

METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES: BASES FÍSICAS PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN ESPAÑA

IONISING RADIATION METROLOGY: PHYSICAL BASIS FOR THE RADIATION PROTECTION IN SPAIN

José M^a Los Arcos. Jefe del Programa de Metrología de Radiaciones Ionizantes. CIEMAT. / *Head of Ionising Radiation Metrology Program. CIEMAT.*

Antonio Brosed. Investigador del Grupo de Metrología de Radiaciones Ionizantes. CIEMAT. / *Scientist of the Ionising Radiation Metrology Group. CIEMAT.*

Francisco Fernández. Jefe del Grupo de Física de las Radiaciones. Departamento de Física. Universidad Autónoma de Barcelona. / *Head of Physics Department. Universidad Autónoma de Barcelona.*

Applying radiological protection principles and, in particular optimisation, requires a system of metrological references internationally traceable and to which be traced at the national level, through a well defined calibration chain. In this paper an overview of the activities done in the national standards laboratory and in the calibration laboratories existing in Spain is presented. As a conclusion it is established that, although the necessities at the protection level are reasonably covered for α , β , X and γ radiation, the lack of a neutronic reference laboratory is detected, to give metrological support to the two laboratories with capability for making irradiations or determinations of neutronic doses, currently operating in the country.

INTRODUCTION

The necessity of protecting the human beings from the detrimental effects of ionising radiations, demonstrated soon after its discovery at the end of the 19th century, gave rise to the discipline named "Radiological Protection".

At the beginning of the 20th century the first protecting recommendations and regulations are issued and several radiological protection organisations emerge, among which the

La aplicación de los principios de la Protección Radiológica, y, particularmente el de optimización, requiere un sistema de referencias metrológicas trazable internacionalmente y al cual trazarse al nivel nacional a través de una cadena de calibración bien definida. Se presenta una perspectiva de actividades del laboratorio de patrones nacionales y de los laboratorios de calibración existentes en España. Como conclusión se establece que, si bien las necesidades en niveles de protección están razonablemente bien cubiertas para radiación α , β , X y γ , se acusa la carencia de un laboratorio de referencia neutrónica capaz de dar soporte metrológico a los dos laboratorios con capacidad de efectuar irradiaciones o determinaciones de dosis neutrónica que ya operan en el país.

INTRODUCCIÓN

La disciplina denominada "**Protección Radiológica**" tiene su origen en la necesidad de proteger al ser humano frente a los efectos dañinos de las radiaciones ionizantes, puestos rápidamente en evidencia tras su descubrimiento a finales del siglo XIX.

Ya a comienzos del siglo XX se emiten las primeras recomendaciones y regulaciones protectoras y surgen diversas organizaciones para la protección radiológica, entre las que destaca la **International Commission on Radiological Protection** (ICRP, que bajo otra denominación se remonta a 1928) cuyas recomendaciones,

basadas en el análisis científico de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, han constituido los principios fundamentales para el establecimiento de los sistemas de protección radiológica que han venido inspirando las normas reguladoras de la comunidad internacional.

Así, la Publicación ICRP 26 [1] definió en 1977 los principios básicos de un sistema de protección radiológica: justificación, optimización y limitación de dosis, confirmados y reforzados posteriormente en 1991 por la **Publicación ICRP 60** [2] y recogidos en la Directiva 96/29/EURATOM de 13 de mayo de 1996 [3].

Todos estos requisitos han sido transcritos a la **legislación española** a través de diversas regulaciones [4-11] que son objeto de análisis en otro artículo de este mismo volumen ("Marco legal de la Protección Radiológica en España").

Un denominador común a todas estas regulaciones es el referente a los requisitos de calibración y de verificación periódica del correcto funcionamiento de los instrumentos de medición, según las exigencias metroológicas específicas de cada área de aplicación de la protección radiológica.

Por ello, los requerimientos de **trazabilidad metroológica a patrones** bien establecidos han sido siempre especialmente demandados y todos los países desarrollados han incorporado a sus respectivos institutos metroológicos nacionales un **sistema de patrones nacionales para radiaciones ionizantes** que intenta cubrir las necesidades de calibración relativas tanto a la emisión radiactiva de los diferentes radionucleidos como a su interacción con los medios materiales en su aspecto dosimétrico, como pilares físicos sobre los que

se sustenta la aplicación de los principios de la protección radiológica en las diversas áreas.

LOS PATRONES NACIONALES PARA RADIACIONES IONIZANTES: LMRI-CIEMAT

En España, las referencias metroológicas en el área de las radiaciones ionizantes están definidas mediante el Real Decreto 533/1996 [12] por el que el Centro Español de Metrología (CEM), declara al Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del CIEMAT (LMRI-CIEMAT) depositario de los Patrones Nacionales de las magnitudes Actividad, Exposición, Kerma y Dosis Absorbida y, al mismo tiempo, Laboratorio Asociado al CEM para las radiaciones ionizantes.

En consecuencia, **el LMRI-CIEMAT es responsable, en nombre del Estado, de establecer, conservar y difundir los Patrones Nacionales para radiactividad y magnitudes dosimétricas**, asumiendo la representación internacional de España en este área frente a los institutos metroológicos nacionales de otros países y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). En particular, dichos Patrones fueron establecidos en la Orden de 11 de abril de 1996, del M^e de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente [13].

