Capacitación en ciencias nucleares

El Centro Internacional de Física Teórica sirve de centro de intercambio de información en materia de física nuclear y física de los reactores

por M.K. Mehta y J.J. Schmidt

El Centro Internacional de Física Teórica (CIFT) tiene un largo historial en la capacitación de científicos provenientes de países en desarrollo en diversos campos de la física teórica básica y sus aplicaciones en diferentes ramas de la tecnología. Esas actividades responden fundamentalmente al concepto de que la tecnología se basa en las investigaciones y los descubrimientos científicos, aseveración plenamente demostrada por la tecnología nuclear, que se apoya en la física nuclear.

Hace cincuenta años se descubrió el proceso físico de la fisión nuclear, que se caracteriza por los siguientes rasgos importantes: los neutrones térmicos son capaces de fisionar nucleidos pesados; la fisión nuclear va acompañada de la emisión de más de un neutrón; y en cada acto de fisión nuclear se libera una gran cantidad de energía (cerca de 200 MeV).

Estas características hicieron posible las cadenas continuas y controlables de reacciones de fisión nuclear que, ya en 1942, dieron lugar a la construcción del primer reactor de fisión, con lo cual quedó demostrada la posibilidad de generar energía nucleoeléctrica para fines pacíficos. Hoy se explotan en todo el mundo más de 400 reactores de potencia con una capacidad aproximada de 300 000 MWe, y más de 300 reactores nucleares de investigación, los cuales contribuyen notablemente a la producción total de energía eléctrica mundial y a las posibilidades de investigación nuclear, industrial y científica.

Si bien la mayoría de los adelantos en materia de reactores de potencia ha tenido lugar en los países avanzados, 17 países en desarrollo han emprendido programas nucleoeléctricos para suplir las deficiencias existentes en sus recursos energéticos. Alcanzan el doble de esa cifra los países en desarrollo que poseen reactores nucleares de investigación para la capacitación e investigación en la esfera de la física nuclear básica y aplicada, así como para la capacitación en la explotación de reactores de potencia. Cerca de 80 países en desarrollo emplean hoy técnicas nucleares en diversos sectores de la economía y la investigación nacionales, y aplican radisótopos y radiación nuclear en la agricultura, la medicina, la biología, la geología y la investigación ambiental.

El dominio de todos los aspectos de la tecnología nuclear, incluidos el diseño, la explotación, el mantenimiento y la seguridad de los reactores de potencia e investigación, requiere una cabal comprensión del tipo, mecanismo y envergadura de los procesos de reacción y desintegración nucleares que ocurren en un reactor. La física nuclear teórica y la experimental son instrumentos de investigación básicos para la comprensión cualitativa y la determinación cuantitativa de esas reacciones nucleares. Los datos nucleares son el producto final de esa investigación, y luego de varios pasos de evaluación intermedios, y del proceso computadorizado para la formación de archivos de datos adecuados, constituyen la materia prima fundamental para los cálculos de la física de los reactores. Esos cálculos son necesarios para predecir el comportamiento de los neutrones dentro del reactor y determinar cuantitativamente las características de diseño, operación y seguridad más importantes de los reactores de fisión nuclear. Los datos nucleares sirven de vínculo entre la física nuclear básica, el diseño de la tecnología nuclear y sus aplicaciones.

Todo programa de capacitación en ciencia y tecnología nucleares orientado hacia la física teórica debe comprender métodos y modelos de la teoría básica de las reacciones nucleares verificados comparativamente con los resultados de la física nuclear experimental y códigos de computadora conexos para el proceso de los datos nucleares; evaluación y aplicación de datos nucleares y bibliotecas computadorizadas de datos nucleares sobre aplicaciones de la tecnología nuclear; y métodos de la física de los reactores nucleares y códigos de computadora conexos para la operación y seguridad de los reactores de potencia y de investigación.

