

**Jornada de I+D
en seguridad nuclear
y protección radiológica**

27 de noviembre de 2008

i+d

Colección Documentos I+D

Jornada de I+D
en seguridad nuclear
y protección radiológica

27 de noviembre de 2008

**Jornada de I+D
en seguridad nuclear
y protección radiológica**

27 de noviembre de 2008

Colección
Documentos I+D
17.2008



Colección: Documentos I+D

Referencia: DID-17.08

Copyright 2008. Consejo de Seguridad Nuclear

Publicado y distribuido por:
Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11. 28040 - Madrid
<http://www.csn.es>
peticiones@csn.es

Maquetación: Digrafic

Índice

SEGURIDAD NUCLEAR

Nuevo Plan de I+D del CSN (período 2008-2011)

José Manuel Conde López

Jefe de la Oficina de I+D del CSN..... 7

Aplicación de técnicas avanzadas de diagnóstico de cables eléctricos de centrales nucleares

Tomás López Vergara

Departamento Eléctrico de Empresarios Agrupados 19

Studsвик Cladding Integrity project (SCIP)

M^a Consuelo Alejano Monge

Área de Ingeniería del Núcleo del CSN..... 49

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Resultados y beneficios del proyecto “Aplicaciones informáticas y radioanalíticas para el control de la radiactividad ambiental en los procesos de desmantelamiento”

Catalina Gascó Leonarte

Vigilancia Radiológica y Radiactividad Ambiental [CIEMAT] 75

Seguridad y control regulador de las instalaciones radiactivas de radioterapia mediante la aplicación de técnicas de análisis e identificación de riesgos

M^a Luisa Ramírez Vera y Arturo Pérez-Mulas

Área de Instalaciones Radiactivas Médicas del CSN 101

**Nuevo plan de I+D del CSN
(período 2008-2011)**

José Manuel Conde López

Jefe de la Oficina de I+D del CSN

CSN Jornada de I+d del CSN
27 de noviembre de 2008

ACTIVIDADES DE I+D DEL CSN ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

J.M. Conde
Oficina de I+D
CSN

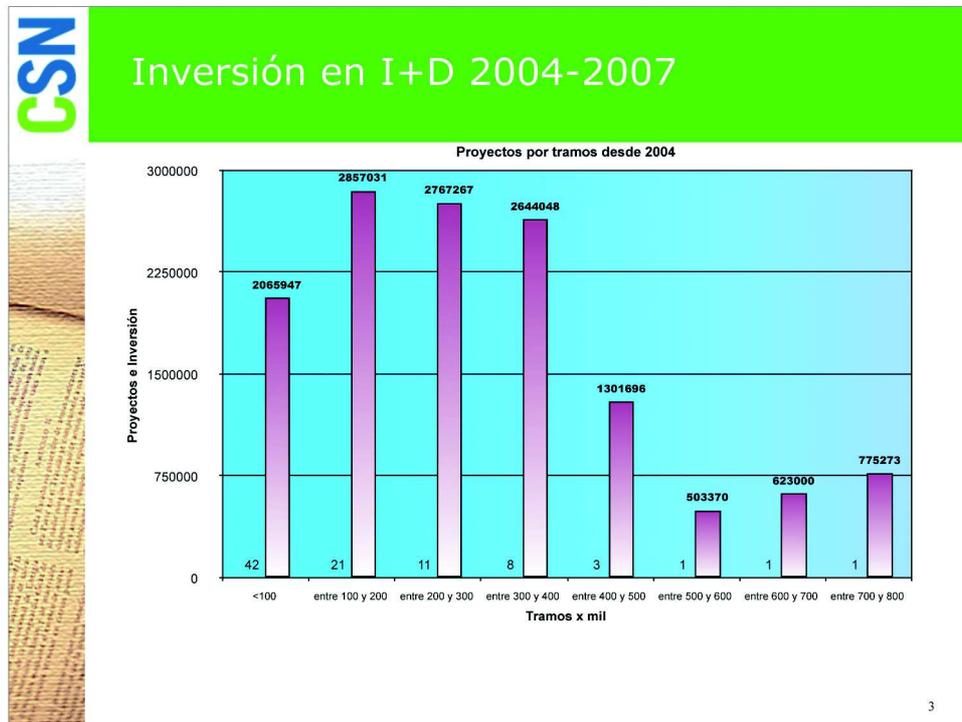
CSN Plan de I+D 2004-2007

- Algunos datos:
 - 67 proyectos de I+D ejecutados
 - 10,8 M€ de inversión

Inversión de Proyectos 2004-2007 por Programa

Programa	Inversión (€)	Número de proyectos
1	1.537.403,00	8
2	2.440.024,36	19
3	335.717,00	6
4	1.351.797,28	8
5	2.131.030,89	15
6	1.898.024,00	10
7	325.448,00	1
8	325.448,00	1

2



- CSN**
- ## Algunas conclusiones
- Cooperación con otras organizaciones:
 - Necesidad de redefinir la relación con UNESA para actividades de I+D
 - Relación mejorable con otras organizaciones españolas
 - Muy buen rendimiento de la relación con la NEA
 - Relación con OIEA y UE prácticamente inexistente en temas de I+D
 - Diferencias estructurales entre el tratamiento de la I+D en SN y la PR
 - Poco aprovechamiento de los acuerdos bilaterales (NRC)
- 4

CSN

Algunas conclusiones

- La variabilidad temporal de los recursos disponibles para I+D ha generado problemas
- La gestión de las distintas alternativas de formalización de proyectos debe mejorarse
- La valoración interna y la visibilidad externa de las actividades de I+D no se corresponde con el esfuerzo que realiza el CSN
- Es preciso mejorar los resultados y retornos de los proyectos de I+D y su difusión
- Se puede incrementar el efecto de las actividades de I+D sobre la calidad de las actuaciones del CSN y como medio óptimo para la formación y mantenimiento al día del personal con experiencia

Evolución del presupuesto

Año	Presupuesto
2004	2.5
2005	2.5
2006	1.5
2007	1.5

5

CSN

Plan de I+D 2008-2011

- El CSN ha iniciado durante 2008 un proceso de potenciación de sus actividades de I+D y de mejora de su gestión:
 - Aumento de recursos
 - Uso exhaustivo de los instrumentos administrativos disponibles
 - Fomento de la cooperación
 - Revisión de procesos de gestión
- El Plan de I+D constituye el marco fundamental en el que se desarrollan las actividades de I+D del CSN

6



Contenido del Plan

- Objetivos de I+D
- Líneas de Investigación 2008-2011
- Estrategias concretas
- Instrumentos de implantación

7



Objetivos de I+D

- Contribuir a asegurar un alto nivel de seguridad nuclear y protección radiológica en las instalaciones existentes, hasta que alcancen el final de su vida
- Mejorar la vigilancia de la exposición de los trabajadores y del público a las radiaciones ionizantes
- Continuar avanzando en el desarrollo la protección radiológica en las exposiciones médicas
- Disponer, en el momento temporal oportuno, de los conocimientos y medios técnicos necesarios para apreciar los riesgos asociados a las instalaciones futuras

8



Líneas de Investigación

- Combustible nuclear y física de reactores
- Modelación y metodologías de análisis
- Comportamiento de materiales
- Nuevas tecnologías
- Residuos radiactivos
- Control de la exposición a la radiación
- Dosimetría y radiobiología
- Gestión de emergencias y análisis de incidentes

9



Documento de objetivos

- Es un documento que describe los objetivos y estrategias de I+D para temas concretos:
 - Aquellos con mayor volumen de proyectos
 - Aquellos con proyectos de mayor impacto directo en SN y PR
- Complemento del plan de I+D, proporciona un marco de actuación futura para el tema concreto:
 - Contexto y situación actual
 - Objetivos y estrategia
 - Líneas de actuación

10

CSN

Estrategias concretas (borrador)

- 1.1. Combustible
- 2.1. Termohidráulica
- 2.2. Metodologías realistas de análisis de seguridad
- 2.3. Factores humanos y de organización
- 2.4. Accidentes severos
- 3.1. Materiales
- 4.1. Tecnologías digitales
- 5.1. Residuos de alta actividad
- 5.2. Residuos de actividad media y baja
- 5.3. Residuos NORM
- 5.4. Rehabilitación de zonas contaminadas
- 6.1. Impacto ambiental de instalaciones en operación y clausuradas
- 6.2. Vigilancia radiológica ambiental
- 6.3. Protección del paciente
- 6.4. Radiación natural
- 7.1. Dosimetría
- 7.2. Radiobiología
- 8.1. Gestión de emergencias: aspectos radiológicos
- 8.2. Gestión de emergencias: aspectos de seguridad nuclear
- 8.3. Análisis de incidentes

Realizados
En curso

11

CSN

Cartera de proyectos

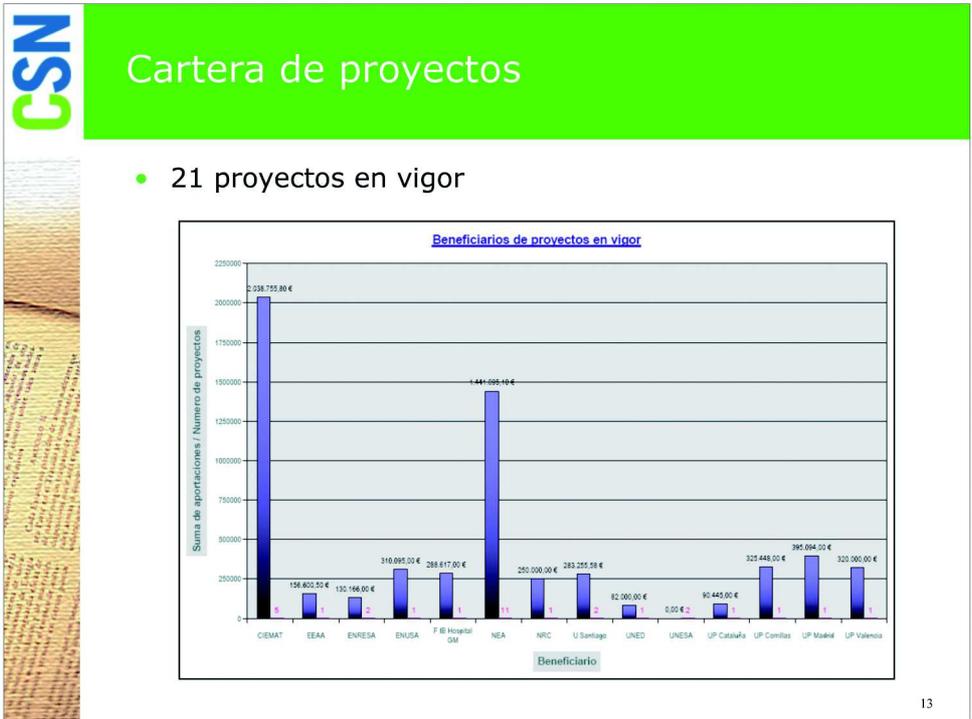
- 21 proyectos en vigor

Gráfico dinámico de Proyectos en Vigor vs Programa Plan I+D 2008 - 2011 vs Inversión CSN

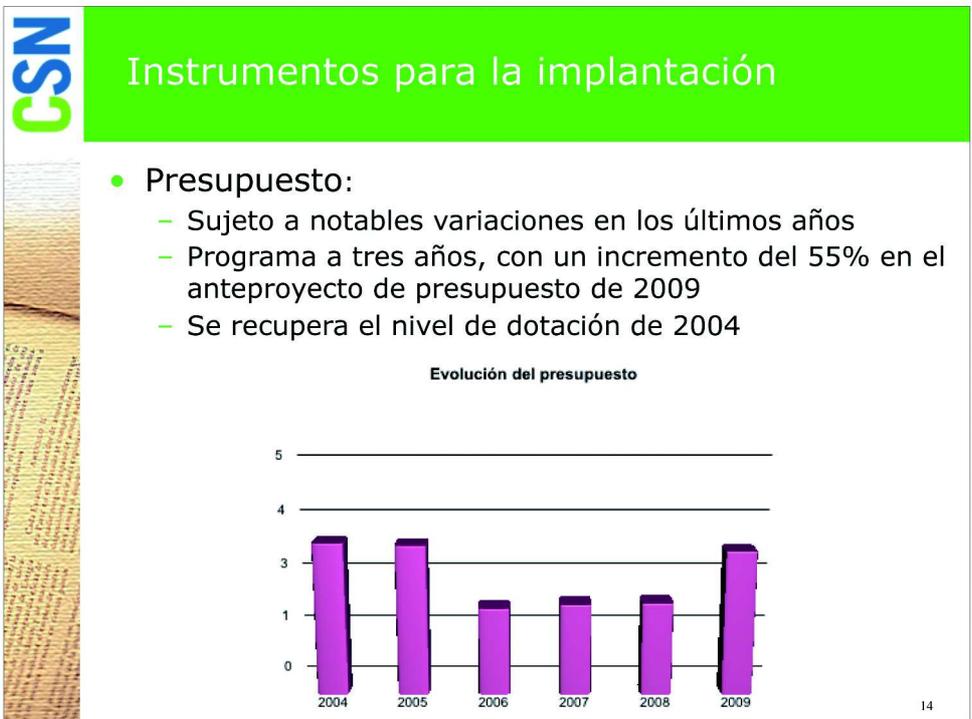
Categoría	Número de Proyectos	Inversión (€)
1	7	1.573.085,98
2	10	1.494.149,90
3	3	290.743,70
4	2	995.568,00
5	4	957.937,59
6	4	1.084.082,00
7	1	329.448,00

Programa Plan 2008 - 2011

12



13



14



Instrumentos para la implantación

- **Dotación técnica:**
 - Más de 20 técnicos del CSN actúan como coordinadores de proyectos de I+D
 - El número de técnicos involucrados en los proyectos es superior
 - 23 técnicos del CSN participan en actividades de la NEA
- **Perspectiva:**
 - Incremento del número de técnicos involucrados en actividades de I+D

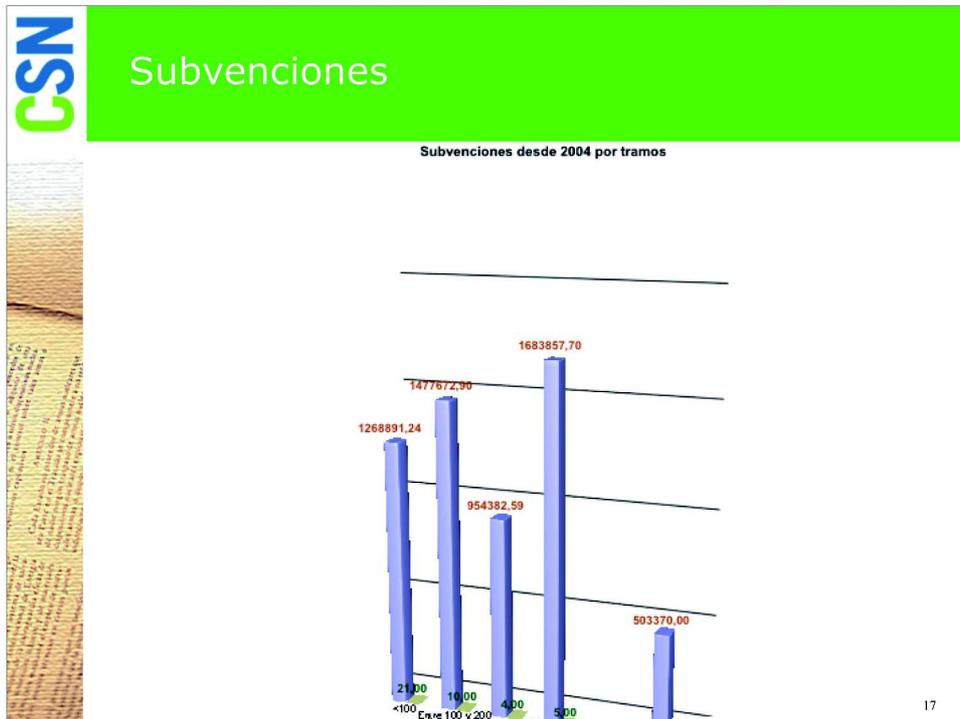
15



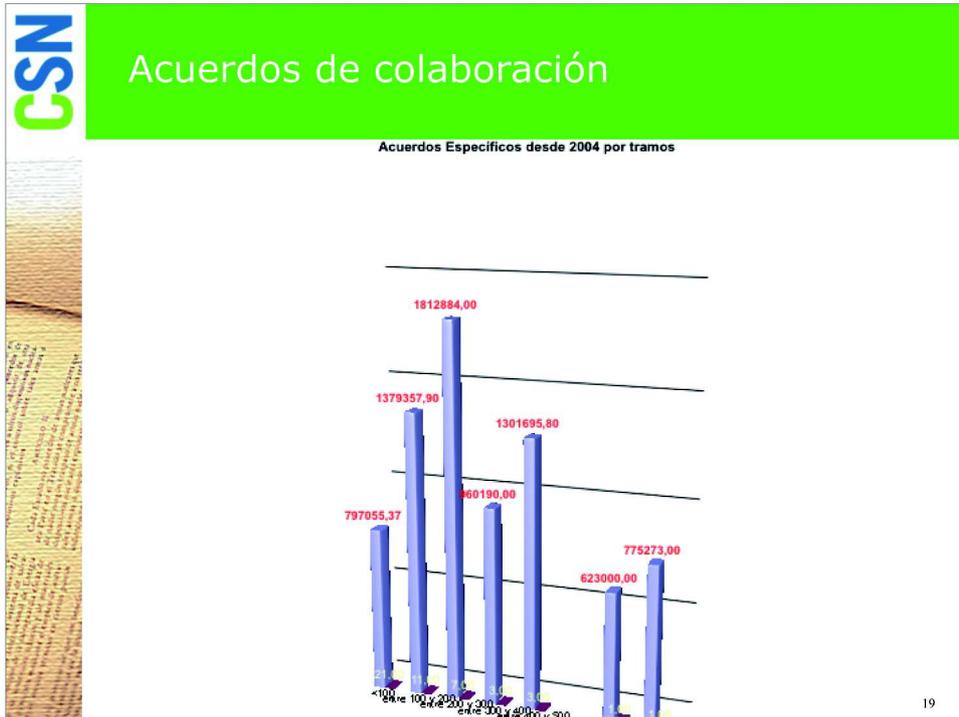
Instrumentos para la implantación

- **Subvenciones a proyectos de I+D:**
 - Por razones presupuestarias, no se ha realizado convocatoria de concesión desde 2005
 - Necesarias para cubrir una de las funciones del CSN: mantenimiento de conocimientos e infraestructuras
 - Convocatoria de concesión en 2009 para el periodo 2009-2011
 - Dotación de 2 M€ (sujeta a aprobación final del presupuesto)
 - Temas técnicos objeto de la convocatoria menos generales que en años anteriores: compatibilizar el interés técnico del CSN con la función a cumplir
 - Proyecto de publicar una convocatoria cada tres años con dotaciones similares

16



- ### Instrumentos para la implantación
- Acuerdos marco con otras entidades:
 - Revisión y mejora de los acuerdos existentes
 - Identificación de nuevos acuerdos a establecer
 - Acuerdos de colaboración:
 - Son el instrumento natural para la formalización de la mayoría de los proyectos de I+D
 - Criterios y requisitos administrativos claros para su establecimiento
 - Dotación presupuestaria no afectada por la convocatoria de concesión de subvenciones: aumento neto respecto al año 2008
 - Establecimiento de acuerdos de colaboración para intercambio de resultados con otras organizaciones: EdF (Francia), JNES (Japón),...
- 18



- ## CSN Instrumentos para la implantación
- **Proyectos cooperativos:**
 - El CSN tiene una larga tradición de participación en proyectos de cooperación:
 - Unesa, Enusa, Enresa, Ciemat,...
 - NEA
 - Ofrecen diversas ventajas:
 - Nivel técnico del proyecto
 - Difusión de resultados
 - Mejor utilización de los recursos
 - Fomento de la I+D por otras organizaciones
 - Se favorecerá la realización de proyectos en colaboración con organizaciones externas, nacionales y extranjeras
- 20



Gestión de I+D

- **Revisión de procedimientos internos**
 - Análisis y simplificación de procesos
 - Los recursos humanos de las DT dedicados a I+D deben poder centrarse en los trabajos técnicos
 - Adecuación del papel de la Oficina de I+D
- **Establecimiento de nuevos procesos:**
 - Selección y priorización de proyectos
 - Participación y seguimiento de los proyectos
 - Valoración de resultados y retornos
 - Difusión y comunicación de los resultados

21

Aplicación de técnicas avanzadas de diagnóstico de cables eléctricos de centrales nucleares

Tomás López Vergara

Departamento Eléctrico de Empresarios Agrupados

Índice

1. Introducción
2. Objetivos del proyecto
3. Documentación de referencia
4. Diapositivas

1. INTRODUCCIÓN

La vigilancia del envejecimiento de los cables eléctricos en las centrales nucleares ha cobrado una importancia creciente en los últimos años, que viene reflejada en la realización de un importante volumen de investigación de carácter internacional. Los factores que motivan lo anterior son básicamente los siguientes:

- El elevado volumen de cableado instalado en una central nuclear. Los cables están distribuidos por toda la planta, incluidas áreas de difícil acceso y de ambiente severo.
- La funcionalidad del cable se basa en el mantenimiento de las propiedades mecánicas y eléctricas de su cubierta y aislamiento. Estos elementos están normalmente constituidos por materiales orgánicos, objeto de degradación con el tiempo.
- El parque nuclear, tanto nacional como internacional, se plantea en estos momentos estrategias de extensión de vida de las plantas mas allá de las vidas iniciales de diseño establecidas, para las cuales se diseñaron los cables actualmente instalados.

Dados los factores anteriores y la situación de vida útil de las centrales nucleares españolas, se ha considerado apropiado desarrollar actuaciones sistemáticas de vigilancia sobre los cables instalados, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La vida media de las plantas españolas hace que ciertos cables (normalmente los instalados en condiciones más adversas de operación normal) puedan proporcionar ya datos reales de envejecimiento, susceptibles de evaluación como cables testigo para la aplicación de los resultados al resto de los cables similares de la planta.
- El momento actual de vida de las plantas hace asimismo muy adecuado el inicio de actuaciones de vigilancia/toma de datos con vistas a disponer de un conjunto sólido de resultados de la evolución del estado general del cableado de cara a los programas de extensión de vida de las plantas.
- La aplicación de actuaciones sistemáticas de vigilancia del cableado permitirá la detección temprana de fallos con su consiguiente efecto sobre la disponibilidad de la planta.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta el limitado conocimiento existente sobre los mecanismos de degradación de los distintos tipos de materiales de aislamiento normalmente utilizados, así como de las técnicas de monitorización de los mismos, se incluyó en el Plan Coordinado de Investigación (PCI),

suscrito por el CSN y UNESA, el desarrollo de un proyecto sobre “Seguimiento y Vigilancia del Envejecimiento de Cables Eléctricos en Centrales Nucleares”.

Con este proyecto se buscaba establecer una base común de actuación para todas las centrales nucleares españolas, en línea con el estado actual del arte y sobre la base de los criterios generales de actuación establecidos con carácter internacional por el IAEA en su documento IAEA-TECDOC-1188, “Assessment and Management of Aging of Major NPP Components Important to Safety: In-Containment I&C Cables”.

Los objetivos específicos del proyecto fueron los siguientes:

- Evaluación del estado actual del arte en la vigilancia del estado del cableado eléctrico.
- Definición de actuaciones prácticas aplicables en el contexto español y establecimiento de criterios y metodología comunes para el desarrollo de actividades de vigilancia para gestión de vida de cables eléctricos en las centrales nucleares españolas.
- Consolidación de lo anterior en una guía práctica de aplicación, para su uso por las plantas en el establecimiento del programa de vigilancia.
- Desarrollo de procedimientos técnicos específicos para la ejecución de las actividades significativas de vigilancia y la valoración de los resultados que constituyen el programa de vigilancia.
- Puesta a punto y validación de las técnicas de monitorización propuestas sobre cables representativos.

Para el cumplimiento de los objetivos anteriores, se planteó la realización de los trabajos en dos fases.

En la primera fase se abordaron los cuatro primeros objetivos anteriormente descritos. Los ensayos de caracterización de cables, descritos en el objetivo 5, se pospusieron para una siguiente fase.

La realización de los trabajos de la primera fase fue adjudicada a Tecnatom y Empresarios Agrupados, habiéndose desarrollado entre noviembre de 2002 y octubre de 2003.

Las principales actividades incluidas en esta primera fase fueron las siguientes:

- Elaboración de un informe de evaluación del estado de la investigación y desarrollo nacional e internacional, incluyendo fichas bibliográficas resumen de la documentación principal publicada.
- Elaboración de una Guía de Vigilancia del estado de los cables eléctricos.
- Elaboración de los siguientes procedimientos técnicos:
- Identificación de parámetros ambientales y de servicio críticos.

- Selección de circuitos y definición del programa de vigilancia de cables.
- Definición de procedimientos de caracterización eléctrica de los cables.
- Definición de procedimientos de caracterización mecánica de los cables.

Los documentos generados en esta fase corresponden a las referencias [1], [2], [3], [4], [5] y [6].

Como continuación de la primera fase del proyecto, se ha iniciado una nueva fase que tiene como objetivo básico la puesta a punto y aplicación de técnicas de vigilancia avanzadas, de carácter no destructivo, para la determinación del estado de los cables eléctricos de las Centrales Nucleares Españolas.

La actual fase del proyecto, asimismo perteneciente al PCI, está financiada parcialmente por el CSN y UNESA y se lleva a cabo conjuntamente por Tecnatom, el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas – Instituto de Materiales de Madrid (ICMM) y Empresarios Agrupados.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos básicos del proyecto son la puesta a punto y aplicación de técnicas de vigilancia avanzadas, de carácter no destructivo, para la determinación del estado de los cables de las Centrales Nucleares españolas. Las técnicas de vigilancia servirán asimismo como base para futuros desarrollos de metodologías para la extensión de vida del cableado eléctrico de las centrales nucleares españolas.

Tomando en consideración el limitado conocimiento actual de los mecanismos de degradación de los distintos tipos de materiales de aislamiento normalmente utilizados en los cables y las técnicas de monitorización de los mismos, sólo resulta posible un adecuado seguimiento y control del envejecimiento a largo plazo del sistema de cableado eléctrico de la planta mediante la implantación de un conjunto de técnicas de vigilancia debidamente desarrolladas y planificadas sobre una muestra representativa de los cables.

Si bien existe una amplia literatura sobre la aplicación de técnicas de ensayo de vigilancia a cables eléctricos, puede afirmarse que no existen unas técnicas generales que puedan ser aplicadas por igual a todos los tipos de cables. La construcción del cable y sus materiales influyen de una forma fundamental a la hora de determinar la aplicabilidad de una técnica. Asimismo, para un mismo tipo de cable, con similares materiales, existe una gran dispersión de los resultados para distintos fabricantes, por lo que no se puede, en general, fijar límites admisibles globalmente aplicables para los resultados de los ensayos, sino que deben establecerse para cada cable.

De acuerdo con lo anteriormente indicado, y a fin de lograr una herramienta de gestión del envejecimiento de los cables en las centrales nucleares españolas, se precisa determinar de una forma práctica la aplicabilidad de las diferentes técnicas de diagnóstico a los cables específicos instalados en dichas centrales, correlacionando los resultados de los ensayos y la degradación real de los cables.

2.1 Alcance y descripción general del proyecto

Las técnicas de diagnóstico consideradas en el proyecto son: módulo indenter, tiempo/temperatura de inducción a la oxidación (OITM/OITP) y análisis termogravimétrico (TGA), en correspondencia con las recomendaciones recogidas en el documento (1), desarrollado dentro de la fase anterior del proyecto.

A través de un proceso de validación se determinará de forma práctica la aplicación de las técnicas de vigilancia avanzadas, mediante la obtención de la relación existente entre los valores obtenidos en los ensayos respecto al estado de degradación del cable.

Para realizar este proceso de validación se ha seleccionado una muestra de doce cables, representativa de los cables existentes en las centrales nucleares españolas. La selección de la muestra se realizó teniendo en cuenta el tipo del cable, material, fabricante, ámbito de aplicabilidad de cada técnica, y la posibilidad de disponer al mismo tiempo de cable nuevo y cable que haya estado en servicio en las centrales.

Las distintas muestras de cable nuevo se someten a ensayos de envejecimiento térmico y de irradiación para simular diferentes escalones de envejecimiento por su funcionamiento en la central.

En el proceso de validación se realizarán ensayos de caracterización que consistirán en la aplicación de las técnicas “Elongation at break” (EAB) y “Tensile Strength” (TS) sobre muestras de cable nuevo y cable envejecido artificialmente. Ambas técnicas son consideradas de forma generalizada como indicadoras de la degradación del cable, puesto que su tendencia informa acerca del estado en que se encuentra el cable: los valores decrecen gradualmente con el envejecimiento del cable.

Se determinará la existencia de factores de correlación entre las técnicas de vigilancia y la degradación real de los materiales por comparación de los resultados de los ensayos correspondientes a las técnicas a validar con los de los ensayos de caracterización.

Finalmente se comprobarán los resultados obtenidos con cables que previamente hubieran estado en servicio en central.