Para cumplir sus objetivos, el LMRI-CIEMAT dispone de dos instalaciones radiactivas, la IR13 "Laboratorios de Metrología de Radionucleidos", y la IR14 "Laboratorios de Patrones Dosimétricos", donde mantiene los patrones y presta servicios de calibración en las respectivas áreas. En la Figura 1 se ofrece una perspectiva general

International Commission on Radiological Protection (ICRP), which with other name was founded in 1928) has to be highlighted, whose recommendations, based in the scientific analysis of the biological effects of ionising radiations, have constituted the basic principles to establish the radiological protection systems that have guided the regulatory policies in the international community.

Thus, the ICRP Publication 26 [1] defined in 1977 the basic principles of a radiological protection system: justification, optimisation and dose limitation, subsequently confirmed and strengthened in 1991 in ICRP Publication 60 [2], and which have been incorporated in the Directive 96/29/EURATOM of May 13th 1996[3].

All these requirements have been transposed into the Spanish Legislation through several regulations [4-11], which are described in another paper of this journal (Legal Framework of Radiological Protection In Spain).

All these regulations have in common the requirement for periodical calibration and verification of the correct operation of the measurement instruments, according to the metrological requirements specific to each area of application within radiological protection.

Therefore, the requirements of metrological traceability to well established standards have always been specially demanded and all the developed countries have incorporated into their respective national metrology institutes a system of national standards for ionising radiations, which tries to cover the calibration necessities related both to the radioactive emission of the different radionuclides, and to their interactions with matter in its dosimetric aspect, as physical basis on which the application of the radiological protection principles in the different areas is sustained.

THE NATIONAL STANDARDS FOR IONISING RADIATIONS: LMRI-CIEMAT.

In Spain, the metrological references in the area of ionising radiations are defined through the Royal Decree 533/1996 [12] in which the Spanish Centre of Metrology (CEM) declares the Ionising Radiation Metrology Laboratory of the CIEMAT (LMRI-CIEMAT) the legal trustee of the National Standards of the quantities Activity, Exposure, Kerma and Absorbed Dose and, at the same time, Associated Laboratory to the CEM for ionising radiations.

As a consequence, the LMRI-CIEMAT is responsible, on behalf of the State, for the establishment, conservation and dissemination of the National Standards for radioactivity and dosimetric quantities, assuming the international representation of Spain in this field before the national metrology

institutes of other countries and the international Bureau des Poids et Mesures (BIPM). In particular, such standards were established in the Ministerial Act of April 11th 1996, Ministry for Public Works, Transports and Environment [13].

To fulfil its objectives, the LMRI-CIEMAT operates two radioactive facilities, the IR13 "Radionuclide Metrology Laboratories" and the IR14 "Dosimetric Standards Laboratories" where the standards are maintained and which render calibration services in their respective fields. A general view of some of their facilities and services is shown in Figure 1.

The facility IR13 holds the reference instruments, primary (absolute) or secondary, that constitute the practical realization of the **National Standard of Activity for α -, β - or γ - emitting radionuclides**:

- Two, primary, $4\pi\beta(\text{CP})-\gamma(\text{NaI})$ coincidence counters (atmospheric and pressurized), for β - γ emitters,
- An ionisation chamber with grid and a low-geometry chamber, for α emitters (both of them primary),
- Two liquid scintillation counters for β -, β^+ emitters and electron-capture radionuclides.

Besides, other secondary instruments are also used: proportional counters, α - and β -spectrometry systems with semiconductor detectors and well-type ionisation chambers, traced to the formers. The uncertainty reached depends on the reference instrument and on the radionuclide used, but in optimal situations it is around 0.1 % ($k=1$) and, in most cases, lower than 1%, which represents a level equivalent to, or even better than, that of the other metrology laboratories of the developed countries in our environment.

The facility IR14 has four laboratories that hold the **National Standards for dosimetric quantities of**:

- γ radiation at protection levels (^{137}Cs y ^{60}Co),
- γ radiation at therapy levels (^{60}Co),
- X rays (21 qualities ISO4037, wide and narrow spectrum, from 10 to 300 kV,
- β radiation at protection levels ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ^{147}Pm y ^{204}Tl).

The reference instruments are constituted by one primary chamber for X rays up to 50 kV, 3 Shonka-type ionisation chambers, two NE2551 and NE2575C ionisation chambers and a set of reference beta sources. The optimum uncertainty that can be reached is around 0.5% ($k=1$) and in most cases is lower than 2%.