Panorama histórico

La vinculación del CIFT con la física nuclear de las bajas energías tuvo su origen en cuatro cursos de teoría nuclear que se dedicaron a los elementos básicos de la teoría nuclear sin tomar en consideración las aplicaciones (1966, 1969, 1971 y 1973). En los años setenta, un número mayor de países en desarrollo se iniciaron en la tecnología nucleoeléctrica y en la aplicación de radiaciones e isótopos en diversas ramas de las ciencias nucleares. Paralelamente, se puso de manifiesto la necesidad de una transferencia en gran escala a los países en desarrollo de conocimientos especializados en materia de métodos y técnicas empleados en la ciencia y la tecnología nucleares. El CIFT fue y sigue siendo el único lugar del mundo donde puede llevarse a cabo esa transferencia, al menos en lo tocante a los aspectos de la física teórica básica y aplicada. El Centro sirve de complemento necesario a la transferencia experimental e industrial de conocimientos especializados en tecnología de reactores de potencia e investigación que lleva a cabo el programa de asistencia y cooperación técnicas del OIEA.

Ante este hecho, y de conformidad con una recomendación del Comité Internacional de Datos Nucleares, el

El Sr. Mehta y el Sr. Schmidt son funcionario y jefe, respectivamente, de la Sección de Datos Nucleares de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

OIEA, en colaboración con el CIFT, convocó en 1975 a una reunión de consultores en el Centro, en Trieste, a fin de examinar la situación de la teoría nuclear y de los modelos y códigos de computadora y su empleo con miras a evaluar los datos nucleares neutrónicos necesarios para diseñar reactores de fisión y de fusión y otras aplicaciones nucleares. Otro objetivo de la reunión fue elaborar recomendaciones para avances futuros, con especial atención a las necesidades de los científicos de los países en desarrollo y su posible cooperación.

Esa reunión de expertos de alto nivel en física nuclear básica y aplicada se ha considerado como "pionera" en lo tocante a definir el papel que debía desempeñar el CIFT en la esfera de la teoría nuclear y sus aplicaciones a la tecnología nuclear. Además de determinar las necesidades de avances intrínsecos ulteriores en la teoría de las reacciones nucleares de baja potencia básicas y aplicadas, la reunión concluyó que había muchas posibilidades de que los científicos de los países en desarrollo hicieran contribuciones valiosas en los campos de teoría nuclear, la física de los reactores y el proceso y uso de los datos nucleares. Sin embargo, como estaban aislados de sus colegas en esa esfera, dichos científicos necesitaban capacitarse para actualizar sus conocimientos y ponerse en contacto con la metodología más reciente en esos campos. La reunión recomendó organizar y celebrar en el CIFT un curso prolongado de varias semanas de duración sobre teoría nuclear y códigos de computadora para modelos nucleares y sus aplicaciones.

La participación de la División de Energía Nucleoeléctrica del OIEA completaba el alcance del curso previsto al cubrir aspectos tocantes a los reactores de potencia. Los primeros cursos de invierno sobre física nuclear y reactores nucleares tuvieron lugar del 17 de enero al 10 de marzo de 1978, y fueron organizados conjuntamente en dos partes por el OIEA, el CIFT y el Centro di Calculo, radicado en Bologna, del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare de Italia.

La primera parte del curso se dedicó a "teoría nuclear para aplicaciones" con el fin de dar a los físicos, evaluadores de datos nucleares y científicos en reactores interesados en la teoría y los datos nucleares, —en especial de los países en desarrollo dispuestos a iniciar un programa nucleoeléctrico—, una panorámica completa de las investigaciones contemporáneas relativas a la teoría de reactores nucleares de baja potencia. A ello se unía capacitación simultánea avanzada en la aplicación de esta teoría y de códigos de computadora conexos a la interpretación y el proceso de los datos nucleares neutrónicos necesarios para cálculos de reactor nuclear. Los temas abarcaban la importancia de los datos nucleares para las aplicaciones de la tecnología nuclear, teoría e interpretación de la resonancia neutrónica, modelos ópticos avanzados, teoría estadística de las reacciones nucleares neutrónicas, teoría y modelos de la desintegración nuclear previa al equilibrio, y teoría de la fisión nuclear inducida por neutrones. Participaron 91 científicos nucleares de 29 países en desarrollo, 12 científicos de seis países industrializados, y cinco científicos de dos organizaciones internacionales de investigación.

