

LA DOSIMETRÍA EN ESPAÑA

DOSIMETRY IN SPAIN

Paloma Marchena. Jefe del servicio de dosimetría personal de TECNATOM. / *Head of TECNATOM's personnel dosimetry service.*

Ignacio Amor. Coordinador técnico de protección radiológica de los trabajadores de CSN. / *CSN technical coordinator of radiological worker protection.*

Emilio Casal. Jefe del servicio de dosimetría personal del Centro Nacional de Dosimetría. / *Head of the personnel dosimetry service of the Centro Nacional de Dosimetría.*

Antonio Delgado. Jefe del programa de dosimetría de radiaciones del CIEMAT. / *Head of CIEMAT's radiation dosimetry program.*

Xavier Ortega. Director del Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de Cataluña. / *Director of the Instituto de Técnicas Energéticas of the Polytechnic University of Catalonia.*

Eduardo Sollet. Jefe del servicio de protección radiológica de central nuclear de Cofrentes. / *Head of the Cofrentes nuclear power plant radiological protection service.*

It was only a relatively short time ago that mankind acquired an understanding of ionizing radiation and, consequently, of the doses received by exposed workers. However, detection and quantification systems of radiation doses (dosimetry) to exposed workers have experienced a significant technological development, and the metering capability, which is an important indicator when evaluating the radiological protection measures adopted in the country's nuclear and radioactive facilities, is now quite precise.

This article briefly describes the current situation of dosimetry in Spain and the activities carried out in the leading centers in this field.

LEGAL FRAMEWORK OF DOSIMETRY IN SPAIN

Spanish regulations in matters of radiological protection specify that dosimetry of exposed workers should be done by entities that are expressly authorized and supervised by the Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

In order to define the technical and administrative framework associated with this regulatory activity, in 1985 the CSN approved a Safety Guideline [1], which is currently in an advanced stage of revision in order to adapt the requirements provided therein to current technical criteria in this field, and also to include new requirements enacted by Royal Decree 783/2001 (which transposes to Spanish legislation the precepts of

Hace relativamente poco tiempo que el hombre tiene conocimiento de las radiaciones ionizantes y, por lo tanto, de las dosis recibidas por los trabajadores expuestos. Sin embargo, se ha producido un destacable desarrollo tecnológico de los sistemas de detección y cuantificación de las dosis de radiación (Dosimetría) de las personas expuestas, siendo actualmente la capacidad de medida bastante precisa, lo que constituye un importante indicador a la hora de valorar las medidas de protección radiológica adoptadas en las instalaciones nucleares y radiactivas del país.

En este artículo, se describe someramente la situación actual de la dosimetría en España y se presentan las actividades realizadas en los centros más destacables en este campo.

MARCO LEGAL DE LA DOSIMETRÍA EN ESPAÑA

La reglamentación española en materia de protección radiológica establece que la dosimetría de los trabajadores expuestos debe ser realizada por entidades expresamente autorizadas y supervisadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Con objeto de definir el marco técnico y administrativo asociado a esta actividad reguladora, el CSN aprobó en 1985 una

Guía de Seguridad, [1] que actualmente se encuentra en fase avanzada de revisión con objeto de adaptar los requisitos en ella establecidos a los criterios técnicos actuales en esta materia y, asimismo, para incorporar nuevos requisitos que surgen del Real Decreto 783/2001 (que transpone a la legislación española los preceptos de la Directiva 96/29 de Euratom) y de las Guías de Seguridad elaboradas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en relación con la dosimetría del personal.

En el ámbito de la dosimetría externa, el CSN ha autorizado un total de veinticuatro Servicios de Dosimetría Personal (SDP), todos ellos basados en sistemas de termoluminiscencia (TL), cuyo equipamiento cubre una amplia gama de los sistemas disponibles en el mercado.

En el ámbito de la dosimetría interna, el CSN ha autorizado un total de nueve SDP, todos ellos basados en la medida directa de la radiactividad corporal; uno de ellos cuenta también con autorización para dosimetría mediante técnicas de bioensayo.

Con el objeto de verificar que el funcionamiento de estos servicios es acorde con las condiciones establecidas en su autorización, el CSN realiza inspecciones periódicas a los mismos; como resultado de estas inspecciones se remiten a los servicios de dosimetría las instrucciones complementarias que resulten pertinentes para asegurar la calidad de su funcionamiento.

Adicionalmente, con una periodicidad en torno a los cinco años, el CSN lleva a cabo campañas de intercomparación en las que los SDP autorizados tienen que acreditar la fiabilidad de su funcionamiento procediendo, en el caso de la dosimetría externa, a la determinación de la dosis en una serie de dosímetros "problema" cuyas condiciones de irradiación (dosis y energías) desconocen; y en el caso de la dosimetría interna, a la determinación de la actividad presente en un maniquí antropométrico relleno con una solución de radionucleidos cuyo contenido isotópico y concentración desconocen. Estas campañas proporcionan al CSN una base objetiva para valorar la fiabilidad de cada SDP y para, eventualmente, requerirles las acciones correctoras que resulten pertinentes para mejorar dicha fiabilidad.

El CSN ha instaurado un Banco Dosimétrico Nacional (BDN) que constituye una gran base de datos en la que se archivan todas las dosis registradas por los trabajadores profesionalmente expuestos en España y en el que, a finales de 2003, se almacenaban datos dosimétricos relativos a 219.300 trabajadores y 36.200 instalaciones (con un total de 9.850.000 registros dosimétricos).

Cada uno de esos registros dosimétricos lleva asociada información en relación con el ámbito de trabajo (centrales nucleares, medicina, industria, etc.), el tipo de instalación (radiodiagnóstico, radioterapia, etc.) y el tipo de trabajo (médico, supervisor, operador, etc.). Este planteamiento hace que el BDN constituya una valiosa herramienta desde el punto de vista regulador, ya que permite realizar análisis sectoriales sobre tendencias de exposición, y por tanto, identificar aquellos sectores e instalaciones con mayor carga radiológica, que serán los prioritarios a la hora de requerir actuaciones con vistas al cumplimiento del principio ALARA. En la tabla I se presentan parte de los resultados del estudio sectorial realizado por el CSN en relación con las dosis ocupacionales en las instalaciones nucleares y radiactivas españolas en 2002.

EL PROGRAMA DE DOSIMETRÍA DE RADIACIONES DEL CIEMAT

Las actividades en dosimetría de radiaciones en España comenzaron en la extinta Junta de Energía Nuclear (JEN) a mediados de la década de los cincuenta, con actividades bien identificables en dosimetría personal de la radiación externa, a las que pronto siguieron también actividades

Euratom Directive 96/29) and by the Safety Guidelines drawn up by the International Atomic Energy Agency in relation to personnel dosimetry.

In the area of external dosimetry, the CSN has authorized a total of twenty-four Personnel Dosimetry Services (SDP), all of them based on thermoluminescence (TL) systems and equipped with a wide range of systems available on the market.

