

Advance: proyecto de investigación de envejecimiento en cableado eléctrico en centrales nucleares

J.C. Cano y S. Ruiz

A medida que las plantas nucleares envejecen aumenta la importancia de la evaluación de la condición de cables de baja tensión de instrumentación, control y potencia. Adicionalmente, mientras se construyen nuevas centrales, la elección de los cables y el uso de técnicas de monitorización *in situ* para conseguir indicadores fieles al envejecimiento, puede resultar muy útil a lo largo de la vida de la planta.

El objetivo de este proyecto es adaptar, optimizar y valorar técnicas de *condition monitoring* para cables de centrales nucleares, que junto con el establecimiento del criterio de aceptación apropiado, permitan conocer el estado del cable a lo largo de su longitud y estimar su vida residual.

En el proyecto se estudia el envejecimiento acelerado de una serie de cables instalados en centrales europeas con el fin de evaluar la capacidad de técnicas de *condition monitoring* para detectar envejecimiento global y local. Los resultados se comparan con técnicas aceptadas de evaluación de envejecimiento para validar su uso en la estimación de vida residual.

En este artículo se exponen las etapas principales del proyecto y el estado actual del mismo.

As Nuclear Power Plants get older it is more important to know the real condition of low voltage, instrumentation, power and control cables. Additionally, as new plants are being built, the election of cables and the use of in-situ monitoring techniques to get reliable aging indicators, can be very useful during the plant life.

The goal of this Project is to adapt, optimize and asses "Condition Monitoring" techniques for Nuclear Power Plants cables. These techniques, together with the appropriate acceptance criteria, would allow specialists to know the state of the cable over its entire length and estimate its residual life. In the Project, accelerated ageing is used in cables installed in European NPPs in order to evaluate different techniques to detect local and global ageing. Results are compared with accepted tests to validate its use for the estimation of cables residual life.

This paper describes the main stages of the Project and some results.

INTRODUCCIÓN

A medida que las plantas nucleares envejecen aumenta la importancia de la evaluación de la condición de cables de baja tensión de instrumentación, control y potencia. Adicionalmente, mientras se construyen nuevas centrales, la elección de los cables y el uso de técnicas de monitorización *in situ* para conseguir indicadores fieles al envejecimiento, puede resultar muy útil a lo largo de la vida de la planta.

En el proyecto Advance se estudia el envejecimiento acelerado de una serie de cables instalados en centrales

nucleares europeas, con el fin de evaluar la habilidad de técnicas de medidas eléctricas de *condition monitoring* para detectar envejecimiento global y local. Los resultados se comparan con aquellos obtenidos mediante técnicas convencionales y aceptadas de evaluación del envejecimiento, para validar la estimación de vida residual. Estas técnicas convencionales son en su mayoría ensayos destructivos, y por ello se busca optimizar ensayos de medidas eléctricas no destructivos que se puedan utilizar posteriormente en campo para la monitorización y evaluación del estado y envejecimiento de los cables.



JUAN CARLOS CANO

es ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Madrid en la especialidad eléctrica. Comienza su carrera profesional en Tecnatom en 1995, en el campo del mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas. Desde el año 2000 es el responsable de la Unidad de Ensayos Eléctricos cuyas principales actividades son el mantenimiento predictivo y la monitorización de equipos eléctricos y la gestión de vida de cableado eléctrico en centrales nucleares.



SARA RUIZ

es diplomada en Ingeniería Técnica Industrial en la especialidad de electrónica por la universidad del País Vasco (2002), y licenciada en Ingeniería en Electrónica y Automática por la Universidad de Navarra (2005). Se incorporó a Tecnatom en 2007 y trabaja actualmente en el Grupo de Materiales y Gestión de Vida, donde se realizan estudios de degradación y de estimación de vida residual de componentes de centrales nucleares y térmicas.

