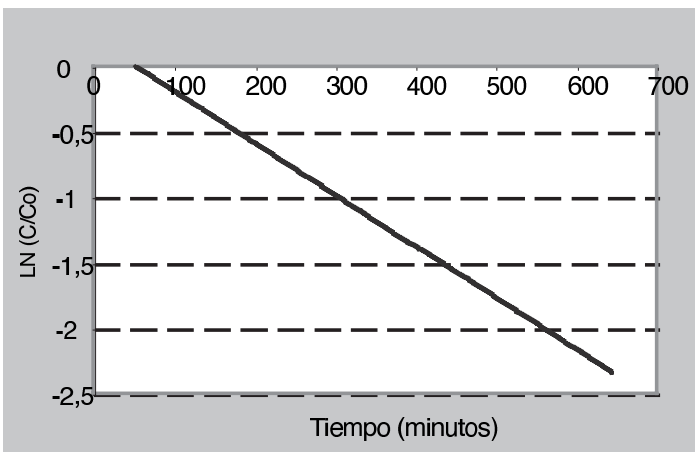


Figura 5. $\ln(C/C_0) = A \times t + b$

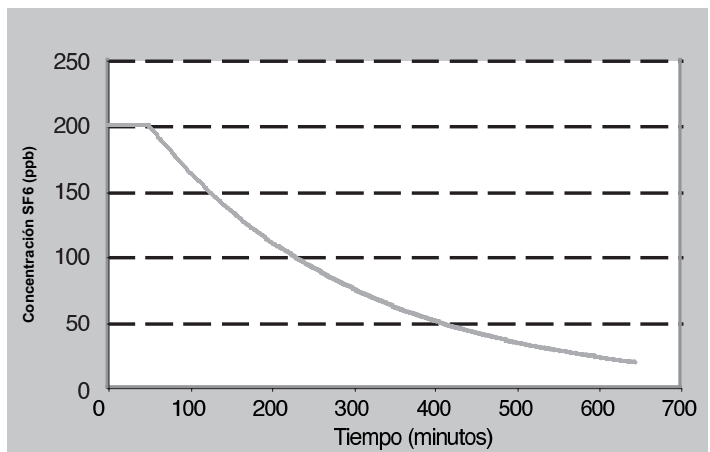


Figura 7. Respuesta ante diversas infiltraciones

Cuando las infiltraciones son muy pequeñas, el error de la medida del caudal de presurización puede ser varias veces el valor de las infiltraciones, por lo que es necesario llegar a otra expresión. Suponiendo una concentración ambiente del gas trazador despreciable, y haciendo uso de la ecuación empleada en la medida de caudales mediante gas trazador:

$$Q_{\text{presurización}} = \frac{F}{C_{\text{presurización}}} \quad (8)$$

Sustituyendo (6) y (8) en (7) queda la ecuación a aplicar:

$$q_{\text{in}} = Q_{\text{presurización}} \times \left(\frac{C_{\text{presurización}}}{C_{\text{retorno}}} - 1 \right) \quad (9)$$

donde las infiltraciones se calculan como un porcentaje del caudal de presurización a partir de un ratio de concentraciones.

Si no hubiera infiltraciones, la concentración en la envolvente será igual a la concentración en el aire de presu-

rización. De esta forma, tras la inyección rápida con la que se llega a la concentración de trabajo, se inicia una inyección constante en el caudal de aire exterior de forma que la concentración en el mismo sea igual a la concentración de trabajo alcanzada en la zona con la inyección rápida. Si se siguiera un proceso con una única inyección, constante, el tiempo de prueba se alargaría considerablemente como se observa en la figura 6.

Cuanto más infiltraciones presente el sistema, habrá mayor dilución y una concentración final menor en la envolvente, tal como se refleja en la figura 7.

Es necesario comprobar que se ha llegado a la condición de equilibrio para poder tomar las medidas que se vayan a utilizar en los cálculos. Si se trata de una envolvente de presión positiva, se puede hacer una estimación del tiempo que tardará en conseguirse el equilibrio. Partiendo de una concentración de cero, se llega al 95% de la concentración de equilibrio en $3/A$ unidades de tiempo.