In the field of internal dosimetry, the CSN has authorized a total of nine SDP, all of them based on direct metering of body radioactivity; one of them also has a permit for bio-testing technique-based dosimetry.

In order to verify that these services operate in accordance with the conditions provided in their permits, the CSN conducts periodic inspections of these centers. As a result of these inspections, pertinent complementary instructions are issued to the dosimetry services to assure the quality of operation.

In addition, on a more or less five-yearly basis, the CSN undertakes intercomparison campaigns in which the licensed SDP must prove the reliability of their operations. In the case of external dosimetry, they determine the dose in a series of "problem" dosimeters with unknown irradiation conditions (doses and energies) and, in the case of internal dosimetry, the activity present in an anthropometric dummy filled with a solution of radionuclides with an unknown isotopic content and concentration. These campaigns provide the CSN with an objective basis on which to assess the reliability of each SDP and, eventually, to require any pertinent corrective actions to improve this reliability.

The CSN has set up a National Dosimetric Bank (BDN), which is a large database in which all doses recorded for professionally exposed workers in Spain are filed. In late 2003, it stored dosimetric data on 219,300 workers and 36,200 installations (with a total of 9,850,000 dosimetric registers).

Each of these dosimetric registers has associated information regarding the work setting (nuclear power plant, medicine, industry, etc.), the type of facility (radiodiagnostic, radiotherapy, etc.) and the type of job (doctor, supervisor, operator, etc.). Thanks to this approach, the BDN is a valuable tool from a regulatory perspective, as it can be used to perform sectorial analyses on exposure trends and thus identify those sectors and facilities with the highest radiological load, which will then take precedence when requiring actions aimed at fulfilling the ALARA principle. Table I shows some of the results of the sectorial study carried out by the SCN in relation to occupational doses in

Tabla I / Table I
Número de trabajadores expuestos y dosis colectivas e individuales en las instalaciones nucleares y radiactivas españolas en 2002.

Number of exposed workers and collective and individual doses in Spanish nuclear and radioactive facilities in 2002.

	Número de trabajadores expuestos <i>Number of exposed workers</i>	Dosis colectiva (mSv.p) <i>Collective dose (mSv.p)</i>	Dosis individual media (mSv) ¹ <i>Average individual dose (mSv)¹</i>
Centrales Nucleares/ <i>Nuclear Power Plants</i>	6.599	6.506	2,00
IIRR médicas/ <i>Medical Rad. Facilities</i>	68.625	32.612	0,82
IIRR industriales/ <i>Industrial Rad. Facilities</i>	5.725	3.517	1,28
Ciclo del combustible/ <i>Fuel cycle</i>	976	96	0,52
Otras/ <i>Others</i>	4.838	938	0,44
TOTAL ⁽²⁾	86.345	43.669	0,91

(1) Sólo se incluyen a los trabajadores con dosis por encima del nivel de registro/*Only workers with doses above the register level are included.*

(2) El número total de trabajadores no coincide con la suma de los trabajadores de cada sector porque hay trabajadores expuestos que desarrollan su actividad laboral en más de un sector/*The total number of workers does not coincide with the sum of workers in each sector because there are exposed workers who work in more than one sector.*

Spanish nuclear and radioactive facilities in 2002.

THE CIEMAT'S RADIATION DOSIMETRY PROGRAM

Activities in the area of radiation dosimetry in Spain began in the former Junta de Energía Nuclear (JEN) in the mid-1950s with well identified projects in personnel external radiation dosimetry, which were soon followed by activities in internal dosimetry carried out by the then Radiotoxicity Laboratory. These were pioneering activities in the field of dosimetry that have continued uninterruptedly to the present in spite of different organizational and functional changes, including conversion of the JEN into the current CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas). This institution's radiation dosimetry activities have thus become a tradition in the field of Radiological Protection and have contributed very significantly to the current level of development of this discipline in our country.

The CIEMAT's current ionizing radiation dosimetry program includes activities in the external radiation dosimetry and internal dosimetry sectors, and these include both research and services developed on a national and international scale [2]. Some of them, most notably in internal dosimetry, are carried out in support of the Spanish regulatory body. Of note also is the ongoing presence in the European Union's successive Framework Programs and very active participation in international panels of experts, especially in the case of EURADOS, in the editorial committees

en dosimetría interna llevadas a cabo en el entonces denominado laboratorio de Radiotoxicidad. Se trataba de actividades pioneras en el campo de la dosimetría que no se han interrumpido y que continúan en el presente, independientemente de diversos cambios organizativos y funcionales entre los que cabe destacar la conversión de la JEN en el actual CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). Las actividades en dosimetría de radiaciones de esta institución constituyen pues una tradición en el campo de la Protección Radiológica, habiendo contribuido de modo muy apreciable al actual nivel de desarrollo que esta disciplina tiene en nuestro país.

El actual programa de dosimetría de radiaciones ionizantes del CIEMAT incluye actividades en los sectores de la dosimetría de la radiación externa y de la dosimetría interna, actividades tanto de investigación como de servicios, que se desarrollan a escala nacional e internacional [2]. Algunas de ellas, notablemente en dosimetría interna, se realizan en apoyo del organismo regula-

dor español. A destacar, la continuada presencia en los sucesivos Programas Marco de la Unión Europea y la participación muy activa en grupos internacionales de expertos, notablemente en el caso de EURADOS, en los comités editoriales de las principales revistas científicas del sector o en comités organizadores o científicos de congresos nacionales e internacionales.

El programa de dosimetría incluye tanto servicios como líneas de investigación, resaltando que existe una notable sinergia entre ambos tipos de actividades. De hecho, algunas de las líneas de investigación han surgido de los propios servicios y viceversa, desarrollos llevados a cabo en proyectos de investigación se han incorporado a los servicios mejorando su operatividad y la fiabilidad de sus resultados.

El servicio de dosimetría de radiaciones está compuesto por los servicios de dosimetría externa y de dosimetría interna, cuyas actividades en dosimetría personal están reglamentariamente autorizadas por el organismo regulador. El servicio de externa incluye dos laboratorios: el de dosimetría personal y el de dosimetría ambiental.

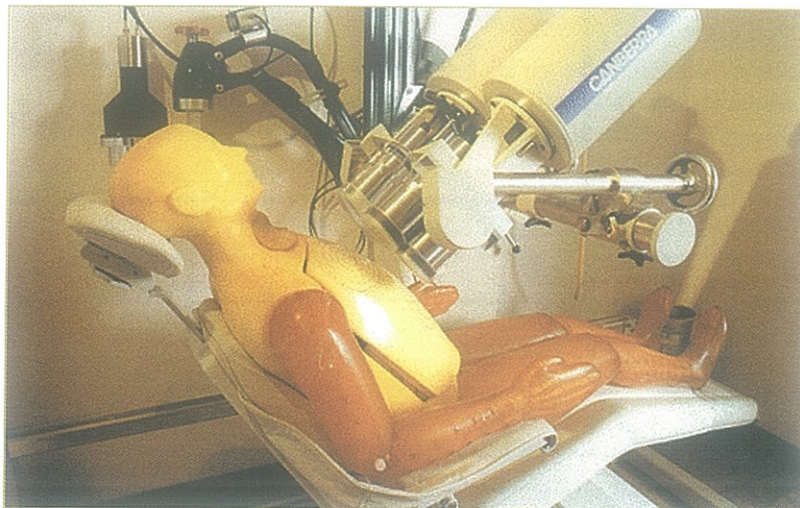


Figura 1: Detectores LE Germanio del contador de cuerpo entero del CIEMAT. Los detectores están situados sobre un maniquí de calibración, en el proceso de determinación de la eficiencia de detección para una geometría particular.