Las técnicas de vigilancia servirán asimismo como base para futuros desarrollos de metodologías para valorar y asegurar la vida del cableado eléctrico de las centrales nucleares españolas de cara a su operación a largo plazo.

2.2 Actividades del proyecto

Selección y acopio de cables representativos

La selección de cables se ha realizado de acuerdo con las recomendaciones indicadas en los documentos (1) y (3) correspondientes a la fase anterior del proyecto.

La muestra está formada por doce cables, incluyendo cables de fuerza baja tensión, control, instrumentación y extensión de termopares.

Se ha optado por excluir del alcance a los cables de media tensión debido a que los resultados que se obtengan en los cables de fuerza baja tensión les son, en general, aplicables. Ambos tipos de cables comparten los mismos materiales, y dado que el espesor del aislamiento es menor en los cables de baja tensión, al extrapolar los resultados se obtendrán conclusiones conservadoras.

La muestra seleccionada pretende cubrir el mayor número posible de materiales de aislamiento y cubierta presentes en los cables de las centrales, y dentro de un mismo tipo de material, diversos fabricantes, puesto que aún cuando dos cables puedan responder a la misma denominación genérica de material en su aislamiento o cubierta, la formulación específica de los mismos puede hacer que su comportamiento en términos de envejecimiento a largo plazo sea diferente. Se han considerado cables de fabricación nacional, pues los cables de fabricantes exteriores generalmente están incluidos en otros proyectos de investigación.

Para la realización de la selección de cables se ha contado con la colaboración de las Centrales Nucleares de Almaraz, Ascó, Cofrentes, Santa María de Garoña, Trillo y Vandellós, recogándose sus recomendaciones relativas a los tipos de cables a considerar, y analizándose la posibilidad de disponer de cables, tanto nuevos como envejecidos naturalmente por su instalación en la central, de características similares. Las Centrales suministraron un total de 22 cables diferentes, de los que finalmente se seleccionaron 12. (Ver tabla 1). Asimismo, se facilitó por las Centrales la documentación correspondiente a los cables seleccionados (características e información de calificación).

Ajuste de técnicas / Ensayo de muestras no envejecidas

A la hora de aplicar una técnica existen variables que dependen del material a ensayar. En esta etapa se procede a ensayar las muestras modificando las variables aplicables hasta encontrar los procedimientos de ejecución adecuados a cada material.

Los procedimientos que se desarrollen en cada técnica deben proporcionar resultados consistentes y reproducibles.

Una vez ajustadas las técnicas, se aplican los ensayos de caracterización y las técnicas de vigilancia avanzadas sobre las muestras de cables sin envejecer.

Envejecimiento térmico acelerado/Ensayo de muestras envejecidas térmicamente

Las distintas muestras de cables acopiados se someten a ensayos de envejecimiento térmico para simular diferentes escalones de envejecimiento.

Se emplea la ecuación de Arrhenius en la determinación de las condiciones de ensayo. La energía de activación de cada material de aislamiento corresponde a la identificada en los informes de calificación correspondientes o, a los valores recomendados en la literatura técnica.

En principio se consideran los siguientes escalones de envejecimiento: 20, 40, 60 años.

Sobre las muestras envejecidas térmicamente se aplican los ensayos de caracterización y las técnicas de vigilancia avanzadas.

Envejecimiento por radiación / Ensayo de muestras envejecidas por radiación

Las distintas muestras de cables acopiados se someten a ensayos de envejecimiento por radiación para simular diferentes escalones de envejecimiento.

En principio se consideran los siguientes escalones de envejecimiento: 1/3, 2/3 y 3/3 de dosis total acumulada a 60 años (60 Mrad).

Las tasas de dosis no superarán el valor de 0,1 Mrad/h, a fin de asegurar un envejecimiento adecuado de las muestras.

Sobre las muestras envejecidas por radiación se aplican los ensayos de caracterización y las técnicas de vigilancia avanzadas.

Envejecimiento acelerado térmico y por radiación / Ensayo de muestras envejecidas térmicamente y por radiación

Las distintas muestras de cables acopiados se someten sucesivamente a ensayos de envejecimiento térmico y por radiación, para simular diferentes escalones de envejecimiento.

Se consideran los siguientes escalones de envejecimiento: 20 años (y 1/3 dosis), 40 años (y 2/3 dosis), 60 años (y 3/3 dosis).

Sobre las muestras envejecidas térmicamente y por radiación se aplican los ensayos de caracterización y las técnicas de vigilancia avanzadas.

Estudio de resultados y obtención de factores de correlación de las técnicas de “condition monitoring”

En primer lugar se determinará la tendencia que muestran los resultados de los ensayos de caracterización con la degradación del material.

Posteriormente se compararán los resultados de los ensayos correspondientes a las técnicas a validar con los de los ensayos de caracterización.

Finalmente se determinará la existencia de factores de correlación entre las técnicas de vigilancia y la degradación real de los materiales.

Comparación de los resultados obtenidos en la aplicación de las técnicas sobre muestras envejecidas artificialmente y sobre muestras con envejecimiento natural

Sobre muestras de cables retirados de servicio, de similares características a las de los cables ensayados, se aplicarán las técnicas de vigilancia a fin de comparar los resultados obtenidos con cables envejecidos naturalmente frente a los obtenidos con cables envejecidos artificialmente. Para poder realizar la comparación se debe conocer el tiempo de servicio en central de los cables y sus condiciones de instalación.

Sobre las muestras disponibles, se realizarán ensayos de EAB/TS, “Indenter”, OITM/OITP y TGA.

Con los resultados obtenidos se llevará a cabo un análisis comparativo de la aplicación de las técnicas de “condition monitoring” sobre muestras envejecidas artificialmente y sobre muestras con envejecimiento natural.

Como conclusión del proyecto se evaluará la aplicabilidad de las técnicas de vigilancia a cada tipo de material, metodología de aplicación de las técnicas de vigilancia y procedimientos de evaluación del estado de los cables en función de los parámetros medidos.

2.3 Productos esperados del proyecto

- Puesta al día de las técnicas avanzadas de diagnóstico para su aplicación a los cables de las centrales nucleares españolas
- Caracterización de la degradación de los cables en función de su envejecimiento.
- Obtención de factores de correlación entre los resultados de las técnicas de vigilancia y la degradación de los cables.
- Evaluación del comportamiento de los cables envejecidos artificialmente frente a los envejecidos naturalmente.
- Obtención de datos para su aplicación a los programas de extensión de vida de las plantas.
- Obtención de una herramienta de aplicación práctica para la gestión del envejecimiento de los cables en las centrales.

2.4 Avance del proyecto

El proyecto estaba previsto para una duración total de 27 meses, habiéndose iniciado en diciembre de 2005.

En los seis primeros meses del proyecto se llevó a cabo el proceso de selección y acopio de los cable nuevos de las centrales.

El plazo previsto para la realización del proyecto se ha incrementado como consecuencia de las siguientes incidencias:

- Con anterioridad al inicio de los ensayos de envejecimiento térmico se decidió revisar las energías de activación a considerar para el cálculo del tiempo de ensayo, lo que originó un aumento en el plazo de cinco meses.
- En los ensayos de envejecimiento térmico se observó un deterioro significativo de los cables de fuerza, que impedía realizar los ensayos previstos en el proyecto. Se decidió repetir el ensayo para esos cables, con una temperatura de ensayo inferior, lo que originó un aumento del plazo en un año.

En el momento actual, la situación del proyecto es la siguiente:

- Se han realizado los ensayos correspondientes a las muestras de cables no envejecidas, tanto los correspondientes a las técnicas de diagnóstico (módulo indenter, tiempo/temperatura de inducción a la oxidación [OITM/OITP] y análisis termogravimétrico (TGA), como los de caracterización (EAB/TS).
- Se han realizado los ensayos de irradiación de los cables sobre cables no envejecidos térmicamente, habiéndose aplicado los siguientes ensayos sobre los cables ya irradiados:
 - OITM/OITP en cables irradiados a 20, 40 y 60 años.
 - TGA en cables irradiados a 20, 40 y 60 años.
 - Módulo Indenter sobre cables irradiados a 20, 40 y 60 años .
- Se han finalizado los ensayos de envejecimiento térmico de los cables de fuerza en Septiembre de 2008. el resto de los cables ya habían sido ensayados con anterioridad. Para dichos cables se han realizado los siguientes ensayos:
 - OITM/OITP en cables envejecidos a 20, 40 y 60 años.
 - Módulo Indenter en cables envejecidos a 20, 40 y 60 años.
- En octubre de 2008 se han comenzado los ensayos de irradiación sobre cables envejecidos térmicamente; se espera finalizar los ensayos a finales de marzo de 2009.
- No se han comenzado los ensayos de diagnóstico sobre muestras envejecidas naturalmente en las Centrales, pues actualmente se está en fase de suministro de dichas muestras.

Se espera haber finalizado todas las actividades del proyecto en septiembre de 2009.

2.5 Resultados obtenidos

En los ensayos de OITM sobre cables nuevos e irradiados, se ha observado en general una disminución del tiempo de oxidación, tanto en los materiales de aislamiento como de cubiertas, con cables irradiados, lo que da idea de una degradación de los materiales. Se observa una mayor disminución en cables irradiados con mayores dosis, si bien no en todos los casos se observa una tendencia uniforme. También se observa una importante desviación de unos materiales a otros.

En los ensayos de dureza e indenter los cambios en los parámetros medidos son mucho más reducidos, si bien también se observa en general una indicación de deterioro del material con mayores dosis de radiación o mayor envejecimiento térmico (aumento de dureza y del módulo indenter).

2.6 Conclusiones

De acuerdo con lo expuesto, y aún cuando no puede darse una visión completa sobre la aplicabilidad de las técnicas de diagnosis en los cables seleccionados, ya que está pendiente de realización gran parte de los ensayos previstos, puede observarse una tendencia general de variación de los resultados de los ensayos, tanto de OITM/OITP, como de indenter y dureza, con la degradación de los cables. Los resultados parecen confirmar, por tanto, la utilidad de dichas técnicas de diagnosis aplicadas para la estimación de la degradación de los cables en servicio.

Identificación cable en el proyecto	Utilización	Material		Fabricante	Central de procedencia	Composición	Identificación en la central
		Aislamiento	Cubierta				
A	Fuerza, baja tensión	EPR	AFUMEX	Pirelli	CNC	3x16 mm ²	W19
B	Fuerza, baja tensión	EPR	AFUMEX	Pirelli	CNA	3x10 mm ²	W20
C	Fuerza, baja tensión	EPR	CSPE	Fercable	CNT	2x6 mm ²	W063
D	Fuerza, baja tensión	EPR	CSPE	General cable	ANV	3x4 mm ²	4E3
E	Fuerza, baja tensión	EPR	CSPE	Saenger	CNG	3x25 mm ²	
F	Fuerza, baja tensión	ETFE	CSPE (1)	System cable	CNC	1x16 mm ²	W217
G	Instrumentación y control	AFUMEX	AFUMEX	Pirelli	CNG	5x0,75 mm ² +P	
H	Instrumentación y control	EPR	NEOPRENO	Pirelli	ANA	2x4 mm ²	IP2
I	Instrumentación y control	ETFE	AFUMEX	Pirelli	CNT	2x2x0,5 mm ²	W560
J	Instrumentación y control	PVC	PE	Pirelli	CNT	4x2x0,8 mm ²	W501
K	Instrumentación y control	XLPE	CSPE	General Cable	ANV	3x14AWG	4D3
L	Extensión de termopares	AFUMEX	AFUMEX	Pirelli	CNG	2Px1,5mm ²	

DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA

- [1] ES13/IT-02-0503. “Guía de Vigilancia del Estado de los Cables Eléctricos”.
- [2] ES13/IT-01-0103. “Informe de Evaluación del Estado de la Investigación y Desarrollo Nacional e Internacional”.
- [3] ES13/IT-04-0903. “Procedimiento Técnico para la Selección de Circuitos y Definición de programa de Vigilancia de Cables”.
- [4] ES13/IT-03-0903. “Procedimiento Técnico para la Identificación de Parámetros Ambientales y de Servicio Críticos”.
- [5] ES13/IT-05-0903. “Procedimiento Técnico para la Caracterización Eléctrica de Cables”.
- [6] ES13/IT-06-0903. “Procedimiento Técnico para la Caracterización Mecánica de Cables”.
- [7] IAEA TECDOC-932. “Pilot Study on the Management of Aging of Instrumentation and Control Cables”.
- [8] IAEA TECDOC-1188, Vol. 1 y 2. “Assessment and Management of Aging of Major NPP Components Important to Safety: In-containment I&C Cables”.
- [9] EPRI TR-104075. “Evaluation of Cable Polymer Aging through Indenter Testing of IN-Plant and Laboratory-Aged Specimens”
- [10] NUREG CR-6384, Vol. 1 y 2. “Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cables”.



Aplicación de Técnicas Avanzadas de Diagnosis de Cables Eléctricos en Centrales Nucleares.

Autor: Tomás López Vergara



IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE TÉCNICAS DE DIAGNOSIS DE CABLES

- * Elevado volumen de cables en las centrales, muchos de difícil acceso
- * Aislamiento y cubierta de materiales orgánicos, degradables con el tiempo
- * Críticos para la extensión de vida de las plantas
- * Con la vida actual de las centrales en España, es posible obtener datos específicos de envejecimiento
- * Existe una amplia investigación internacional, pero no pueden obtenerse conclusiones generales sobre el comportamiento de los cables



PROYECTO PCI INICIAL: "SEGUIMIENTO Y VIGILANCIA DEL ENVEJECIMIENTO DE CABLES ELÉCTRICOS DE CENTRALES NUCLEARES". OBJETIVOS:

- * Evaluación del estado del arte
- * Definición de metodologías de diagnosis en cables de centrales Españolas
- * Elaboración de una guía de vigilancia del estado de los cables
- * Desarrollo de procedimientos técnicos de ejecución
- * Puesta a punto y validación de las técnicas de diagnosis



EJECUCIÓN DEL PROYECTO EN DOS FASES:

- * Primera fase: Cuatro primeros objetivos
- * Segunda fase: Quinto objetivo (análisis y aplicación práctica de las técnicas de diagnóstico)
- * Primera fase se adjudicó a Tecnatom y Empresarios Agrupados, desarrollándose entre Noviembre de 2002 y Octubre de 2003



PRODUCTOS DE LA PRIMERA FASE:

- * ES13/IT-02-0503. "Guía de Vigilancia del Estado de los Cables Eléctricos"
- * ES13/IT-01-0103. "Informe de Evaluación del Estado de la Investigación y Desarrollo Nacional e Internacional"
- * ES13/IT-04-0903. "Procedimiento Técnico para la Selección de Circuitos y Definición de programa de Vigilancia de Cables"
- * ES13/IT-03-0903. "Procedimiento Técnico para la Identificación de Parámetros Ambientales y de Servicio Críticos"
- * ES13/IT-05-0903. "Procedimiento Técnico para la Caracterización Eléctrica de Cables"
- * ES13/IT-06-0903. "Procedimiento Técnico para la Caracterización Mecánica de Cables"



COMO CONTINUACIÓN DE LA PRIMERA FASE SE INICIÓ EL PRESENTE TRABAJO, FINANCIADO PARCIALMENTE POR CSN Y UNESA, LLEVÁNDOSE A CABO CONJUNTAMENTE POR:

- * TECNATOM
- * CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas)
- * ICMM (Consejo Superior de Investigaciones científicas – Instituto de Materiales de Madrid)
- * EA (Empresarios Agrupados)



OBJETIVOS DEL PROYECTO

- * Puesta a punto y aplicación de técnicas de diagnosis de carácter no destructivo
- * Estudio de aplicabilidad a los tipos de cables de centrales españolas
- * Análisis de tendencias y determinación de correlación con la degradación real de los cables
- * Permitir la implantación de programas de vigilancia de cables en las centrales



TÉCNICAS ESTUDIADAS

- * Técnicas de diagnosis:
 - Módulo "Indenter" (Complementado con ensayo de dureza)
 - Temperatura/tiempo de inducción a la oxidación (OITM/OITP)
 - Análisis Termogravimétrico (TGA)
- * Técnicas de caracterización:
 - Elongación y Carga de rotura (EAB/TS)



METODOLOGÍA DEL PROYECTO

- * Selección de cables nuevos representativos de los existentes en las Centrales
- * Obtención de cables similares envejecidos naturalmente en las centrales
- * Validación de las técnicas de diagnosis (Indenter, OITM/OITP, TGA en cables nuevos
- * Envejecimiento térmico y radiactivo de muestras de cables a distintos escalones de tiempo



METODOLOGÍA DEL PROYECTO (Cont.)

- * Aplicación de técnicas de diagnóstico y de caracterización (EAB/TS) en cables nuevos y envejecidos artificialmente
- * Análisis de correlación de resultados de técnicas de diagnóstico y técnicas de caracterización
- * Aplicación de técnicas de diagnóstico y de caracterización en cable envejecidos naturalmente
- * Evaluación de la aplicación de las técnicas a los cables de las Centrales



SELECCIÓN Y ACOPIO DE CABLES REPRESENTATIVOS

- * Reuniones con las Centrales (Almaraz, Cofrentes, Ascó, Vandellós, Trillo y Santa M^a de Garoña) para elección de cables y obtención de documentación.
- * 22 cables suministrados por las Centrales
- * Se seleccionaron 12 representativos
- * Tipos de cables:
 - Fuerza, baja tensión
 - Control
 - Instrumentación
 - Extensión de termopares



SELECCIÓN Y ACOPIO DE CABLES REPRESENTATIVOS (Cont.)

- * Se excluyó MT, por ser los materiales similares a fuerza BT
- * Fabricantes:
 - Pirelli
 - Fercable
 - General cable
 - Saenger
 - System cable

• IDENTIFICACIÓN CABLE EN EL PROYECTO	• UTILIZACIÓN	• MATERIAL		• FABRICANTE	• CENTRAL DE PROCEDENCIA	• COMPOSICIÓN	• IDENTIFICACIÓN EN LA CENTRAL
		• AISLAMIENTO	• CUBIERTA				
* A	*Fuera, baja tensión	*EPR	*AFUMEX	* Pirelli	* CNC	* 3 x 16 mm ²	* W19
* B	*Fuera, baja tensión	*EPR	*AFUMEX	* Pirelli	* CNA	* 3 x 10 mm ²	* W20
* C	*Fuera, baja tensión	*EPR	*CSPE	* Feracable	* CNT	* 2 x 6 mm ²	* W063
* D	*Fuera, baja tensión	*EPR	*CSPE	* General Cable	* ANV	* 3 x 4 mm ²	* 4E+03
* E	*Fuera, baja tensión	*EPR	*CSPE	* Saenger	* CNG	* 3 x 25 mm ²	
* F	*Fuera, baja tensión	*ETFE	*CSPE (I)	* System Cable	* CNC	* 1 x 16 mm ²	* W217
* G	*Instrumentación y control	*AFUMEX	*AFUMEX	* Pirelli	* CNG	* 5 x 0,75 mm ² + P	
* H	*Instrumentación y control	*EPR	*NEOPRENO	* Pirelli	* ANA	* 2 x 4 mm ²	* IP2
* I	*Instrumentación y control	*ETFE	*AFUMEX	* Pirelli	* CNT	* 2 x 2 x 0,5 mm ²	* W560
* J	*Instrumentación y control	*PVC	*PE	* Pirelli	* CNT	* 4 x 2 x 0,8 mm ²	* W501
* K	*Instrumentación y control	*XLPE	*CSPE	* General Cable	* ANV	* 3 x 14 AWG	* 4D3
* L	*Extensión de termopares	*AFUMEX	*AFUMEX	* Pirelli	* CNG	* 2P x 1,5 mm ²	

* (I) Se observa un único material aislante, no distinguiéndose el aislamiento de la cubierta.

■ AJUSTE DE TÉCNICAS/ENSAYOS EN MUESTRA NO ENVEJECIDAS

- * Ajuste de las principales variables de las técnicas de ensayo
- * Elaboración de procedimientos de ensayo
- * Aplicación de las técnicas de diagnosis a cables sin envejecer
- * Aplicación de ensayos de caracterización (EAB/TS)

■ APLICACIÓN TÉCNICAS DE DIAGNOSIS SOBRE CABLES ENVEJECIDOS ARTIFICIALMENTE

- * Aplicación de técnicas de diagnosis sobre muestras envejecidas artificialmente con distintas secuencias y escalones de envejecimiento
- * Aplicación de ensayos de caracterización (EAB/TS)
- * Análisis de correlación de técnicas de diagnosis con degradación del cable.



- **ENVEJECIMIENTO DE LOS CABLES**
 - * Secuencias:
 - Envejecimiento térmico
 - Envejecimiento por radiación
 - Envejecimiento térmico + radiación
 - * Escalones de envejecimiento:
 - 20 años, 40 años, 60 años



- **ENVEJECIMIENTO DE LOS CABLES (Contin.)**
 - * Envejecimiento térmico:
 - Ecuación de Arrhenius
 - Energía activación del material de aislamiento
 - Temperaturas de servicio
 - * Envejecimiento por radiación:
 - Radiación gamma 60 Mrad (60 años)
 - Tasa de dosis $\leq 0,1$ Mrad/h



- **APLICACIÓN TÉCNICAS DE DIAGNOSIS SOBRE CABLES ENVEJECIDOS NATURALMENTE**
 - * Ensayo sobre cables extraídos de las centrales
 - * Confirmación de correlación de técnicas diagnosis con envejecimiento de cables



■ PRODUCTOS PROYECTO

- * Puesta al día de técnicas avanzadas de diagnosis para centrales españolas
- * Procedimientos de aplicación de técnicas a cada tipo de cable
- * Caracterización de la degradación de los cables en función de su envejecimiento
- * Factores de correlación de resultados de técnicas de diagnosis con estado de los cables



■ PRODUCTOS PROYECTO (Cont.)

- * Evaluación del comportamiento de los cables envejecidos artificialmente frente a los envejecidos naturalmente
- * Obtención de datos para su aplicación a los programas de extensión de vida de las plantas
- * Procedimientos de evaluación del estado de los cables



■ AVANCE DEL PROYECTO

- * Inicio: Diciembre de 2005
- * Plazo de ejecución:
 - Inicialmente 27 meses
 - Incrementado por revisión de energías de activación para envejecimiento térmico (5 meses) y por repetición ensayos de envejecimiento (1 año)



AVANCE DEL PROYECTO (Cont.)

- * Actividades realizadas:
 - Selección y acopio de cables de almacén (6 primeros meses)
 - Ajuste de técnicas y elaboración de procedimientos de identificación, preparación y ensayo de muestras
 - Ensayos sobre muestras no envejecidas:
 - > OITM/OITP
 - > TGA
 - > Módulo Indenter
 - > EAB/TS



AVANCE DEL PROYECTO (Cont.)

- Irradiación de cables a 20, 40 y 60 años equivalentes
- Ensayos sobre muestras irradiadas:
 - > OITM/OITP 20, 40 y 60 años
 - > TGA 20, 40 y 60 años
 - > Módulo Indenter 20, 40 y 60 años
- Ensayos de envejecimiento térmico a 20, 40 y 60 años (dos tipos de cables de fuerza únicamente ensayados hasta 40 años)



AVANCE DEL PROYECTO (Cont.)

- Ensayos sobre cables envejecidos térmicamente::
 - > Cables de I&C: OITM/OITP 20, 40 y 60 años
 - > Cables de I&C: Módulo Indenter 20, 40 y 60 años
- En Octubre 2008 inicio de ensayos de irradiación sobre cables envejecidos térmicamente
- Actualmente se está en fase de suministro de muestras envejecidas naturalmente en las centrales



■ **RESULTADOS**

- * Ensayos OITM: Disminución en general del tiempo de oxidación con irradiación creciente
- * Ensayos dureza e indenter: tendencia general de endurecimiento con envejecimiento por radiación y térmico
- * Pendiente analizar OITM/OITP en cable envejecidos térmicamente con envejecimiento radiación + térmico

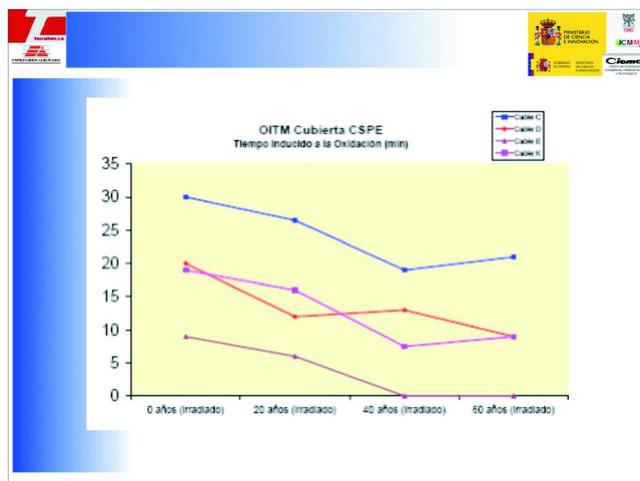
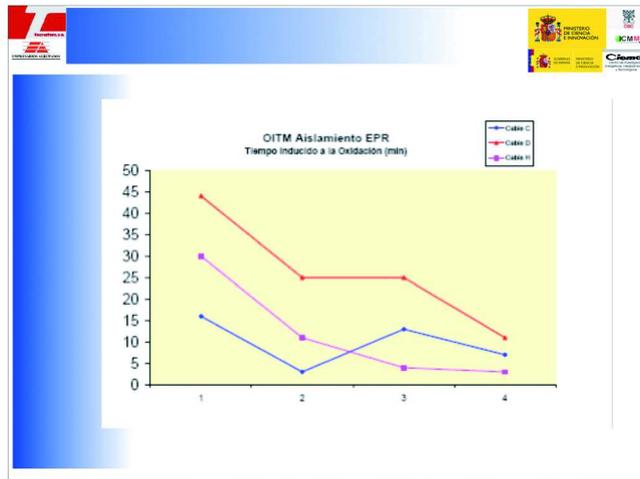
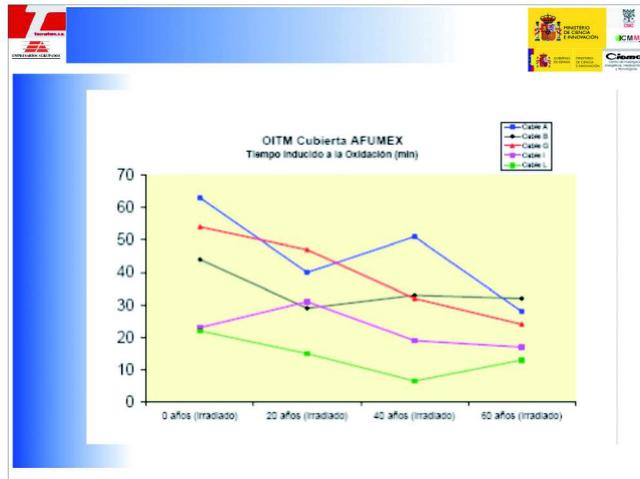


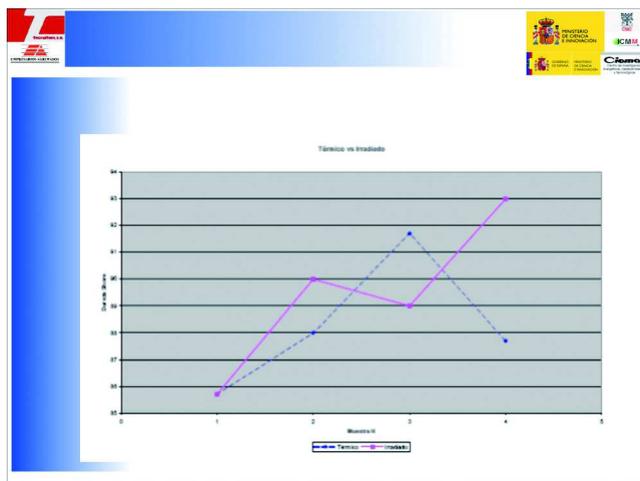
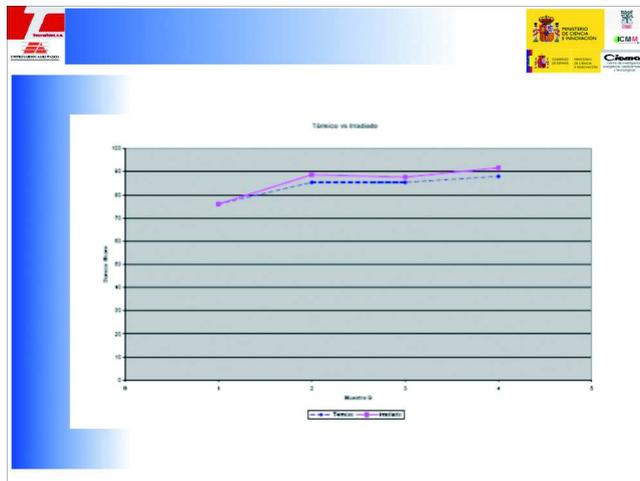
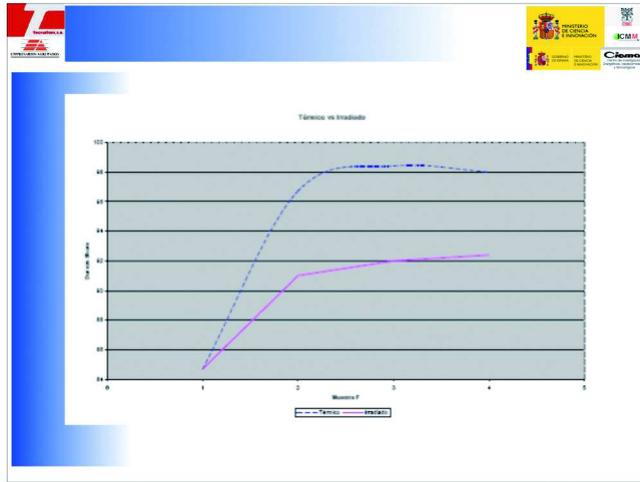
■ **CONCLUSIONES**