Dentro del proyecto se estudia también el impacto que tiene el envejecimiento de los materiales polímeros, que constituyen el aislante y cubierta de los cables, en las propiedades eléctricas del cable. Dicho estudio servirá para adaptar y optimizar las técnicas de monitorización existentes, interpretar los resultados de los ensayos eléctricos con el fin de extrapolar dichos resultados a otros cables similares, y adaptar el diseño de nuevos cables a estas técnicas de ensayos eléctricos para la monitorización del estado.

DESCRIPCIÓN

El proyecto Advance es un proyecto Euratom del 7º Programa Marco. Este proyecto nace en 2011 y tiene prevista su finalización en diciembre de 2013, con un presupuesto de 3,95 millones de euros y con una financiación de 2,3 millones por parte de la Unión Europea. En el proyecto participan 11 empresas europeas (Tabla 1).

El proyecto nace de la inquietud a nivel internacional de conocer el estado de los cables de las centrales nucleares. La seguridad y disponibilidad de las centrales dependen directamente de los cables de instrumentación, control y de potencia; un solo reactor tiene alrededor de 1000 km de cables y algunos tienen que ser capaces de aguantar condiciones de accidente y de postaccidente. Hay muchas centrales con una edad cercana a los 40 años que se espera que funcionen 60 años, lo que ha dado lugar a que se cuestione el estado de los cables. Las centrales nucleares necesitan métodos efectivos y no destructivos para monitorizar el estado de los cables sin sacarlos de servicio.

El proyecto Advance nace con los siguientes objetivos:

- Adaptar, optimizar y validar técnicas de monitorización de estado para cables de centrales nucleares, que sean no destructivas y puedan ser usadas *in situ* para determinar la condición actual de los cables instalados en toda la longitud del cable.
- Usar técnicas de monitorización de la condición para predecir la vida útil de los cables, y establecer criterios de aceptación mediante la correlación de las propiedades eléctricas y físicas.
- Correlacionar indicadores de la condición del cable cerca del final de la vida del mismo, incluyendo el accidente de LOCA.

Nº	Nombre	Nombre corto	País
1	ELECTRICITÉ DE FRANCE S.A.	EDF	Francia
2	FORSMARKS KRAFTGRUPP AB	Forsmark	Suecia
3	COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES	CEA	Francia
4	ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	Unibo	Italia
5	TECANTOM S.A.	Tecnatom	España
6	USTAV JADERNEHO VYZKUMU REZ A.S.	NRI	Rep. Checa
7	NEXANS DEUTSCHLAND GMBH	Nexans	Alemania
8	INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JADROWEJ	INCT	Polonia
9	BELGISCH LABORATORIUM VAN DE ELEKTRICITEIT-SINDUSTRIE	Laborelec	Bélgica
10	KUNGLIKA TEKNISKA HOEGSKOLAN	KTH	Suecia
11	WESTINGHOUSE ELECTRIC SWEDEN AB	WSE	Suecia

Tabla 1. Países participantes.