Figure 1: Germanium LE detectors of the CIEMAT whole body meter. The detectors are placed on a calibration dummy, in the process of determining the detection efficiency for a specific geometry.

A su vez, el servicio de interna cuenta con otros dos laboratorios: el del contador de radiactividad corporal (CRC) para medidas "in vivo" y el de bioeliminación para medidas "in vitro". (Figura1)

El diseño de los laboratorios de los servicios se ha hecho teniendo en cuenta no solamente las necesidades del CIEMAT, sino también las del sector de dosimetría a escala nacional. De hecho, algunos de estos laboratorios o sus capacidades son únicas en nuestro país y, por tanto, tienen la condición de infraestructura nacional en sus cometidos. A destacar, las actividades de organización o participación en intercomparaciones en los ámbitos nacional e internacional, que son parte importante del sistema de calidad y trazabilidad de los servicios del CIEMAT. Los servicios también participan en proyectos de investigación de naturaleza orientada al desarrollo de nuevas capacidades de medida o al perfeccionamiento de las existentes.

Actualmente, en el programa hay cuatro líneas de investigación con carácter estable: dosimetría retrospectiva, dosimetría

numérica, modelos biocinéticos y microdosimetría.

El grupo de **dosimetría retrospectiva** emplea métodos luminiscentes, TL y OSL, aplicados al estudio de la viabilidad de la aplicación a dosimetría de diferentes tipos y fases minerales. El grupo ha participado en dos proyectos consecutivos de la UE, proyecto DOSE Reconstrucción (4º PM) y LUMINATE (5º PM) junto a otras instituciones europeas [3].

En **dosimetría numérica** se emplean diferentes códigos de cálculo, tipo Monte Carlo, aplicados a la simulación de la respuesta de detectores y a la estimación de dosis en diferentes situaciones, entre las que merece la pena destacar las aplicaciones a la dosimetría interna. Recientemente ha concluido un estudio sobre la determinación de Americio en hueso (cráneo y rodilla) empleando detectores de LE Germanio, comparando la simulación matemática y las determinaciones experimentales obtenidas sobre maniqués antropomórficos [4].

El proyecto de **modelos biocinéticos** ha surgido de las necesidades del servicio de dosimetría

of this sector's leading scientific journals, and in the steering or scientific committees of national and international congresses.

The dosimetry program includes both services and lines of research, and there is a notable synergy between the two types of activities. In fact, some of the lines of research have sprung from the services and vice versa, i.e. developments undertaken in research projects have been included in the services, thus improving their operability and the reliability of their results.

The radiation dosimetry service is composed of the external dosimetry and internal dosimetry services, and their activities in personnel dosimetry are authorized by the regulatory body. The external service includes two laboratories – personnel dosimetry and environmental dosimetry. In turn, the internal service has another two laboratories – the body radioactivity meter (CRC) for "in vivo" measurements, and the bio-elimination meter for "in vitro" measurements. (Figure1)

The service laboratories have been designed by considering not only CIEMAT's needs, but also the needs of the dosimetry sector on a national scale. In fact, some of these laboratories or their capabilities are unique in our country and, therefore, their missions assign them the status of national infrastructure. Of note are the activities involving organization of and participation in intercomparisons on a national and international scale, which are an important part of the quality and traceability system of the CIEMAT services. The services also take part in research projects oriented at development of new metering capabilities or enhancement of existing ones.

At present, the program includes four stable lines of research: retrospective dosimetry, numeric dosimetry, bio-kinetic models and microdosimetry.

The **retrospective dosimetry** group uses luminescent methods, TL and OSL, applied to the study of the viability of application of different mineral types and phases to dosimetry. The group has taken part in two consecutive projects of the EU – project DOSE Reconstruction (4th FP) and LUMINATE (5th FP) – together with other European institutions [3].

Numeric dosimetry uses different Monte Carlo computational codes applied to the simulation of detector response and dose estimation in different situations, including applications to internal dosimetry. A study has recently been concluded on determination of americium in bone (cranium and knee) by using germanium LE detectors, with subsequent comparison to the mathematical simulation and experimental determinations obtained on anthropomorphic dummies [4].

The objective of the **bio-kinetic model** project, which emerged from the needs of the internal

dosimetry service, is to provide new experimental data on the distribution of different types of radionuclides in different organs and tissues of experimental animals. It involves animals, dissection techniques, and analysis and measurement of the activity deposited in organs. In addition, the project has the equipment required to administer radionuclides to the animals via inhalation, ingestion or injection. The new experimental data are meant to enhance the understanding of metabolic models for specific radionuclides and improve the uncertainty in the values of transfer and retention coefficients of organs and tissues.

Micro-dosimetry is the most recent of the lines of research, and its purpose is to study the dose-effect dependency at the cellular level as a function of different physical and biological factors, thus providing experimental data on relevant magnitudes and parameters for dosimetry in radiological protection (relative biological effectiveness or RBE). For this purpose, studies on effects at the cellular level must be combined with studies on the process of energy delivery in volumes comparable to cellular volumes, i.e. micro-dosimetric studies. This includes collaboration in an international context with the study of physical-biological factors that influence the cellular response to radiation. In this area, CIEMAT takes part in the EU-6th FP project GENRAD-T.

THE NATIONAL DOSIMETRY CENTER

The personnel dosimetry services authorized by the regulatory body include the Centro Nacional de Dosimetría (CND), which reports to the National Institute of Health Care Management of the Ministry of Health located in Valencia. This institute has been providing dosimetric services since 1977 to most of the Spanish National Health Service institutions in the 17 autonomous regions to which competences in matters of health have been transferred. Likewise, the CND is in charge of dosimetric control of the Spanish Nuclear Emergency Plan, and every six months it processes the dosimeters distributed among towns located around the Spanish nuclear power plants.

The CND currently provides dosimetric control of more than 45,000 workers in around 3,000 facilities throughout Spain, and it processes more than 400,000 dosimeters a year.