La segunda parte del curso de invierno de 1978, "Teoría de los reactores y reactores de potencia", se concibió como un examen más amplio, avanzado y pormenorizado de la teoría de los reactores nucleares y su aplicación a los requisitos técnicos para el diseño y explotación de reactores de potencia. Los temas incluían: datos nucleares empleados en los cálculos del reactor; métodos avanzados teóricos, de cálculo y experimentales en materia de física de reactores; aspectos de la física de reactores relativos a los principales tipos de reactores de potencia térmicos, y códigos de computadora para cálculos neutrónicos destinados a reactores de potencia. Asistieron 100 científicos nucleares de 27 países en desarrollo, 16 científicos de 6 países industrializados y 4 pertenecientes a una organización internacional de investigación.

Situación actual

Diversos factores alentaron al CIFT y al OIEA a complementar estos primeros cursos con otra serie de cursos y talleres. Entre ellos cabe mencionar la nutrida participación en los cursos de invierno sobre física nuclear y reactores nucleares, así como los numerosos contactos y la interacción que se establecieron entre los participantes de los países en desarrollo y los conferencistas, y entre los propios participantes. Durante los cursos y una vez concluidos éstos, se reciben numerosas solicitudes relativas a datos nucleares, documentación científica, modelos nucleares, física de reactores y códigos para el proceso de datos. Los nuevos cursos y talleres se celebraron posteriormente en el CIFT en 1980, 1982, 1984, 1986 y 1988. En los cursos de invierno de 1980 y 1982, se empleó el mismo formato de 1978: se ofrecieron dos cursos consecutivos que abarcaban, el primero, asignaturas de física nuclear y datos nucleares, y el segundo, reactores nucleares.

A partir de 1984 se alteró el formato por varias razones. Durante los tres primeros cursos complementarios, que estaban divididos en dos partes cada uno, en general asistían a cada una de las partes los mismos participantes. Resultó evidente que los físicos de reactores y los ingenieros nucleares no estaban interesados en la teoría nuclear ni derivaban beneficio alguno de ella; los teóricos nucleares y los evaluadores de datos nucleares, a su vez, no tenían interés por la teoría de los reactores nucleares. Por ende se decidió separar los cursos y continuar ofreciéndolos con frecuencia bienal, pero esta vez alternando las materias entre teoría nuclear y cálculos de modelos nucleares de datos nucleares para aplicaciones tecnológicas nucleares (1984 y 1988), y física de los reactores y aplicaciones de los datos nucleares (1986 y curso previsto para 1990).

En segundo lugar, los rápidos avances en el campo de la dotación física de computadoras redundó en la disponibilidad de microcomputadoras y minicomputadoras más potentes y económicas, en especial las computadoras personales. De ese modo los países en desarrollo pudieron adquirir más microcomputadoras y minicomputadoras con configuraciones más potentes, y aumentaron así considerablemente su capacidad para llevar a cabo cálculos más complejos con mayores códigos de modelos nucleares y de física de los reactores. A raíz de estos avances, el CIFT adquirió una unidad central de proceso Gould, acoplada a un número creciente de computadoras personales.