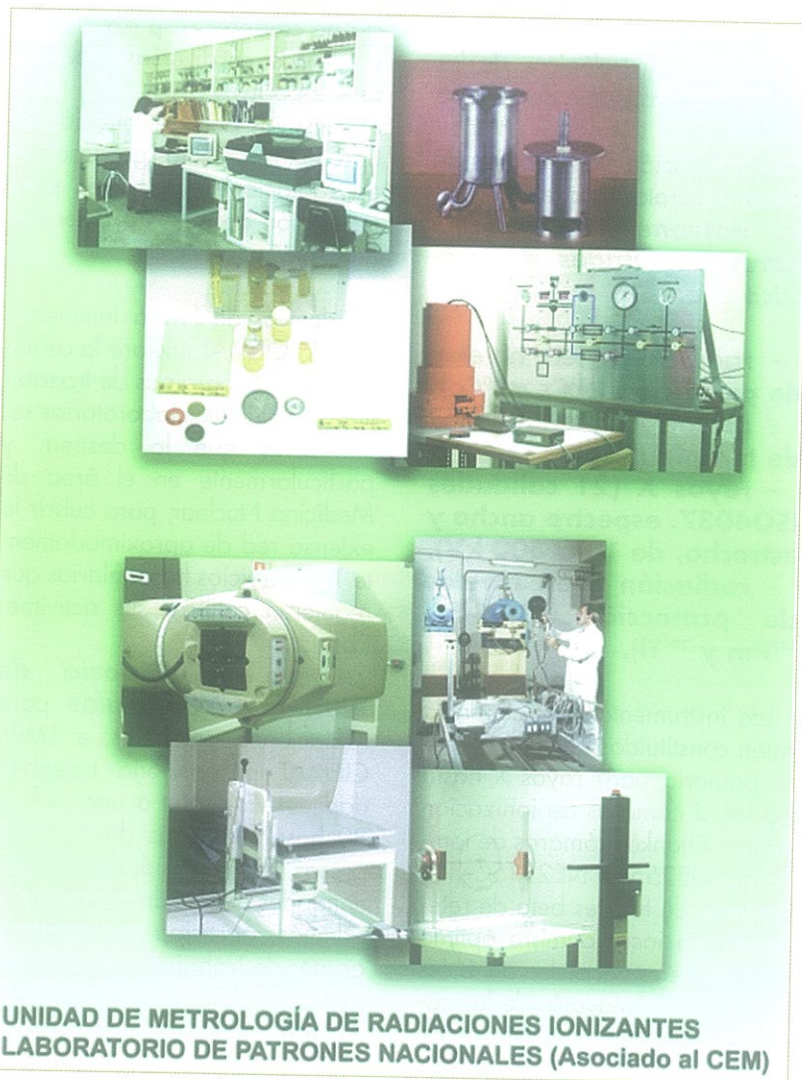


Figura 1. Perspectiva de instalaciones y actividades del LMRI-CIEMAT.
Figure 1. View of facilities and activities of the LMRI-CIEMAT.

de algunas de sus instalaciones y servicios.

La instalación IR13 alberga los instrumentos de referencia, primarios (absolutos) o secundarios, que constituyen la realización práctica del **Patrón Nacional de Actividad de radionucleidos emisores α , β o γ** :

- dos contadores primarios (atmosférico y presurizado), de coincidencias $4\pi\beta(\text{CP})-\gamma(\text{NaI})$, para emisores β - γ ,
- una cámara de ionización con reja y una cámara de baja geometría, para emisores α (ambas primarias),

- dos espectrómetros de centelleo líquido para emisores β -, β^+ y de captura electrónica.

Además, se utilizan también otros de carácter secundario: contadores proporcionales, sistemas de espectrometría alfa y gamma con detectores de semiconductor y cámaras de ionización de pozo, trazados a los anteriores. La incertidumbre alcanzable depende del instrumento de referencia y del radionucleido en cuestión, pero en casos óptimos es del orden del 0,1% ($k=1$) y, en la mayoría de los casos, inferior al 1%, lo que representa un nivel equivalente a,

cuando no mejor que, el de otros laboratorios metrológicos de los países desarrollados de nuestro entorno.

La instalación IR14 consta de cuatro laboratorios que albergan los **Patrones Nacionales para magnitudes dosimétricas de:**

- radiación γ en niveles de protección (^{137}Cs y ^{60}Co),
- radiación γ en niveles de terapia (^{60}Co),
- rayos X (21 calidades ISO4037, espectro ancho y estrecho, de 10 a 300 kV),
- radiación β en niveles de protección ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{147}Pm y ^{204}Tl).

Los instrumentos de referencia están constituidos por una cámara primaria para rayos X hasta 50 kV, 3 cámaras de ionización de tipo Shonka, cámaras de ionización NE2551 y NE2575C y un conjunto de fuentes beta de referencia. La incertidumbre óptima alcanzable es del orden del 0,5% ($k=1$) y en la mayoría de los casos es inferior al 2%.

El LMRI-CIEMAT ofrece actualmente diversos tipos de **servicios de calibración**, emitiendo anualmente más de 400 certificados de calibración con trazabilidad expresa al correspondiente patrón nacional para:

- monitores de radiación portátiles o de área,
- alarmas de nivel de radiación,
- monitores de contaminación superficial,
- patrones de referencia de radiación gamma o X (niveles de protección y ambientales),
- patrones de referencia de radiación gamma (radioterapia),
- asignación de dosis a dosímetros pasivos (rayos X, ^{137}Cs y ^{60}Co),
- fuentes radiactivas de referen-

cia de emisores α , β o γ , sólidas o líquidas, en diversas geometrías y soportes,

- ensayos para aprobación de tipo de instrumentos generadores de radiaciones ionizantes para inspección de bultos o detección de explosivos.