The dosimetric system used by the CND is based on photon dosimetry, which uses thermoluminescent (TL) dosimeters with LiF detectors, TLD-100. One of the main features of this dosimetric system [5] is automatic control of the entire dosimeter process, from the time they are received in the Center until they are returned to the user, including automatic packing.

interna y su objetivo es aportar nuevos datos experimentales sobre la distribución de diversos tipos de radionucleidos en los diferentes órganos y tejidos de animales de experimentación. Se dispone de animalario, de técnicas de disección y de análisis y medida de la actividad depositada en órganos. Así mismo, se dispone del equipamiento necesario para administrar los radionucleidos a los animales vía inhalación, ingestión o inyección. Los nuevos datos experimentales buscan mejorar el conocimiento de los modelos metabólicos para radionucleidos específicos, mejorando la incertidumbre en los valores de los coeficientes de transferencia y retención de órganos y tejidos.

La línea de **microdosimetría** es la más reciente de las líneas abordadas y su objetivo es estudiar la dependencia dosis-efectos a nivel celular, en función de diversos factores físicos y biológicos, obteniendo datos experimentales sobre magnitudes y parámetros relevantes para la dosimetría en protección radiológica (eficacia biológica relativa o RBE). Para ello, es preciso combinar estudios sobre efectos a nivel celular con estudios sobre los procesos de impartición de energía en volúmenes comparables a los celulares, es decir, estudios microdosimétricos. Se está colaborando en un contexto internacional al estudio de factores físico-biológicos con influencia en la respuesta celular a radiaciones. En esta línea se participa en el proyecto de la UE-6^º PM, GENRAD-T.

EL CENTRO NACIONAL DE DOSIMETRÍA

Entre los Servicios de dosimetría personal autorizados por el organismo regulador, cabe des-

tacar el Centro Nacional de Dosimetría (CND) dependiente del Instituto Nacional de Gestión Sanitaria del Ministerio de Sanidad y Consumo, ubicado en Valencia, que presta servicio dosimétrico desde 1977, a la mayor parte de las instituciones del Servicio Nacional de Salud español, en las 17 Comunidades Autónomas que tienen transferidas las competencias en materia sanitaria. Igualmente, el CND realiza el control dosimétrico del Plan de Emergencia Nuclear español procesando semestralmente los dosímetros distribuidos en poblaciones situadas alrededor de las centrales nucleares españolas.

En la actualidad, el CND controla dosimétricamente más de 45.000 trabajadores en alrededor de 3.000 instalaciones en toda España, procesando más de 400.000 dosímetros por año.

El sistema dosimétrico utilizado por el CND se basa en la dosimetría de fotones, utilizando dosímetros termoluminiscentes (TL) con detectores de LiF, TLD-100, siendo una de las principales características de este sistema dosimétrico [5] el control automático de todo el proceso de los dosímetros, desde la recepción en el Centro hasta la devolución al usuario, incluyendo el embolsado automático de los mismos.

Las tarjetas portadetectores son del tipo NE Technology 860-N52 y consisten en láminas de aluminio anodizado, con cuatro pastillas TL, que llevan grabado un código de barras identificativo y que se pueden hornear durante períodos largos de tiempo a temperaturas hasta de 300°C. Para la dosimetría de cuerpo entero, los dosímetros utilizados permiten la discriminación de la energía de la radiación incidente, ya que constan de una tarjeta portadetectores colocada entre dos láminas con filtros y todo el conjunto

envuelto con un plástico aluminizado sobre el que se imprime la identificación del usuario y el período de uso para el que está destinado el dosímetro. Los dosímetros utilizados para dosimetría de las extremidades consisten en una lámina con cuatro detectores, sin filtros, colocada dentro de una bolsa sellada y con una correa con velcro para facilitar su utilización.

El sistema consta de dos lectores Harshaw 8800, con sistema de calentamiento por nitrógeno caliente y cuatro lectores Vinten 823 con sistema de calentamiento por contacto térmico, los ciclos de calentamiento han sido escogidos para que ambos tipos de lectores proporcionen regeneraciones similares. Además, los lectores Harshaw han sido adaptados para procesar tarjetas del tipo NE. La calibración de todo el sistema dosimétrico se realiza en el Laboratorio de calibración de que dispone el CND, que cuenta con haces estándar de rayos X y es trazable al PTB.

A lo largo de todo el procesamiento de los dosímetros se han establecido una serie de controles de calidad con objeto de evitar posi-

bles errores y garantizar una adecuada estimación de las dosis [6]. Entre dichos controles, cabe citar el establecimiento de criterios de máxima dispersión tras la utilización de factores de sensibilidad individual para la aceptación de nuevos dosímetros, el diseño de un algoritmo de cálculo de dosis y energía que a partir de las lecturas de los cuatro detectores de cada tarjeta, permite estimar la energía de la radiación incidente y calcular la dosis recibida a partir de las cuatro lecturas corregidas por la energía. Por último, se realizan mensualmente auditorías internas del sistema dosimétrico en las que se efectúa una comprobación ciega del sistema dosimétrico. Para esta finalidad, se utiliza un conjunto de dosímetros a los que se les da el mismo tratamiento que a los del resto de usuarios, pero que se irradian a dosis conocidas para diferentes haces de radiación en nuestro laboratorio de calibración, las lecturas se realizan de forma aleatoria a lo largo del proceso dosimétrico mensual y el análisis final de los resultados permite detectar los puntos débiles del sistema.

The detector-carrying cards are NE Technology 860-N52 and consist of anodized aluminum sheets with four TL pellets, which are engraved with an identifying barcode and can be heated for long periods of time at temperatures of up to 300°C. For whole body dosimetry, the dosimeters are able to discriminate the incident radiation energy, as they are made of a detector-carrying card placed between two sheets with filters, and the whole assembly is wrapped with aluminized plastic on which the user identification and the period of use for which the dosimeter is intended are printed. The dosimeters used for extremity dosimetry are made of a sheet with four detectors, without filters, placed inside a sealed bag and with a strap with Velcro to facilitate use.

The system contains two Harshaw 8800 readers with a hot nitrogen heating system, and four Vinten 823 readers with a thermal contact heating system; the heating cycles have been selected so that both types of readers provide similar regenerations. In addition, the Harshaw readers have been adapted to process NE type cards. The whole dosimetric system is calibrated in the CND's calibration laboratory, which has standard X-ray beams and is traceable to PTB.

A series of quality controls are applied throughout the processing of dosimeters, in order to prevent possible errors and guarantee a proper dose estimate [6]. These controls include the establishment of maximum dispersion criteria after the use of individual sensitivity factors for acceptance of new dosimeters, and the design of a dose and energy calculation algorithm that, based on the readouts of the four detectors of each card, estimates the incident radiation energy and calculates the

Tabla II / Table II
Número de trabajadores expuestos y dosis colectivas e individuales en las instalaciones radiactivas médicas españolas en 2002.

Number of exposed workers and collective and individual doses in Spanish radioactive medical facilities in 2002.