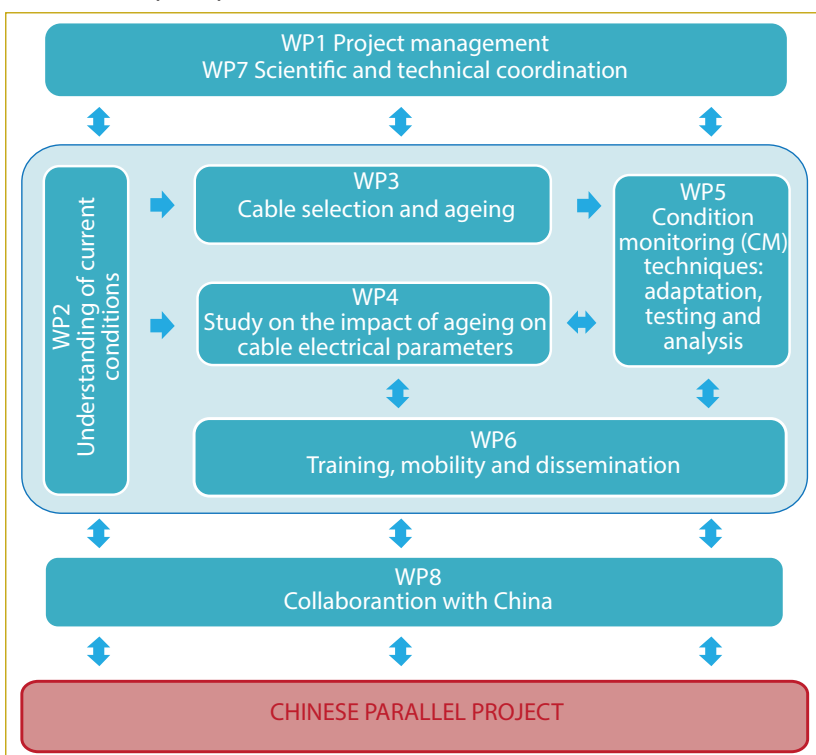


Figura 1: Estructura del proyecto.

- Proporcionar conocimiento para el diseño y formulación de la siguiente generación en cables de centrales nucleares con capacidades de diagnóstico eléctrico mejoradas.

Etapas del proyecto

La Figura 1 muestra las distintas fases del proyecto. Como resumen podemos destacar los siguientes puntos:

- **WP2. Estudio del estado del arte.** En esta etapa se han estudiado las distintas técnicas usadas actualmente para conocer el estado de los cables, se ha elaborado un documento explicando los distintos ensayos. Se ha estudiado también

los cables con más presencia en los distintas centrales de los países participantes.

- **WP3. Selección de cables y envejecimiento.** Se han seleccionado un grupo de cables representativo de cada uno de los países/centrales participantes; finalmente, los elegidos han sido los indicados en la Tabla 2.

Dependiendo de las muestras se ha realizado envejecimiento térmico y por radiación simultáneo o secuencial, y ensayo de accidente (LOCA) y post accidente.

En cada cable se ha reservado una muestra para simular un tipo

Cable Name	Producer	Type	Size	Sheath/insulation
RG - 59 B	Alcatel France	Coaxial	75 ohm	EVA/XLPE
CST74C068	Nexans	measurement/instrument	1p1mm ²	EVA/PE
ERR	Kabelwerk Eupen	LV power cable	5 x 2.5	EPDM/EVA
FSSR Lipalon from NPP	ASEA-Sweden	measurement/instrument	4 x 1	Hypalon/ EPDM
Lot CO 6249 04 – HN 33 S 25	Alcatel	LV power cable	3 x 35 mm ²	EPR/Hypalon
AFUMEX	Pirelli (Prysmian)	Instrumentation	2 x 1.5 mm ²	EPDM/EVA

Tabla 2. Listado de cables seleccionados.

Tipo de cable	Longitud	Defecto	Tamaño y disposición del defecto
Alcatel RG - 59 B	20 m	Presionado del 25%	10 cm mínimo, localizado a 1/3 de longitud de un extremo
Nexans CST74C068	20 m	Calentamiento local	2 m, localizado a 1/3 de longitud de un extremo
Eupen ERR	20 m	Calentamiento local	10 cm, localizado a 1/3 de longitud de un extremo
Forsmark FSSR	20 m	-	-
Alcatel CO 6249 04	20 m	Doblado con radio reducido	localizado a 1/3 de longitud de un extremo
Pirelli AFUMEX	20 m	Calentamiento local	2 m, localizado a 1/3 de longitud de un extremo

Tabla 3. Defectos simulados en los cables seleccionados

de defecto, con el objetivo de poder estudiar si las técnicas de monitorización ensayadas son capaces de detectar dichos defectos:

- **WP4. Estudio del impacto del envejecimiento en las propiedades eléctricas.** En esta tarea se estudia el impacto del envejecimiento en los distintos parámetros eléctricos de los cables. Los objetivos son los siguientes:

- Elegir las propiedades eléctricas que tienen mayor correlación con el envejecimiento.
- Entender la relación entre los procesos de envejecimiento y la evolución de los distintos parámetros eléctricos.
- Modelar el envejecimiento con agentes agresores múltiples (térmico y radiación).
- Estimar el tiempo de cambio de los cables, basándose en los modelos de propiedades de diagnóstico frente al comportamiento.
- Investigar cómo adaptar los diseños futuros de los cables a las técnicas de monitorización de la condición.

- **WP5. Técnicas de monitorización de estado.** Éste es el paquete de trabajo principal, ya que los resultados del proyecto se obtienen a partir de los trabajos realizados en esta actividad. Constituye, junto con el WP4, la mayor innovación del proyecto, ya que se intenta conseguir adaptar ciertas técnicas de ensayos eléctricos para que aporten información no sólo del estado de los cables (aceptable o dañado), sino para que sirvan como técnicas de monitorización del

envejecimiento de los cables y den información de la vida residual o remanente de los mismos. Entre los objetivos de este grupo de trabajo cabe señalar los siguientes:

- Adaptar y optimizar técnicas de *condition monitoring* para la detección del envejecimiento.
- Proporcionar procedimientos para realizar ensayos de *condition monitoring*.
- Valorar la idoneidad de ciertas técnicas para detectar envejecimiento en cables de cierta longitud, tanto envejecimiento local como global.
- Correlacionar indicadores de *condition monitoring* con otros datos por técnicas tradicionales, especialmente cerca del final de vida del cable.
- Verificar el rendimiento de las técnicas eléctricas en campo.
- Proporcionar recomendaciones y guías para la utilización de ensayos eléctricos de *condition monitoring* en cables eléctricos.
- Recopilar muestras de cables envejecidos y formar una base de datos con las medidas realizadas para uso futuro.

- **WP6. Formación, movilidad y dissemination.** Los objetivos de este paquete de trabajo son los siguientes:

- Transmitir el conocimiento en cableado eléctrico mediante la educación y el entrenamiento de estudiantes y jóvenes científicos.
- Promover la movilidad de estudiantes y profesionales jóvenes.

- Organizar seminarios en técnicas de diagnóstico y envejecimiento de cableado.
- Diseminar el conocimiento adquirido entre la comunidad científica.

EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO

La primera fase del proyecto se dedicó al estudio del estado del arte y la recopilación de información sobre los mecanismos de envejecimiento y condiciones ambientales a los que se ven sometidos los cables instalados en las centrales nucleares europeas, así como las técnicas de monitorización basadas en ensayos eléctricos y convencionales utilizadas hasta el momento.

En el paquete de trabajo WP3 se llevó a cabo la definición de los criterios apropiados para la selección de los cables a estudiar, se realizó una lista de cables instalados en las centrales nucleares europeas, y de dicha lista se seleccionaron seis cables representativos para su estudio.

Tras la elaboración de las especificaciones y procedimientos de los ensayos de envejecimiento, se comenzaron dichos ensayos. La realización de los ensayos de envejecimiento acelerado se dividieron entre tres de los socios: Westinghouse (WSE), NRL, y Tecnatom (TEC). En la Tabla 4 puede verse como se repartieron dichos trabajos.

Los cables se han envejecido térmicamente y por radiación durante un tiempo equivalente a 60 años de operación normal en central. Dicho envejecimiento se ha dividido en seis periodos de forma que cada una de las etapas de envejecimiento equi-

Cable	TA (envejecimiento térmico)	RA (envejecimiento por radiación)	LOCA
Alcatel RG - 59 B	WSE	NRI	WSE
Nexans CST74C068	TEC	NRI	TEC
Eupen ERR	NRI	NRI	NRI
Forsmark FSSR	NRI	NRI	NRI
Alcatel CO 6249 04	WSE	NRI	WSE
Pirelli AFUMEX	TEC	NRI	TEC

Tabla 4: Listado de laboratorios donde se realiza el envejecimiento de los cables.