Además, de forma inminente, el LMRI-CIEMAT iniciará la certificación de programas de trazabilidad de aquellos laboratorios secundarios que lo deseen, y particularmente en el área de Medicina Nuclear, para cubrir la extensa red de aproximadamente 140 servicios hospitalarios que requieren calibrar sus activímetros.

Como Laboratorio de Patrones Nacionales para radiaciones ionizantes, el LMRI-CIEMAT proporciona trazabilidad **en España** a una red de 80 hospitales, más de 100 empresas, 20 universidades y varias entidades de la Administración y, además, participa en comités y grupos de Trabajo de diversos organismos (CEM, ENAC, CSN, AENOR, ...) y sociedades científicas nacionales (SEFM, SEPR, SEMN, SERFA, ...).

En el **contexto metrológico internacional**, el LMRI-CIEMAT está sujeto al denominado **Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de los Patrones Nacionales y Certificados de Calibración** (MRA) [14] firmado en 1999 por los Laboratorios de Patrones Nacionales de la mayoría de países representados en el Comité Internacional de Pesas y Medidas. Según exige el MRA, el LMRI-CIEMAT ha implantado un Sistema de Calidad conforme a la norma ISO 17025:1999 [15], que ha sido aprobado por el Comité QS-FORUM de EURO-MET en 2003, y participa regularmente en las Comparaciones Clave organizadas por el BIPM o

The LMRI-CIEMAT currently offers several types of calibration services, annually issuing more than 400 calibration certificates, with explicit traceability to the corresponding national standard, for:

- Radiation monitors, portable or for area survey,
- Radiation level alarms,
- Surface contamination monitors,
- Reference standards for gamma- or X-radiation (protection and environmental levels),
- Reference standards for gamma radiation (radiotherapy),
- Dose assignment to passive dosimeters (X rays, ^{137}Cs y ^{60}Co),
- X-ray peak voltage/quality equipment in radiodiagnostic.
- Reference radioactive sources of α -, β - or γ -emitters, solid or liquid, in several geometries and supports,
- Type approval testing of instruments producing ionising radiations for baggage inspection or explosive detection.

Besides, beginning soon, the LMRI-CIEMAT will start the certification of traceability programmes of those secondary laboratories interested, and in particular in the field of nuclear medicine, to cover the wide hospital network with approximately 140 services that need to calibrate their activimeters.

As National Standards Laboratory for ionising radiations, the LMRI-CIEMAT gives traceability in Spain to 80 hospitals, more than 100 enterprises, 20 universities and several Government Agencies and, besides, collaborate in committees and working groups of several organisations and National Scientific Societies.

In the international metrological context, the LMRI-CIEMAT is subject to the arrangement **"Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes"** (MRA), signed in 1999 by the National Standards Laboratories of most of the countries represented in the "Comité International des Poids et Mesures" (CIPM). As the MRA required, the LMRI-CIEMAT has implemented a Quality System compliant with the ISO Standard 17025:1999, which was approved by the QS-FORUM Committee of EUROMET in 2003, and regularly participates in the Key Comparisons organised by the BIPM or EUROMET, to establish the level of equivalence between the national standards of each country. Therefore, as the MRA foreseen, as of January 2004 the certifications of LMRI-CIEMAT have the international recognition of the other national standards laboratories, European and non European, that have also reached this qualification.

Laboratories for α , β , γ radiations.

Apart from the LMRI-CIEMAT, there are in Spain several other laboratories that also offer calibration services in the ionising radiation field:

- The Dosimetry and Calibration Laboratory-INTE (Polytechnic University, Barcelona), accredited by ENAC for calibration of monitors/dosimeters for γ , β and X-ray radiations, contamination monitors and X-ray peak voltage/quality equipment in radiodiagnostic,

- The Ionising Radiation Metrology Laboratory-Dosimetry National Centre (CND) (Health and Consumers Ministry) accredited by ENAC, for calibration of X-rays monitors,

- Several nuclear power stations, two public bodies and some commercial companies, also have calibration laboratories (with restricted scope) for radioprotection monitors, for their own use or for third parties, without accreditation, and using secondary standards traced either to LMRI-CIEMAT or to foreign laboratories.

With regard to testing and measurements, there also exist several laboratories, with standards of different traceability, depending on the origin of the instrument or reference material used:

- Radioactivity Analysis Laboratory and Thermoluminescent Dosimetry Laboratory-INTE (Polytechnic University, Barcelona), accredited by ENAC,

- Low-Level Activity Measurements Laboratory-Nuclear Engineering and Fluid Mechanics Department (Basque Country University), accredited by ENAC,

- Environmental Isotopes Laboratory-CIEMAT, accredited by ENAC.

It should be mentioned here also the approximately 24 Personal Dosimetry Services and 8 Environmental Dosimetry Services, authorised and inspected by the Nuclear Safety Council (CSN), that usually are traced to the LMRI-CIEMAT or to other calibration laboratory previously mentioned. Every 5 years, the CSN organises inter-laboratory exercises through blind samples, considering as reference the irradiations made in the LMRI-CIEMAT and in the INTE on TLD dosimeters distributed to the participants.