	Número de trabajadores expuestos <i>Number of exposed workers</i>	Dosis colectiva (mSv.p) <i>Collective dose (mSv.p)</i>	Dosis individual media (mSv) ¹ <i>Average individual dose (mSv)¹</i>
Radiodiagnóstico/Radiodiagnosis	40.874	15.019	0,69
Radioterapia/Radiotherapy	2.230	855	0,64
Medicina Nuclear/Nuclear Medicine	1.843	2.761	1,86
Odontología/Dentistry	12.064	9.154	1,12
Otras/Others	12.655	4.823	0,68
TOTAL ⁽²⁾	68.625	32.612	0,82

(1) Sólo se incluyen a los trabajadores con dosis por encima del nivel de registro/Only workers with doses above the register level are included.

(2) El número total de trabajadores no coincide con la suma de los trabajadores de cada sector porque hay trabajadores expuestos que desarrollan su actividad laboral en más de un sector/The total number of workers does not coincide with the sum of workers in each sector because there are exposed workers who work in more than one sector.

dose received on the basis of the four readouts corrected for energy. Finally, internal audits of the dosimetric system are performed on a monthly basis to make a blind check of the system. A set of dosimeters is used for this purpose and these are treated the same as the dosimeters of other users, except that they are irradiated at known doses for different radiation beams in our calibration laboratory, readings are randomly taken throughout the monthly dosimetric process, and the final analysis of the results helps to detect the system's weak points.

Management of a dosimetric service that processes a large volume of dosimeters involves many technical and administrative problems. These include the need for adequate equipment maintenance, good quality of the thermoluminescent material used, correct identification of the dosimeters and management of dosimeters not sent for readings, as well as the high number of dosimeters misplaced by users, treatment of high doses, irradiation of dosimeters during transport, etc.

Adopting proper solutions for these problems should help any personnel dosimetry service to achieve its objective, i.e. assign the correct dose to each user.

DOSIMETRY IN NUCLEAR POWER PLANTS

Since the Spanish nuclear power plants started operating back in the late 1960s, the dosimetry carried out in these plants has always been at the leading edge of the latest reliable technology available. For instance, the Spanish nuclear power plants were some of the first in the world to implement electronic dosimetry early in the decade of the 80s and to develop practical applications for applying the complicated internal exposure models of the International Commission for Radiological Protection to internal worker dosimetry.

External dosimetry primarily focuses on high energy photon dosimetry that is done with very reliable passive LiF thermoluminescence (TL) systems, normally with 4 pellets – two for reading Hp(10) and another two for reading Hp(0.07) – and with a monthly reading frequency and personnel dose equivalent register level of 0.1 mSv.

Usually, instead of individual neutron dosimetry, area dosimetry is performed, although some plants have developed "Albedo" type TL dosimeters combining Li-6 and Li-7 pellets; however, neither the country nor the plants have calibration sources with a spectrum similar to that of fission neutrons and most of the plant calibration sources are Am-Be. Nevertheless, some PWR plants, after taking measurements with Bonner

La gestión de un servicio dosimétrico que procesa un gran volumen de dosímetros presenta muchos problemas técnicos y administrativos. Entre ellos, se podría citar la necesidad de un adecuado mantenimiento de los equipos, una buena calidad del material termoluminiscente utilizado, la correcta identificación de los dosímetros, la gestión de los dosímetros no enviados para su lectura, el elevado número de dosímetros extraviados por los usuarios, el tratamiento de las dosis elevadas, las irradiaciones de los dosímetros durante el transporte, etc.

Adoptar correctas soluciones a tales problemas debe permitir lograr el objetivo de cualquier servicio de dosimetría personal que es asignar la dosis correcta a cada usuario.

DOSIMETRÍA EN CENTRALES NUCLEARES

Desde el inicio de la operación de las centrales nucleares españolas allá por los finales de los años 60, la dosimetría efectuada en ellas ha estado siempre en

vanguardia de la última tecnología fiable que estuviera disponible. Así, las centrales nucleares españolas fueron de las primeras del mundo en incorporar la dosimetría electrónica a principios de los años 80 y en el desarrollo de aplicaciones prácticas que permiten poder aplicar los complicados modelos metabólicos de exposición interna de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) a la dosimetría interna de los trabajadores.

La dosimetría externa se centra fundamentalmente en la dosimetría de fotones de alta energía que se lleva a cabo mediante sistemas pasivos muy fiables de termoluminiscencia (TL) de FLi normalmente de 4 pastillas, dos para la lectura de Hp(10) y otras dos para la lectura de Hp(0,07), con una frecuencia de lectura mensual y con un nivel de registro en dosis equivalente personal de 0,1 mSv.

Normalmente, no se realiza dosimetría individual para neutrones sino dosimetría de área, aunque algunas centrales han desarrollado dosímetros TL tipo "Albedo" mezclando pastillas de Li-6 y Li-7, pero no existe ni en el

71

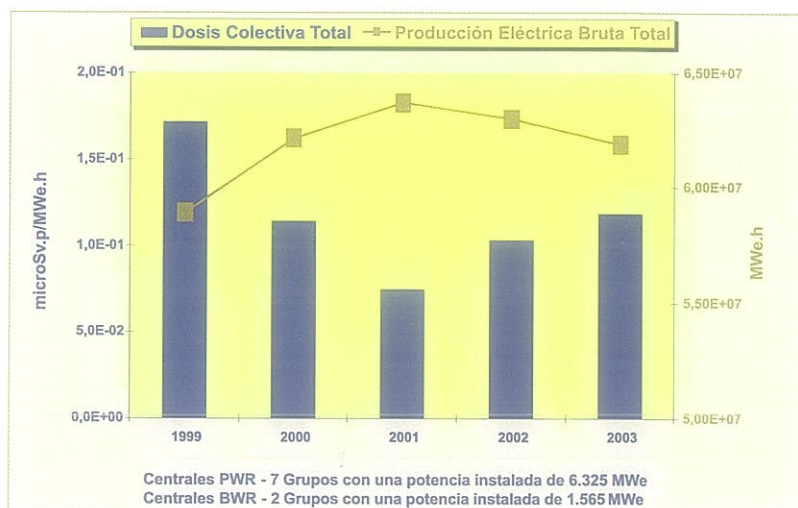


Figura 2. Dosis colectiva anual y producción eléctrica bruta de las centrales nucleares españolas.

Figure 2. Annual collective dose and gross electric output of the Spanish nuclear power plants.

país ni en las centrales fuentes de calibración con espectro semejante al de los neutrones de fisión siendo la mayoría de las fuentes de calibración de las centrales de Am-Be. Sin embargo, alguna central PWR tras realizar medidas con esferas Bonner ha puesto de manifiesto en que el riesgo de exposición neutrónica en condiciones normales de operación es muy pequeño en comparación con la exposición a la radiación gamma.

La dosimetría de la radiación beta es la más difícil de llevar a cabo en comparación con la de neutrones y la de fotones. Por ello, en todas las centrales nucleares españolas se opta por proteger a los trabajadores del riesgo de exposición beta mediante el uso de prendas de protección personal que cubren todas las partes del cuerpo salvo la cara. La lectura Hp(0,07) de las pastillas del dosímetro TL se asigna a dosis superficial a efectos de control de la dosis del cristalino y de las extremidades.