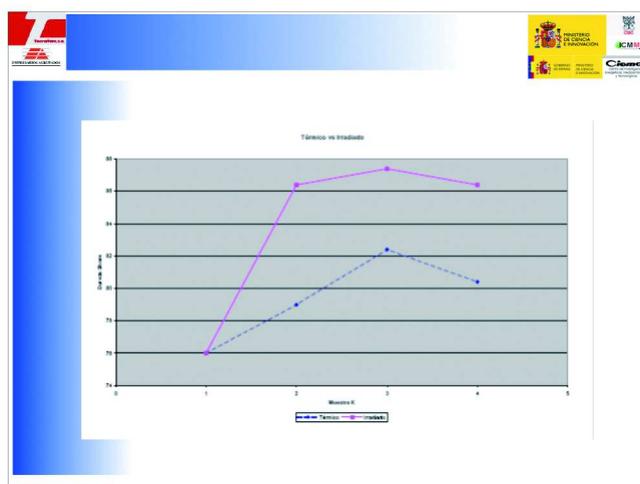
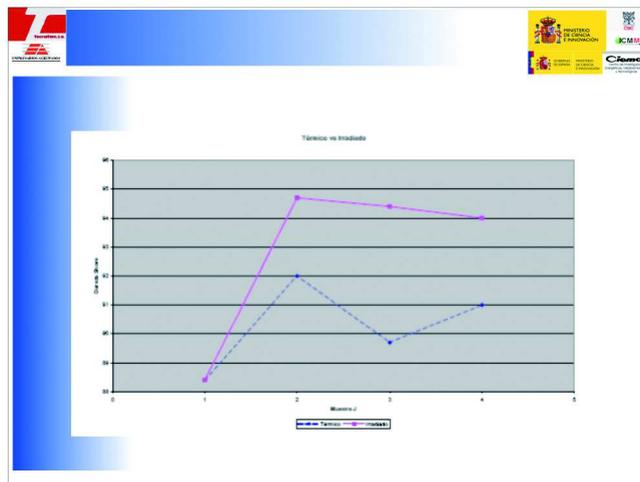
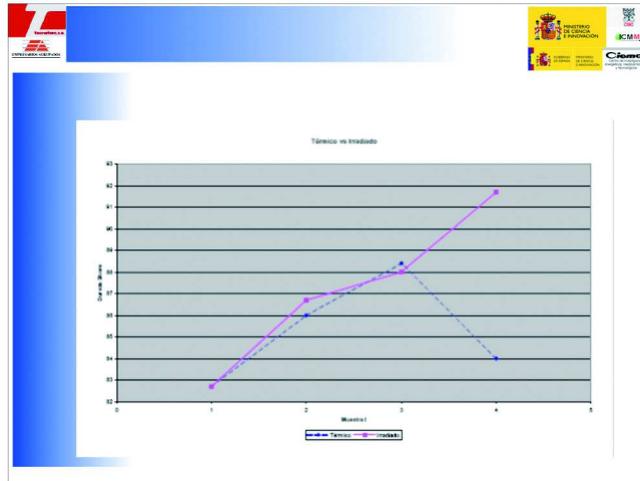
- * Hasta ahora se han observado resultados que permiten establecer tendencias generales de las técnicas analizadas con la degradación de los cables
- * Pendiente de finalizar los ensayos y analizar comportamientos específicos de materiales

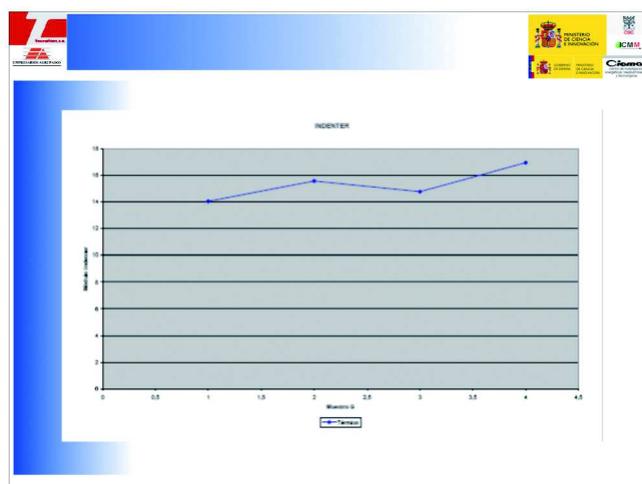
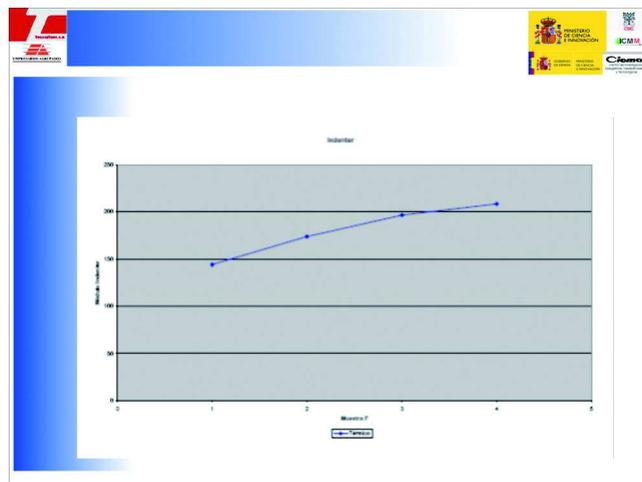
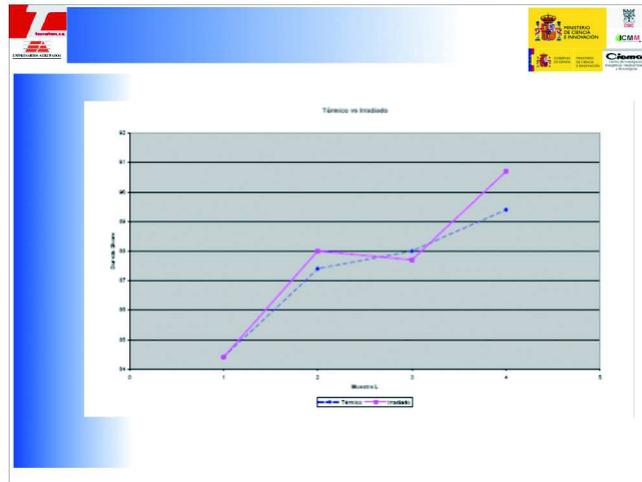


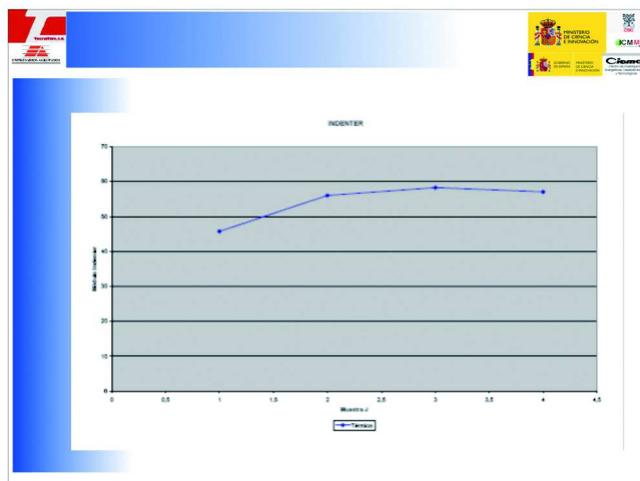
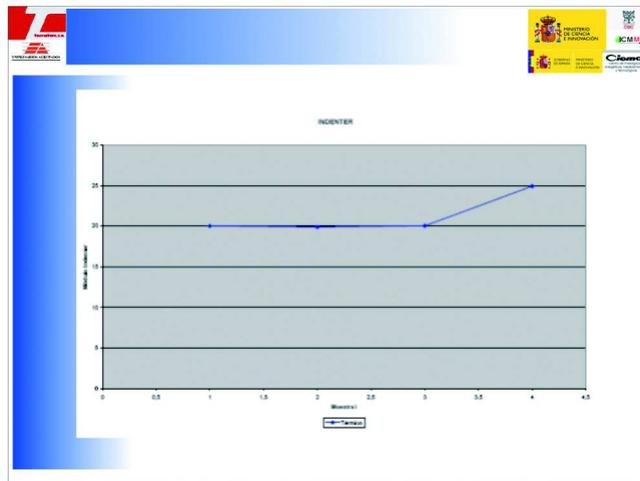
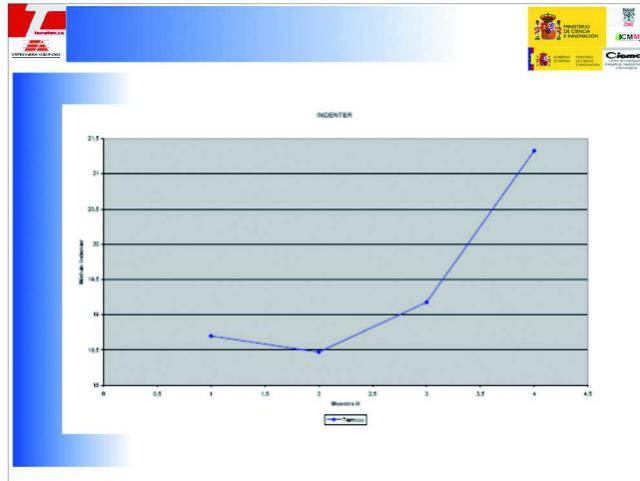
ANEXOS

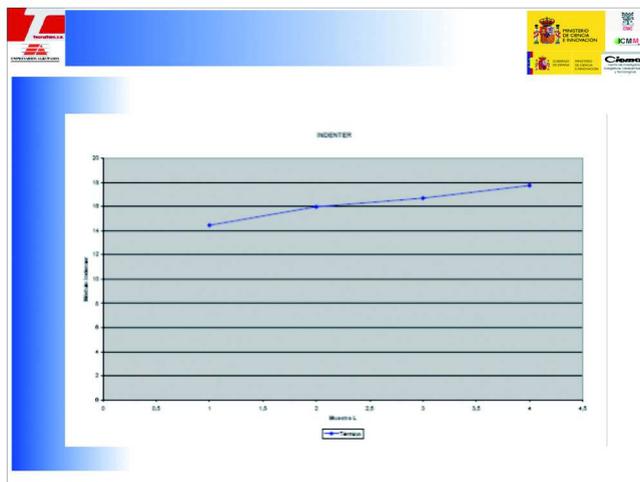
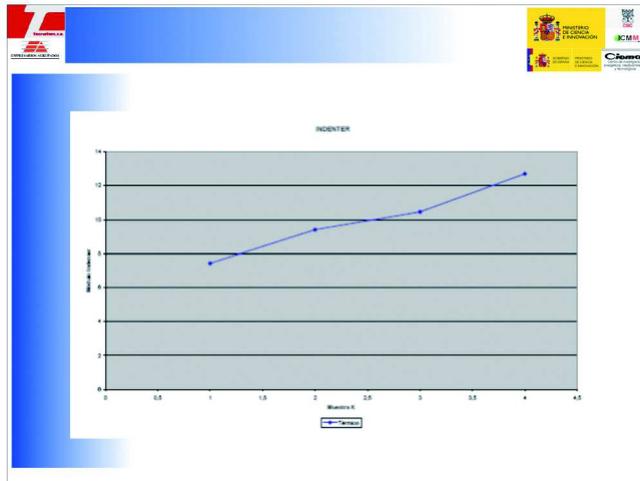


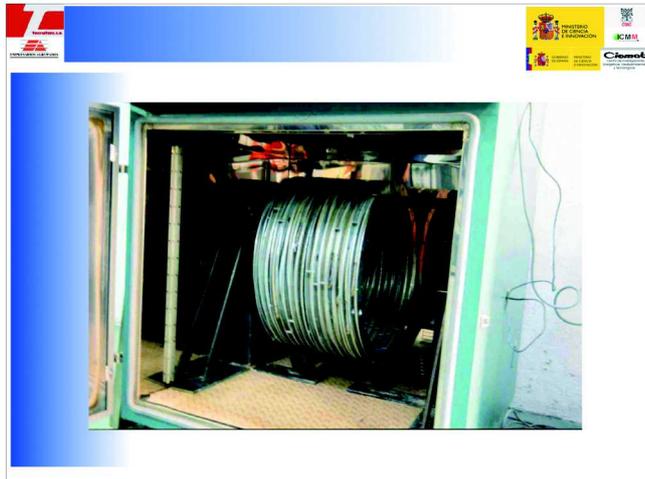
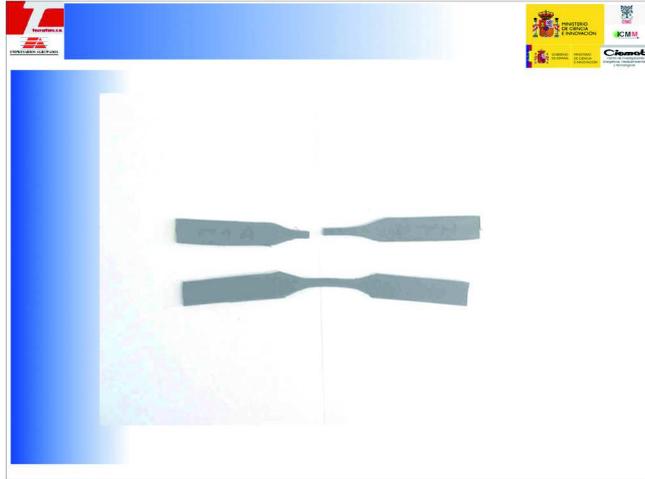


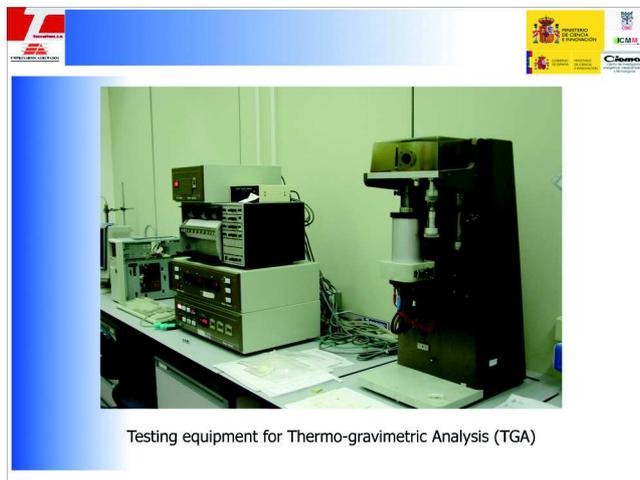
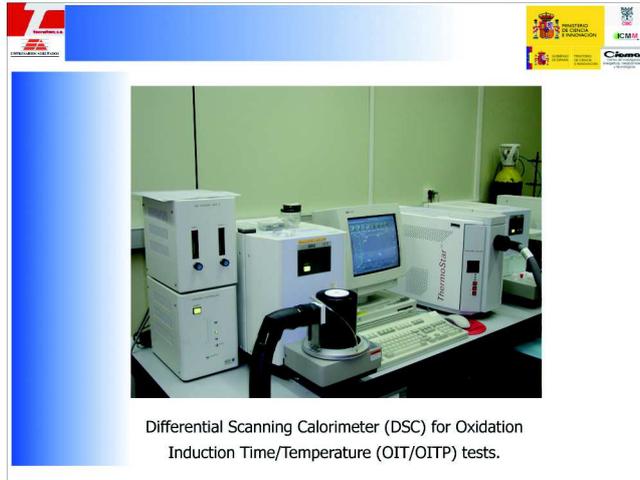














Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP)

M^a Consuelo Alejano Monge

Área de Ingeniería del Núcleo del CSN

Índice

1. Introducción
2. Objetivos del proyecto
3. Actividades del proyecto
4. Estructuración del proyecto: tareas
5. Resultados seleccionados
6. Extensión del proyecto: SCIP II
7. Diapositivas

1. INTRODUCCIÓN

SCIP es un proyecto de ámbito internacional sobre comportamiento de combustible promovido por la Agencia de la Energía Nuclear de la OECD, con una duración de cinco años y origen de tiempo en junio de 2004 y cuya realización se lleva a cabo en el laboratorio de Studsvik en Suecia.

Los nuevos diseños de combustible y materiales de vaina necesarios para lograr altas potencias específicas de operación y grados de quemado más elevados, requieren ser verificados con respecto a aspectos relevantes de seguridad y operación, entre los que destacan resistencia a la corrosión y a la interacción mecánica pastilla-vaina (PCMI) bajo condiciones de operación normal y transitorios previstos.

Para alcanzar este objetivo, es necesario un conocimiento profundo de los principales aspectos que gobiernan los mecanismos de fallo de la vaina. Este proyecto recoge esta necesidad, siendo su objetivo principal obtener un mejor entendimiento de los mecanismos de fallo dominantes de las vainas de combustible de reactores de agua ligera (LWR) bajo cargas de interacción mecánica pastilla-vaina (PCMI) representativas de condiciones de operación normal o transitorios esperados.

Los participantes en el proyecto representan a once países de elevado nivel tecnológico en este campo: Alemania (Areva-NP, GRS), Corea (KAERI, KINS, KNFC), España (CSN, Enusa), Estados Unidos (EPRI, GNF-A, NRC, Westinghouse), Finlandia (Fortum, TVO, VTT), Francia (Areva-NP, CEA, EDF, IRSN), Japón (CRIEPI, GNF-J, JNES, MHI, NFI), Reino Unido (HSE-NII), República Checa (REZ), Suecia (OKG, SKI, Vattenfall, Westinghouse Sweden) y Suiza (KKL y PSI), con una amplia representación que incluye la presencia tanto de compañías suministradoras, como de empresas de producción, organismos reguladores y centros de investigación.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal e inmediato de este proyecto es el estudio de los mecanismos de fallo dominantes que pueden conducir al fallo de las vainas de combustible LWR bajo cargas de interacción mecánica pastilla-vaina (PCMI) propias de condiciones de operación normal o transitorios esperados. El objetivo último sería el soporte de límites operacionales que permitieran la eliminación de este tipo de fallos.

Con este objetivo principal, el proyecto SCIP se centra en el estudio de los siguientes mecanismos de fallo de la vaina de combustible, que se estudiarán dentro de las correspondientes tareas del proyecto:

- PCMI como fuerza impulsora de todos los mecanismos de fallo de la vaina estudiados.

- Interacción pastilla-vaina (PCI): rotura por corrosión bajo tensión (Stress Corrosion Cracking SCC) iniciada en la superficie interior de la vaina bajo el efecto combinado de las cargas mecánicas y de la química del entorno generadas por un aumento de temperatura de pastilla tras un aumento de potencia.
- Fallos inducidos por la presencia de hidrógeno:
 - Fragilización por hidruros (Hydride Embrittlement HE): fractura, independiente del tiempo, de los hidruros formados en la superficie exterior de la vaina.
 - Rotura retardada por hidruros (Delayed Hydride Cracking DHC): iniciación de la rotura en una zona hidrurada y propagación dependiente del tiempo a través de la fractura de los hidruros que pueden formarse en el frente de la grieta en las condiciones adecuadas de tensión y temperatura.

Para el estudio de cada uno de estos mecanismos de fallo, el proyecto aplica las siguientes fases de investigación:

- Estudios básicos: Identificación de los procesos físicos y fenómenos clave involucrados en cada mecanismo de fallo.
- Estudios de efectos separados: cuantificación de los parámetros clave para la generación del fallo y de su influencia a través de este tipo de estudios.
- Desarrollo teórico: modelado de los mecanismos de fallo.
- Desarrollo experimental: mejora y refinamiento de técnicas de ensayo apropiadas para la verificación experimental del comportamiento del combustible con respecto a estos mecanismos de fallo.
- Gestión del conocimiento: soporte de la información existente en este campo y transferencia del conocimiento mediante seminarios y talleres.

El proyecto tiene además los siguientes objetivos generales:

- Mejorar el conocimiento general de la integridad de la vaina de alto quemado.
- Estudiar la integridad de la vaina de combustible tanto BWR como PWR/VVER.
- Complementar dos grandes proyectos internacionales (CABRI y ALPS), centrados en el comportamiento del combustible en accidentes base de diseño (LOCA y RIA) en los que algunos mecanismos son similares a los que podrían ocurrir en condiciones de operación normal y transitorios esperados.
- Alcanzar resultados de aplicabilidad general (no restringidos a un único diseño de combustible, especificación de fabricación o condición de operación).

- Conseguir eficiencia experimental mediante la adecuada combinación de técnicas y planteamientos experimentales y teóricos.

Aunque la principal preocupación de este proyecto es la integridad de la vaina LWR durante su operación en el reactor, se tratan también otras cuestiones íntimamente relacionadas y relevantes para reactores de agua en general. Por ejemplo el comportamiento de la vaina de combustible tras su descarga del núcleo y en operaciones de manejo, transporte y almacenamiento tiene algunos puntos en común con el comportamiento de la vaina en el reactor.

3. ACTIVIDADES DEL PROYECTO

El proyecto comprende los siguientes tipos de actividades:

Técnicas experimentales:

- Rampas en reactor: se realizaron diez ensayos en el reactor R2 de Studsvik en la primavera de 2005, antes de su clausura, y en 2008 se realizó uno en Halden con vainas de combustible irradiadas en los siguientes reactores:
 - BWR: cuatro muestras de KKL3 (LK3/liner), una de OKG2 (Zry2-RX), una de Forsmark (Zry2-RX).
 - PWR: dos muestras de Ringahls 4 (M5), dos de North Anna (ZIRLO) y una de Vandellós (ZIRLO).
- Ensayos de caracterización post-irradiación (PIE): se realizan en las celdas calientes del laboratorio.
- Ensayos mecánicos sobre material no irradiado que reproducen el comportamiento de combustible en condiciones de reactor. Se realizan en el laboratorio de metales activos.

Desarrollos teóricos:

Como soporte a las técnicas experimentales y a la interpretación de resultados obtenidos: se simulan los mecanismos de fractura involucrados en el estudio y se generan modelos para introducir en los códigos de combustible, garantizando la calidad de la documentación que se obtiene y su utilidad práctica.

Si bien se trata de un proyecto de marcado carácter experimental, la adecuada utilización de desarrollos teóricos ayuda a conseguir la eficiencia experimental así como a elaborar productos finales, modelos validados experimentalmente, de alto valor añadido para los participantes.

4. ESTRUCTURACIÓN DEL PROYECTO: TAREAS

El proyecto se estructura en cuatro tareas que corresponden al estudio de cada uno de los mecanismos de fallo estudiados, y que se enumeran en el anterior apar-

tado de objetivos. Se describe a continuación cada una de estas tareas y los principales trabajos desarrollados dentro de las mismas, ilustrado por una tabla en la que se desglosan las subtareas desarrolladas y se incluye su evolución en el tiempo:

TAREA 0 (PCMI): Estudio de la interacción mecánica pastilla-vaina, fuerza conductora de todos los mecanismos analizados.

- Se han realizado cinco rampas de potencia dentro de esta tarea, que han permitido la determinación del comportamiento de tensión/deformación de la vaina durante transitorios de potencia en función del quemado y del tiempo para diferentes tipos de vaina, todas ellas con pastillas de óxido de uranio.

Task 0

Subtasks		1	2	3	4	5
0:1-B	Scoping ramp tests (5)+PIE					
0:2-D	PCMI in earlier ramps	Seminar				
0:3-B	Clad relaxation tests					
0:4-C	Modelling of PCMI (3:9-A)					
0:5-B	FGR, Neutronradiography					
0:6-B	Ceramography	on hold				
0:7-B	Ramp of extra KKL rod					
0:8-B	PIE of extra KKL rod					

TAREA 1 (PCI): Estudio de la interacción pastilla-vaina, que genera la rotura por corrosión bajo tensión (Stress Corrosion Cracking, SCC) iniciada en la superficie interior de la vaina bajo el efecto combinado de las sollicitaciones mecánicas y de la química del entorno propias de un incremento en la temperatura de pastilla tras un aumento de potencia.

- Identificación y cuantificación de los parámetros clave (tasa de tensión/deformación, concentración de yodo, presencia de oxígeno, propiedades del material de vaina) para que se produzca SCC.
- Determinación de los parámetros de carga y química del entorno responsables del fallo PCI/SCC por yodo y cuantificación de los mismos.
- Desarrollo de una técnica experimental adecuada para la simulación mecánica del fallo por PCI.

Task 1 Overview

		Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
	1.1-D Iodine SCC, earlier tests		Workshop				
	1.2-C I-SCC test technique						
	1.3-D PCI int./propag. review			on hold			
	1.4-B Studies on int./propag.			on hold			
⇒	1.5-B Parameter study of I-SCC						
⇒	1.6-C In-pile vs out-of-pile tests						
	1.7-B Extension of 1.4-B			on hold			
⇒	1.8-A Extension of 1.5-A						
⇒	1.9-C Inter-laboratory comparison					??	
	1.10-D PCI/I-SCC in-depth workshop						Workshop

TAREA 2 (HE): Estudio de la fragilización producida por hidruros que provoca la fractura instantánea por rotura de los hidruros existentes en la superficie exterior de la vaina.

- Identificación de los parámetros clave para que se produzca el fallo por este mecanismo en vainas BWR y PWR: se estudia el efecto combinado de concentraciones medias y locales de hidrógeno, así como la orientación y morfología de los hidruros bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.
- Determinación de la dependencia de la fractura con estos parámetros.
- Establecimiento de técnicas experimentales adecuadas para la determinación de criterios que permitan evitar este fallo.

Task 2

Subtasks	1	2	3	4	5
⇒ 2:1-B Parametric study of crack initiation in hydride rim					
2:2-D H-embrittlement, earlier experiments/state of art	Seminar				
⇒ 2:3-A Modelling of critical hydride parameters					
2:4-C Development of critical hydride morphology methods					
2:5-B Ductile-brittle transition					
⇒ 2:6-B Par. study of crack initiation in rad. oriented hydrides					
2:7-A Hydride re-orientation in irradiated tubing					
⇒ 2:8-A Basic H-embrittlement studies					
2:9-B Ramp tests					
2:10-D H-embrittlement/in-depth workshop					Workshop

TAREA 3 (DHC): Estudio de la rotura retardada por hidruros que provoca la iniciación de la grieta en una zona hidrurada y la posterior propagación de la misma dependiente del tiempo a través de la fractura de los hidruros que precipitan en el frente de la grieta.

- Determinación de los márgenes de fallo primario de la vaina por DHC bajo cargas PCMI en combustible intacto: se han realizado ensayos de tensión en anillo aplicando tensiones en escalón y dando tiempo a la difusión del H en el frente de grieta.
- Establecimiento de criterios para evitar la propagación axial de las grietas a través de la pared (fallo secundario): ensayos a diferentes temperaturas y concentraciones de H.
- Un objetivo adicional es el estudio de aspectos de este mecanismo de fallo que tienen relevancia para temas de la fase final del ciclo del combustible tras su descarga del reactor (manejo, transporte y almacenamiento en seco).

Task 3

Subtasks:		1	2	3	4	5
⇒	3:1-B Parametric study of crack propagation					
⇒	3:2-A Modelling of DHC in cladding axial/radial direction					
	3:3-D DHC: earlier tests	workshop				
⇒	3:4-A Basic study: microscopy					
⇒	3:5-C Demonstration of radial direction DHC technique					
⇒	3:6-D DHC: CANDU experience					
⇒	3:7-A Basic studies: irradiation effects on hydride dissolution and H diffusion					
⇒	3:8-B Study of DHC in radial direction					
	3:9-A Alt. test technique (D.4-C)	on hold				
	3:10-B Ramp tests (2-5)					
⇒	3:11-D DHC: in-depth workshop					workshop

5. RESULTADOS SELECCIONADOS

TAREA 0 (PCMI): resultados seleccionados

- BWR (KKL-1, KKL-2, KKL-4, O2): En el caso de quemados altos, se observa una fuerte dependencia de la deformación de la vaina y la potencia lineal (LHR) aplicada en el ensayo, lo que indica mayor expansión de la pastilla y por tanto tensiones anulares sobre la vaina.
- PWR (M5-H1, M5-H2, Z2, Z3, Z4): únicamente se han ensayado barras de muy alto quemado, observándose un fuerte aumento de la deformación al aumentar el tiempo de permanencia a potencia: rotura de una barra, conclusiones de interés para RIA (control cambios diámetro, hinchamiento pastilla).
- Simulación: se ha realizado un importante trabajo (Studsvik y participantes voluntarios) de modelación del comportamiento de la vaina en rampas de potencia seleccionadas para comprobar los niveles de tensión/deformación durante las mismas y comparar diferentes códigos.
- Existe actualmente un Workshop en marcha para un nuevo benchmark de comparación de códigos (FRAPCON3 v3.3/CIEMAT, ALCYONEv1.1/CEA, STAV7.3/Westinghouse, FALCON/PSI) con nuevos datos.