Figura 2. Envejecimiento térmico en los laboratorios de Tecnatom.

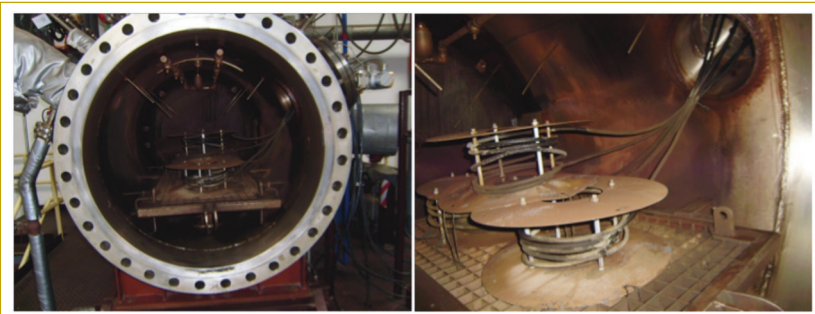


Figura 3. Ensayo LOCA en los laboratorios de Tecnatom.

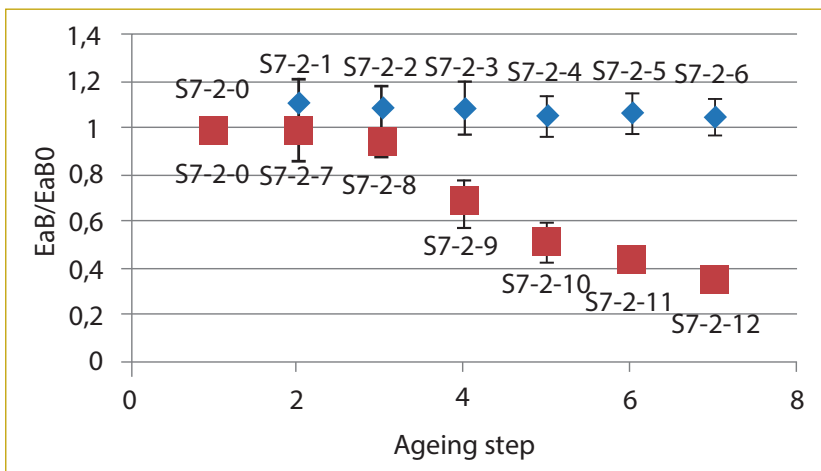


Figura 4. Elongación a rotura. Gráfico azul envejecimiento térmico y gráfico rojo envejecimiento térmico y radiación.

vale a 10 años de operación. De esta forma, tras cada una de las etapas de envejecimiento se han realizado ensayos eléctricos y convencionales para poder estudiar la evolución de las propiedades eléctricas y físicas de los cables.

En las figura 2 se pueden ver los cables dentro de una estufa térmica donde se realizó su envejecimiento térmico acelerado (Figura 2).

Una vez envejecidos los cables térmicamente y por radiación, se proce-

dió a realizar el ensayo de accidente LOCA (Figura 3).

A su vez, en el WP4 se han realizado ensayos de envejecimiento a diferentes niveles de radiación y temperatura, estudiando los cambios en las propiedades eléctricas causados por dicho envejecimiento, e intentando correlacionar dicha evolución con la degradación de los polímeros que constituyen el aislante y cubierta de los cables. De esta forma, los resultados obtenidos han servido para evaluar y modificar los ensayos realizados en el WP5 para la monitorización del envejecimiento de los cables. También se están investigando nuevos diseños de cables adaptados a las técnicas de monitorización.