En la práctica, se aplica el siguiente criterio de equilibrio sobre la serie de da-

tos seleccionada $[C_{\text{INICIAL}}, C_{\text{FINAL}}]$ para el cálculo final de las infiltraciones:

$$\left| \frac{C_{\text{FINAL}} - C_{\text{INICIAL}}}{T_{\text{test}}} \right| < 0.05 \times \frac{F}{V} \quad (10)$$

Algunos detalles prácticos

- En modo de operación por emergencia de gases tóxicos, el método de prueba elegido es el de decaimiento de la concentración siendo el método de inyección constante el utilizado en emergencia por accidente radiológico.
- Este tipo de pruebas requieren la obtención de una concentración uniforme de gas trazador en todo el volumen de la sala de control. La medida en varios puntos junto con la inyección del gas trazador en varios puntos del sistema y la utilización de ventiladores (uno por cada 1000 m² aproximadamente) mejoran la precisión de los resultados de la prueba.
- Es importante la selección apropiada del punto o puntos de inyección de gas



Figura 8. Toma de Muestras en Conductos



Figura 9. Sistema de Inyección del Gas Trazador

trazador, así como de muestreo. En las figuras 2 y 3 se puede ver un ejemplo.

- Si dos puertas de acceso a la envolvente se abren simultáneamente, los resultados de la prueba deberían considerarse no válidos.
- En los casos en que sea aplicable, la capacidad de obtener una medida precisa del caudal de presurización puede tener una relevancia significativa en la incertidumbre del resultado final.
- El tiempo de la prueba es el tiempo en alcanzar la condición estacionaria.

- En función de los valores de infiltración esperados será necesario evitar cualquier variación significativa de las condiciones de la prueba, tales como apertura de puertas o cambios de alineamiento de sistemas de ventilación adyacentes.

PRUEBAS BASE DE MEDIDA DE INFILTRACIONES

Todas las Envolventes de Sala de Control deben ser probadas inicialmen-

te para determinar un primer valor de infiltración. Posteriormente y de forma periódica, dentro de un programa de integridad de la ESC, se alternarán las pruebas con la vigilancia del sistema por parte de los responsables de la instalación para verificar la condición de habitabilidad.

Adicionalmente, cuando se lleven a cabo modificaciones en las estructuras, componentes y sistemas de la ESC que pudieran afectar a su integridad, será necesario realizar una nueva prueba de infiltración a toda la envolvente.

Preparación de la prueba base

Previo paso a la realización de una primera prueba, se debe realizar un análisis con el objeto de identificar caminos potenciales de infiltración a través de la frontera de la ESC, determinar si los sistemas asociados a la ESC se configuran según establecen sus Bases de Diseño, e identificar las áreas hacia las que dirigir el mantenimiento.

La realización de reconocimientos en campo (walkdowns) y la inspección de áreas específicas especialmente vulnerables forman parte de la preparación de la prueba; además, en esta inspección se determinará la situación de los puntos de inyección y de toma de muestras del gas trazador, y del resto de medidas requeridas durante las pruebas.

Considerando aspectos como el modo de operación en emergencia del sistema (radiológico o gases tóxicos), presiones en la ESC en función de la configuración, pérdida de energía exterior, criterio de fallo único de componente activo o condiciones ambientales y teniendo en cuenta la información obtenida en la inspección en campo se procede a elaborar el procedimiento específico de prueba.

Ejecución de la prueba base en CC.NN. españolas

Una vez finalizada la fase anterior, en el año 2006 se iniciaron las pruebas base en nuestro país. A lo largo de ese año se llevan a cabo las pruebas de CN Ascó 1 y 2, CN de Cofrentes y CN Sta. María de Garoña en los diferentes modos de operación en emergencia de cada instalación y para cada uno de los dos trenes que forman el sistema de ventilación de emergencia de cada central.

Todas las pruebas realizadas han dado resultados satisfactorios por comparación de los valores de infiltración obtenidos con los empleados en el análisis de habitabilidad de cada una de las instalaciones.

Se tiene previsto completar la ejecución de las prueba base del resto de centrales durante el segundo semestre de 2007.

Validación del Método

El Instituto de Energía Nuclear Americano, en la tabla I-1 de su guía NEI 99-03, establece que en los casos de pequeña infiltración a la ESC con caudales de infiltración relativamente altos, la incertidumbre de medida alcanza valores del 100% de la medida de la infiltración.