Besides, to check the environmental radiological quality in the national territory, the CSN has established several networks: in the surroundings of nuclear power stations, with the corresponding "Environment Radiological Monitoring Programmes" (PVRAs), a nation-wide radiological vigilance network with 25 automatic stations (REA),

EUROMET para establecer el grado de equivalencia entre los patrones nacionales de cada país. Por consiguiente, según establece en el MRA, **desde Enero de 2004, las certificaciones del LMRI-CIEMAT tienen el reconocimiento internacional** de los restantes laboratorios de patrones nacionales, europeos y no europeos, que hayan también alcanzado esta cualificación.

LABORATORIOS DE CALIBRACIÓN Y DE ENSAYO EN ESPAÑA

Laboratorios para radiación α , β , X y γ .

Aparte del LMRI-CIEMAT, existen en España otros laboratorios que también ofrecen servicios de **calibración** en el área de las radiaciones ionizantes:

- El Laboratorio de Dosimetría y Calibración-INTE (Universidad Politécnica de Cataluña), acreditado por ENAC, para calibración de monitores/dosímetros de radiación gamma, β , rayos X, monitores de contaminación y medidores de tensión de pico y calidad en radiodiagnóstico,

- El Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes-Centro Nacional de Dosimetría (CND) (Ministerio de Sanidad y Consumo), acreditado por ENAC, para calibración de monitores de rayos X,

- Varias centrales nucleares, dos entidades públicas y algunas firmas comerciales, también disponen de laboratorios de calibración (con alcance restringido) de medidores de radioprotección, para uso propio o de terceros, sin acreditación y utilizando patrones secundarios trazados al LMRI-CIEMAT o a laboratorios extranjeros.

En el apartado de los **ensayos o mediciones**, existen también varios laboratorios, con patrones de diversa trazabilidad, según el origen del instrumento o material de referencia utilizado:

- Laboratorio de Análisis de Radiactividad y Laboratorio de Dosimetría Termoluminiscente-INTE (Universidad Politécnica de Cataluña), acreditado por ENAC,

- Laboratorio de Medidas de Baja Actividad (LMBA)-Depto. de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos (Universidad del País Vasco), acreditado por ENAC,

- Laboratorio de Isótopos Ambientales-CIEMAT, acreditado por ENAC.

Hay que mencionar también aquí a los aproximadamente 24 **Servicios de Dosimetría Personal** y 8 **Servicios de Dosimetría Ambiental**, autorizados e inspeccionados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), que se trazan habitualmente al LMRI-CIEMAT o a alguno de los otros laboratorios de calibración mencionados. Aproximadamente cada 5 años, el CSN realiza ejercicios interlaboratorios mediante pruebas ciegas, tomando como referencia las irradiaciones efectuadas por el LMRI-CIEMAT y el INTE sobre dosímetros TLD distribuidos a los participantes.

Asimismo, para vigilar la calidad radiológica ambiental en todo el territorio nacional, el CSN ha establecido **diversas redes**: en el entorno de instalaciones nucleares, con los correspondientes Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental (**PVRAs**), una red de vigilancia radiológica de ámbito nacional con 25 estaciones automáticas (REA), complementada con la red de 900 estaciones de la Red de Alerta de Radiactividad (**RAR**) de la

Dirección General de Protección Civil, y la Red de Estaciones de Muestreo (**REM**) integrada por 21 laboratorios mayoritariamente pertenecientes a Universidades de todo el país. Estos laboratorios utilizan patrones trazables al LMRI-CIEMAT o a otros laboratorios nacionales o extranjeros, según los casos. Periódicamente, el CSN organiza ejercicios interlaboratorios mediante caracterización de muestras ciegas, y para los que el LMRI suministra las muestras de referencia certificadas al Laboratorio de Radiactividad Ambiental del CIEMAT, coordinador de estos ejercicios.

Laboratorios neutrónicos

Si bien no existe en España un laboratorio de calibración neutrónica propiamente dicho, hay que mencionar al menos 2 laboratorios que cuentan ya con una bien probada experiencia en medidas espectrométricas y dosimétricas:

- Grupo de Física de las Radiaciones. Departamento de Física. Universidad Autónoma de Barcelona (GFR-UAB),
- Laboratorio de Medidas Neutrónicas. Departamento de Ingeniería Nuclear. Universidad Politécnica de Madrid (LMN-UPM).

En el caso del GFR-UAB, su experiencia se remonta a 1985, con estudios experimentales de radiación cósmica, integrándose en 1990 a la colaboración EURADOS/CENDOS, para dosimetría personal de neutrones con detectores de trazas y participando en dos comparaciones internacionales, en 1990 y 1992, que permitieron mejorar el diseño del detector hasta lograr una aceptable respuesta en energía en un amplio margen de energías y un

límite de detección de 60 μSv en el rango de energías entre 144 keV y 15 MeV y ángulos de incidencia comprendidos entre 0° y 60° .