TAREA 1 (PCI): resultados seleccionados

- Los primeros resultados experimentales utilizando la técnica del mandril mostraron que los fallos pueden simularse para Zry-2 sin liner. Sin embargo hay una elevada sensibilidad a la química de la cámara de ensayo, y los resultados preliminares indicaban que incluso cantidades pequeñas de oxígeno podían inhibir la ISCC y que el ZrI_4 es peor para la ISCC que el propio I_2 . Se han hecho ajustes en el equipo para controlar mejor la química.
- Tras estas modificaciones se realizarán los primeros ensayos en vainas irradiadas. El efecto de la tasa de deformación y la geometría de la pastilla se investigarán en SCIP I. Los estudios paramétricos para vaina irradiada quedan para una extensión del proyecto SCIP.

TAREA 2 (HE): resultados seleccionados

- Se han determinado los parámetros críticos para el fallo por fragilización debido a la presencia de hidruros en el rim:
 - Espesor del rim de hidruros ~ 0.1 mm
 - Concentración de hidrógeno en el rim de hidruros ~ 8000-9000 ppm H
 - Carga ~ 500 Mpa
 - Temperatura crítica para el ZIRLO ≈ 385 °C

- Se está desarrollando un modelo de fallos inducidos por hidrógeno en las vainas.

TAREA 3 (DHC): resultados seleccionados

- Efecto de la temperatura: se ha comprobado el fallo de la vaina por DHC y la propagación del mismo a través de la pared a tensiones inferiores al límite elástico y a temperaturas de 250°C-300°C. Sin embargo a temperaturas elevadas (385°C) no se ha iniciado la rotura, lo que indica la posible existencia de un umbral de temperatura por encima del cual no se inicia DHC, quizás por ello no ha podido demostrarse su existencia en material PWR.
- Efecto de la concentración de H: Se ha demostrado en los ensayos que a bajas concentraciones de H, puede darse DHC por debajo del límite de solubilidad de formación de hidruros, lo que en BWR está alrededor de 10⁰ ppm de H a 300°C.
- Simulación: para temperaturas de operación BWR e inferiores se ha demostrado la posibilidad de coexistencia de diferentes fallos inducidos por H. Se está desarrollando un modelo que permita reproducir la combinación de los mismos.

Como comentario final, y entre los aspectos que caracterizan este proyecto, en su quinto y último año de desarrollo cabe destacar:

- El elevado número de ensayos incluidos en el programa de trabajo
- La disponibilidad de material nuclear adecuado y de las instalaciones de Studsvik, que se han demostrado idóneas y suficientes para la realización del proyecto, lo que ha permitido el desarrollo del programa de proyecto con cierta flexibilidad, realizándose modificaciones de mayor o menor entidad sobre el mismo en función de los resultados tanto experimentales como teóricos que se han ido obteniendo, así como de las dificultades experimentales que se han ido encontrando, siempre en el marco de las decisiones tomadas por los comités de revisión y dirección del mismo, con amplia participación de los signatarios del proyecto.

Entre los resultados ya obtenidos en el proyecto SCIP I se encuentran los siguientes:

- Determinación de la relación deformación/potencia lineal en función del quemado
- Establecimiento de una técnica experimental de PCI/SCC para la simulación de rampas de potencia fuera del reactor.

- Determinación de la dependencia de parámetros de PCI/SCC.
- Determinación de las condiciones de fractura frágil del rim de Hidrógeno.
- Establecimiento de un método de ensayo de DHC fuera del reactor.
- Respuestas a algunas preguntas:
 - ¿Puede ocurrir DHC pasante en PWR a T de operación? NO
 - ¿Puede ocurrir DHC pasante en PWR a T inferiores? SI
 - ¿Puede ocurrir DHC pasante en BWR a T de operación? NO

Y entre los resultados en fase de obtención en el proyecto SCIP I:

- Determinación de la relación tensión/deformación en $f(t)$.
- Obtención de la tensión en anillo () crítica para la iniciación de DHC.
- Desarrollo de un modelo de fallos de la vaina inducidos por H.

En términos generales, los resultados obtenidos hasta ahora, han mejorado nuestro entendimiento del comportamiento de la vaina ante PCMI y de los mecanismos de fallo por este tipo de interacción, especialmente de los fallos inducidos por hidrógeno en vainas de alto quemado:

- demostrando cuáles son los parámetros críticos para cada tipo de vaina y pastilla.
- obteniendo correlaciones analíticas.
- desarrollando y cualificando modelos de fractura que pueden incorporarse en códigos de combustible.

6. EXTENSIÓN DEL PROYECTO: SCIP II

Según puede deducirse de la descripción del proyecto y sus resultados, realizada en anteriores apartados, a pesar de lo dilatado y denso del mismo son muchos los temas que han quedado abiertos, unos no han podido resolverse satisfactoriamente y otros han surgido como consecuencia de las investigaciones realizadas.

En consecuencia, con el objetivo de cerrar estos puntos pendientes y, a la luz de la experiencia y conocimientos adquiridos en la primera fase, otros nuevos de interés mayoritario para los participantes, Studsvik ha propuesto la extensión del proyecto con el objetivo general de eliminar los fallos de la vaina de combustible por PCMI durante operación normal y transitorios esperados, así como durante el manejo final del mismo tras su operación en el reactor y hasta el almacenamiento definitivo.

Se trata de un objetivo un escalón más ambicioso que la fase primera en la que se pretendía estudiar estos fallos, en esta se pretende eliminarlos lo que im-

plica un profundo conocimiento de los mismos. Dados los buenos resultados obtenidos en SCIP I el planteamiento realizado es muy similar:

- Combinación de técnicas experimentales y teóricas.
- Utilización de las técnicas de ensayo, correlaciones analíticas y modelos desarrollados en SCIP I.
- Studsvik se focalizará en trabajos experimentales que:
 - Simulen el fallo de la vaina en condiciones de reactor.
 - Proporcionen datos para los códigos de combustible de los participantes.
- Los participantes realizarán la modelación del comportamiento ante PCMI para relacionar la historia de tensión y deformación de las rampas realizadas con los resultados de los ensayos mecánicos del material.

La estructuración en tareas planteada por Studsvik de esta segunda fase es también muy similar a la de la primera fase, aunque con nuevos objetivos específicos:

- Tarea 1 (PCMI): separación del efecto de la pastilla y la vaina en fallos por PCMI.
- Tarea 2 (PCI): papel de los diferentes productos de fisión en la iniciación y propagación de este tipo de fallos: efecto del quemado, combinación PCI e H.
- Tarea 3 (Fallos inducidos por H): vainas avanzadas con baja CH y corrosión, peores condiciones para BWR de alto BU y baja CH, estudio del efecto del H en disolución sólida sobre creep y crecimiento de barra.

Dentro de estas tareas son de destacar los siguientes objetivos específicos:

- Comportamiento de pastillas avanzadas ante PCMI.
- Separación del papel de pastilla y vaina en PCMI.
- Identificación de las peores condiciones que conducen a fallos por PCI (missing pellet).
- Mejorar el conocimiento del papel de diferentes productos fisión en PCI.
- Estudiar el efecto del quemado en PCI.
- Simular fallos concurrentes por PCI e inducidos por hidrógeno.
- Fallos inducidos por H en materiales de vaina avanzados con bajos contenidos de H y niveles de corrosión reducidos.
- Identificar las peores condiciones para fallos inducidos por Hidrógeno en material de vaina BWR de alto quemado y con baja concentración de Hidrógeno..
- Estudiar el efecto del Hidrógeno en solución sólida sobre la deformación, creep y crecimiento de barra.

Jornada de I+D en SN y PR
27 de noviembre de 2008

PROYECTO SCIP
"Studs vik Cladding Integrity Project"

Consuelo Alejano
INNU/STN

Contenido

1. Antecedentes y objetivo del proyecto
2. Técnicas y mecanismos de fallo analizados
3. Estructura del proyecto: tareas
4. Resumen de los principales resultados
5. Extensión del proyecto: SCIP II

2

1. Antecedentes y objetivo del proyecto(1)

Fallos de combustible: clasificación, mecanismos, eliminación

Failure Cause	PWRs (%)	BWRs (%)
DF	~5	~36
GF	~52	~0
PCI/Duty	~0	~18
Mfg	~0	~2
AccCorr	~0	~3
Unk	~2	~8
Nex	~12	~15
Est	~32	~18

DF = debris fretting; GF = grid-to-rod fretting;
 PCI/Duty = duty-related; Mfg = manufacturing-related;
 AccCorr = accelerated corrosion; Unk = examined indeterminate; Nex = not examined;
 Est = estimated based on coolant activity

3

CSN

1. Antecedentes y objetivo del proyecto(2)

- **Antecedentes:**
 Proyecto OECD-NEA de marcado carácter experimental dedicado a la investigación de comportamiento de combustible que se desarrolla en el laboratorio sueco de Studsvik, con una duración de 5 años y origen de tiempos en junio 2004.



4

CSN

1. Antecedentes y objetivo del proyecto(3)

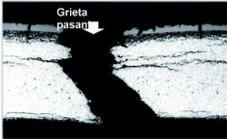
- **Participantes**
 Alemania: Areva-NP, GRS GmbH
 Corea: KAERI, KINS, KNFC
 España: CSN, Enusa
 Estados Unidos: EPRI, GNF-A, NRC, Westinghouse
 Finlandia: Fortum, TVO, VTT
 Francia: Areva-NP, CEA, EDF, IRSN
 Japón: CRIEPI, GNF-J, JNES, MHI, NFI
 Reino Unido: HSE-NII
 República Checa: REZ
 Suecia: OKG, SKI, Vattenfall, Westinghouse Sweden
 Suiza: KKL y PSI

5

CSN

1. Antecedentes y objetivo del proyecto(4)

- **Objetivo principal:**
 - Estudio de los mecanismos de fallo dominantes que pueden conducir al fallo de las vainas de combustible LWR bajo cargas de interacción mecánica pastilla-vaina (PCMI) propias de condiciones de operación normal o transitorios esperables, con objeto de soportar el desarrollo de límites operacionales y la eliminación de este tipo de fallos de combustible.



Grieta pasara



Grieta incipiente

6

CSN

1. Antecedentes y objetivo del proyecto⁽⁵⁾

Además son de destacar los siguientes objetivos:

- Estudiar y mejorar el conocimiento general de la integridad de la vaina de combustible LWR en condiciones de alto quemado.
- Alcanzar resultados de aplicabilidad general, no restringidos a un único diseño de combustible, especificación de fabricación o condición de operación, utilizando para ello diversos combustibles.
- Conseguir eficiencia mediante la adecuada combinación de desarrollos teóricos y técnicas experimentales.
- Complementar dos grandes proyectos internacionales (CABRI y ALPS) de comportamiento del combustible en accidentes base de diseño (RIA y LOCA), en los que algunos mecanismos son similares a los que podrían ocurrir en condiciones de operación normal o transitorios esperados.

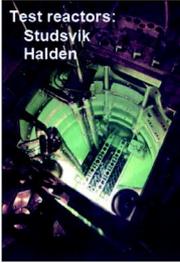
7

CSN

2. Técnicas y mecanismos analizados (1)

Técnicas experimentales: rampas en reactor, caracterización
Desarrollos teóricos: modelación

Test reactors:
Studsjvjk
Haldén



Hot cell laboratory



Active metals laboratory



PIE (post-irradiated exam.) | Mechanical Testing

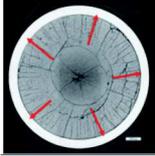
In-pile ramp testing

8

CSN

2. Técnicas y mecanismos analizados (2)

El proyecto se centra en el estudio de los fallos de la vaina de combustible generados como consecuencia de las tensiones o deformaciones resultantes de la interacción mecánica entre la pastilla y la vaina (PCMI) en condiciones de operación normal y transitorios esperados.

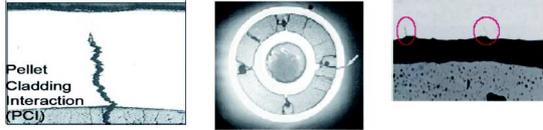


9

CSN

2. Técnicas y mecanismos analizados (3)

I. Rotura desde el interior: fallo por interacción pastilla-vaina: Rotura por corrosión bajo tensión (Stress Corrosion Cracking SCC) iniciada en la superficie interior de la vaina bajo el efecto combinado de las sollicitaciones mecánicas y la química del entorno propias de un incremento en la temperatura de pastilla tras un aumento de potencia.



Pellet Cladding Interaction (PCI)

10

CSN

2. Técnicas y mecanismos analizados (4)

II. Rotura desde el exterior: fallos inducidos por la presencia de hidrógeno:

II.1 Fragilización producida por hidruros (Hydride Embrittlement HE): fractura instantánea debida a la rotura de los hidruros existentes.



II.2 Rotura retardada por hidruros (Delayed hydride cracking DHC): iniciación de la grieta por hidruros y propagación dependiente del tiempo a través de la fractura de los hidruros que precipitan en el frente de la grieta.

11

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (1)

Estructuración del proyecto por tareas:

- Tarea 0: Estudio de la interacción mecánica pastilla-vaina (PCMI), fuerza conductora de todos los mecanismos de fallo.
- Tarea 1: Estudio de la interacción pastilla-vaina (PCI)
- Tarea 2: Estudio de la fragilización por hidruros (HE)
- Tarea 3: Estudio de la rotura retardada por hidruros (DHC)

12

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (2)

A su vez, para cada una de estas cuatro tareas, el proyecto SCIP persigue los siguientes objetivos:

- Estudios básicos: **Identificación** de procesos y fenómenos físicos clave involucrados en cada mecanismo de fallo.
- Estudios de efectos separados: **Cuantificación** de parámetros clave y su influencia a través de estudios de efectos separados.
- Desarrollo teórico: **Modelado** de los mecanismos de fallo.
- Desarrollo experimental: mejora y refinamiento de **técnicas de ensayo** apropiadas para la verificación experimental del comportamiento del combustible con respecto a estos mecanismos de fallo.
- Gestión del conocimiento: **Soporte** de la información existente en este campo y transferencia del conocimiento mediante seminarios y talleres.

13

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (3)

Tarea 0 (PCMI): Objetivo y trabajos realizados

- Determinación del comportamiento tensión/deformación de la vaina durante transitorios de potencia en función del quemado y del tiempo para diferentes materiales de vaina, con pastillas de óxido de uranio.
- Se han obtenido diagramas de tensión/deformación experimentalmente mediante ensayos de rampas de potencia en el reactor de Studsvik R2, dos tipos de rampa:
 - cortas con un pulso de 30 s a la máxima potencia
 - en escalón, 1-6 h en cada nivel de potencia.

14

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (4)

SCIP ramps

Rod name	Cladding	Reactor	BU [MWd/kgU]	Ramp type
KKL-1	LK3/Liner	KKL	63	Stair case
KKL-2	LK3/Liner	KKL	65	Short, 30 s
KKL-3	LK3/Liner	KKL	56	Stair case
Studsvik, R2-1	LK3/Liner	KKL	38	Short, 5 s
Spring 2005 R2-2	M5	R4	67	Short, 5 s
	M5	R4	68	Long, 12 h
R-3	Zirlo	NA	76	Short, 5 s
O2	Zry2-RX	OKG 2	55	Short, 30 s
R-2	Zirlo	Vand	70	Long, 2 steps
R-4	Zirlo	NA	75	Long, 2 steps
Halden, 2008	Zry2-RX	Forsmark	46	Stair case, 6 st

15

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (5)

Tarea 0 (PCMI): Estado del proyecto

Subtasks	1	2	3	4	5
0:1-B Scoping ramp tests (5)+PIE					
0:2-D PCMI in earlier ramps	Seminar				
0:3-B Clad relaxation tests					
0:4-C Modelling of PCMI (3:9-A)					
0:5-B FGR,Neutronradiography					
0:6-B Ceramography	on hold				
0:7-B Ramp of extra KKL rod					
0:8-B PIE of extra KKL rod					

16

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (6)

- Tarea 0 (PCMI): resultados seleccionados

Vainas BWR (KKL-1, KKL-2, KKL-4, O2): En el caso de quemados altos, se observa una fuerte dependencia de la deformación de la vaina y la potencia lineal (LHR) aplicada en el ensayo, lo que indica mayor expansión de la pastilla y por tanto tensiones anulares sobre la vaina.



Vainas PWR (M5-H1, M5-H2, Z2, Z3, Z4): únicamente ensayos de barras de muy alto quemado observándose un fuerte aumento de la deformación al aumentar el tiempo de permanencia a potencia: rotura de una barra, conclusiones de interés para RIA (seguimiento de cambios de diámetro, hinchamiento pastilla)

17

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (7)

Tarea 0 (PCMI): resultados seleccionados

- Simulación: se ha realizado un importante trabajo (Studsvik y participantes voluntarios) de modelación del comportamiento de la vaina en rampas seleccionadas para comprobar los niveles de tensión/deformación durante las mismas y comparar diferentes códigos.
- Taller en marcha para un nuevo benchmark de comparación de códigos de comportamiento de combustible (FRAPCON3 v3.3/CIEMAT, ALCYONEv1.1/CEA, STAV7.3/Westinghouse, FALCON/ PSI) con nuevos datos.

18

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (8)

Tarea 1: Objetivos y trabajos desarrollados

- Identificación y cuantificación de los parámetros clave (tasa tensión/deformación, concentración de yodo, presencia de oxígeno, propiedades material vaina) para la Rotura por Corrosión bajo Tensión (SCC).
- Determinación de los parámetros de carga y química del entorno responsables del fallo PCI/SCC por yodo y cuantificación de los mismos.
- Desarrollo de una técnica experimental adecuada para la simulación mecánica de las rampas de potencia sobre el combustible.

19

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (9)

Tarea 1: Objetivos y trabajos desarrollados

- Se ha desarrollado una técnica basada en un equipo tipo mandril que permite estudiar la sensibilidad a SCC inducida por yodo (ISCC): simula la pastilla mediante un material cerámico, introduciéndose el yodo a presión controlada mediante un flujo de argón.

Fuel behaviour at ramp test **Simulation of PCI failure : Mechanical testing**

20

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (10)

- Tarea 1 (PCI): Técnica experimental

Mandrel testing technique

21

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (11)

Tarea 1 (PCI): Estado del proyecto

		Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
1.1-D	Iodine SCC, earlier tests		Workshop				
1.2-C	I-SCC test technique						
1.3-D	PCI init./propag. review				on hold		
1.4-B	Studies on init/propag.				on hold		
→ 1.5-B	Parameter study of I-SCC						
→ 1.6-C	In-pile vs out-of-pile tests						
1.7-B	Extension of 1.4-B				on hold		
→ 1.8-A	Extension of 1.5-A						
→ 1.9-C	Inter-laboratory comparison					??	
1.10-D	PCI-I-SCC In-depth workshop						Workshop

22

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (12)

- Tarea 1 (PCI): resultados
 - Los primeros resultados experimentales utilizando la técnica del mandril mostraron que los fallos pueden simularse para Zry-2 sin liner. Sin embargo hay una elevada sensibilidad a la química de la cámara de ensayo y los resultados preliminares indicaban que incluso cantidades pequeñas de oxígeno podían inhibir la ISCC y que el ZrI_4 es peor para la ISCC que el propio I_2 . Se han hecho ajustes en el equipo para controlar mejor la química.
 - Tras estas modificaciones se realizarán los primeros ensayos en vainas irradiadas. El efecto de la tasa de deformación y la geometría de la pastilla se investigarán en SCIP I. Los estudios paramétricos para vaina irradiada quedan para una extensión de SCIP.

23

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (13)

Tarea 2 (HE): objetivos

- Identificación de los parámetros clave para que se produzca el fallo por este mecanismo de fragilización por hidruros en vainas PWR y BWR: se ha estudiado el efecto combinado de concentraciones medias y locales de hidrógeno así como la orientación y morfología de los hidruros bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.
- Determinación de la dependencia del fallo de la vaina con estos parámetros.
- Establecimiento de técnicas experimentales adecuadas para la determinación de criterios que permitan evitar este fallo.

24

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (14)

Tarea 2 (HE): Estado del proyecto

Subtasks	1	2	3	4	5
2-1-B Parametric study of crack initiation in hydride rim					
2-2-D H-embrittlement: earlier experiments/state of art	Seminar				
2-3-A Modeling of critical hydride parameters					
2-4-C Development of critical hydride morphology methods					
2-5-B Ductile-brittle transition				on hold	
2-6-B Par. study of crack initiation in rad. oriented hydrides					
2-7-A Hydride re-orientation in irradiated tubing					
2-8-A Basic H-embrittlement studies					
2-9-B Ramp tests					
2-10-D H-embrittlement in-depth workshop					Workshop

25

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (15)

- Tarea 2 (HE): resultados
 - Se han determinado los parámetros críticos para el fallo por fragilización debido a la presencia de hidruros en el rim.
 - Espesor del rim de hidruros ~ 0.1 mm
 - Concentración de hidrógeno en el rim de hidruros ~ 8000-9000 ppm H
 - Carga ~ 500 Mpa
 - ZIRLO T ≈ 385 °C
 - Se está desarrollando un modelo de fallos inducidos por hidrógeno en las vainas.

26

CSN

3. Estructura del proyecto: tareas (16)

Tarea 3 (DHC): Objetivos y trabajos desarrollados

- Determinación de los márgenes al fallo primario de la vaina por DHC bajo cargas PCMI en combustible intacto: se han realizado ensayos de tensión en anillo aplicando tensiones en escalón y dando tiempo a la difusión del H en el frente.
- Establecimiento de criterios para evitar la propagación axial de las grietas a través de la pared (fallo secundario): ensayos a diferentes temperaturas y concentraciones de H
- Un objetivo adicional es el estudio de aspectos de este mecanismo de fallo que tienen relevancia para temas de manejo, transporte y almacenamiento en seco del combustible.

27

3. Estructura del proyecto: tareas (17)

Tarea 3 (DHC): Estado del proyecto

Subtasks	1	2	3	4	5
3-1-B Parametric study of crack propagation					
3-2-A Modelling of DHC in cladding axial/radial direction					
3-3-D DHC: earlier tests	workshop				
3-4-A Basic study: microscopy					
3-5-C Demonstration of radial direction DHC technique					
3-6-D DHC: CANDU experience					
3-7-A Basic studies: irradiation effects on hydride dissolution and H diffusion					
3-8-B Study of DHC in radial direction					
3-9-A All test techniques (3-4-C)			on hold		
3-10-B Ramp tests (2-5)					
3-11-D DHC: in-depth workshop				workshop	

28

3. Estructura del proyecto: tareas (18)

- Tarea 3 (DHC): resultados
 - Efecto de la temperatura:** fallo de la vaina por DHC y propagación a través de la pared a tensiones inferiores al límite elástico y a T de 250°C-300°C. A T elevadas (385°C) no se ha iniciado la rotura, lo que indica la posible existencia de un umbral de T por encima del cual no se inicia DHC, quizás por ello no ha podido demostrarse su existencia en material PWR.
 - Efecto de la concentración de H:** En ensayos a bajas CH, puede darse DHC por debajo del límite de solubilidad de formación de hidruros, lo que en BWR está alrededor de 100 ppm de H a 300°C.
 - Simulación:** para T de operación BWR e inferiores se ha demostrado la posibilidad de coexistencia de diferentes fallos inducidos por H. Se está desarrollando un modelo que permita reproducir la combinación de los mismos.

29

4. Principales resultados (1)

- Aspectos relevantes del proyecto en su quinto y último año de desarrollo:
 - Elevado número de ensayos incluidos en el programa de trabajo
 - Disponibilidad de material nuclear adecuado y de las instalaciones de Studsvik que han demostrado ser idóneas y suficientes para la realización del mismo.

lo que ha permitido el desarrollo del programa de proyecto con cierta flexibilidad, realizándose modificaciones de mayor o menor entidad sobre el mismo en función de los resultados tanto experimentales como teóricos que se han ido obteniendo, así como de las dificultades experimentales que se han ido encontrando, siempre en el marco de las decisiones tomadas por los comités de revisión y dirección del mismo, con amplia participación de los signatarios del proyecto.

30



4. Principales resultados (2)

- Resultados ya obtenidos en el proyecto SCIP I:
 - Determinación de la relación deformación/potencia lineal en $f(BU)$
 - Establecimiento de una técnica experimental de PCI/SCC para la simulación de rampas de potencia fuera del reactor.
 - Determinación de la dependencia de parámetros de PCI/SCC
 - Determinación de las condiciones de fractura frágil del rim de H
 - Establecimiento de un método de ensayo de DHC fuera del reactor
 - Respuestas a algunas preguntas:
 - ¿Puede ocurrir DHC pasante en PWR a T de operación? NO
 - ¿Puede ocurrir DHC pasante en PWR a T inferiores? SI
 - ¿Puede ocurrir DHC pasante en BWR a T de operación? NO
- Resultados en fase de obtención en el proyecto SCIP I:
 - Determinación de la relación tensión/deformación en $f(t)$
 - Obtención de la tensión anular (σ) crítica para la iniciación de DHC
 - Desarrollo de un modelo de fallos de la vaina inducidos por H

31



4. Principales resultados (3)

En términos generales, los resultados obtenidos hasta ahora, han mejorado nuestro entendimiento del comportamiento de la vaina ante PCMI y de los mecanismos de fallo por este tipo de interacción, especialmente de los fallos inducidos por hidrógeno en vainas de alto quemado:

- demostrando cuáles son los parámetros críticos para cada tipo de vaina y pastilla.
- obteniendo correlaciones analíticas.
- desarrollando y cualificando modelos de fractura que pueden incorporarse en códigos de combustible.

32



5. Extensión del proyecto: SCIP II (1)

- Objetivo principal:

Eliminación de fallos de la vaina de combustible por PCMI durante operación normal y transitorios esperados, así como durante el manejo final del mismo tras su operación en el reactor y hasta el almacenamiento definitivo.

33

CSN

5. Extensión del proyecto: SCIP II (2)

- Para desarrollar este objetivo se definen las siguientes tareas:
 - Tarea 1 (PCMI): separación del efecto de la pastilla y la vaina en fallos por PCMI.
 - Tarea 2 (PCI): papel de los diferentes productos de fisión en la iniciación y propagación de este tipo de fallos: efecto del quemado, combinación PCI e H.
 - Tarea 3 (Fallos inducidos por H): vainas avanzadas con baja CH y corrosión, peores condiciones para BWR de alto BU y baja CH, estudio del efecto del H en disolución sólida sobre creep y crecimiento de barra.

34



CSN

5. Extensión del proyecto: SCIP II (4)

- Dentro de estas tareas son de destacar los siguientes objetivos específicos:
 - Comportamiento PCMI de pastillas avanzadas
 - Separación papel de pastilla y vaina en PCMI
 - Identificación peores condiciones fallos PCI (missing pellet)
 - Mejorar conocimiento papel diferentes productos fisión en PCI
 - Estudiar efecto del quemado en PCI
 - Simular fallo concurrente PCI e inducido por hidrógeno
 - Fallos inducidos por H en vainas avanzadas con bajos contenidos en H y niveles de corrosión.
 - Identificar las peores condiciones para fallos inducidos por H en BWR de alto quemado y baja concentración de H.
 - Estudiar el efecto del H en solución sólida sobre deformación, creep y crecimiento de barra

36



5. Extensión del proyecto: SCIP II (5)

- El planteamiento es similar al de SCIP I dados los buenos resultados obtenidos:
 - Combinación de técnicas experimentales y teóricas.
 - Se utilizarán las técnicas de ensayo, correlaciones analíticas y modelos desarrollados en SCIP I.
 - Studsvik se focalizará en trabajos experimentales que:
 - Simulen el fallo de la vaina en condiciones de reactor.
 - Proporcionen datos para los códigos de combustible de los participantes
 - Los participantes realizarán la modelación del comportamiento ante PCMI para relacionar la historia de tensión y deformación de las rampas realizadas con los resultados de los ensayos mecánicos del material.

37

**Resultados y beneficios del proyecto
“Aplicaciones informáticas
y radioanalíticas para el control
de la radiactividad ambiental en los
procesos de desmantelamiento”**

Catalina Gascó Leonarte

Vigilancia Radiológica y Radiactividad Ambiental

[CIEMAT]

Índice

1. **Objetivos y logros**
2. **Resultados y beneficios**
3. **Publicaciones**
4. **Diapositivas**

El proyecto denominado "Aplicaciones informáticas y radioanalíticas para el control de la radiactividad ambiental en los procesos de desmantelamiento" se enmarca en el acuerdo CIEMAT-CSN para realizar mejoras en el Laboratorio de Medida de la Radiactividad Ambiental y Vigilancia Radiológica (URAYVR). Este laboratorio consta de varios módulos en los que se desarrollan técnicas analíticas específicas, supervisadas por la Unidad de Calidad: laboratorio de centelleo líquido, laboratorio de emisores alfa, laboratorio de emisores beta, laboratorio de emisores gamma y laboratorio de transuránicos. Dentro de los objetivos de este laboratorio es realizar los análisis correspondientes a los Planes de Vigilancia Radiológica Ambiental del CIEMAT. Estos Planes han sido ampliados recientemente al iniciarse el proceso de desmantelamiento de varias instalaciones radiactivas del propio Centro, por lo que el Laboratorio ha debido adaptarse a las nuevas exigencias.