Ante este postulado, durante la realización de las primeras pruebas de medida de infiltraciones en nuestro país, se llevó a cabo una validación del método de medida. La finalidad de esta validación era demostrar que una infiltración al sistema de ventilación de emergencia de SC inferior a 2,8 Sm³/min (100 SCFM) puede ser detectada utilizando la metodología ASTM E741-00 con razonable incertidumbre de medida, en contraposición con lo expresado por el NEI.

El experimento fue realizado sobre uno de los trenes probados con medida de infiltración más bajos. Para ello se indujo un caudal de aire conocido al sistema de ventilación de emergencia de SC mediante la utilización de caudalímetros máscicos; salvo esta aportación de aire al sistema, el ensayo se realizó de manera idéntica a la de la prueba inicial de infiltración del tren.

Finalizado el experimento de validación se comparó el valor de infiltración medido en este ensayo con el obtenido por suma del caudal de aire introducido al sistema y del valor de infiltración inicial del tren. Los resultados finales demostraron que ambos valores se encontraban dentro de una banda de medida del ± 5 % suficiente para considerar que la metodología establecida en ASTM E741-00 es adecuada en la medición de valores de infiltración bajos.

PROGRAMA DE HABITABILIDAD DE SALA DE CONTROL

Una vez realizada una prueba base y obtenida una tasa de fugas inicial, se procederá a la implantación de controles administrativos relativos a: la frontera de la ESC, procedimientos, evaluación de sustancias químicas tóxicas en el entorno de la Central, cambios de diseño, análisis de seguridad y mantenimiento.

Análisis periódico

Se realizará en colaboración con la industria especializada, tres años

después de la primera prueba inicial satisfactoria, o tres años después de subsiguientes pruebas periódicas satisfactorias. Constará de:

- Revisión de los controles administrativos y su efectividad.
- Realización de walkdowns para comprobación de correspondencia con los planos y la no aparición o inclusión de nuevas vulnerabilidades.
- Revisión de pruebas realizadas sobre los sistemas de sala de control y áreas adyacentes.
- Confirmación del margen de presión diferencial entre la ESC y áreas adyacentes.
- Examen de la experiencia operativa.

La detección de alguna disconformidad provocaría la entrada en el programa de mantenimiento correctivo de la planta. Una discrepancia menor o de procedimiento obligaría a realizar una prueba periódica a los 3 años. Si la discrepancia fuera importante habría que realizar una prueba tras el mantenimiento realizado y una prueba periódica a los 3 años.

Pruebas periódicas

Previamente a su realización se procederá, al igual que en la prueba base inicial, a un reconocimiento en planta (walkdown) y al análisis de las áreas específicas.

Se realizarán tres años después de un análisis periódico satisfactorio o tres años después de cualquier prueba no satisfactoria o de un fallo importante encontrado en un análisis periódico.

La detección de alguna disconformidad obligaría a demostrar el cumplimiento de las bases de licenciamiento mediante reanálisis y realizar una prueba periódica a los 3 años. También se podría resolver la discrepancia y realizar una primera prueba y una prueba periódica a los 3 años.

CONCLUSIÓN

Dentro de los Programas de Habitabilidad de Sala de Control que todas las centrales nucleares españolas tienen que desarrollar en los próximos años, TECNATOM S.A está ofreciendo el apoyo técnico y los medios para la realización de las pruebas de integridad de la envolvente mediante la técnica de gases trazadores y el desarrollo de planes de mantenimiento que garantizarán dicha integridad durante la vida útil de la planta.



Francisco Mediavilla García es Ingeniero Industrial por la E.S.I.I de Bilbao.

En 1981 inicia su actividad profesional en la construcción de la CN de Valdecaballeros para posteriormente continuar con la de CN de Trillo con Empresarios Agrupados.

En 1987 se incorpora a la empresa TECNATOM dentro de la División de Pruebas. Es responsable de la Unidad de Medidas y Análisis con actividades en pruebas de Instrumentación Nuclear, pruebas de rendimiento en Ciclos Térmicos y pruebas HVAC en los Sistemas de Ventilación de centrales nucleares.



Juan José Sierra Muñoz es Ingeniero Industrial por la E.T.S. de Ingenieros Industriales ICAI (Madrid). En 2003 inicia su actividad profesional en Tecnatom como ingeniero de sistemas para la C.N.Santa María de Garoña, planta en la que desarrolla su actividad hasta su incorporación a la división de pruebas de Tecnatom en el año 2005. Actualmente es supervisor de pruebas de infiltraciones de aire en Salas de Control de centrales nucleares.