En España, la dosimetría TL es la denominada dosimetría "oficial", es decir, la que se asigna a cada persona, se reporta en el

carne y expediente dosimétricos de cada trabajador expuesto y se usa a efectos de control de los límites legales. Sin embargo, el control diario de la dosis operacional se realiza con dosimetría electrónica, con ello, se permite el seguimiento diario de las dosis de cada trabajo en zona controlada y constituye por tanto una herramienta imprescindible para la optimización de la protección radiológica y para gestión ALARA de los trabajos. Actualmente, se utilizan mayoritariamente dosímetros electrónicos de estado sólido, siendo en la década de los 90 cuando se pasó paulatinamente de la tecnología del detector de GM a la de estado sólido.

También se utiliza la teledosimetría, que permite poder seguir a distancia y en tiempo real la dosis que se recibe en trabajos con una muy alta tasa de dosis. En la actualidad, se está mejorando tanto la comunicación verbal como la visual en estos trabajos de alta dosis controlados por teledosimetría.

El número de trabajadores expuestos en el conjunto de las centrales nucleares españolas se sitúa alrededor de las 7.000 personas.

spheres, have confirmed that the risk of neutron exposure under normal operating conditions is very small in comparison to gamma radiation exposure.

Beta radiation dosimetry is more difficult to perform in comparison to neutron and photon dosimetry. Therefore, all the Spanish nuclear power plants have chosen to protect workers against the risk of beta exposure with personal protective clothing that covers the whole body except the face. The Hp(0.07) reading of TL dosimetry pellets is assigned to the surface dose for purposes of controlling the dose to the crystalline lens and extremities.

In Spain, TL dosimetry is the so-called "official" dosimetry, i.e. the one assigned to each person, reported on the dosimetric card and dossier of each exposed worker and used for purposes of control of the legal limits. However, electronic dosimetry is used for daily control of the operational dose, for purposes of daily tracking of the doses of each job in the controlled zone, and thus it is an essential tool for radiological protection optimization and for ALARA job management. At present, most of the electronic dosimeters used are solid state, after a gradual changeover in the 1990s from the GM detector to the solid state technology.

Remote dosimetry is also used to track the dose received in jobs with a very high dose rate from a distance and in real time. At present, both the verbal and visual communications in these high-dose jobs controlled by remote dosimetry are being improved.

There are around 7000 exposed workers in all of the Spanish nuclear power plants. Of these, around 50% receives no significant doses exceeding the register level, and the number of workers who in one year have exceeded an effective dose greater than 20 mSv can be counted with the fingers on one hand. In no case have the dose limits been exceeded since the introduction in 2002 of the new dose limits in accordance with European Union Directive 96/29/EURATOM, which enacts the latest ICRP recommendations contained in its Publication 60. The average dose of all exposed workers fluctuates around 1-2 mSv/year.

In the immediate future, it is expected that the advances in electronic dosimetry will lead to a reliable, safe passive storage system of dosimetric information by making use of EEPROM memory and MOSFET transistor technology. This will make it possible to develop a single dosimetry system for both official dosimetry and operational dosimetry. Since the nuclear power plants began operating, internal dosimetry has continued to make use of gamma spectrometry equipment based on INa detectors. Almost all the

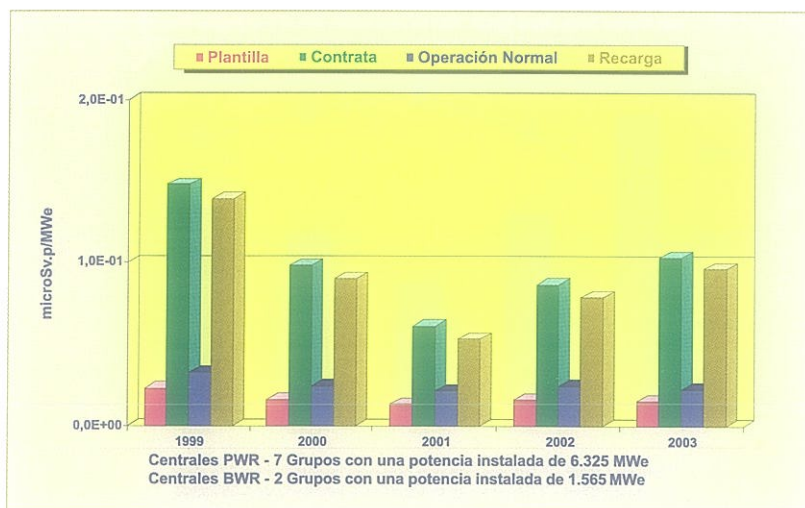


Figura 3. Dosis colectiva anual de plantilla y contrata, operación normal y recarga, de las centrales nucleares españolas.

Figure 3. Annual collective staff and contractor worker dose, in normal operation and refueling, of the Spanish nuclear power plants.

plants are equipped with two kinds of equipment – vertical geometry with 4 INa detectors for very rapid measurements lasting around 2 minutes, and bed-type raster scan geometry for more precise, accurate measurements lasting for a longer period of time.

The sector has a service with two mobile units, one with bed-type equipment and another with vertical type equipment, to meet the demands that may arise in refueling or accident situations. There are no plans in the immediate future to change to GeLi detectors or similar, since the range of possible radionuclides that can be incorporated into the organism continues to revolve around high energy gamma-emitting fission products. The register and research level used corresponds to an annual incorporation equivalent to a 1 mSv effective dose commitment, and the intervention level to one annual incorporation equivalent to a 5 mSv effective dose commitment. The number of internal dosimetry controls carried out in the Spanish nuclear power plants averages around 10,000 a year, and the percentage of readings with incorporations exceeding the register level is zero or almost zero. Most efforts in the Spanish nuclear power plants in the field of internal dosimetry have focused on development of computer applications operationally designed for applying the complicated ICRP metabolic models to the daily practice of internal dosimetry.

Finally, some dosimetric results from the last 5 years of Spanish nuclear power plant operation are shown below. All the data have been normalized at the gross electric output of the NPPs.

DOSIMETRY IN THE POLYTECHNIC UNIVERSITY OF CATALONIA

The Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) is a university institute pertaining to the Polytechnic University of Catalonia in Barcelona. Its activities have primarily focused on the use and risks of ionizing radiation. In the field of dosimetry, it takes part in environmental, radiological protection and clinical dosimetry studies, in collaboration with different organizations such as the CIEMAT, the CSN, the University of Barcelona, the Hospital de la Santa Creu y Sant Pau, and the Hospital Clínic y Provincial of Barcelona.