Al mismo tiempo que se fueron realizando las actividades de envejecimiento se han llevado a cabo las actividades del WP5. En este paquete de trabajo se han realizado ensayos eléctricos y convencionales para la monitorización del envejecimiento de los cables. Las técnicas que se están estudiando son las siguientes:

- Tensile test.
- OIT/OITp (Oxidative induction Time/ Oxidative induction Temperature).
- Density.
- Insulation resistance.
- Capacitance and loss factor, tg delta
- TDR/FDR (Time Domain Reflectometry, Frequency Domain Reflectometry).
- Impedance.
- Attenuation.
- Space Charge Density Measurements.
- Dielectric Spectroscopy Tests.
- Charging/Discharging Current Tests.
- Partial Discharge Tests.
- Indenter.
- HPTLC (High Performance Thin Layer Chromatography).
- HPLC-GC (High performance liquid chromatography - Gas Chromatography).
- TGA (Thermogravimetric Analysis).
- Fire test.
- FTIR.
- Breakdown voltage.
- LIRA.

Actualmente el proyecto se encuentra en la última etapa donde se están analizando los resultados obtenidos durante los ensayos realizados a lo largo del proyecto y se obtendrán las principales conclusiones.

RESULTADOS EN LA MUESTRA N° 7

Se exponen a continuación algunos de los resultados encontrados en el cable Pirelli proporcionado por la central nuclear de Santa Mª de Garroña. La elección de este cable se ha

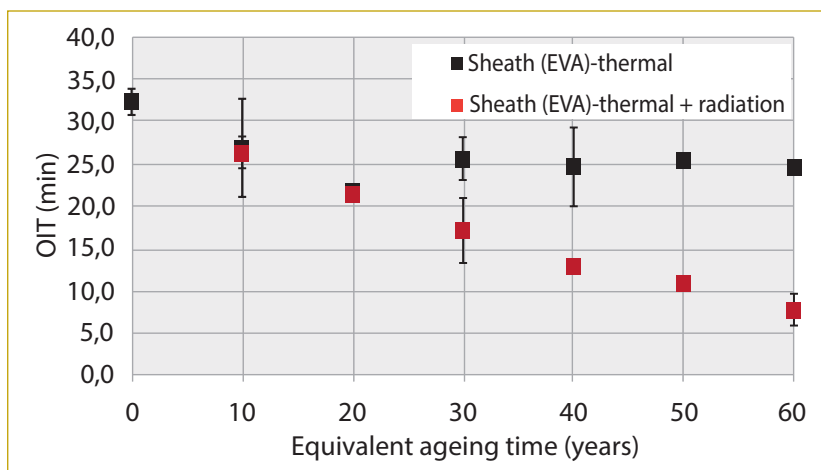


Figura 5. Resultados del OIT. Gráfico negro envejecimiento térmico y gráfico rojo envejecimiento térmico y radiación.

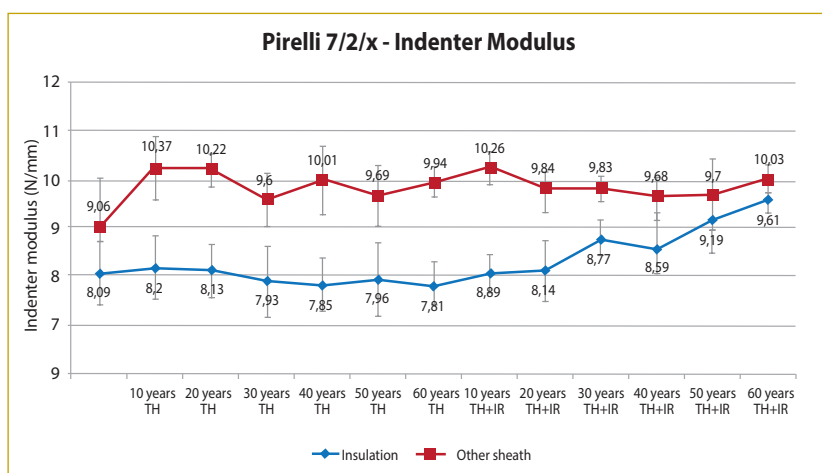


Figura 6. Resultado de indenter en la cubierta (gráfico rojo) y el aislamiento (gráfico azul) durante el envejecimiento térmico y por radiación.