Este nuevo PVRA mientras se procede al desmantelamiento y desclasificación de instalaciones nucleares, debe informar del análisis cualitativo y cuantitativo de los radionucleidos en los componentes abióticos y bióticos de sus ecosistemas circundantes, para garantizar el cumplimiento de la legislación vigente en materia de Protección Radiológica al Público y los Ecosistemas. En algunos casos se ha hecho necesario readaptar metodología analítica existente y en otros desarrollarla para garantizar que estos objetivos se cumplen.

1. OBJETIVOS Y LOGROS

En esta presentación se describen los resultados obtenidos en cada una de las líneas de trabajo de este proyecto:

- A) Ampliación de la capacidad analítica del laboratorio, desarrollando metodología sensible para la determinación cuantitativa de ^{63}Ni y ^{55}Fe en muestras ambientales
- B) Desarrollo de las capacidades informáticas de la Unidad para una mejor información de los resultados del PVRA durante el desmantelamiento
- C) Mejora de la calidad de los restantes laboratorios para proceder a su acreditación

La parte de desarrollo de metodología analítica demuestra la importancia de la presencia de los cationes mayoritarios en la determinación de estos elementos ^{63}Ni y ^{55}Fe en muestras de ambientales. En este trabajo se han optimizado las condiciones de medida de ambos elementos, seleccionándose el tamaño de la alícuota, determinándose los factores de descontaminación, realizando el cálculo de las eficiencias en diferentes medios, aplicando el tratamiento de espectros y obteniéndose los límites característicos mediante programas informáticos. La comple-

jjidad de su separación radioquímica debido a la presencia de los isótopos estables y emisores beta, y la baja sensibilidad del método instrumental, son algunos de los aspectos destacables del estudio experimental. Uno de los beneficios del desarrollo de este método es que se ha permitido descartar en el proceso de desmantelamiento del CIEMAT la presencia de ^{59}Fe en muestras procedentes del sistema de almacenamientos de líquidos del antiguo reactor del CIEMAT. Las muestras contenían otros isótopos emisores beta en elevada concentración demostrándose la efectividad del proceso de separación.

La parte informática ha consistido en: a) la creación de una base de datos -desarrollada en la Unidad URAyVR en un entorno amigable- para almacenar los resultados analíticos procedentes de los diversos laboratorios (concentración de actividad, incertidumbres asociadas, límites de detección e información secundaria) de los radionucleidos incluidos en el Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental -PVRA- de la fase de desmantelamiento b) implantar un software específico para gestionar dicha base de datos c) el desarrollo de macroinstrucciones en un entorno de hoja de cálculo para introducir reformas en las determinaciones de los límites característicos d) la programación en Visual-Basic para aplicaciones de programas para el tratamiento de los espectros obtenidos en el análisis de ^{59}Fe y ^{63}Ni y e) el tratamiento estadístico de datos de los datos obtenidos en la ampliación del PVRA.

Debido a que el cálculo de la concentración de actividad de las muestras procedentes del PVRA, la estimación de su incertidumbre y la determinación de los límites característicos (Umbral de decisión y límite de detección) están sujetos a numerosas revisiones, es importante que el analista pueda disponer de libertad en el establecimiento de las ecuaciones de cálculo y en la asignación de los parámetros necesarios para el mismo. La filosofía del establecimiento de la operativa de dichos cálculos ha sido la de independizar al analista, de la base de datos, y recopilar la información final obtenida conservándola en la base de datos. Esta filosofía debe cumplir los criterios básicos de un sistema de calidad, debiendo estar normalizada y ser trazable en el caso de que se realice una auditoría de estos resultados. En esta presentación, únicamente se han detallado los aspectos debidos al software específico de gestión así como de la estructura de la base de datos. La parte informática correspondiente a las aplicaciones para el Fe, Ni se ha introducido por coherencia en el apartado de la metodología analítica de ambos elementos. El tratamiento de datos se ha realizado en alguna de las muestras de suelo consiguiéndose estudiar si la variabilidad es debida al muestreo o a las condiciones ambientales. La mejora de los métodos de determinación de Pu y Uranio en aire para lograr mayor sensibilidad analítica ha logrado también sus objetivos que se enmarcan en la mejora de la calidad del laboratorio.

La acreditación es un proceso lento y que arrastra burocracia complementaria. Los laboratorios de Radiactividad Ambiental y Vigilancia Radiológica (RAyVR) tienen como objetivo lograr acreditarse pero además tienen que gestionar más de 10.000 análisis anuales lo que le añade una dificultad extra. Uno de los objetivos de este proyecto era realizar los avances necesarios para obtener los requisitos necesarios para proceder al menos a la acreditación de uno de ellos. Se han realizado avances en la acreditación de los ensayos de determinación de índice alfa y beta total en aguas editando un nuevo Manual de Calidad (RA-MC-GC01. Ed 2 (en vigor 2006) que aplica a todos los laboratorios de la Unidad de RAYVR, y en la que se recogen las observaciones de ENAC en la auditoría realizada al laboratorio de Centelleo Líquido, revisándose para incorporar los comentarios realizados por el CSN tras la inspección que hizo a la Unidad de RAYVR en marzo del 2007. El Cumplimiento de los requisitos de la Norma UNE-ISO/IEC 17025 se ha mejorado en el apartado de: a) Personal y b) Equipos. En relación a la acreditación de determinación de alfa total en aguas, se ha elaborado procedimiento técnico RA/PT-E 01, "Determinación de la Actividad Alfa Total en Aguas por Centelleo Sólido", que está pendiente de revisión y aprobación pero que incluye nuevas hojas de cálculo para la automatización del cálculo de las incertidumbres y patrones. La Participación en ejercicios del OIEA (2007) "pruebas de capacitación" para la medida de radionucleidos como el Po-210 y el Am-241 ha permitido comparar la efectividad y rapidez de varios procedimientos analíticos.

2. RESULTADOS Y BENEFICIOS

En este apartado se expone la divulgación que en los foros científicos nacionales e internacionales se ha realizado de cada una de las partes del proyecto, ordenadas en función de sus tres líneas de desarrollo, subrayándose alguno de los beneficios obtenidos.

A) Capacidades analíticas

El estudio del método de separación de ^{55}Fe y ^{63}Ni se presentó en dos Congresos:

- "Problemas analíticos en la determinación de ^{55}Fe y ^{63}Ni en muestras ambientales. Estudio de interferentes químicos" C. Gascó, P. González, M^a P. Galán, C. Alonso, A. Calderón, D. Sánchez, R. Morante. En : 33 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española . (Segovia) 26-28 septiembre. 2007.
- "The difficulties of measuring ^{55}Fe and ^{63}Ni in Environmental Samples" C. Gascó, N. Navarro, A. Alvarez, M. Heras, A. Suañez. En: 12th

International Congress of the International Radiation Protection Association IRPA 12, 19-24 Octubre, 2008. Buenos Aires, Argentina.

En el primero se analizaron los aspectos relacionados con los interferentes químicos y en el segundo con los interferentes radioquímicos. Además se publicó en forma de report CIEMAT los resultados de este desarrollo.

“Determinación de ^{59}Fe y ^{63}Ni en muestras ambientales. Problemas analíticos. Límites característicos. Cálculo automatizado” C. Gascó, N. Navarro, P. González, M^a C. Heras, M^a P. Galán, C. Alonso, A. Calderón, D. Sánchez, R. Morante, M. Fernández, A. Gajate, A. Alvarez (2008). Report CIEMAT-1143. Ed. CIEMAT. Madrid. Abril 2008. ISSN: 1135-9420.

Las conclusiones más relevantes acerca de esta metodología analítica son:

- a) El método propuesto para el ^{59}Fe y ^{63}Ni permite separar los interferentes químicos en un grado tal que pueden ser alcanzados los objetivos legales de su determinación.
- b) La separación de alguno de los interferentes radioquímicos presentes en las muestras ambientales se ha realizado observándose su eliminación total mediante el método propuesto para el análisis de ^{59}Fe y una eliminación parcial para el caso del ^{63}Ni , pero inferior al 1% de la actividad presente en la muestra.
- c) Se ha calculado la eficiencia de los equipos de medida con patrones certificados de estos elementos, en diversas concentraciones y en el medio de medida de estos isótopos, observándose una eficiencia para la detección de ^{59}Fe del 45% y un 65% para el ^{63}Ni . La aparición de color transcurrido un cierto periodo de tiempo tiene consecuencias en el porcentaje de eficiencia para ambos radionucleidos, pudiéndose llegar a ser indetectables en presencia de cantidades elevadas de Fe estable.
- d) La mejora de los límites característicos de la determinación de ^{59}Fe y ^{63}Ni se realizaría con la obtención de instrumental de bajo fondo.
- e) La normalización de la nomenclatura y el cálculo automatizado permitirán incorporar a la base de datos de los PVRA del CIEMAT estas determinaciones.
- f) Las macro-ordenes desarrolladas en “VisualBasic for applications” permiten la obtención de la concentración de actividad y límites característicos de ambos radionucleidos con el espectro original de la muestra.

Una vez conocido el método de separación se aplicó a otro tipo de muestras para descartar la presencia de estos radionucleidos ^{59}Fe y ^{63}Ni en mezclas complejas. Este ha sido uno de los beneficios principales: adaptar rápidamente este método a todo tipo de matrices. Los resultados se presentaron en el Congreso:

"Separación de mezclas complejas de radionucleidos en procesos de desmantelamiento" L. Yagüe, E. Higuera, C. Gascó, N. Navarro, A. Álvarez. En: 34 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española . Murcia 29-31 octubre 2008.

Otro resultado analítico que se obtuvo dentro de este contexto fue la definición de los problemas encontrados en la determinación secuencial de radionucleidos en aire en los PVRA. Las conclusiones más relevantes se presentaron en el siguiente Congreso:

"Analytical problems in plutonium, americium, uranium and polonium determination in air filters". C. Gascó, M. Heras, M. Sánchez, M. Pozuelo, E. Fernández, J. Meral, M. A. Clavero, J. A. Gracia, P. González. En: International Conference on Environmental Radioactivity: From Measurements and Assessments to Regulation. 23–27 april 2007, Vienna, Austria.

B) Desarrollo Informático

Con el objetivo de dar cumplimiento al Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (BOE, 1999), es necesario el disponer de una base de datos que permita:

- Remitir los resultados mensuales y anuales de los diferentes puntos de muestreo.
- Suministrar la información necesaria para evaluar si un incremento es consecuencia o no de las actividades de desmantelamiento, de forma que se puedan aplicar las acciones correctoras pertinentes.

En el informe técnico presentado al CSN se describe la base de datos que va a almacenar los datos de los diferentes análisis de los que va a constar el PVRA de la fase de desmantelamiento, así como el software específico desarrollado para gestionar dicha base de datos. El producto está implantado ya en la Unidad y lleva funcionando desde 2007, agregándose otros laboratorios a los usuarios permitidos.

Los resultados obtenidos para adaptar el formato empleado por el laboratorio de transuránicos a la base de datos implantada de manera general se han presentado en el Congreso:

"Aplicaciones informáticas para la determinación de radionucleidos emisores alfa en entorno genie® –hojas de cálculo". C. Pérez, C. Gascó. En: 33 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española . (Segovia) 26-28 septiembre. 2007.

Otro de los aspectos informáticos que se pueden explotar es la inclusión de los resultados en programas estadísticos. Los datos del PVRA de tres años en suelos se analizaron estadísticamente y se presentaron en el siguiente Congreso:

"Transuranics and Radionuclides Variability in Soils or Sampling Uncertainties? Studies in an Urban Environment" C. Gascó, M. Heras, M.

Pozuelo, M. Sánchez, A. Quejido, J. Meral, E. Fernández, J.A. Gracia M. A. Clavero. En: TAN07. 3rd International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide elements. Septiembre 23 - 28, 2007. Davos. Suiza.

C) Mejora de la calidad

Uno de los requisitos de la acreditación es la de participación en pruebas de capacitación. Los laboratorios del RAyVR han analizado las muestras procedentes del ejercicio de capacitación de la red ALMERA siendo los resultados a su vez comparados con otros laboratorios del CIEMAT también participantes. Las conclusiones se presentaron en el Congreso:

“CIEMAT results in IAEA proficiency tests in the context of Emergency situations (^{210}Po , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Pb , α -emitters and ^{241}Am) in environmental samples”. Catalina Gascó, Ana Suañez, Eva Fernández, José Meral, José Antonio Trinidad, Nuria Navarro, Alicia Alvarez, Ernesto Higuera. En: 12th International Congress of the International Radiation Protection Association. IRPA 12, 19-24 octubre, 2008. Buenos Aires, Argentina.

Los logros en cada uno de los laboratorios y de manera general pueden ser analizados en la presentación que acompaña a este trabajo y que son:

- Revisión de la Edición 2 del Manual de Calidad para incorporar los comentarios realizados por el CSN tras la inspección que hizo a la Unidad de RAyVR en marzo del 2007.
- Cumplimiento de los requisitos de la Norma UNE-ISO/IEC 17025 en:

Personal:

- Actualización al 2007 de las fichas de personal de todos los trabajadores de la Unidad.
- Realización de los registros de entrenamiento y cualificación para todo el personal de la Unidad.
- Realización del registro de firmas y compromiso de confidencialidad para todo el personal que interviene en los ensayos.
- Todos los laboratorios disponen del plan anual de formación para todo su personal.

Equipos:

- Actualización del listado de equipos y materiales de referencia que intervienen en los ensayos.
- Realización de las fichas de equipos.

Avances en la acreditación de los ensayos de determinación alfa y beta en aguas

- Preparación de patrones de Am-241, donde se calcula la actividad y su incertidumbre.

- Calibración en eficiencia, donde se calcula la eficiencia y su incertidumbre de todos los tubos fotomultiplicadores.
- Datos previos, donde se agrupan los datos de las hojas de cálculo anteriores, la curva de autoabsorción y las medidas de los blancos con sus incertidumbres.
- Muestras, donde se recogen los datos de las muestras medidas y se procede al cálculo de la actividad, incertidumbre y LID de las mismas.

Avances en la acreditación de los ensayos de determinación de radionucleidos emisores alfa por espectrometría alfa.

- Creación de un hoja de cálculo con programación que admita la recogida de datos, tanto del espectro como de la base de datos del laboratorio.
- Creación -mediante programación en "Visual Basic para aplicaciones" – de transferencias de resultados de recuento a las hojas que realizan los cálculos de concentración de actividad.
- Introducción de una hoja de cálculo nueva para realizar los cálculos de las incertidumbres según la guía Europea EURACHEM.
- Implantación los cambios correspondientes en las hojas de cálculo adicionales.
- Estimación de los interferentes que lleva asociado el cálculo de concentraciones de elementos como el americio.
- Participación en ejercicios del OIEA (2007) "pruebas de capacitación" para la medida de radionucleidos como el Po-210 y el Am-241.

Avances en la calidad para nuevas determinaciones.

Se describen los requisitos básicos para la aceptación de un método nuevo en el sistema de calidad

Avances en la implantación de normativa internacional para el cálculo de límites de detección y umbrales de decisión.

Se desarrolla la implantación de estos límites a los resultados de laboratorio.

3. PUBLICACIONES

Los resultados relevantes pueden consultarse en los "Proceedings" de los Congresos y el informe CIEMAT donde se aporta abundante bibliografía sobre métodos de separación.

RESULTADOS Y BENEFICIOS DEL PROYECTO " APLICACIONES INFORMÁTICAS PARA EL CONTROL DE RADIATIVIDAD EN LOS PROCESOS DE DESMANTELAMIENTO"

Departamento de Radiactividad Ambiental y Vigilancia Radiológica
C. Gascó Leonarte

Jornada de I+D en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica (27 de Noviembre de 2008)



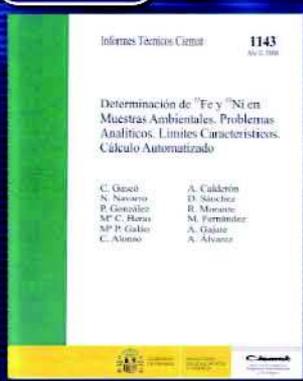
Objetivos

- Ampliación de la capacidad analítica del laboratorio, desarrollando metodología sensible para la determinación cuantitativa de ^{63}Ni y ^{55}Fe en muestras ambientales
C. Gascó, N. Navarro, P. González, M.C. Heras, M.P. Galán, C. Alonso, A. Calderón, D. Sánchez, R. Morante, M. Fernández, A. Gajate, A. Álvarez
- Desarrollo de las capacidades informáticas de la Unidad para una mejor información de los resultados del PVRA durante el desmantelamiento
José Antonio Suárez Navarro, Carlos Pérez, Catalina Gascó
- Mejora de la calidad de los restantes laboratorios para proceder a su acreditación
Mª Antonia Simón, Mª Carmen Heras, Beatriz del Hombrebueno

Capacidad analítica del laboratorio

Resultados

PRESENTACIÓN ORAL:
PROBLEMAS ANALÍTICOS EN LA DETERMINACIÓN DE ^{55}Fe Y ^{63}Ni EN MUESTRAS AMBIENTALES. ESTUDIO DE INTERFERENTES QUÍMICOS.
Congreso: 33ª Reunión Anual de la SNE, Segovia, 26-28 de Septiembre de 2007



Informe Técnico Cisma **1143**
SNE

Determinación de ^{55}Fe y ^{63}Ni en Muestras Ambientales. Problemas Analíticos. Límites Característicos. Cálculo Automatizado

C. Gascó	A. Calderón
N. Navarro	D. Sánchez
P. González	R. Morante
Mª C. Heras	M. Fernández
Mª P. Galán	A. Gajate
C. Alonso	A. Álvarez



Capacidad analítica del laboratorio

Resultados

TITULO DEL POSTER:
SEPARACIÓN DE MEZCLAS COMPLEJAS DE RADIONUCLIDOS EN PROCESOS DE DESMANTELAMIENTO.

Congreso: 34ª Reunión Anual de la SNE. Murcia, 29-31 de Octubre de 2008

The poster details the separation of complex radionuclide mixtures. It includes a flowchart showing the process from sample collection to final analysis. Below the flowchart, there are several gamma spectra plots showing peaks for various radionuclides. A table at the bottom provides data for the identified radionuclides.

Capacidad analítica del laboratorio

Resultados

TITULO DEL POSTER:
THE DIFFICULTIES OF MEASURING ⁶⁰Fe AND ²⁴¹Am IN ENVIRONMENTAL SAMPLES

Congreso: IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina.

The poster discusses the challenges of measuring ⁶⁰Fe and ²⁴¹Am in environmental samples. It features several spectra plots and diagrams that illustrate the complex decay chains and the difficulties of identifying these isotopes in a noisy background. The text explains the specific problems encountered during the measurement process.

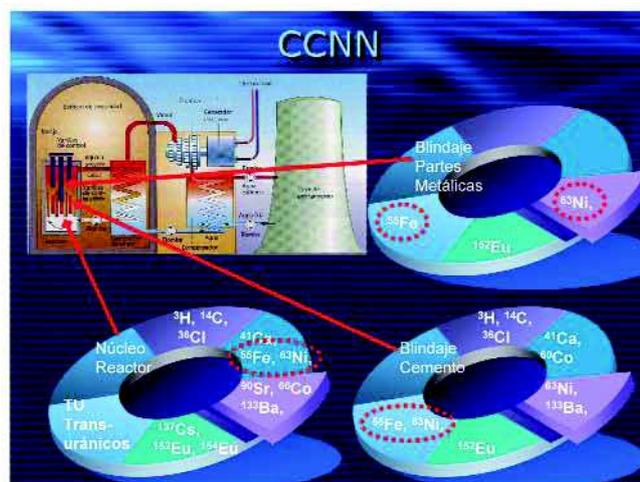
Capacidad analítica del laboratorio

Resultados

TITULO DEL POSTER: ANALYTICAL PROBLEMS IN PLUTONIUM, AMERICIUM, URANIUM AND POLONIUM DETERMINATION IN AIR FILTERS.

Congreso: Internacional Conference on Environmental Radioactivity. 23-27 de Abril de 2007, Viena, Austria.

The poster addresses analytical problems in the determination of plutonium, americium, uranium, and polonium in air filters. It includes a photograph of the laboratory equipment used for these measurements. Below the photo, there are several tables containing data, likely representing the results of the analyses and the challenges faced during the process.





- ### Problemas analíticos
1. Extracción completa de ^{55}Fe y ^{63}Ni de la muestra
 2. El uso de portador viene limitado por la presencia de los elementos estables (Fe y Ni) en la muestra original (suelo, aire y agua)
 3. La eliminación de los radionucleidos naturales y artificiales emisores alfa y beta debe ser completa para no interferir en el espectro del ^{55}Fe y ^{63}Ni .
 4. El empleo del centelleador líquido debe ser optimizado para evitar el contenido de compuestos coloreados de Fe y Ni en el proceso final de medida
 5. La eficiencia debe ser calculada con un patrón emisor beta en el mismo medio que la muestra
 6. La determinación de los umbrales de decisión y límites de detección debe contemplar la presencia de los elementos mayoritarios interferentes



Beneficios

Utilización del método ^{55}Fe y ^{63}Ni que se ha aprendido:

La digestión ácida con HNO_3 8 M del Fe y Ni de la muestra quizás es la que extraiga la mayor parte del Fe de la muestra pero limita la cantidad (5 g máximo) para que los interferentes químicos no ocasionen problemas en la medida por Centelleo líquido .Un ataque con ácido más diluido permitiría el uso de hasta 50 gramos de suelo.

Una de las partes más complicadas es la determinación del rendimiento químico del Fe para ser aplicada a los recuentos. La presencia de sílice dificulta estas determinaciones.

En el caso de no disponer Absorción atómica el método alternativo de determinación de Fe por colorimetría ofrece idénticos resultados a los obtenidos por Absorción Atómica.

Existen métodos cuyos niveles de detección son más bajos debido a la técnica de medida pero **las conclusiones de la separación son aplicables** a todos ellos

Se ha empleado el método a mezclas complejas de desmantelamiento. Observándose que el método es capaz de separar ^3H y ^{90}Sr (emisores beta puros) y ^{137}Cs .

La eficiencia del 45% para el ^{55}Fe y ^{63}Ni de un 63% puede ser reducida por la presencia de coloración.

El Ultima-Gold resulta eficaz para ser empleado como líquido Centelleador. Al menos no produce precipitados blancos cuando Se mezcla con el producto obtenido de la separación radioquímica

Los interferentes radioquímicos son eliminados cuantitativamente para el caso del Fe pero se evidencia que en el Ni no ocurre así. De un total de 697 Bq se recuperan al menos 1 Bq.

Se estima al emplear ^{55}Fe para determinar la eficiencia que el umbral de decisión estará entorno al 0,6 Bq/muestra es decir si se emplean 5 gramos 120 Bq/Kg similar al encontrado por cálculo con la ISO-11929

Aplicaciones Informáticas

- Disponer de una base de datos en un entorno amigable para contener todas las muestras de los laboratorios
- Desarrollar macro-órdenes para facilitar que cada laboratorio tenga sus bases de datos que puedan ser conectadas a la base de datos general.
- Crear la filosofía de entornos amigables para la obtención de resultados que puedan ser trazables
- Cómo se gestiona todo esto.

Aplicaciones Informáticas

Resultados

TITULO DEL POSTER:

APLICACIONES INFORMÁTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE RADIONUCLEIDOS EMISORES ALFA EN ENTORNO GENIE® – HOJAS DE CÁLCULO

Congreso: 33ª Reunión Anual de la SNE, Segovia, 26-28 de Septiembre de 2007

Aplicaciones Informáticas

Resultados

TITULO DEL POSTER:

TRANSURANICS AND RADIONUCLIDES VARIABILITY IN SOILS OR SAMPLING UNCERTAINTIES? STUDIES IN AN URBAN ENVIRONMENT

Congreso: 3rd International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide elements, Davos, Switzerland, september 2007

¿Qué es un entorno amigable?

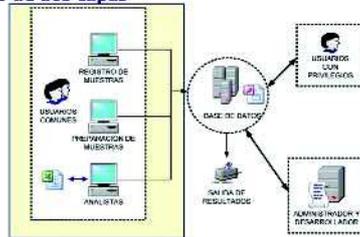
- El ordenador responde a mis necesidades, no yo a las necesidades de un programador desconocido

¿Qué es un entorno no amigable?

- La programación está realizada en un lenguaje en que el usuario solo debe alimentar lo que alguien decidió por él. A veces muy útil a veces no tanto. ¿Cómo gestiono los datos obtenidos de la instrumentación para alimentar una base de datos general? Dependencia para todo.....similar a la droga.

Arquitectura del sistema

Modelo de dos capas

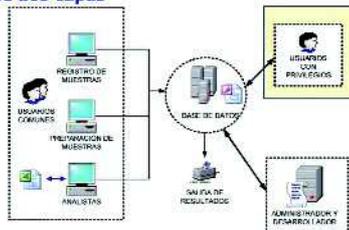


Usuarios comunes

- Registro de muestras y preparación de muestras introducen los datos manualmente.
- Los cálculos (analistas) importan los datos mediante una hoja excel.
- Todos estos usuarios tienen la posibilidad de imprimir los formularios necesarios.

Arquitectura del sistema

Modelo de dos capas



Usuarios con privilegios

- Tienen posibilidad de realizar permisos sobre los usuarios.
- Posibilidad de actualizaciones especiales y borrado de información.

Arquitectura del sistema

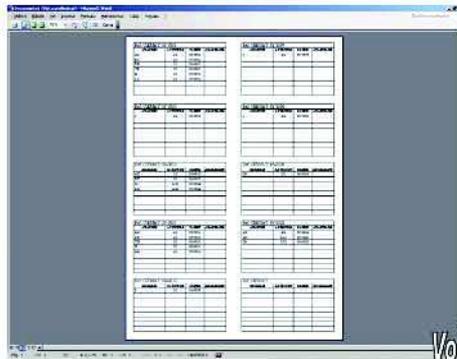
Modelo de dos capas



Administrador y desarrollador

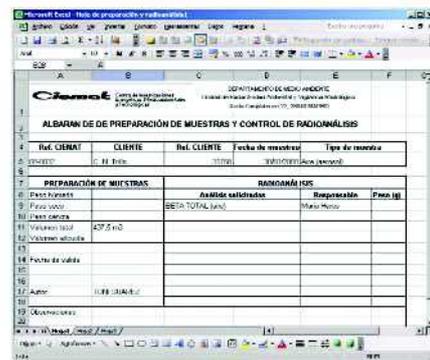
- Realiza modificaciones sobre el diccionario de datos así como el mantenimiento de la base de datos.
- Realiza consultas de acción: actualizaciones, inserciones y borrado de información.
- Desarrolla nuevas pantallas y mantiene las existentes.

Software de gestión



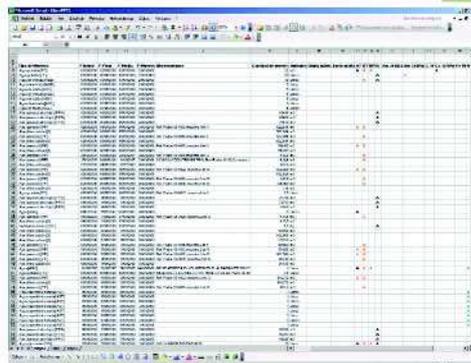
Volver

Software de gestión



Volver

Software de gestión



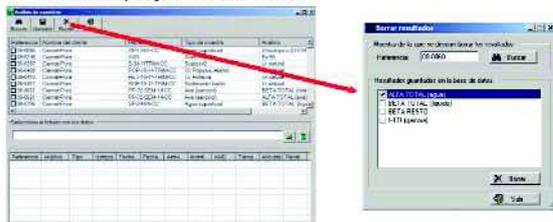
Volver

Software de gestión

● Cálculos

● La pantalla tiene las siguientes características:

- Aparecen los análisis que tiene asignado el usuario protegiendo la privacidad del usuario.
- Se selecciona el fichero de Microsoft EXCEL en el que el usuario ha realizado los cálculos.
- Se importan los datos del análisis, estos datos son los necesarios para dar respuesta a los diferentes informe y ficheros exigidos por el cliente y el Consejo de Seguridad Nuclear.
- No permite edición, siempre que se modifican los datos son reemplazados por los nuevos para evitar incongruencias entre los ficheros de los que se cargan los datos y la base de datos, ya que la ruta del fichero utilizado queda guardada en la base de datos.

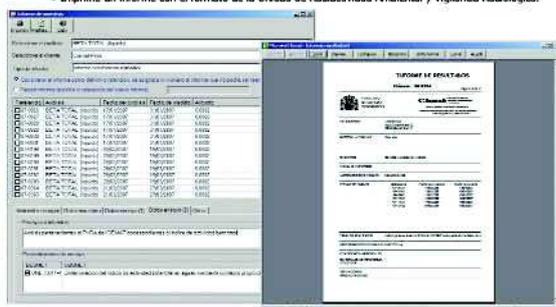


Software de gestión

● Informes para clientes

● La pantalla tiene las siguientes características:

- Aparecen los análisis que tiene asignado el usuario protegiendo la privacidad del usuario.
- Imprime un informe con el formato de la Unidad de Radiactividad Ambiental y Vigilancia Radiológica.