Con el fin de estimar adecuadamente las dosis equivalentes recibidas por el personal que trabaja en instalaciones nucleares, el GFR-UAB ha implantado, en colaboración con el IRSN (Cadache), un espectrómetro de esferas Bonner y los programas necesarios para determinar los espectros neutrónicos existentes en algunos puntos de interés del recinto de contención de la Central Nuclear de Vandellós II (Figura 2), desarrollando el código de deconvolución propio MITOM. Como resultado, se dispone de un sistema de espectrometría neutrónica de carácter secundario, trazado al IRSN, con incertidumbres en la fluencia neutrónica total y dosis equivalente del orden del 4% y 5%, respectivamente [16,17].

En la actualidad, se ejecuta un proyecto del plan Nacional I+D con el objetivo de caracterizar los espectros neutrónicos en aceleradores lineales de electrones (LINAC's), partiendo del espectrómetro Bonner y sustituyendo el detector de ^3He por diferentes detectores pasivos con el fin de obtener un espectrómetro adaptado a las características particulares del intenso campo gamma presente.

Por su parte, el LMN-UPM ha acondicionado en los últimos años una amplia sala de irradiación neutrónica, con dos fuentes de $^{241}\text{Am-Be}$ de 77 y 111 GBq, una cuba cilíndrica de agua para irradiaciones con neutrones termalizados, un sistema de esferas de Bonner con un pequeño detector de centelleo de $^6\text{LiI(Eu)}$, y una bancada de precisión para poder efectuar irradiaciones en aire de monitores de área y dosímetros neutrónicos [18], mediante un

complemented with the network of 900 stations of the "Radioactivity Alert Network" (RAR) of the Civil Protection Agency and the "Sampling Stations Network" (REM) consisting of 21 laboratories mainly from Spanish Universities. These laboratories use standards with different traceability, to the LMRI-CIEMAT or to other national or foreign laboratories, depending on each particular case. Periodically, the CSN organises inter-laboratory exercises using blind samples, and the LMRI-CIEMAT supplies the certified reference sources to the exercise coordinator namely the Environmental Radioactivity Laboratory of the CIEMAT.

Neutronic laboratories

Although in Spain there is not a true neutronic calibration laboratory, there are at least two laboratories which nowadays have a well proved experience in spectrometric and dosimetric measurements:

- Radiation Physics Group. Physics Department of the Autonomous University of Barcelona (GFR-UAB),
- Neutronic Measurements Laboratory. Nuclear Engineering Department. Polytechnic University of Madrid (LMN-UPM).

The GFR-UAB started working in the field in 1985, performing experimental studies of cosmic radiation, joining later in 1990 the collaboration EURADOS/CENDOS, for neutron personal dosimetry using track detectors and participating in two international comparisons, in 1990 and 1992, that allowed to improve the detector design to reach a reasonable response for a wide range of energies and a detection limit of 60 μSv in the range of energies between 144 keV and 15 MeV with incidence angles between 0° and 60° .

With the aim of improving the estimation of the equivalent doses received by personnel working in nuclear facilities, the GFR-UAB has implemented, in collaboration with the IRSN (Cadache), a Bonner spheres spectrometer and the programmes necessary to determine the neutron spectra at some points of interest of the contention enclosure in the nuclear power station Vandellós II (Figure 2), developing the deconvolution code MITOM. As a result, a neutron spectrometry system is available, traced to the IRSN, with uncertainties in the total neutron fluence and equivalent dose of around 4% and 5%, respectively [16,17].

Nowadays, a new project supported by the National R+D Programme is ongoing in order to characterise the neutron spectra in electron linear accelerators (LINAC's), using the Bonner sphere system and substituting the detector of ^3He by different passive detectors, with the aim of getting an spectrometer adapted to the particular characteristics of the intense gamma fields present.

Regarding the LMN-UPM, it has set up in the last years a wide room for neutron irradiation, with two $^{241}\text{Am-Be}$ sources of 77 and 111 GBq, a cylindrical water tub for thermal neutrons irradiations, a Bonner spheres system with an small scintillation detector of $^6\text{LiI(Eu)}$, and a precision bench to make irradiations in air of area monitors and neutron dosimeters [18], using a pneumatic device for storage, transport and positioning of the source in use. The sources, with maximal fluence rate of $6,62 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$, are calibrated by the manufacturer, but according to ISO Standard 8529-1:2001 [19], it must be periodically calibrated, with a high cost.

Through detailed Monte Carlo studies using the code MCNP-4C, the neutron field of the laboratory with the source of $^{241}\text{Am-Be}$ in irradiation position has been characterised, evaluating the fluence of disperse neutrons and the anisotropy effect, and comparing the results with those obtained with the Bonner sphere system, using the code BUNKIUT for deconvolution purposes. It has also been compared the environmental equivalent dose obtained by calculations using MCNP-4C, with the values obtained in the spectrometric measurements and with a direct measurement using the Berthold LB6411 dosimeter, and cooperative work has been developed with the CIEMAT Programme "Radiation Dosimetry".

The results indicate that the discrepancies between mathematical calculations and experimental measurements are lower than 8%, that the contribution of the radiation dispersed by the walls to the environmental equivalent dose is lower than 20% of the total dose, and that the uncertainty in $H^*(10)$ due to anisotropy is around 4.4%.