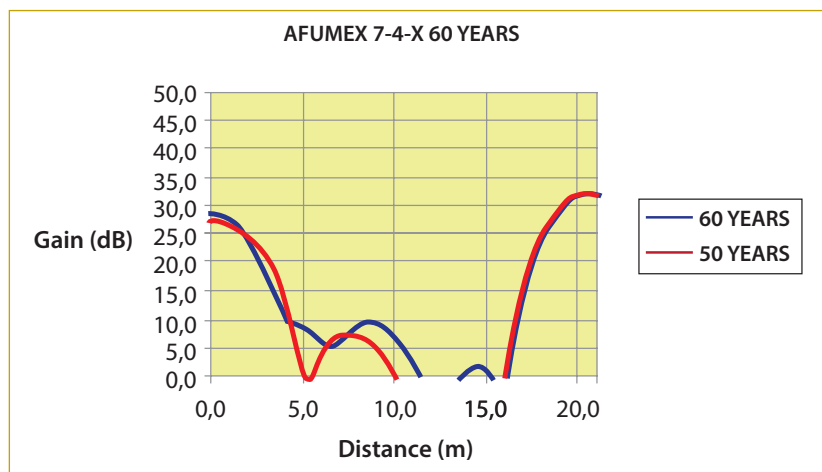


Figura 7. Resultado ensayo LIRA. Cable con defecto local.

debido a su elevada presencia en las centrales nucleares españolas. Anteriormente, en este mismo tipo de cable se han llevado a cabo estudios en los cuales se han hecho únicamente envejecimientos térmicos. En el estudio actual, se han llevado a cabo los siguientes envejecimientos acelera-

dos: térmico, por radiación (en dosis de operación y accidente), y ensayo de LOCA y post-LOCA. Las figuras 4, 5 y 6 muestran algunos de los resultados obtenidos en este cable en los distintos estados de envejecimiento.

Los resultados muestran que el cable Pirelli prácticamente no muestra

degradación por temperatura, esto lo habíamos comprobado en proyectos anteriores, sin embargo las técnicas usadas indican variación al aplicar envejecimiento por radiación, mostrando correlación notable en las técnicas utilizadas. El defecto local simulado en este cable ha sido un envejecimiento local en dos metros de cable situado a seis metros de uno de los extremos; esto se ve reflejado en la Figura 7, lo que demuestra la eficacia del ensayo LIRA para localizar envejecimientos o defectos locales.

CONCLUSIONES

Se han expuesto la estructura del proyecto Advance, las muestras a ensayar, el envejecimiento térmico y por radiación al que se someten, los ensayos elegidos para buscar correlación con el envejecimiento de los cables, y algunos de los resultados de los ensayos realizados en el cable Pirelli, cuyos resultados han mostrado buena correlación con el envejecimiento por radiación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de todas las empresas que han participado en este proyecto y su implicación en el mismo, tanto en tiempo como en conocimientos aportados.

REFERENCIAS

- Seventh framework programme. THEME [Fission-2010-2.1.1] Annex I – “Description of Work” 2010.
- D2.1 “Report on cables description, environmental conditions and function requirements”.
- D5.1 “Report on the adaptation of the selected electrical CM methods for ageing detection”. Advance Project.
- Condition monitoring of electrical cables using Line Resonance Analysis (LIRA). Paolo Fantoni, Gary J. Toman, Juan Carlos Cano. Sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies NPIC&HMIT 2009, Knoxville, Tennessee, April 5-9, 2009, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2009).■