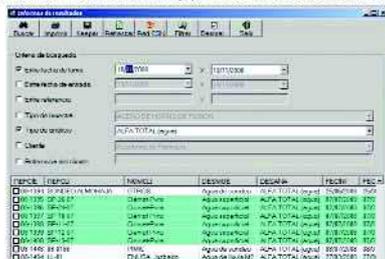


Software de gestión

● Salida de datos para el CSN

● La pantalla tiene las siguientes características:

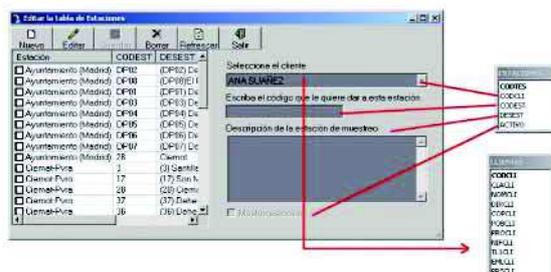
- Búsquedas de datos con unos criterios concretos.
- Impresión de informe con las muestras seleccionadas.
- Generación del fichero Keeper.
- Generación de los ficheros para la Red Española tanto en Ascii como MS Excel.
- Control de la información enviada al consejo pudiéndose modificar el estado de enviada/no enviada.



Software de gestión

Edición de las diferentes tablas

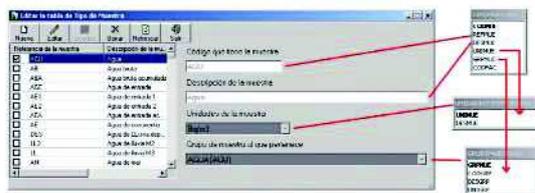
Estaciones de muestreo



Software de gestión

Edición de las diferentes tablas

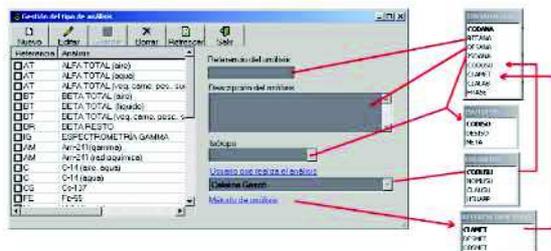
Tabla de tipo de muestras



Software de gestión

Edición de las diferentes tablas

Tabla de Tipo de análisis



Software de gestión

Edición de las diferentes tablas

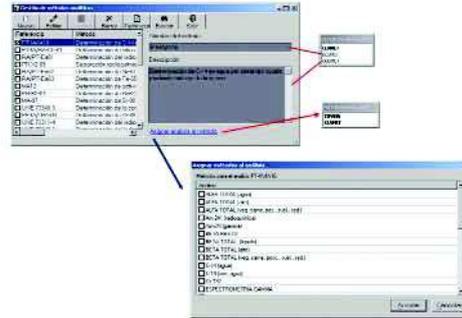
Tabla de Usuarios



Software de gestión

Edición de las diferentes tablas

Tabla de Métodos Analíticos



A	B	C	D	E	F				
1	Cambia espectro					Botones para ejecutar macros			
2	Agrupados (solo para fondo)	Espectros	Selecciones cuenta	Datos muestra	Calcula Actividades (Activar cuando todos los datos de la muestra se hayan introducido)				
3									
5	Registro	Espectro	Muestra(CT)	Fondo (CT)	cps (muestra cpo/fondo)	Tiempo recue			
6	06.001					10			
7	06.002					10			
8	06.003					10			
9	06.004					10			
10	06.005					10			
11	06.006					10			
12	06.007	06J05Fa007T2	195,00	230	0,325	0,383333333			
13	06.008	06J05Fa008T2	314,00	230	0,523333333	0,383333333			
14	06.009	06J05Fa009T2	508,00	230	0,846666667	0,383333333			
15	06.010	06J05Fa010T2	733,00	230	1,221666667	0,383333333			
16	06.011	06J05Fa011T2	215,00	230	0,368333333	0,383333333			
17	06.012	06J05Fa012T2	198,00	230	0,33	0,383333333			
18	06.013	06J05N013T2	234,00	234	0,39	0,39			
19	06.014	06J05N014T2				10			
20	06.015	06J05N015T2	215,00	244	0,343333333	0,39			
21	06.016	06J05N016T2	215,00	234	0,333333333	0,39			
		Hojas con información del laboratorio				10			
		Hoja1	quantiles	LDLID-ISO11929	Eficiencias	ActividadesFeNT3	ActividadesFeNT2	DatosT3	DatosT2

Mejora de la calidad de los restantes laboratorios para proceder a su acreditación

- Avances en la acreditación de los ensayos de determinación de índice alfa y beta total en aguas.
- Avances en la acreditación de los ensayos de determinación de radionucleidos emisores alfa por espectrometría alfa.
- Avances en la calidad para nuevas determinaciones.
- Avances en la implantación de normativa internacional para el cálculo de límites de detección y umbrales de decisión.

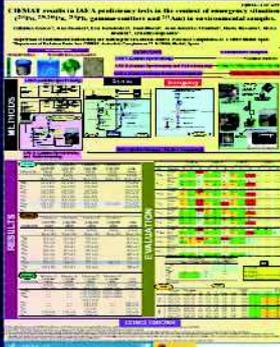
Avances en acreditación

Resultados

TITULO DEL POSTER:

CIEMAT results in IAEA proficiency tests in the context of emergency situations (^{210}Po , $^{238,240}\text{Pu}$, ^{210}Pb , gamma-emitters and ^{241}Am) in environmental samples.

Congreso: IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina.



Avances en la acreditación de los ensayos de determinación de índice alfa y beta total en aguas.

- Edición de un nuevo Manual de Calidad: RA-MC-GC01, Ed 2 (en vigor 2006) que aplica a todos los laboratorios de la Unidad de RAYVR, y en la que se recogen las observaciones de ENAC en la auditoría realizada al laboratorio de Centelleo Líquido.
- Revisión de la Edición 2 del Manual de Calidad para incorporar los comentarios realizados por el CSN tras la inspección que hizo a la Unidad de RAYVR en Marzo del 2007
- Cumplimiento de los requisitos de la Norma UNE-ISO/IEC 17025 en:
 - Personal
 - Equipos
 - Metodología
 - Preparación de patrones de Am-241, donde se calcula la actividad y su incertidumbre.
 - Calibración en eficiencia, donde se calcula la eficiencia y su incertidumbre de todos los tubos fotomultiplicadores.
 - Datos previos, donde se agrupan los datos de las hojas de cálculo anteriores, la curva de autoabsorción y las medidas de los blancos con sus incertidumbres.
 - Muestras, donde se recogen los datos de las muestras medidas y se procede al cálculo de la actividad, incertidumbre y LID de las mismas.

Avances en la acreditación de los ensayos de determinación de radionucleidos emisores alfa por espectrometría alfa.

- Crear un hoja de cálculo con programación que admita la recogida de datos, tanto del espectro como de la base de datos del laboratorio
- Crear mediante programación en "Visual Basic para aplicaciones" transferencias de resultados de recuento a las hojas que realizan los cálculos de concentración de actividad.
 - Introducir una hoja de cálculo nueva para realizar los cálculos de las incertidumbres según la guía Europea EURACHEM.
 - Implantar los cambios correspondientes en las hojas de cálculo adicionales.
 - Estimar los interferentes que lleva asociado el cálculo de concentraciones de elementos como el americio
 - Participación en ejercicios del OIEA (2007) "pruebas de capacitación" para la medida de radionucleidos como el Po-210 y el Am-241.

Avances en la calidad para nuevas determinaciones.

- Escribir el procedimiento técnico
- Conseguir patrones certificados
- Realizar análisis en muestras certificadas con contenidos conocidos del radionucleido a medir
- Participación en "Intercomparaciones" y "Pruebas de Capacitación"
- Verificar la precisión y exactitud de la técnica
- Control de falsos positivos y negativos

Avances en la implantación de normativa internacional para el cálculo de límites de detección y umbrales de decisión

- Se ha introducido una hoja de cálculo que permite la determinación de estos límites según esta normativa
- Se ha estudiado el mejor método posible para ajustar el número de falsos positivos en medidas de baja actividad

Seguridad y Control Regulador de las Instalaciones Radiactivas de Radioterapia mediante la Aplicación de Técnicas de Análisis e Identificación de Riesgos

**Maria Luisa Ramírez Vera, Arturo Pérez Mulas, Marta
Barrientos Montero**

Área de Instalaciones Radiactivas Médicas del CSN

**Grupo de trabajo: Juan José Vilaragut Llanesa, Rubén Ferro Fernández,
Pedro Ortiz López b, María Luisa Ramírezc Arturo Pérez Mulasc, Marta
Barrientos Monteroc, Fernando Somoanod, José Miguel Delgado
Rodrígueze, Susana B. Papadópulosf, Pedro Paulo Pereira Jrg, Ramón
López Moronesh, Manuel Rodríguez Martic Carmen Álvarezc Eduardo
Larrinaga Cortinai, José de Jesús Rivero Olivaj, Jorge Alemañyk**

**^aCentro Nacional de Seguridad Nuclear, Cuba; ^bInternational Atomic Energy
Agency, Viena; ^cConsejo de Seguridad Nuclear, España; ^dELEKTA, España;
^eInstituto Madrileño de Oncología, España; ^fAutoridad Regulatoria Nuclear,
Argentina ^gInstituto Nacional de Câncer, Brasil ^hComisión Nacional de
Seguridad Nuclear y Salvaguardias, México; ⁱInstituto Nacional de
Oncología y Radiobiología, Cuba ^jCUBAENERGÍA, Cuba**

Índice

1. Introducción
2. Objetivos y alcance
3. Metodología
4. Definición del suceso indeseado
5. Resultados y discusión
6. Resumen de recomendaciones
7. Recomendaciones sobre acciones futuras para incrementar el impacto del proyecto
8. Referencias
9. Diapositivas

1. INTRODUCCIÓN

Los informes sobre accidentes en Radioterapia [1, 2, 3, 4, 5] muestran las lecciones aprendidas de los problemas ocurridos a la vez que proponen medidas correctivas para evitar su repetición. Una parte importante de estos accidentes han tenido su origen durante la calibración y puesta en servicio de los equipos de tratamiento, lo que ha permitido que en los servicios de radioterapia ya se disponga de una serie de barreras y medidas de seguridad que disminuyen la probabilidad de que sucesos similares vuelvan a ocurrir. Lamentablemente esto no asegura que no se produzcan nuevos accidentes por otras causas y la práctica lo está demostrando. Se hace necesario, por lo tanto, buscar métodos y técnicas que permitan descubrir las vulnerabilidades existentes en el proceso de tratamiento para adoptar medidas que impidan su progreso hacia posibles accidentes radiológicos.

Una de esas técnicas son los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS), herramienta reconocida en la industria nuclear, aeronáutica y petroquímica, entre otras, por su potencialidad para evaluar la seguridad de forma sistemática, exhaustiva y estructurada combinando en una misma evaluación el impacto que tienen los equipos, el personal y los procedimientos. El APS permite suministrar información no sólo sobre las fortalezas y vulnerabilidades del proceso objeto de estudio, sino también sobre los contribuyentes dominantes en el riesgo y las opciones para reducirlo.

Es por ello que a iniciativa del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores y como parte de sus esfuerzos por promover análisis de seguridad prospectivos en radioterapia se emprendió un proyecto sobre “Seguridad y Control Regulador de las Instalaciones Radiactivas de Radioterapia mediante la aplicación de Técnicas de Identificación y Análisis de Riesgos”. Se aprobaron dos líneas de proyecto paralelas:

- Línea de Proyecto 1: Realización de un Análisis Probabilista de Seguridad (APS) al proceso de tratamiento de radioterapia con un Acelerador Lineal de Electrones de Usos Médicos (LINAC).
- Línea de Proyecto 2: Recomendaciones de seguridad de las instalaciones radiactivas de radioterapia, basadas en la experiencia operacional (lecciones aprendidas) y los resultados de los estudios de APS.

El presente documento resume los principales resultados de la línea de Proyecto 1 (APS-RT-LINAC).

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El Proyecto APS-RT-LINAC tuvo como objetivo principal la evaluación de la seguridad del tratamiento con aceleradores lineales a partir de la aplicación de las

herramientas de Análisis Probabilista de Seguridad (APS) para identificar los errores o fallos que puedan dar lugar a exposiciones accidentales y facilitar la asignación de prioridades en las medidas de control regulador en radioterapia.

El estudio se centró en el análisis del proceso de tratamiento de radioterapia con un acelerador lineal tomando como referencia un modelo de radioterapia definido a partir de las prácticas más comunes en los países participantes en el proyecto o de interés para su análisis en el estudio. Algunas etapas del proceso convencional fueron divididas por necesidades del estudio atendiendo a aspectos tales como las personas que intervienen o los locales donde se ejecutan, entre otros factores que pueden incidir en la tarea humana. No se incluyó el análisis de los procesos externos al tratamiento tales como la aceptación y puesta en servicio de los equipos, las pruebas, calibraciones y mantenimientos asumiendo que los mismos se ejecutan de forma exitosa. Esto se hizo con el objetivo de enfocar los esfuerzos hacia aquellas exposiciones accidentales sobre las cuales se tiene menos información proveniente de las lecciones aprendidas de los accidentes reportados y de las que pudiera existir menos percepción acerca de su potencialidad. En estudios posteriores se podrían aplicar técnicas de APS a éstas y otras áreas que no han sido consideradas en el presente trabajo.

Los modelos tuvieron en cuenta todas las acciones humanas de los diferentes miembros del equipo de radioterapia que interviene en el proceso de tratamiento considerado en el alcance del estudio. Se excluye del análisis aquellas acciones humanas que constituyen decisión médica, es decir, las actuaciones del médico referente a parámetros o conductas a seguir con respecto al tratamiento del paciente, como por ejemplo, la definición de la dosis diaria de tratamiento, las cuales se asumen que son decisiones correctas en función de una intención médica.

3. METODOLOGÍA

Se aplicó la metodología de APS [6] que consiste básicamente en definir los sucesos iniciadores de accidente, es decir, los fallos de equipos o errores humanos que pueden conducir a un suceso indeseado, en este caso, una exposición accidental, y en determinar las secuencias accidentales para cada uno de ellos y en última instancia calcular su frecuencia de ocurrencia.

La definición de los sucesos iniciadores de accidente se realizó utilizando la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA), que es un procedimiento estándar de evaluación sistemática para identificar los fallos potenciales de un equipo o errores humanos asociados a un sistema o proceso, sus causas y analizar los efectos resultantes [7].

Para facilitar el manejo y tratamiento del elevado número de suceso iniciadores que se identificaron a través del FMEA se realizó un agrupamiento de los mismos, de acuerdo a los siguientes criterios:

- Similitud de barreras de seguridad previstas para evitar o mitigar la consecuencia potencial del suceso iniciador.
- Similitud de exposiciones accidentales a que puede conducir el suceso iniciador.
- Posibilidad de modelar las secuencias accidentales a través de un mismo árbol de sucesos.

Cada grupo fue denominado y modelado como un suceso iniciador independiente utilizando el método de árboles de fallos que integra los modos de fallo o errores humanos que constituyen sucesos iniciadores del grupo para no perder ninguna información significativa del FMEA, quedando conformado el listado final de sucesos iniciadores de exposiciones potenciales.

Seguidamente se determinaron las secuencias accidentales que se pueden producir como resultado del fallo o ausencia de barreras de seguridad previstas para hacer frente a los sucesos iniciadores identificados, provocando así exposiciones radiológicas accidentales. Para ello se utilizó el método gráfico de árboles de sucesos.

Concluido el proceso cualitativo anterior se procedió a cuantificar las secuencias accidentales para determinar su frecuencia de ocurrencia, es decir, la frecuencia con que pudiera ocurrir la exposición accidental que la misma provoca. La frecuencia de cada secuencia accidental se calcula como el producto de la frecuencia con que puede ocurrir el suceso iniciador que la genera y la probabilidad de fallo de las barreras que deben intervenir. Si no existen datos para la estimación aritmética directa de esta probabilidad se construyen árboles de fallo, que de forma gráfica, y a través de compuertas lógicas, combinan los fallos de equipos y errores humanos que constituyen causa raíz del fallo de las barreras.

Como resultado de esta cuantificación se obtienen los conjuntos mínimos de fallo, es decir, la combinación mínima posible de fallos de equipos o errores humanos que tiene que ocurrir para se produzca una exposición accidental y se realizan análisis de importancia para determinar los sucesos más significativos desde el punto de vista de la seguridad.

En correspondencia con las recomendaciones y prácticas para estudios de APS que se realizan por primera vez en un sector determinado y dada la baja significación estadística de los datos de fiabilidad de equipos y errores humanos específicos de la práctica de radioterapia, se utilizaron bases de datos genéricas de distintas fuentes ([8], [9], [10] y [11]) para los fallos de equipos. En el caso de las probabilidades de error humano se trabajó con valores de barrido, es decir, valores conservadores que permiten filtrar las acciones humanas más importantes y centrar en ello los esfuerzos de análisis detallados posteriores. Esto permite reali-

zar análisis relativos a partir de los resultados absolutos obtenidos, ya que toda la cuantificación se ha realizado utilizando los mismos tipos de datos.

4. DEFINICIÓN DEL SUCESO INDESEADO

Como suceso indeseado para este estudio se define la exposición radiológica accidental durante el tratamiento con LINAC que responde a los criterios que se indican a continuación. Estos criterios se basan en las experiencias de diferentes estudios y publicaciones [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] y el consenso de los expertos que participaron en el proyecto.

Criterio No. 1: Grupo de personas que recibe la exposición accidental

- Trabajadores: Cualquier exposición accidental de médicos, físico-médicos, dosimetristas, técnicos radioterapeutas, enfermeras y otro personal paramédico del servicio de radioterapia. No incluye la exposición accidental del personal durante operaciones de instalación, reparación, mantenimiento del LINAC.
- Miembros del público: Considera cualquier exposición accidental de miembros del público. Entre los miembros del público se incluyen acompañantes de pacientes, personal hospitalario externo al servicio de radioterapia, personal de servicio y de mantenimiento no-especializado y visitantes.
- Pacientes: Considera cualquier exposición accidental del paciente. Se define como posición accidental la que se desvía de $\pm 10\%$ de la distribución de la dosis total aceptada por el médico provocando una administración errónea del tratamiento por sobredosis o subdosis al volumen blanco, dosis no prevista al tejido sano, no irradiadas partes del volumen blanco o dosis no homogéneas en todo el volumen blanco.

Criterio No. 2. Efecto de la administración errónea sobre el tratamiento y el número de pacientes afectados [14]:

El segundo criterio se aplica solo a los pacientes y es función de la importancia de las consecuencias así como el número de pacientes afectados [8]: según este criterio se clasifican los sucesos de la siguiente forma:

- Efecto recuperable, que afecta a un solo paciente A): Error en dosis menor de $\pm 10\%$ del total, que puede recuperarse durante el curso de su tratamiento (no llega a convertirse en exposición accidental).
- Efecto no recuperable que afecta a un solo paciente: B) error de dosis mayor de $\pm 10\%$ del total.

- Efecto no recuperable, que afecta a varios pacientes C) con un error de dosis mayor de ± 10 % del total.
- Efecto recuperable, que afecta a varios pacientes D): error de dosis menor de ± 10 % del total, y que puede recuperarse durante el curso de sus tratamientos (no llega a convertirse en exposición accidental).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sucesos Iniciadores de Accidente

Como resultado del FMEA se identificaron 158 modos de fallo de equipo y 295 errores humanos con potencialidad de provocar los sucesos indeseados definidos que aparecen resumidos en la TABLA I y que fueron agrupados en 118 sucesos iniciadores.

Relacionado con las tareas del proceso de tratamiento		
	Tareas analizadas	140
	Errores humanos analizados	480
	que constituyen Sucesos Iniciadores	295
	que constituyen Barreras de Seguridad	103
Relacionado con los equipos del proceso de tratamiento		
	Dispositivos analizados	347
	Modos de Fallo analizados	413
	que constituyen Sucesos Iniciadores	158
	que constituyen Barreras de Seguridad	156

Del total de los 118 sucesos iniciadores definidos, 37 son debido a fallo de equipos y 81 de origen humano. Por otra parte, 113 tienen la potencialidad de provocar consecuencias para el paciente, dos para los trabajadores ocupacionales y tres para miembros del público.

Como se aprecia de los datos de la TABLA II, los sucesos iniciadores de origen humano son dominantes en la exposición accidental de pacientes. En el caso de los sucesos iniciadores por fallo de equipos su contribución es solo del 0,03 % dentro de las exposiciones sistemáticas y corresponden a las contribuciones del LINAC, del TAC y del TPS.

Tabla 2. Contribución de los sucesos iniciadores de accidente por su origen a las exposiciones potenciales

Exposición de pacientes							
Episódica individual (Z3A)		Episódica colectiva (Z3D)		Programática (Z3B)		Sistemática (Z3C)	
87,46%		0,06%		15,46%		0,31%	
Por error humano	Por fallo de equipo	Por error humano	Por fallo de equipo	Por error humano	Por fallo de equipo	Por error humano	Por fallo de equipo
87,46%	-	0,02%	0,04%	15,46%	-	0,28%	0,03%

Determinación de las Secuencias Accidentales

Se consideraron en el estudio un total de 120 barreras, cuyo éxito o fallo permitió identificar 434 secuencias accidentales, de las cuales 115 conllevan a exposiciones accidentales para varios pacientes, 143 a exposiciones accidentales de un solo paciente, dos a exposiciones accidentales de los trabajadores ocupacionales, tres a exposiciones accidentales de miembros del público y el resto son administraciones erróneas del tratamiento que pueden recuperarse durante el curso del tratamiento, por lo que no se convierten en exposiciones accidentales.

Cuantificación de la frecuencia anual de ocurrencia de Exposiciones Accidentales

Los análisis de resultados se presentan de forma relativa expresándolos en porcentaje con respecto a la frecuencia total anual con que puede ocurrir una exposición accidental durante el proceso de tratamiento de radioterapia con LINAC o a la frecuencia total de cada tipo de exposición potencial, (a paciente, trabajador y miembros del público) según corresponda.

Distribución de las frecuencias de ocurrencia de las exposiciones accidentales en función de la etapa y del tipo de exposición

En la fig. 1 aparecen los resultados de la contribución de las exposiciones accidentales de los trabajadores, miembros del público y pacientes con respecto a la frecuencia total anual de exposiciones potenciales, destacándose que las exposiciones accidentales al paciente (Z3) resultan absolutamente dominantes con respecto a las exposiciones accidentales de los trabajadores (Z1) y el público (Z2).

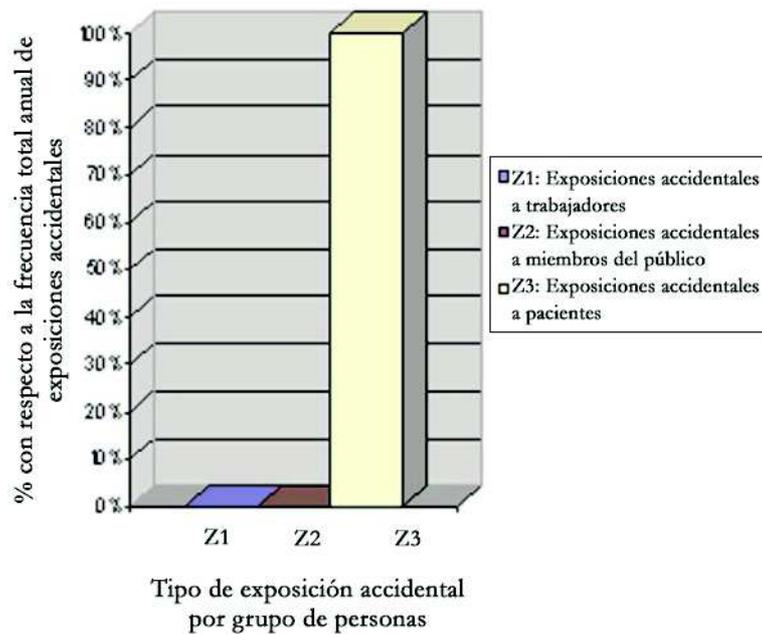


Figura 1 Contribución de las exposiciones accidentales de cada grupo de personas con respecto a la frecuencia total anual de exposiciones potenciales durante el proceso de tratamiento con LINAC

La figura 2 muestra la distribución de los diferentes tipos de exposiciones accidentales de tratamiento de los pacientes con respecto a la frecuencia total anual de exposiciones accidentales del paciente.

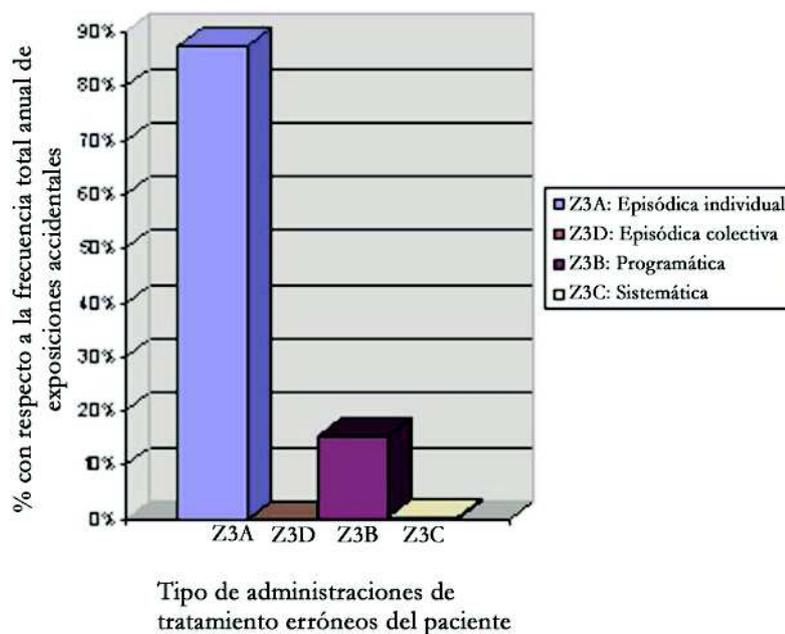


Figura 2 Contribución de los diferentes tipos de administraciones erróneas de tratamiento del paciente

En la figura 3 se agrupan los resultados de la cuantificación de las secuencias accidentales asociadas a las exposiciones accidentales del paciente de tipo no recuperable afectando a un paciente para cada una de las diferentes etapas del proceso de tratamiento consideradas en el estudio

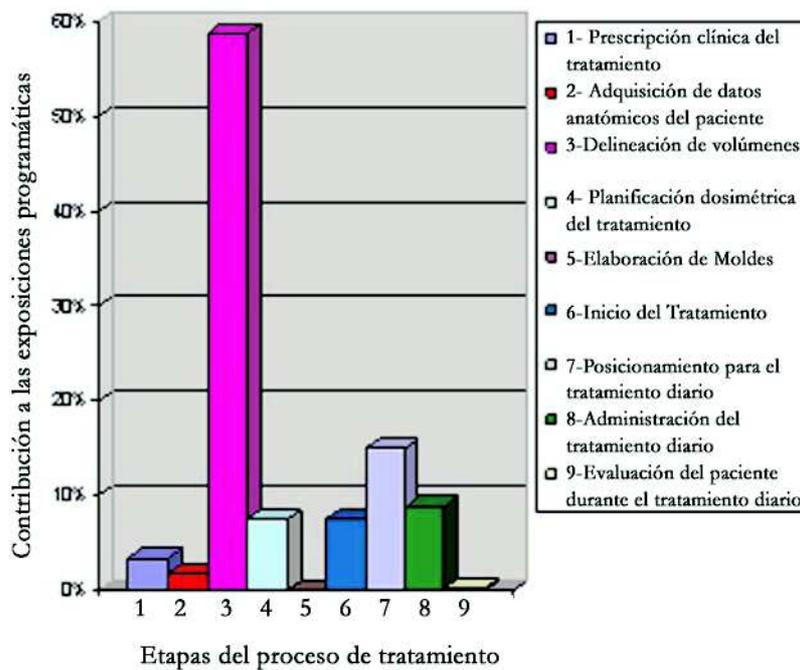


Figura 3 Resumen de la cuantificación por etapa de tratamiento para las exposiciones accidentales de pacientes no recuperable que afecta a un paciente

Por su parte en la figura 4 se muestran los resultados de la cuantificación de las secuencias accidentales asociadas a las exposiciones accidentales del paciente de tipo no recuperables afectando a varios paciente simultáneamente (sistemáticas) para cada una las diferentes etapas del proceso de tratamiento consideradas en el estudio, aunque debe destacarse, como se muestra en la TABLA II, que las exposiciones sistemáticas solo constituyen el 0,31% de la frecuencia anual total de este tipo de exposición accidental. En dicha tabla se compara el aporte de los sucesos iniciadores de accidente según su origen por fallo de equipo o por errores humanos.