The INTE's main activities include work on environmental dosimetry, e.g. studies on the dosimetry of radon gas descendants, with characterization of metering systems for determination of radon gas concentration and descendants in workplaces and homes and optimization of calculation models of the lung dose estimate based on the radon concentration measurement. It is

Alrededor del 50% no reciben dosis significativas superiores al nivel de registro y el número de trabajadores que en un año han superado una dosis efectiva superior a 20 mSv se pueden contar con los dedos de una mano y no se ha dado ningún caso de superación de los límites de dosis, desde la introducción en el año 2002 de los nuevos límites de dosis de acuerdo con la Directiva 96/ 29/ EURATOM de la Unión Europea, que adapta las últimas recomendaciones de ICRP de su Publicación 60. La dosis media del conjunto de trabajadores expuestos fluctúa en el entorno de 1-2 mSv/año.

En el futuro inmediato, lo que se espera es que los avances de la dosimetría electrónica desarrollen un sistema fiable y seguro de almacenamiento pasivo de la información dosimétrica haciendo uso de la tecnología de las memorias EEPROM y de los transistores MOSFET. Ello permitirá tener un único sistema de dosimetría que sirva tanto para la dosimetría oficial como para la dosimetría operacional. La dosimetría interna sigue haciendo uso desde el principio de la operación de las centrales nucleares de equipos de espectrometría gamma basados en los detectores de INa, casi todas las centrales están dotadas de dos tipos de equipos, uno de geometría vertical con 4 detectores de INa para medidas muy rápidas de alrededor de 2 minutos y otro de geometría de barrido tipo cama para medidas mas precisas y exactas de mayor duración.

El sector cuenta con un servicio de dos unidades móviles, una con un equipo tipo cama y otra con un equipo del tipo vertical, para atender las demandas que se originan en situaciones de recarga o de accidentes. No se prevé en un futuro inmediato cambiar a detectores de GeLi o similares dado que el espectro de posibles radio-

nucleidos que se pueden incorporar al organismo sigue centrado en productos de fisión emisores gamma de alta energía. El nivel de registro e investigación utilizado se corresponde con una incorporación anual equivalente a una dosis efectiva comprometida de 1 mSv y el de intervención, se sitúa en una incorporación anual equivalente a una dosis efectiva comprometida de 5 mSv. El número de controles de dosimetría interna llevado a cabo en las centrales nucleares españolas se sitúa en una media de unos 10.000 al año y el porcentaje de contajes con incorporaciones superiores al nivel de registro es cero o casi cero. El mayor esfuerzo de las centrales nucleares españolas en el campo de la dosimetría interna se ha concentrado en el desarrollo de aplicaciones informáticas diseñadas en sus aspectos operacionales para poder aplicar a la práctica cotidiana de la dosimetría interna los complicados modelos metabólicos de la ICRP.

Por ultimo, se muestran algunos resultados dosimétricos de los últimos 5 años de operación de las centrales nucleares españolas. Todos los datos se han normalizado a la producción eléctrica bruta de las centrales nucleares.

DOSIMETRÍA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

El Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) es un Instituto Universitario de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, cuyas actividades han estado centradas principalmente en el ámbito de la utilización y riesgos de las radiaciones ionizantes. En el campo de la dosimetría, participa en estudios ambientales, de protección radiológica y de dosimetría clínica, en colaboración con diversos organismos, tales como el



Figura 4: Sala de irradiación del laboratorio de calibración y dosimetría del INTE-UPC

Figure 4: Irradiation room of the INTE-UPC calibration and dosimetry laboratory.

CIEMAT, el CSN, la Universidad de Barcelona, el Hospital de la Santa Creu y Sant Pau y el Hospital Clínico y Provincial de Barcelona.

Entre las principales actividades del INTE, pueden destacarse los trabajos en dosimetría ambiental como por ejemplo los estudios sobre la dosimetría de los descendientes del gas radón, con la caracterización de sistemas de medida para la determinación de la concentración de gas radón y descendientes en lugares de trabajo y viviendas, y la optimización de los modelos de cálculo de la estimación de la dosis a pulmón a partir de la medida de la concentración de radón. Dispone de una cámara de radón para reproducir atmósferas con diferentes concentraciones de radón y descendientes, en la que pueden calibrarse y verificarse distintos sistemas de medida así como analizar la influencia de las condiciones ambientales en la determinación de las dosis.

Desde 1985, colabora con el organismo regulador en el control de los planes de vigilancia

ambiental en los emplazamientos de algunas de las centrales nucleares españolas como la de Ascó y Vandellós, situadas en la zona catalana, mediante controles de dosimetría ambiental realizada por termoluminiscencia (TL). En el año 2002, obtuvo la acreditación de la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), de acuerdo con la norma ISO 17025 para llevar a cabo la determinación de la dosis equivalente ambiental por termoluminiscencia, convirtiéndose en el primer laboratorio español con dicho reconocimiento.

Las actividades desarrolladas en el campo de la protección radiológica se han realizado en gran medida en torno a las posibilidades experimentales que ofrece su laboratorio de calibración y dosimetría acreditado por ENAC, que junto con la Unidad de Metrología del CIEMAT, ha puesto a punto y ha armonizado, los procedimientos de calibración de equipos de medida de radiación ambiental y los dosímetros personales en España [7] de acuerdo con las normas internacionales. Ambas instituciones han

equipped with a radon camera for reproducing atmospheres with different concentrations of radon and descendants, in which different metering systems can be calibrated and verified and the influence of environmental conditions on dose determination can be analyzed.

Since 1985, it collaborates with the regulatory body in the control of environmental monitoring plans at the sites of some of the Spanish nuclear power plants, such as Ascó and Vandellós, located in the Catalan region, through environmental dosimetric controls based on thermoluminescence (TL). In 2002, it was certified by the Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), in accordance with standard ISO 17025, to de-

termine the dose equivalent via thermoluminescence, thus becoming the first Spanish laboratory to obtain this recognition.

Activities in the field of radiological protection have to a large extent focused on the experimental possibilities offered by its ENAC-certified calibration and dosimetry laboratory which, together with CIEMAT's Metrology Unit, has adapted and harmonized the calibration procedures of environmental radiation metering equipment and personnel dosimeters in Spain [7] in accordance with international standards. Both institutions have collaborated with the Consejo de Seguridad Nuclear in organizing the latest campaigns for intercomparison of authorized external personnel dosimetry services. These campaigns involve a series of problem dosimeters whose dose and energy irradiation conditions are not known by the services, and photon beams with energies ranging from 33 keV to 662 keV are used. As part of a research project, the INTE has drawn up a protocol for characterization and calibration of direct readout personnel dosimetry systems (DLD), in accordance with standard IEC61526. Based on this protocol, a set of 13 DLDs, including the most recent developments up to 2002, has been tested [8]. Along these same lines, it also collaborates with a working group of the EURADOS organization. It has recently been working on enhancement of thermoluminescence personnel dosimetry systems for dose determination in mixed beta-gamma fields, particularly in the case of ring dosimeters [9].

Studies in the field of clinical dosimetry have primarily centered on the area of radiotherapy. On one hand, it collaborates with researchers from certain Spanish hospitals in studies of dose distri-

tribution in external radiotherapy treatments with high energy photons and electrons, in particular in the presence of heterogeneities and for perfecting in-vivo dosimetric techniques.