Although the results are satisfactory for both laboratories, the chain of traceability will improve in precision, simplicity and costs reduction, if a neutron metrology laboratory were implemented in Spain, with capability to standardise isotopic sources and to give support to both laboratories and to other users.

CONCLUSIONS

Applying the basic principles of radiological protection, and in particular the optimisation, requires a system of metrologic references internationally traced and to which be traced at the national level through a well defined calibration chain. Although the necessities at the protection level are reasonably well covered for α , β and γ radiation, the lack of a neutron metrology laboratory is detected, which should have neutron capabilities to give metrological support to the two laboratories that currently perform neutron irradiations and estimations of neutron doses, and to other users.

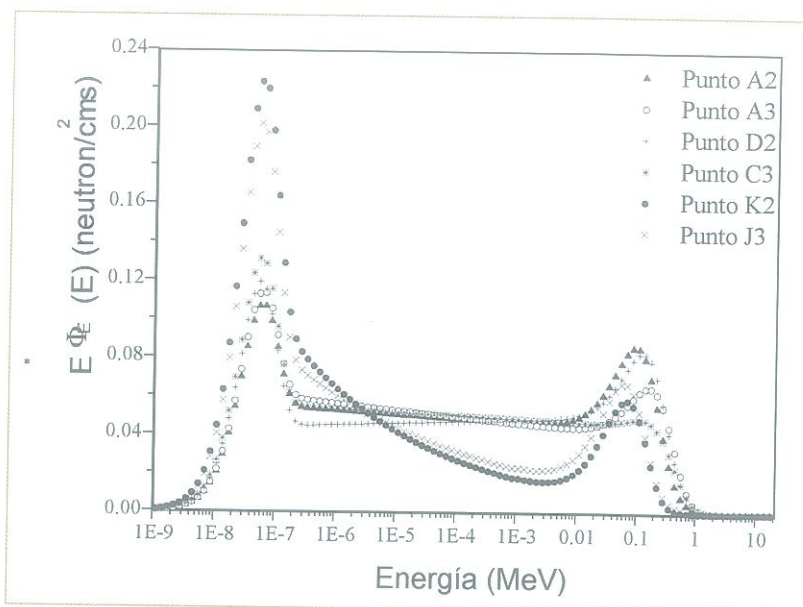


Figura 2. Espectros neutrónicos por espectrometría Bonner en Vandellós II.
Figure 2. Neutron spectra from Bonner spectrometry in Vandellós II.

dispositivo neumático de almacenamiento, transporte y posicionamiento de la fuente en uso. Las fuentes, con tasa de fluencia $6,62 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$, están calibradas en origen por el fabricante pero, según la norma ISO 8529-1:2001 [19], necesitan ser recalibradas periódicamente, con un elevado coste.

Mediante estudios Monte Carlo detallados con el código MCNP-4C, se ha caracterizado el campo neutrónico del laboratorio con la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ en posición de irradiación, así como el efecto de anisotropía, y se ha evaluado la fluencia de los neutrones dispersos y comparado los resultados con los obtenidos mediante el espectrómetro Bonner, empleando el código BUNKIUT para deconvolucionar las medidas. También se ha comparado la asignación de dosis equivalente ambiental obtenida mediante cálculo con MCNP-4C, con la obtenida de las medidas espectrométricas, y con la medida directamente con el dosímetro Berthold LB6411 y se ha colaborado con el Programa de Dosi-

metría de Radiaciones del CIE-MAT en estudios conjuntos sobre dosimetría neutrónica.

Los resultados indican que las desviaciones entre cálculos y medidas experimentales resultan siempre inferiores al 8%, que la contribución de la radiación dispersa por las paredes a la dosis equivalente ambiental es inferior al 20% del total y que la incertidumbre en $H^*(10)$ debido a la anisotropía de la fuente es del orden del 4,4%.

Aunque los resultados son satisfactorios para ambos laboratorios, la cadena de trazabilidad ganaría en precisión, simplicidad y reducción de costes si se implantase en España un laboratorio de metrología neutrónica, capaz de calibrar fuentes isotópicas e instrumentos de transferencia para dar soporte a los dos laboratorios y otros usuarios existentes.

CONCLUSIONES

La aplicación de los principios básicos de la Protección Radiológica, y particularmente el de

optimización, requiere de un sistema de referencias metrológicas trazable internacionalmente y al cual trazarse al nivel nacional a través de una cadena de calibración bien definida. Si bien las necesidades en niveles de protección están razonablemente bien cubiertas para radiación α , β , X y γ , se acusa la carencia de un laboratorio de referencia neutrónica que debería dar soporte metrológico a los dos laboratorios con capacidad de efectuar irradiaciones o determinaciones de dosis neutrónica que ya operan en el país, así como a otros usuarios.

REFERENCIAS

[1] ICRP 26*. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted 1977). Annals of the ICRP, Vol.1, No.3 (1977).

[2] ICRP 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiation Protection (adopted 1990) Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3 (1991).

[3] Directiva 96/29/EURATOM del consejo, de 13 de mayo de 1996, por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. DOCE 159/L, de 29-06-96.

[4] Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. Publicado en el BOE (26/07/2001).

[5] Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas. Publicado en el BOE (31/12/1999).