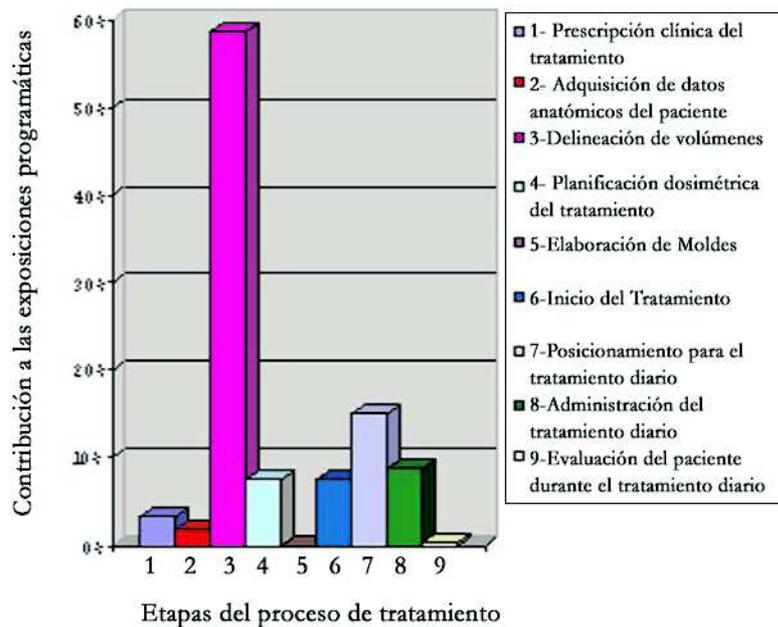


Figura 4 Resumen de la cuantificación por etapa de tratamiento para las exposiciones accidentales de pacientes tipo no recuperables afectando a varios pacientes simultáneamente

La mayor contribución sobre el paciente (87,5 %) la aportan las administraciones erróneas de carácter episódico individual (Z3A), que no constituyen accidente pues se recuperan durante el curso del tratamiento.

Dentro de las que si dan lugar a accidente las 25 exposiciones accidentales con mayor frecuencia anual de ocurrencia (superior al 0,1 % de la frecuencia total anual de exposiciones accidentales) están relacionadas con efectos sobre el paciente y ninguna está asociada a sucesos iniciadores por fallos de equipo. 24 de esas exposiciones son de tipo *no recuperables afectando a un paciente* (Z3B), que sí constituyen accidente por afectar el tratamiento de los pacientes en más de un 10% de la dosis prescrita, y su contribución a las exposiciones accidentales del paciente resultó significativa, alcanzando un 15,46 %.

Las administraciones erróneas de tipo sistemático (Z3C), que también superan el 10 % de la dosis prescrita pero con consecuencias simultáneamente sobre varios pacientes, tienen una contribución mucho más baja, de apenas 0,3 %.

Como resultados del APS se obtuvo que 9 modos de fallo de equipos o errores humanos son los responsables del 90 % de las exposiciones accidentales del paciente de tipo sistemáticas (Z3C) y que con tres medidas de seguridad se pueden evitar el 77 % de este tipo de exposiciones accidentales. Éstas son:

- QA periódico del TPS (PC, digitalizador, periféricos, revalidación del haz externo, transferencia del plan).

- Verificación del TPS después de modificaciones.
- Atención a la modificación de los procedimientos de uso del TPS.

De acuerdo con los resultados del estudio de APS, la verificación del TPS después de modificaciones de sus procedimientos de uso, pueden reducir en 21 veces el riesgo de exposiciones accidentales producto de un suceso similar a la exposición accidental ocurrida en Panamá [4].

Como resultados del APS se obtuvo además que 21 modos de fallo de equipos o errores humanos son los responsables del 90 % de las exposiciones accidentales del paciente de tipo no recuperable que afecta a un paciente o programáticas (Z3B). Con tres medidas de seguridad se pueden evitar el 55 % de este tipo de exposiciones accidentales. Éstas son:

- Evaluación del Paciente durante su tratamiento.
- Dosimetría en Vivo (Fiabilidad de los dosímetros, calibración y procedimientos de uso).
- Evaluación del Plan de Tratamiento entre el Físico Médico y el Oncólogo durante la planificación dosimétrica.

Los sucesos iniciadores que más contribuyen a este tipo de exposiciones accidentales (no recuperable que afecta a un paciente) son los correspondientes a la etapa de Delineación de Volúmenes (DV). Estos errores se producen en una etapa temprana del proceso de tratamiento y de no detectarse hacen poco probable que puedan recuperarse en etapas posteriores del tratamiento. Para evitar estos errores se recomienda: 1) establecimiento en el servicio de radioterapia de un convenio único de colores y su uso obligatorio por el personal de servicio, 2) incluir en los criterios de aceptación del TPS la demostración, por parte del suministrador, de la correspondencia del software con la terminología y códigos establecido por ICRU 62 y 3) implementar medidas de seguridad dirigidas a perfeccionar los TPS a través de enclavamientos y advertencias, de manera que durante la planificación se limiten las acciones que puedan realizarse sobre cada volumen en función de su denominación (CTV, GTV, OAR).

Las siguientes medidas de seguridad también pueden prevenir un gran número de secuencias accidentales: 1) realización de la imagen portal periódica, 2) realización de las pruebas dosimétricas de QA, y 3) existencia de enclavamientos del sistema de control dosimétrico. La ausencia de estas medidas de seguridad incrementa el riesgo de los sucesos iniciadores donde ellas participan por un factor de 90, 30 y 6 respectivamente.

La revisión independiente, por otro físico médico, de los cálculos realizados en el TPS también reduce significativamente el riesgo y la ausencia de esta medida de seguridad lo incrementa en diez veces.

El sistema de registro y verificación por software del acelerador constituye una barrera para nueve sucesos iniciadores de accidente y de no existir se incrementa el riesgo en 75 veces, por lo que es recomendable que todos los nuevos equipos dispongan de este sistema.

La presencia de dos técnicos radioterapeutas en el inicio de tratamiento y la presencia de, al menos uno de ellos, durante el resto del tratamiento es otro elemento importante desde el punto de vista del riesgo. El fallo de esta buena práctica incrementa el riesgo en 10,4 veces.

6. RESUMEN DE RECOMENDACIONES

En el presente apartado se relacionan las Recomendaciones que se proponen como resultado del estudio APS-RT-LINAC. Estas recomendaciones contienen un grupo de propuestas sobre estrategias a seguir, posibles soluciones técnicas u organizativas e iniciativas que pueden contribuir a prevenir o reducir la probabilidad de ocurrencia de exposiciones accidentales en la Radioterapia con LINAC. Excepto algunas recomendaciones muy específicas, el resto han sido redactadas de forma general, por lo que los usuarios finales de las mismas, es decir, las Autoridades Reguladoras, Servicios de Radioterapia u otros deberán utilizarlas de acuerdo a sus funciones.

Aunque algunas recomendaciones pueden constituir prácticas habituales en ciertos servicios, en otros pueden no estar suficientemente implementadas o minimizada su importancia, por lo que para los primeros tendrán un carácter de conclusiones reafirmadas por el presente APS y para los segundos tendrán un carácter recomendatorio.

Las recomendaciones aparecen agrupadas por temas. Al final de esta relación se incluyen otras recomendaciones de carácter general que complementan las anteriores:

a) Recomendaciones asociadas a barreras de seguridad del paciente

- Se deberá establecer un requerimiento de seguridad que establezca la obligatoriedad de un sistema de registro y verificación por software para los nuevos equipos que se instalen en los servicios de radioterapia, teniendo en cuenta que constituye barrera para 9 sucesos iniciadores de la etapa de Administración del Tratamiento Diario y que de no existir se incrementa el riesgo de exposición accidental del paciente en 74,5 veces, según cálculos del estudio.
- Por tratarse de barreras, la atención diferenciada a los cinco elementos que se relacionan a continuación, puede evitar que ocurran el 55 % de las exposiciones accidentales de los paciente que afecten todo su tratamiento:

- Evaluación del Paciente durante el Tratamiento.
 - Procedimiento de Dosimetría en Vivo periódica.
 - Fiabilidad de los dosímetros para la Dosimetría en Vivo.
 - Calibración de dosímetros para la dosimetría en vivo.
 - Evaluación del Plan de Tratamiento con el Oncólogo Radioterapeuta durante la Planificación Dosimétrica.
- Por su participación en un número significativo de sucesos iniciadores las barreras siguientes deberán tener una atención diferenciada en las estrategias de seguridad para radioterapia:
 - Evaluación del Paciente durante el Tratamiento.
 - Imagen Portal Periódica.
 - Revisión de la imagen portal en Inicio de Tratamiento.
 - Pruebas Dosimétricas de QA.
 - Enclavamiento dosimétrico.
 - Evaluación del Plan de Tratamiento con el OR durante la Planificación Dosimétrica del Tratamiento.
 - Observación del paciente por el Técnico-radioterapeuta durante el posicionamiento del paciente para el tratamiento diario.

b) Recomendaciones asociadas al TPS

- Teniendo en cuenta la contribución significativa de las exposiciones accidentales asociadas a los sucesos iniciadores por errores en la denominación de volúmenes blanco en el TPS durante la delineación de los mismos se recomienda lo siguiente:
 - Adoptar medidas que aseguren el establecimiento en los servicios de radioterapia de un convenio único de colores y códigos para la denominación de los volúmenes y su uso obligatorio por el personal del servicio.
 - Incluir en los criterios de aceptación de los TPS la demostración, por parte del suministrador, de la correspondencia del software con la terminología y códigos sobre este tema establecidos por la ICRU 62.
 - Implementar medidas dirigidas a perfeccionar los TPS (través de enclavamientos y advertencias) de manera que durante la planificación se limiten las acciones que puedan realizarse sobre cada volumen en función de su denominación (CTV, GTV, OAR).
- Para reducir la alta contribución a la exposición accidental del paciente del suceso iniciador relacionado con la posibilidad de omisión de denominación de CTVs en el TPS se recomienda:

- Incorporar en los TPS recursos de advertencia o enclavamientos que alerten sobre la posibilidad omisión de volúmenes secundarios durante la delineación.
 - Incorporar recursos ergonómicos en la hoja de tratamiento que faciliten detectar la omisión de volúmenes secundarios en el proceso de delineación de volúmenes.
- La implementación de un procedimiento en los sistemas de garantía de calidad de los servicios de radioterapia para verificar los TPS puede reducir en 21 veces el riesgo de exposiciones accidentales que afectan el tratamiento de todos los pacientes debido a las modificaciones de los procedimientos de uso de los TPS.
 - Verificar, en los servicios de radioterapia, la existencia de procedimientos detallados de QA para TPS que se correspondan con las publicaciones existentes al respecto[18], [19].
 - Verificar, en los servicios de radioterapia, la existencia de un procedimiento administrativo de revisión independiente por otro físico-médico de los cálculos realizados con el TPS considerando que esta barrera puede reducir el riesgo significativamente y que de no realizarse se incrementa el riesgo en 10 veces, según los cálculos realizados en este estudio.
 - En el caso de los Sistemas de Planificación del Tratamiento la atención diferenciada de los tres elementos que se relacionan a continuación permitiría evitar la ocurrencia de secuencias accidentales que en las condiciones actuales se estima contribuyen al 77 % de las exposiciones accidentales de los paciente de tipo sistemática:
 - QA mensual del TPS (PC, Digitalizador, periféricos, revalidación del haz externo, transferencia del plan).
 - Verificación del TPS después de modificaciones.
 - Atención a la modificación de los procedimiento de uso del TPS.

c) Recomendaciones asociadas a movimientos del paciente

- Para reducir la alta contribución a la exposición accidental del paciente del suceso iniciador relacionado con el movimiento de éste durante el revelado de la imagen portal que se realiza en el inicio de tratamiento se recomienda:
 - Implementar el procedimiento de verificación con la luz de campo y las marcas en la piel del paciente para comprobar que no se ha producido ningún movimiento que modifique el campo a irradiar, ya que de lo contrario el riesgo de exposición accidental se incrementa en diez veces según los cálculos realizados en este estudio.

- Implementar la imagen portal electrónica que puede reducir sustancialmente este tipo de exposición accidental.
- Se debe promover la investigación, desarrollo e introducción de tecnologías que detengan instantáneamente la irradiación de los pacientes en caso de movimientos significativos de éstos (que provoca desplazamientos mayores de 3 mm por encima del PTV) considerando que es el suceso que más puede incrementar el riesgo de exposiciones accidentales del paciente de tipo programáticas, debido a la ausencia de barreras para este iniciador. La generalización de este tipo de barrera constituye aún un reto tecnológico.
- Por el impacto que tiene el movimiento significativo (observable) del paciente antes del tratamiento en el incremento del riesgo resulta esencial garantizar el éxito de las barreras previstas asociadas a la vigilancia de los técnicos-radioterapeutas a través de los monitores y la habilitación bidireccional del intercomunicador, que en ocasiones se afecta por factores como la presión asistencial o la falta de una percepción adecuada sobre la importancia de las mismas. En este sentido se deberá trabajar para sensibilizar a los Técnicos radioterapeutas y elevar su cultura de seguridad sobre este aspecto.
- Se debe trabajar en los servicios de radioterapia sobre aquellos elementos relacionados con la presión asistencial, las interrupciones en el trabajo de los técnico-radioterapeutas, la organización de su trabajo, las malas prácticas, la pobre cultura de seguridad o el diseño del cuarto de control que impiden ejecutar la visualización y vigilancia de los pacientes a través de los monitores de televisión en los cuartos de control mientras el paciente se irradia considerando que el fallo de esta barrera incrementa en más de 100 veces el riesgo de exposición accidental del paciente en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.

d) Recomendaciones asociadas a las hojas de tratamiento

- Habilitar en las hojas de tratamiento un espacio para la colocación obligatoria de la foto del posicionamiento del paciente tomada durante el inicio de tratamiento a fin de reducir los errores de posicionamiento diario por el impacto de esta barrera sobre el riesgo de exposición accidental de los pacientes.
- Se debe implementar en los servicios de radioterapia un sistema de identificación de paciente mediante la inclusión y uso de su fotografía, datos de ID o código de barras en las Hojas de Tratamiento, Hojas de Realización de TAC, Tarjetas de Identificación de Paciente y Hoja de Tratamiento Electrónica considerando que la ausencia o fallo de estas barreras puede incrementar, entre 2 y 18 veces, el riesgo de exposiciones accidentales al paciente en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.

- Se debe verificar en los servicios de radioterapia la calidad y funcionamiento de los medios de registro y verificación manual de los tratamientos que deben llevar a cabo los técnicos-radioterapeutas, su diversidad y redundancia, considerando que los mismos constituyen barreras cuyo fallo o ausencia pueden incrementar el riesgo de exposiciones accidentales de 2,6 hasta 51 veces en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.
- Se debe revisar en los servicios de radioterapia que el diseño de la Hoja de Tratamiento del Paciente incluya un apartado específico para la indicación inequívoca y sobresaliente de las modificaciones que se introduzcan en el plan de tratamiento del paciente como resultado de la evaluación semanal por parte del Oncólogo-Radioterapeuta, considerando que la ausencia de este recurso puede incrementar el riesgo de exposición accidental del paciente en cerca de cinco veces, en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.

e) Relacionados con software

- Durante el proceso de licenciamiento del LINAC debe prestarse especial atención al sistema de control por software, teniendo en cuenta que cuatro de los seis sucesos que más contribuyen al incremento del riesgo de exposiciones de los pacientes están relacionados su fallo. En particular se debe:
 - Verificar cómo el sistema de control por software cumple con IEC-60601-1-4 for computer controlled systems or programmable electrical medical systems y/o con IEC 61508 “Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safe related systems” parte 3 “Software Requirements” [16], [17].
- Verificar que para los sistema de control por software de los equipos:
 - Exista dentro de su estructura de diseño un bloque separado para las funciones de seguridad (Kernel de seguridad).
 - Se ofrezcan datos de las pruebas realizadas al software (estáticas y dinámicas) y de la independencia entre ambas pruebas.
 - Se realicen pruebas periódicas para evitar la vulnerabilidad a virus informáticos.

Otras

- Se debe incluir en los programas de preparación y capacitación de los técnicos-radioterapeutas la importancia de su contacto diario con el paciente como mecanismo de detección y alerta temprana de signos que indiquen

problemas del tratamiento considerando que el fallo de esa barrera puede incrementar el riesgo de exposiciones accidentales en cerca de nueve veces en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.

- Verificar que en los servicios de radioterapia esté implementada la orientación a los nuevos pacientes sobre el cuidado y conservación de las marcas de posicionamiento en su piel, considerando que el fallo de este procedimiento incrementa el riesgo de exposiciones accidentales del paciente en más de diez veces en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.
- Revisar que en los procedimientos y programas de preparación y entrenamiento de los técnicos-radioterapeutas se enfatiza la importancia de instruir al paciente respecto a mantener la misma posición después de posicionado mientras se le administre su tratamiento diario considerando que la no realización de este procedimiento puede incrementar el riesgo de exposición accidental del paciente en 29 veces en el grupo de sucesos iniciadores donde interviene.

6.1 Otras Recomendaciones Generales

En el estudio quedó demostrada la importancia dominante de las acciones humanas en el riesgo de exposiciones accidentales de pacientes, trabajadores y público en la práctica de radioterapia con LINAC. En este sentido se recomienda:

- Promover en los servicios de radioterapia con LINAC estudios sobre factores humanos que permitan identificar y eliminar situaciones y condiciones que propician errores humanos.
- Particular énfasis debe concederse a los aspectos relacionados con la presión asistencial considerando que es un elemento crítico actual en la radioterapia con LINAC en muchos servicios y constituye un elemento que afecta directamente el desempeño humano, considerado clave en este estudio.
- Promover proyectos y programas de fomento de la cultura de seguridad radiológica en los servicios de radioterapia considerando que la actitud y compromiso del personal tanto directivo como técnico que interviene en el proceso de tratamiento es determinante para reducir eficazmente la probabilidad de ocurrencia de sucesos iniciadores, fallo de barreras o exposiciones accidentales.

7. RECOMENDACIONES SOBRE ACCIONES FUTURAS PARA INCREMENTAR EL IMPACTO DEL PROYECTO

El estudio identificó áreas potenciales de accidentes durante la administración de tratamientos de radioterapia con LINAC, estableciendo prioridades para

su atención y mejoras en función de su importancia y contribución al riesgo de exposiciones accidentales. Se recomienda las siguientes acciones para incrementar el impacto del Proyecto:

- Implementar resultados y recomendaciones del APS-RT-LINAC.
 - Revisar las Guías de Seguridad sobre Radioterapia y verificar si tienen en cuenta los sucesos con mayor riesgo (iniciadores, barreras, etc.).
 - Revisar los métodos (cuestionarios) de examen y evaluación sobre el licenciamiento de LINAC.
 - Revisar el alcance de los Programas de Inspección.
- Promover la difusión de los resultados del APS-RT-LINAC.
 - Publicación de Resultados.
 - Presentación en Eventos y Congresos.
 - Realización de Talleres y Cursos.

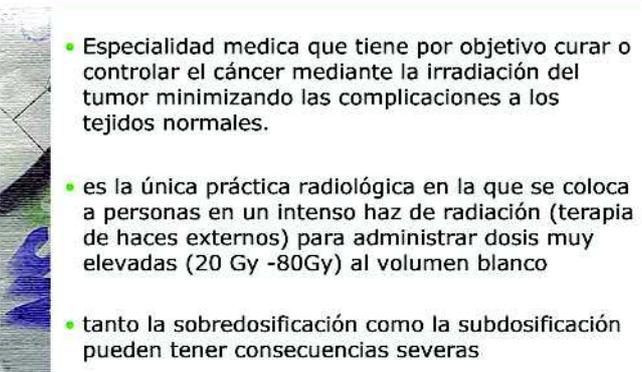
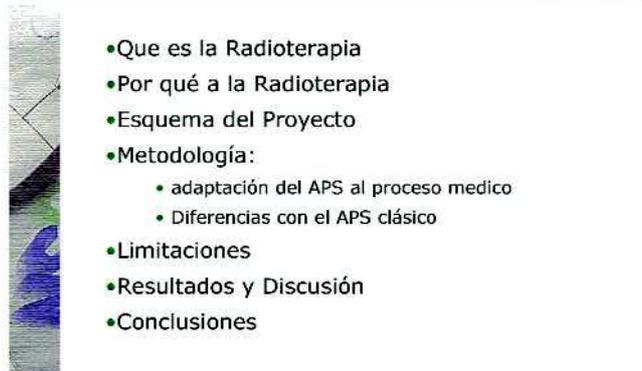
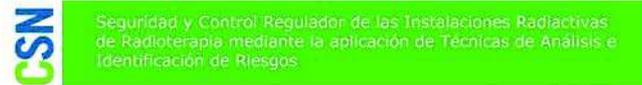
8. REFERENCIAS

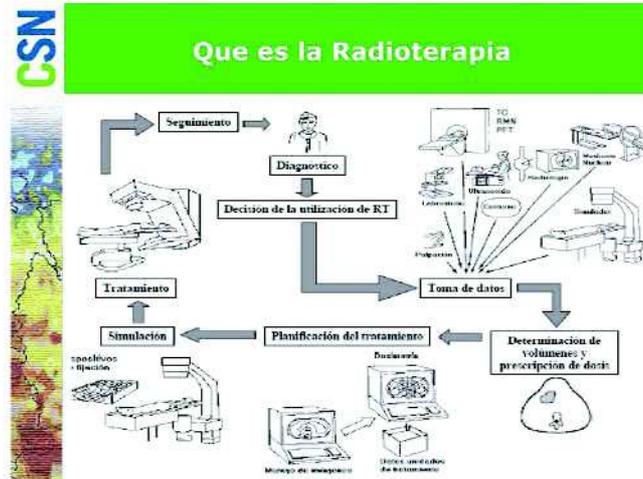
- [1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Prevention of Accidental Exposure to Patients Undergoing Radiation Therapy, ICRP Publication 86. Annals of the ICRP 30 (3), Pergamon Press, Oxford (2002).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Lessons learned from accidents in radiotherapy, Safety Reports Series No. 17, IAEA, Vienna (2000).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Accidental overexposure of radiotherapy patients in San José, Costa Rica. IAEA, Vienna, (1998).
- [4] I. Investigation of an Accidental Exposure of Radiotherapy Patients in Panamá. IAEA, Vienna, (2001).
- [5] I, Bialystok, IAEA, Vienna (2004).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants (Level 1). Safety Series No. 50-P-4, IAEA, Vienna 1992.
- [7] INTERNATIONAL ELECTRO TECHNICAL COMMISSION Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), IEC Standard Publication 812. First edition. 1985. Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale. Genève, Suisse.
- [8] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Good practices for imple-

- menting Human Reliability Analysis (HRA). Final Report, NUREG1792, EEUU 2005.
- [9] US DEPARTMENT OF ENERGY Hazard and Barrier Analysis Guidance Document. EH-33 Office of Operating Experience Analysis and Feedback. Department Of Energy. USA November 1996.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic component reliability data for research reactor PSA, IAEA-TECDOC-930, Vienna, 1997
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Component Reliability Data for use in Probabilistic Safety Assessment IAEA TECDOC 478, Vienna, 1988.
- [12] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).
- [13] AAPM Report No. 56 Medical Accelerator Safety Considerations. Medical Physics, Vol 20, Issue 4. July/August 1993.
- [14] ICRP 86 (2000). Prevention of Accidental Exposures to patients Undergoing radiation Therapy. Annals of the ICRP.
- [15] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION Human Factor Evaluation of Teletherapy. NUREG/ CR-6277, EEUU 1995.
- [16] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION NUREG/CR –6323 UCRL-ID-120051 Relative Risk Analysis in Regulating the Use of Radiation – Emitting Medical Devices. A preliminary Application, EEUU, 1995.
- [17] Thomadsen Bruce. Towards Probabilistic Risk Assessment in Braquithrapy. Progress Report. IAEA CRP J1.70.05, Viena, 2002.
- [18] CENTRO NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR. Informe Técnico del Análisis Probabilista de Seguridad al Proceso de Tratamiento con Cobalto-terapia, CNSN-APS Co, Cuba, 2003.
- [19] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION NUREG/CP –0144 INEL-94/0111 A Workshop on Developing Risk Assessment Methods for Medical Use of Radioactive Material, EEUU, 1995.
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Lessons learned form accidental exposures in radiotherapy. Safety Reports Series No. 17. IAEA. Vienna, 2000.
- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Case studies in the application of probabilistic safety assessment techniques to radiation sources, IAEA TECDOC 1404, Vienna, 2006

[22] INFORMES TÉCNICOS ELABORADOS POR EL PROYECTO APS LINAC:

- P1_RT_01_2006 “Descripción del Acelerador Lineal y otros equipos asociados al tratamiento”.
- P1_RT_02_2006 “Descripción de los Procesos Asociados al Tratamiento de Radioterapia con LINAC”.
- P1_RT_03_2006 “Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA) del LINAC y otros equipos asociados al tratamiento”.
- P1_RT_04_2006 “Análisis de Modos y Efectos de Fallo Humano (FMEA-Humano) del Proceso de Tratamiento con LINAC y de los Procesos de chequeos periódicos, mantenimientos y calibraciones de equipos y sistemas para su uso clínico”.
- P1_RT_05_2007 “Cuantificación del APS-RT- LINAC”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_1 “Modelos de Árboles de Sucesos”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_2 “Conjuntos Mínimos de Fallo y Medidas de Importancia de las secuencias para cada sistema y etapas del proceso de tratamiento con LINAC”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_3 “Árboles de Fallo de Sucesos Iniciadores”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_4 “Árboles de Fallo de las barreras de los Árboles de Sucesos”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_5 “Conjuntos Mínimos de Fallo y Medidas de Importancia de las secuencias accidentales y sucesos iniciadores”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_6 “Conjuntos Mínimos de Fallo y Medidas de Importancia para cada barrera”.
 - P1_RT_05_2007 Parte 5_7 “Probabilidades de los Sucesos Básicos”.
 - P1_RT_06_2007 “Análisis de Resultados del APS-RT- LINAC”.





PAÍS	AÑO	NÚMERO DE PACIENTES AFECTADOS	CAUSA Y FACTORES CONTRIBUYENTES
Francia	2006	Sobreexposición de ~200%. Superación límite tolerancia en tejido normal.	Error en el tamaño del detector usado para la puesta en servicio de micro multiláminas.
Bélgica	2008	ninguno	Desajuste en los límites de tolerancia del enclavamiento por tasa de dosis detectado en QC diario.
Francia	2004	23 (10 pacientes lesiones graves 4 pacientes murieron)	Calculo incorrecto de las unidades de monitor para el tipo de caña. Sobreexposición del 20-30% de la dosis
USA	2007	1 (irradiación en lado erróneo)	Modificación de derecha e izquierda en una imagen de planificación para el tratamiento.
USA	2005	1 (sobreexposición)	Error en el ordenador con pérdida de integridad de los datos de tratamiento. tratamiento con un campo diferente al planificado
Gran Bretaña	1996	1 (muerte del paciente)	Confusión en la transmisión de datos al linac debido a necesidad de empleo de método manual de transferencia en vez del procedimiento normal de transferencia electrónica

PAÍS	AÑO	NÚMERO DE PACIENTES AFECTADOS	CAUSA Y FACTORES CONTRIBUYENTES
Polonia	2001	5 (radio lesiones severas)	Fallo del sistema de monitorización de dosis del linac después de pérdida de tensión eléctrica
Panamá	2000	28 (19 paciente fallecidos)	Modificación incorrecta del TPS sin verificación posterior de los cálculos proporcionados por el mismo
Gran Bretaña	1982-1991	1045 (495 pacientes con recurrencia del cáncer)	Funcionamiento del TPS sin suficiente conocimiento del mismo. Subdosificaciones del 5-30%. Insuficiente control de calidad.
Costa Rica	1996	114 (14 pacientes fallecidos)	Error en la calibración de un equipo de Co-60. Sobredosis del 60%
España	1990	23 (15 muertes directamente causada por la irradiación)	Error en el mantenimiento, incumplimiento de procedimiento de transferencia del Linac desde el mantenimiento al uso clínico. No notificación a los físicos. No análisis de señales contradictorias. Sobredosis entre 200-600%.