In another major line of research developed in collaboration with the University of Barcelona and the University of Michigan, radiation transport techniques are studied in order to fine tune Monte Carlo simulation programs to resolve dosimetric issues of clinical interest and in which there are significant uncertainties concerning commercial planning programs.

REFERENCES

1. Safety Guideline 7.1. Technical-administrative requirements for personnel dosimetry services. 1985.

2. Delgado A. and Navarro T. Dosimetría de Radiaciones: Una herramienta para la protección radiológica de las personas y el medio ambiente. Chapter 10 of the book: Tecnologías Energéticas e Impacto Ambiental. Mc Graw-Hill pp:163-178; 2001.

3. Bailiff, I.K., Stepanenko, V.F., Goksu, H.Y., Botter-Jensen, L., Brodski, V., Chumak, V., Correcher, V., Delgado, A., Golikov, V., Jungner, H., Khamidova, L.G., Kolizshenkov, T.V., Liktarev, I., Meckbach, R., Petrov, S.A. and Sholom, S. Comparison of Retrospective Luminescence Dosimetry with Computational Modeling in Two Highly Contaminated Settlements Downwind of the Chernobyl NPP. Health Physics, 86 (1): 25-41; 2004.

4. Moraleda, M., López, M.A., Gómez Ros, J.M., Navarro, T., Navarro, J.F. Calibration Human Voxel Phantoms for In-Vivo Measurements of ^{241}Am in bone, at the Whole Body Counting facility of CIEMAT. CIEMAT Technical Report no. 1005 (ISSN 1135-92420); 2002.

5. Casal E. The Valencia Centro Nacional de Dosimetría, TL Personnel Dosimetry Service. Published by M. Oberhofer and A. Scharmann. "Personnel Thermoluminescence Dosimetry". Report EUR 16277 EN: 159-185; 1995.

6. Casal E., Gil J.A., Roig F., Soriano A.. Quality Control in the Dosimetric System of the Personnel Dosimetry Service of the Spanish National Health Service. Radiat. Prot. Dosim 84 (2): 11-14; 1999.

7. Ginjaume M., Ortega X., Duch M.A. "Implementing new recommendations for calibrating personal dosimeters." Radiat. Prot. Dosim. 96 (1-3): 93; 2001.

8. Ortega X., Ginjaume M., Hernández A., Villanueva I., Amor I. The outlook for the application of electronic dosimeters as legal dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 96(1-3): 87-91; 2001.

9. Pérez S., Ginjaume M., Ortega X., Duch M.A., Roig M. Extremity and whole-body dosimeters for beta and beta gamma fields based on LiF:Mg,Cu,P thin detectors. Radiat. Prot. Dosim. 101 (1-4): 261; 2002.

colaborado con el Consejo de Seguridad Nuclear en la organización de las últimas campañas de intercomparación entre Servicios de dosimetría personal externa autorizados. Estas campañas se llevan a cabo con una serie de dosímetros problema cuyas condiciones de irradiación de dosis y energía son desconocidas por los servicios, empleando haces de fotones de energías comprendidas entre 33 keV y 662 keV. El INTE bajo un proyecto de investigación ha elaborado un protocolo para la caracterización y calibración de los sistemas de dosimetría personal de lectura directa (DLD), de acuerdo con la norma IEC61526. En base al mismo, se han ensayado un conjunto de 13 DLD, que incluyen los desarrollos más recientes realizados hasta el año 2002 [8]. En esta línea colabora, así mismo, con un grupo de trabajo de la organización EURADOS. Recientemente, se está trabajando en la mejora de los sistemas de dosimetría personal por termoluminiscencia para la determinación de la dosis en campos mixtos beta-gamma, en particular en el caso de dosímetros de anillo [9].

Los estudios en el ámbito de la dosimetría clínica se han centrado fundamentalmente en el área de la radioterapia. Por una parte, se colabora con los investigadores de determinados hospitales españoles en estudios de distribución de dosis en tratamientos de radioterapia externa con fotones y electrones de alta energía, en particular, en presencia de heterogeneidades y para la puesta a punto de técnicas de dosimetría in vivo.

Otra línea importante de investigación desarrollada en colaboración con la Universidad de Barcelona y la Universidad de Michigan, estudia las técnicas de transporte de la radiación a fin de poner a punto programas de simulación Monte Carlo para re-

solver problemas dosimétricos de interés clínico, en los que los programas de planificación comerciales presentan importantes incertidumbres.

REFERENCIAS

1. Guía de Seguridad 7.1. Requisitos técnico-administrativos para los servicios de dosimetría personal. 1985.

2. Delgado A. y Navarro T. Dosimetría de Radiaciones: Una herramienta para la protección radiológica de las personas y el medio ambiente. Capítulo 10 del libro: Tecnologías Energéticas e Impacto Ambiental. Mc Graw-Hill pp:163-178; 2001.

3. Bailiff, I.K., Stepanenko, V.F., Goksu, H.Y., Botter-Jensen, L., Brodski, V., Chumak, V., Correcher, V., delgado, A., Golikov, V., Jungner, H., Khamidova, L.G., Kolizshenkov, T.V., Liktarev, I., Meckbach, R., Petrov, S.A. and Sholom, S. Comparison of Retrospective Luminescence Dosimetry with Computational Modeling in Two Highly Contaminated Settlements Downwind of the Chernobyl NPP. Health Physics, 86 (1): 25-41; 2004.

4. Moraleda, M., López, M.A., Gómez Ros, J.M., Navarro, T., Navarro, J.F. Calibration Human Voxel Phantoms for In-Vivo Measurements of ^{241}Am in bone, at the Whole Body Counting facility of CIEMAT. Informe Técnico CIEMAT nº 1005 (ISSN 1135-92420); 2002.

5. Casal E. The Valencia Centro Nacional de Dosimetría TL Personnel Dosimetry Service. Editado por M. Oberhofer y A. Scharmann. "Personnel Thermoluminescence Dosimetry". Report EUR 16277 EN: 159-185; 1995.

6. Casal E., Gil J.A., Roig F., Soriano A.. Quality Control in the Dosimetric System of the Personnel Dosimetry Service of the Spanish National Health Service. Radiat. Prot. Dosim 84 (2): 11-14; 1999.

7. Ginjaume M., Ortega X., Duch M. A. "Implementing new recommendations for calibrating personal dosimeters." Radiat. Prot. Dosim. 96 (1-3): 93; 2001.

8. Ortega X., Ginjaume M., Hernández A., Villanueva I., Amor I. The outlook for the application of electronic dosimeters as legal dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 96(1-3): 87-91; 2001.

9. Pérez S., Ginjaume M., Ortega X., Duch M.A., Roig M. Extremity and whole-body dosimeters for beta and beta gamma fields based on LiF:Mg,Cu,P thin detectors. Radiat. Prot. Dosim. 101 (1-4): 261; 2002.