[6] Real Decreto 1132/90 de 14 de septiembre, por el que se establecen medidas fundamentales de protección radiológica de las personas sometidas a exámenes y tratamientos médicos (BOE 18/09/1990).

[7] Real Decreto 413/1997 de 21 de marzo, sobre protección operacional de los trabajadores externos con riesgo de exposición a radiaciones io-

nizantes por intervención en zona controlada (BOE 16/04/1997).

[8] Real Decreto 815/2000 de 13 de julio sobre justificación del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas (BOE 14/07/2001).

[9] Real Decreto 1841/1997 de 5 de diciembre, por el que se establecen los Criterios de Calidad en Medicina Nuclear (BOE 19/12/1997).

[10] Real Decreto 1566/1998 de 17 de julio, por el que se establecen los Criterios de Calidad en Radioterapia (BOE 28/08/1998).

[11] Real Decreto 1976/1999 de 23 de diciembre, por el que se establecen los Criterios de Calidad en Radiodiagnóstico (BOE 29/12/1999).

[12] Real Decreto 533/1996 de 15 de marzo, por el que se declara al LMRI-CIEMAT laboratorio depositario de los patrones nacionales de actividad, exposición, kerma y dosis absorbida (BOE 29/03/1996).

[13] Orden de 11 de Abril de 1996 del M^e de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones, por la que se declaran los patrones nacionales de las unidades de actividad, exposición, kerma y dosis absorbida (BOE 24/04/1996).

[14] CIPM, Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Comité International des Poids et Mesures. BIPM, Sèvres (1999).

[15] ISO Standard 17025: 1999. General Requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

[16] Fernández F., Espectrometría de neutrones aplicada a la dosimetría. Radioprotección, 34 (2002)37.

[17] Muller H., Fernández F., Van Ryckeghem L., Alexandre P., Bouassoule, T., Pochat J.-L. and Tomas M.. Monte Carlo calculations and experimental results of Boner spheres systems with a new cylindrical helium-3 proportional counter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A476, (2002)411.

[18] Gallego E, Lorente A. y Martín-Fuertes F., Calibración de monitores de área y dosímetros de neutrones, Radioprotección, 34 (2002)45.

[19] ISO Standard 8529-Part 1:2001. Reference neutron radiations. Characteristics and methods of production.

REFERENCES

[1] ICRP 26*. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted 1977). Annals of the ICRP, Vol.1, No.3 (1977).

[2] ICRP 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiation Protection (adopted 1990) Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3 (1991).

[3] Consejo DIRECTIVE 96/29/EURATOM, dated May 13, 1996, establishing the basic rules regarding health protection of workers and the population against the risks resulting from ionizing radiation (D.O.C.E. Series L no. 159, dated 29/06/1996).

[4] Royal Decree 783/2001 dated July 6, on health protection against ionizing radiation (BOE 27284-27393; 2001).

[5] Royal Decree 1836/1999; on Nuclear and Radioactive Facilities (BOE 46463-46481; 1999).

[6] Royal Decree 1132/90 dated September 14, by which the basic actions of radiological protection for persons undergoing medical exams and treatments are established (BOE 18/09/1990).

[7] Royal Decree 413/1997 dated March 21, regarding operational protection of outside workers at risk of exposure to ionizing radiation by working in controlled zones (BOE 11957-11959; 1997).

[8] Royal Decree 815/2001 dated July 13, on justification of the use of ionizing radiation for radiological protection of people on occasion of medical exposures (BOE 13626-13631; 2001).

[9] Royal Decree 1841/1997, dated December 5, by which the Quality Criteria for Nuclear Medicine are established (BOE 19/12/1997).

[10] Royal Decree 1566/1998, dated July 17, by which the Quality Criteria for Radiotherapy are established (BOE 28/08/1998).

[11] Royal Decree 1976/1999, dated December 23, by which the Quality Criteria for Radiodiagnosis are established (BOE 29/12/1999).

[12] Royal Decree 533/1996, dated March 15, by which the LMRI-CIEMAT is declared the legal trustee of the National Standards of the magnitudes Activity, Exposure, Kerma and Absorbed Dose (BOE 29/03/1996).

[13] Ministerial Act of April 11th 1996, of the Ministry for Public Works, Transport and Environment by which the National Standards of Activity, Exposure, Kerma and Absorbed Dose are established (BOE 24/04/1996).

[14] CIPM, Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Comité International des Poids et Mesures. BIPM, Sèvres (1999).

[15] ISO Standard 17025:1999. General Requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

[16] Fernández F., Neutronic spectrometry applied to dosimetry. Radioprotección, 34 (2002) 37.

[17] Muller H., Fernández F., Van Ryckeghem L., Alexandre P., Bouassoule, T., Pochat J.-L. and Tomas M.. Monte Carlo calculations and experimental results of Boner spheres systems with a new cylindrical helium-3 proportional counter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A476, (2002)411.

[18] Gallego E, Lorente A. y Martín-Fuertes F., Calibration of area monitors and neutronic dosimeters. Radioprotección, 34 (2002)45.

[19] ISO Standard 8529-Part 1:2001. Reference neutron radiations. Characteristics and methods of production.