Por qué a la Radioterapia	
Controles diarios	
<ul style="list-style-type: none"> - Test de consola - Luces de puerta - Luces de irradiación - Sistema de televisión - Intercomunicador - Verificación de parada de emergencia por la puerta - Verificación de parada de emergencia por la consola - Verificación de parada de emergencia por pulsadores en la sala de tratamiento - Verificación de parada de emergencia por el Sistema anticollisión - Interrupción por UM 	<ul style="list-style-type: none"> - Verificación de ambas monitores - Movimiento del Gantry - Movimiento del colimador - Movimiento del cabezal - Movimientos de camilla - Telémetro - Láseres - Tamaño de campo - Centrado del retículo - Centrado del campo luminoso - Constancia de Dosis de Referencia (D) para fotones - Constancia de Dosis de Dosis de Referencia (DW) para fotones de un valor de energía - Constancia de Dosis de Dosis de Referencia (DW) para electrones

Por qué a la Radioterapia	
Controles Mensuales	
<ul style="list-style-type: none"> - Verificar topes de la camilla - Verificación de enclavamientos - Pulsadores de corte de energía eléctrica - Control de código de conos de electrones y bandejas - Campos permitidos para cuñas - Indicadores angulares del Gantry - Indicadores angulares del colimador - Isocentro mecánico - Centrado de retículo - Coincidencia de bordes de campo - Tamaños de campo - Horizontalidad lateral de la camilla - Horizontalidad longitudinal de la camilla - Verticalidad de la camilla - Coincidencia del puntero mecánico con el telémetro óptico - Linealidad del telémetro - Láseres 	<ul style="list-style-type: none"> - Constancia de Dosis de referencia (Dw) para fotones - Constancia de Dosis de referencia (Dw) para electrones - Constancia de Calidad del haz de fotones - Constancia de Calidad del haz de electrones - Constancia de planitud de haz de fotones - Constancia de planitud de haz de electrones - Constancia de Simetría de haz de fotones - Constancia de Simetría de haz de electrones - Incidencia de campo de luz-radiación de fotones - Incidencia de campo de luz-radiación de electrones - Constancia de centrado de haz de fotones - Constancia de centrado de haz de electrones

Por qué a la Radioterapia	
Controles Anuales	
<ul style="list-style-type: none"> - Comprobación de todos los enclavamientos - Rotación del colimador - Rotación del gantry - Rotación de la camilla - Coincidencia de los tres ejes de rotación - Verticalidad de la camilla - Rotación del colimador, mandíbulas superiores cerradas - Rotación del colimador, mandíbulas inferiores cerradas - Rotación del Gantry - Rotación de la camilla - Factores de Campo para fotones - Factores de campo para electrones - Factor de cuña - Factor de bandeja porta-bloques - Factores sobre el eje de fotones a PDD - Factores sobre el eje de fotones a TMR (TPR) - Factores sobre el eje de electrones a PDD 	<ul style="list-style-type: none"> - Constancia de Dosis de Referencia (Dw) para fotones - Constancia de Dosis de Referencia (Dw) para electrones - Constancia de Planitud de haz de fotones - Constancia de Planitud de haz de electrones - Constancia de Simetría de haz de fotones - Constancia de Simetría de haz de electrones - Control de las cámaras monitoras para fotones (incluye factor de calibración, reproducibilidad, linealidad y variación con tasa mínima usual y máxima) - Control de las cámaras monitoras para electrones (incluye factor de calibración, reproducibilidad, linealidad y variación con tasa mínima usual y máxima)

CSN

método retrospectivo o reactivo

- Basado en utilizar las lecciones aprendidas de las exposiciones accidentales.
- Estos métodos consisten en re-evaluar los programas y procedimientos existentes en las instalaciones, a la luz de las lecciones que se aprenden de nuevos sucesos que van dándose a conocer.
- Son muy valiosos para dar soluciones prácticas a problemas reales que se han presentado y evitar que se repitan, no solo en la instalación donde ocurrieron sino en cualquier otra parte.

CSN

Aprender de los errores pasados es necesario pero tiene limitaciones

- Se han aprendido lecciones importantes de accidente notificados en el pasado
- Las limitaciones de los métodos retrospectivos es que abarcan solo sucesos conocidos.
- Dejan sin considerar otros posibles fallos que aunque no han ocurrido o no se han publicado, lo cual no quiere decir que no puedan ocurrir.

CSN

- Como averiguamos que puede ir mal?
- Como establecemos las prioridades en las listas de chequeo de control de calidad?



Métodos proactivos

CSN **Métodos proactivos responden a estas cinco preguntas**

- ¿que puede ir mal?
- ¿con qué probabilidad?
- ¿cuáles pueden ser las consecuencias de un incidente medico de exposición?
- ¿existe algún medio de evitarlo?
- ¿cómo son de efectivos dichos medios?

CSN **Métodos proactivos**

- Este enfoque sistemático ha sido seguido por un grupo multidisciplinario de radiofísicos, médicos radioterapeutas especialistas en seguridad y regulación, técnicos, ingenieros de mantenimiento, fabricantes de aceleradores
- Proyecto internacional de seguridad de radioterapia dentro del FORO de Reguladores Iberoamericano, auspiciado por la OIEA

CSN **Proyecto sobre Seguridad y Control Regulator de las Instalaciones Radiactivas de Radioterapia mediante la aplicación de Técnicas de Identificación y Análisis de Riesgos**

Objetivo (2005- 2008)	Evaluar de forma sistemática la seguridad de los tratamientos con radioterapia, aplicando técnicas y herramientas de identificación de riesgos para investigar las principales causas que pueden provocar una exposición accidental.
Proyecto 1	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de un Análisis Probabilista de Seguridad (APS) al proceso de tratamiento de radioterapia con un Acelerador Lineal de Electrones de Usos Médicos (LINAC).
Proyecto 2	<ul style="list-style-type: none"> • Recomendaciones de seguridad de las instalaciones radiactivas de radioterapia, basados en la experiencia operacional (lecciones aprendidas) y los resultados de los estudios de APS.
Alcance del proyecto1	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis del proceso de tratamiento de radioterapia convencional con un acelerador lineal, de la marca ELEKTA. • Proceso que se inicia con la prescripción clínica del tratamiento de radioterapia hasta concluir las sesiones de tratamiento diario prescritas • Fuera del alcance: aceptación y puesta en servicio de los equipos, las pruebas, calibraciones y mantenimientos

CSN Proyecto sobre Seguridad y Control Regulador de las Instalaciones Radiactivas de Radioterapia mediante la aplicación de Técnicas de Identificación y Análisis de Riesgos

Participantes	Actividad
GRUPO CUBA	- Ejecutar el APS (expertos en APS, radiooncólogos, radiofísicos, reguladores)
GRUPO ESPAÑOL Expertos regulación práctica médica (DPR/CSN)	- Coordinación del grupo español - Consulta de todo el proceso del proyecto - Aportación de juicio de experto y revisiones cruzadas
Expertos APS (DSN/CSN)	- Apoyo técnico al grupo APS de Cuba en las actividades de fiabilidad humana y en la modelización de secuencias - Aportación de juicio de experto y revisiones cruzadas
Experto de ELEKTA	- Descripción del diseño del equipo. - Aportación de datos de fiabilidad del equipo - Aportación de juicio de experto y revisiones cruzadas
Especialista radiofísica (Instalación de referencia; Grupo IMO)	- Consulta del estudio y descripción del proceso de tratamiento durante la ejecución del APS - Canalización de las consultas a otros especialistas del proceso. - Recogida de datos del proceso de tratamiento - Aportación de juicio de experto y revisiones cruzadas
Experto de OIEA	- Aportación de los datos de lecciones aprendidas para el FMEA - Consulta de todo el proceso del proyecto - Aportación de juicio de experto y revisiones cruzadas
Expertos APS Argentina, Brasil y México	- Revisión Complementaria de cada uno de los Informes Técnicos del APS

CSN Planificación del Trabajo

Principales tareas del APS	Cantidad de especialistas	Hombres-meses equivalente
Gestión y Organización	1	12
Familiarización con el tratamiento con radioterapia	4	30
Identificación del estado de daño y los Sucesos Iniciadores de Accidente	11	60
Modelación de las secuencias accidentales	4	10
Gestión de Datos de Confiabilidad	2	4
Cuantificación de las secuencias accidentales	4	4
Análisis de Resultados	11	11
Documentación del APS	4	18

CSN Trabajo realizado y Metodología

- Se utilizó y adaptó la metodología estándar de APS descrito en la Colección de Seguridad IAEA No. 50-P-4



- Se presenta:
 - La metodología empleada
 - Las diferencias fundamentales con la metodología estándar (CCNN)



Tareas del estudio de APS

- *Definición de los sucesos indeseados o estados de daño*
- *Descripción de la Instalación y del Proceso de Tratamiento.*
- *Determinación de los sucesos iniciadores*
- *Modelación de las Secuencias Accidentales, utilizando Árboles de Sucesos y Árboles de Fallos.*
- *Cuantificación de la frecuencia de ocurrencia de las exposiciones accidentales; análisis de importancia para determinar los principales contribuyentes al riesgo.*
- *Propuesta de Recomendaciones de Seguridad.*



1 – Definición de los estados de daño

La definición de los Estados de Daño o Exposiciones Accidentales se realizó a partir de la revisión de:

- *CS 115 Normas Básicas de Seguridad*
- *ICRP 86 Prevention of Accidental Exposures to Patients Undergoing Radiation Therapy*
- *IAEA SRS No 17 Lesson Learned from Accidental Exposures in Radiotherapy*
- *NUREG/CR-6277 Human Factor Evaluation of Teletherapy*
- *APS Cobalto*
- *NUREG/CR-6323 Relative Risk Analysis in Regulating the Use of Radiation-Emitting Medical Devices*



1- Exposiciones accidentales

Trabajadores	Z1	- Cualquier dosis accidental recibida por un trabajador
Miembros del Público	Z2	- Cualquier exposición radiológica recibida por miembros del público durante el proceso de tratamiento
Pacientes	Z3A	Recuperable a un solo paciente: Administración errónea del tratamiento de un paciente (menor de $\pm 10\%$ del total) que puede recuperarse durante el curso de su tratamiento (no llega a convertirse en exposición accidental)
	Z3B	Irrecuperable a un solo paciente: Administración errónea del tratamiento de un paciente (mayor de $\pm 10\%$ del total) que afecta su tratamiento total
	Z3C	Recuperable a múltiples pacientes: Administración errónea del tratamiento de todos o varios pacientes (mayor de $\pm 10\%$ del total) que afectan sus tratamientos totales
	Z3D	Irrecuperable a múltiples pacientes: Administración errónea del tratamiento de varios pacientes (menor de $\pm 10\%$ del total) que puede recuperarse durante el curso de su tratamientos (no llega a convertirse en exposición accidental)

- Exposiciones accidentales a un tejido normal del paciente

CSN

2 – Descripción de la Instalación y proceso de tratamiento

- El estudio se centra en el proceso de tratamiento de radioterapia con un acelerador lineal
- En lo referente a los equipos, se analiza en detalle el acelerador lineal. Otros equipos que participan en el proceso de tratamiento (TPS, TAC, dosimetría en vivo) se analizaron como macro-componentes, sin profundizar en detalle en las principales partes que lo conforman, teniendo en cuenta esencialmente los errores humanos relacionados con su manejo
- Para conjugar los dos aspectos del APS (especificidad del APS frente a necesidad de resultados generalizables), se consideró oportuno definir un Modelo de Referencia de Servicio de Radioterapia con LINAC, que permitiera realizar el APS sobre una base definida, pero que, a su vez, fuera suficientemente general como para permitir extrapolación de los resultados a otros Servicios.

CSN

3 – Determinación de sucesos iniciadores

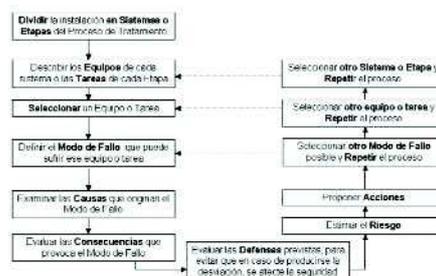
- **SUCESO INICIADOR**
- Estrategia para la determinación de los sucesos iniciadores



CSN

3 – Determinación de sucesos iniciadores

- Metodología FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Fallo)





3 – Determinación de sucesos iniciadores

Relacionados con las tareas del proceso de tratamiento	Tareas analizadas	140
	Errores Humanos analizados	480
	que constituyen Sucesos Iniciadores	295
	que constituyen Barreras de Seguridad	103
Relacionado con los equipo del proceso de tratamiento	Dispositivos analizados	347
	Modos de Fallo analizados	413
	que constituyen Sucesos Iniciadores	158
	que constituyen Barreras de Seguridad	156
Sucesos Iniciadores tras agrupación	Relacionados con las tareas (origen humano)	81
	Relacionados con el equipo	37
	Total	118



4 – Modelación de secuencias accidentales

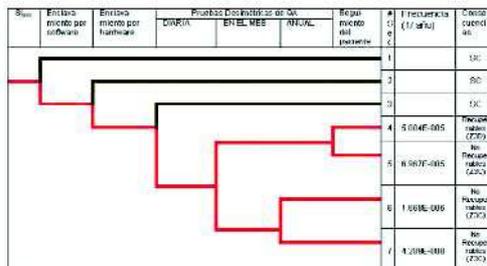
- Secuencias accidentales: las combinaciones de fallos de las barreras que conducen a una exposición accidental dado un suceso iniciador.
- Se determinaron por el método de árboles de sucesos: para cada iniciador:
 - se analizan las barreras previstas
 - se valoran las opciones de éxito o fallo de cada barrera
 - se determina qué secuencias llevan a una exposición accidental
- Se identifican en total 120 barreras y 434 secuencias accidentales
- Algunas de las secuencias identificadas fueron simuladas de forma controlada en un acelerador.



4 – Modelación de secuencias accidentales

- Ejemplo de Árbol de Sucesos:

SI018: Pérdida de la alimentación de las cámaras de ionización





4 – Modelación de secuencias accidentales

- Ejemplo de Árbol de Sucesos:

S1048: Realización de la TAC de simulación con parámetros geométricos erróneos

Suceso	Definición de volúmenes	Definición y confirmación del PTV en la PDT	Revisión de la imagen portal por el FM y OI en IT	Imagen Portal Periódica	Evaluación del Paciente durante el Tratamiento	# Sucesos	Frecuencia (1/año)	Consecuencias
1						1	-	SC
2						2	-	NC
3						3	-	SC
4						4	6.008E-002	Recuperable (Z3A)
5						5	6.824E-003	No Recuperable (Z3B)
6						6	6.862E-003	Recuperable (Z3A)
7						7	7.643E-004	No Recuperable (Z3B)



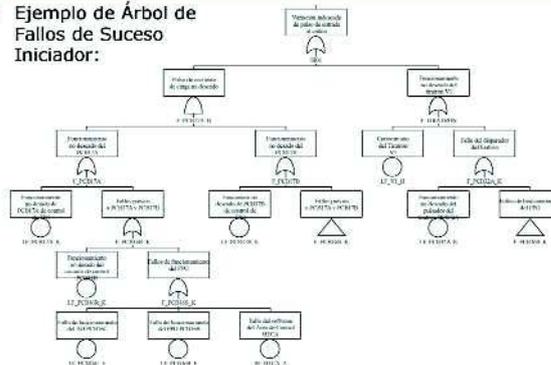
4 – Modelación de secuencias accidentales

- Dentro de cada secuencia accidental, los iniciadores y las barreras están modelados mediante modelos *Árboles de Fallo*.
- Los *Árboles de Fallo* permiten analizar la indisponibilidad de una barrera o la posibilidad de ocurrencia de un iniciador en función de las indisponibilidades o probabilidades de fallo de elementos, componentes o acciones más elementales, o *sucesos básicos*.
- La combinación de *Árboles de Secuencias* y *Árboles de Fallo* permite tener en cuenta las dependencias que existan entre sistemas o acciones en distintas etapas del proceso.



4 – Modelación de secuencias accidentales

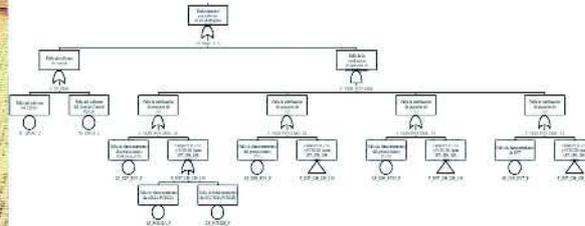
- Ejemplo de Árbol de Fallos de Suceso Iniciador:





4 – Modelación de secuencias accidentales

- Ejemplo de Árbol de Fallos de Barrera:



4 – Modelación de secuencias accidentales

- Para obtener la fiabilidad de los sucesos básicos relativos a componentes, se realiza la tarea de **análisis de datos** que permiten obtener
 - Probabilidades de fallo de componentes
 - Indisponibilidades de equipos por pruebas y mantenimiento
 - Probabilidades de fallos de causa común
- Al no existir datos públicos ni estadísticamente relevantes para los fallos de los componentes de los aceleradores de radioterapia, se han empleado datos provenientes de *bases de datos genéricas*.



4 – Modelación de secuencias accidentales

- Para obtener la probabilidad de error en las acciones humanas, se realiza la tarea de **análisis de fiabilidad humana**.
- Dado el gran número de acciones humanas identificadas en el estudio, así como la ausencia de datos y metodología probada en este campo, se adoptó un *enfoque simplificado* en el tratamiento de acciones humanas, utilizando *valores de screening*.
- Los resultados permiten identificar cuáles son las acciones humanas que deberían ser objeto de un análisis de fiabilidad más detallado.

CSN

5 - Cuantificación

- Para cada secuencia accidental se obtiene la Frecuencia con que puede dar lugar a una exposición accidental.
- *Aproximadamente* se puede considerar que la frecuencia de una secuencia accidental proviene de multiplicar la *frecuencia de ocurrencia del suceso iniciador* por las *probabilidades de fallo* de las barreras que, en dicha secuencia no tienen éxito.
- De forma más exacta, se construye un árbol de fallos para cada secuencia (puerta AND) del iniciador y todos los cabeceros fallados. La frecuencia final se obtiene teniendo en cuenta los datos de fiabilidad de los componentes y de errores humanos y las dependencias entre barreras.

CSN

Comparación con el APS de CCNN

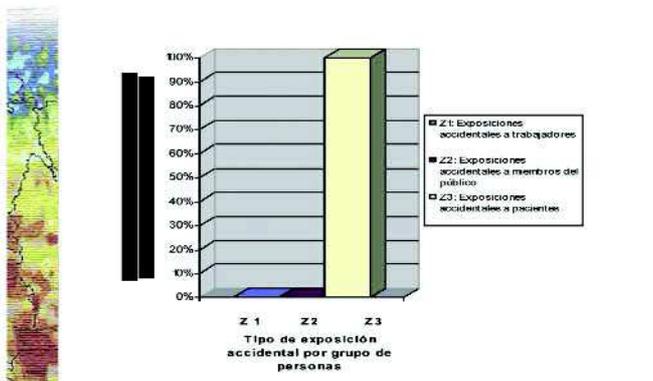
	APS CCNN (estándar)	APS LINAC
Alcance	Alcance: Instalación específica	Alcance: Modelo genérico de radioterapia
Estandarización	Metodología estandarizada y madura	Aplicación de forma experimental
Instalaciones	Sistemas tecnológicos complejos muy automatizados	Sistemas relativamente simples con elevada intervención humana
Tiempos	Procesos dinámicos y tiempos disponibles largos	Procesos inmediatos y tiempos muy breves
Estados de daño	Nivel 1, daño al núcleo	Múltiples estados de daño (exp. Accidentales)

CSN

Comparación con el APS de CCNN

	APS CCNN (estándar)	APS LINAC
Modelación de secuencias	Defensa en profundidad, redundancia, diversidad e independencia	No existe el concepto de defensa en profundidad, ni r/d/i
Fiabilidad Humana	Metodologías probadas según tipo de acción, permite uso de análisis detallado	No existe una metodología establecida ni validada: uso de valores de <i>screening</i>
Análisis de datos	Bases de datos de la industria con años de experiencia	No existen datos estadísticamente significativos
Frecuencia de iniciadores	Datos estadísticos o árboles de fallos	Árboles de fallos

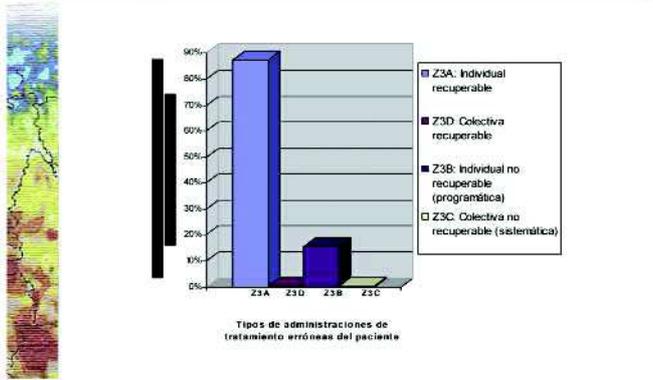
CSN **RESULTADOS**



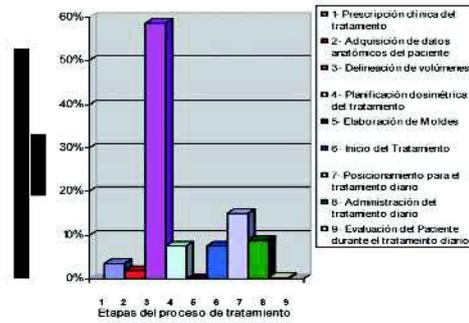
CSN *contribución porcentual de cada tipo de exposición accidental de pacientes a la frecuencia total de exposiciones accidental*

Exposición Accidental de Pacientes							
Recuperable afectando a un sólo paciente (Z3A)		Recuperable afectando a múltiples pacientes (Z3B)		No recuperable afectando a un sólo paciente (Z3B)		No recuperable afectando a múltiples pacientes (Z3C)	
87,5 %		0,06 %		15,5 %		0,3%	
Por Error Humano	Por Fallo de Equipo	Por Error Humano	Por Fallo de Equipo	Por Error Humano	Por Fallo de Equipo	Por Error Humano	Por Fallo de Equipo
87,5 %	-	0,02 %	0,04 %	15,5 %	-	0,28%	0,03%

CSN *Contribución porcentual de los diferentes tipos de exposición potencial de pacientes a las frecuencia total de las exposiciones accidentales de los mismos*



CSN Contribución de la frecuencia de exposiciones accidentales irre recuperables de un solo paciente, originadas en cada etapa de tratamiento, a la frecuencia total de exposiciones accidentales irre recuperables de un solo paciente

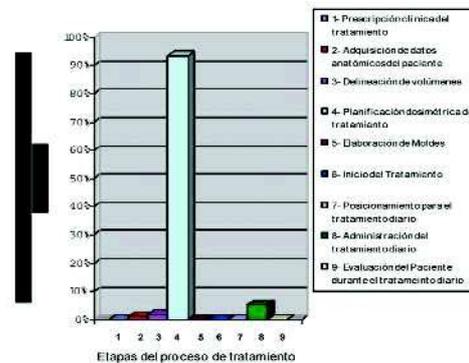


CSN Recomendaciones respecto a la denominación de los volúmenes de tratamiento en la prescripción



1. Dada la contribución significativa de los errores en la denominación de volúmenes blanco en el TPS a la frecuencia de exposiciones accidentales, se recomienda lo siguiente:
 - a. Establecer un convenio único de colores y códigos para denominar a los volúmenes y la obligatoriedad de utilizarlo en el servicio.
 - b. Incluir en las pruebas de aceptación de los TPS la verificación de que el software cumple la terminología y códigos sobre denominación de volúmenes de ICRU 62
 - c. Normalizar e incluir enclavamientos y advertencias en la fabricación de los TPS, que guíen al usuario y limiten las posibilidades de confundir los CTV, GTV, OAR y de omitir algún volumen.
2. Para reducir la probabilidad de exposición accidental del paciente por omitir la denominación de CTVs secundarios en el TPS se recomienda:
 - a. Incorporar advertencias o enclavamientos en los TPS que alerten al oncólogo radioterapeuta sobre la posibilidad de omitir de volúmenes secundarios.
 - b. Incorporar advertencias en la hoja de tratamiento que alerten al Oncólogo radioterapeuta sobre la posibilidad de omitir volúmenes secundarios

CSN Contribución de la frecuencia de exposiciones accidentales irre recuperables de múltiples pacientes, originadas en cada etapa del tratamiento, a la frecuencia total de exposiciones accidentales irre recuperables de múltiples pacientes



CSN *contribución individual y acumulada de los modos de fallo y errores humanos a la frecuencia total de exposiciones accidentales irrecuperables de múltiples pacientes.*

Modo de fallo o error humano	Contribución individual	Acumulado
Omisión o error en la Verificación del TPS después de una modificación del mismo o de los procedimientos de uso del TPS	45,51%	45,51%
Omisión o error en la QA mensual del TPS (PC, Digitalizador, periféricos, revalidación del haz externo, transferencia del plan)	31,95%	77,5%
Omisión de la Evaluación Médica del Paciente durante el Tratamiento, o pasar por alto efectos anormales u otros signos	3,86%	81,3%
Omisión o error en la verificación independiente por otro Físico Médico	2,74%	84,1%
Omisión o error en la observación del técnico durante la colocación de paciente en el posicionamiento diario	2,38%	86,5%
Error Humano en la toma de la Imagen portal periódica	1,87%	88,3%
Error Humano en la Dosimetría en Vivo en Inicio de Tratamiento	1,49%	89,8%
Revisión de imagen portal en inicio del tratamiento	1,41%	91,2%

CSN *Recomendaciones sobre exposiciones accidentales múltiples*

Evitando los errores humanos que se listan a continuación, y que se relacionan con el TPS, **se puede disminuir en un 71%** la frecuencia de las exposiciones accidentales de múltiples pacientes:

- **Modificar un procedimiento de utilización del TPS omitiendo validarlo o verificarlo.**
- **Omitir la revalidación del haz externo durante el control de calidad mensual del TPS, o realizarla erróneamente**

Evitando esto ocho modos de fallo **se disminuiría en un 91%** la frecuencia de ocurrencia de exposiciones accidentales de múltiples pacientes.

Recomendaciones para TPS

- **Verificar que el TPS funciona correctamente después de efectuar alguna modificación al equipo, al software o al uso del mismo.**
- **Por su contribución a la disminución de la frecuencia de ocurrencia de exposiciones accidentales irrecuperables de múltiples pacientes deberá verificarse que en el control de calidad mensual del TPS esté incluida la revalidación del haz externo**

CSN *contribución individual y acumulada de los fallos de equipos y errores humanos a la frecuencia anual de exposiciones accidentales irrecuperables de un solo paciente*

Fallo de la dosimetría en vivo (fallo de los dosímetros, descalibración, calibración y omisión de la dosimetría en vivo, o cometer errores durante al analizarla) procedimientos de uso)	31%	31%
Omitir la revisión médica de control (evaluación) del paciente durante el curso del Tratamiento, o pasar por alto efectos anormales u otros signos	18%	49%
Cometer un error evaluar y aprobar el Plan de Tratamiento por parte del físico y el Oncólogo Radioterapeuta	5,9%	55,2%
Diseño ergonómico deficiente de la Hoja de Tratamiento	3,8%	59%
Omitir verificar la foto de posicionamiento del paciente en la Hoja de Tratamiento	3,5%	62%
Ausencia del técnico radioterapeuta en la sesión de Inicio del Tratamiento	3,1%	68%
Equivocarse al delinear y conformar PTV durante la planificación dosimétrica del tratamiento	2,4%	75%



Recomendaciones sobre exposiciones accidentales de un solo paciente

Evitando los tres modos de fallo o errores que se listan a continuación se **disminuye en un 55 %** la frecuencia de las exposiciones accidentales irreversibles de un solo paciente:

- a. **Fallo de la dosimetría en vivo (fallo de los dosímetros, descalibración, calibración y omisión de la dosimetría en vivo, o cometer errores durante al analizarla).**
- b. **Omitir la revisión médica de control (evaluación) del paciente durante el curso del tratamiento, o pasar por alto efectos anormales u otros signos.**
- c. **Cometer un error al evaluar y aprobar el Plan de Tratamiento por parte del Físico y el Oncólogo Radioterapeuta.**

19 modos de fallo son responsables de un 90 % de la frecuencia de ocurrencia de exposiciones accidentales de un solo paciente



Recomendaciones

Donde aplica	Número
-Sistema de Planificación de Tratamiento	6
-Software (Linac, TPS)	2
-Sistema de registro y verificación del linac	1
-Sobre barreras que evitan exposiciones accidentales múltiples	1
-Sobre barreras que evitan exposiciones accidentales a un solo paciente	1
-Movimiento del paciente	4
-Errores de posicionamiento del paciente	3
-Mejoras de la hoja de tratamiento	3
-Acciones humanas (cultura de seguridad)	2
-Actividades reguladoras	1



Conclusiones

- El Análisis probabilista de seguridad (APS) proporciona información cuantitativa sobre el grado en que se reduce el riesgo por la existencia o introducción de una medida de seguridad
- El APS identifica las causas comunes en más de una secuencia accidental y permite determinar su importancia y así establecer prioridades.
- El APS requiere de un esfuerzo importante, precisa de expertos en la metodología junto con el personal de departamento de radioterapia y no puede ser llevado a cabo de forma individual.

CSN

Conclusiones

- La realización de un APS al proceso de radioterapia abre una puerta a las técnicas de análisis de riesgos y por tanto a la promoción de la investigación en la seguridad y gestión de riesgos en una práctica médica.
- Aun cuando el APS es una técnica costosa la identificación de sucesos iniciadores potenciales de accidente, de barreras y de consecuencias, permite derivar a una aplicación mas simplificada y de utilización mas práctica en las instalaciones radiactivas de radioterapia (matrices de riesgo)

Nuestra propuesta para el futuro:

- Realizar al menos un APS para cada nueva tecnología que permita identificar las vulnerabilidades del proceso (borrador ICRP 32/147/07).
- Autoevaluación por parte de los hospitales mediante técnicas mas simples como las matrices de riesgo.