Estos factores trajeron como consecuencia un nuevo formato para los cursos de teoría nuclear y física de los

reactores a partir de 1984. Los primeros cursos habían consistido principalmente en conferencias, seminarios especiales y talleres de debate. A partir de 1984 los cursos se convirtieron en talleres que incluían conferencias seguidas de ejercicios en la unidad central de proceso y en computadoras personales con códigos de modelos nucleares y física de reactores. Las conferencias brindaban esencialmente una introducción a los avances registrados en la teoría básica y a los códigos escogidos que se emplearían en los ejercicios. El nuevo formato exigía una preparación y un rendimiento más exhaustivos, así como mayor cooperación entre los conferenciantes y los instructores de los ejercicios, sobre todo en el personal de física y computadoras. Por ejemplo, fue menester adaptar los códigos de computadora a la unidad central de proceso del CIFT y a las computadoras personales, y para ello los participantes necesitaron una orientación sostenida de los instructores sobre el uso del equipo de computadora y la ejecución de los ejercicios.

A solicitud de los participantes en cursos anteriores, los talleres del CIFT se extendieron por períodos cortos de una o dos semanas de duración en laboratorios cercanos adecuados, a fin de que los participantes pudieran familiarizarse con los aspectos prácticos del plan de estudios del curso. En 1986, se ofreció en el reactor de investigación del Instituto Jozef Stefan de Liubliana (Yugoslavia) un curso de capacitación de una semana sobre física, seguridad y explotación de reactores de investigación práctica. Luego del taller de 1988, celebrado en los Laboratorios del INFN en Legnaro (Italia) sobre experimentos típicos de física nuclear básica y aplicada, se organizó uno similar.

Desde el principio, según lo previsto, se mantuvo un alto nivel en las conferencias, ejercicios y debates. En consecuencia, los requisitos que debían reunir los participantes también eran bastante elevados: postdoctorado o nivel académico equivalente, o varios años de estudio e investigación en uno o más de los temas del curso luego de haber alcanzado un primer grado científico, o ambar cosas. En los tres últimos cursos, era requisito imprescindible tener experiencia en cálculos computadorizados de modelos nucleares y de física de los reactores, y en el uso de computadoras en general.

Para los talleres sobre teoría nuclear, los participantes fueron seleccionados de entre físicos nucleares teóricos y experimentales y evaluadores de datos nucleares, y se incluyeron varios físicos en reactores nucleares con intereses más amplios. Para los talleres sobre física de los reactores, se eligieron fundamentalmente físicos e ingenieros en reactores nucleares y evaluadores de datos nucleares, y también físicos nucleares interesados en física de los reactores nucleares.

Los países en desarrollo enviaron entre 70 y 90 participantes a los cursos. Desde 1984 se ha mantenido un nivel constante de entre 60 y 70 participantes, ya que es el número al que puede dar servicio el equipo de computadora con que cuenta el CIFT. Si bien el nivel académico de los participantes en los primeros cursos fue bastante heterogéneo (los participantes más experimentados tenían que dictar conferencias tutoriales para los menos experimentados), ese nivel se ha ido equiparando durante los últimos cursos ya que la mayoría de los participantes tenía un nivel profesional y académico acorde con los requisitos de los talleres.

Las actas de los cursos de capacitación del CIFT incluyen:

- ***Nuclear theory in neutron nuclear data evaluation*** (Teoría nuclear para la evaluación de datos nucleares neutrónicos), acta de una reunión consultiva, CIFT-Trieste, 8 al 11 de diciembre de 1975, IAEA TECDOC, IAEA-180, Vols. I y II (1976).
- ***Nuclear theory for applications*** (Teoría nuclear para aplicaciones), actas de la primera parte de los cursos de invierno sobre física nuclear y reactores nucleares, CIFT-Trieste, 17 de enero al 10 de febrero de 1978, IAEA-SMR-43 (1980).
- ***Reactor theory and power reactors*** (Teoría de los reactores y reactores de potencia), actas de la segunda parte de los cursos de invierno sobre física nuclear y reactores nucleares, CIFT-Trieste, 13 de febrero al 10 de marzo de 1978, IAEA-SMR-44 (1980).
- ***Nuclear theory for applications-1980*** (Teoría nuclear para aplicaciones-1980), actas del curso interregional avanzado de capacitación sobre las aplicaciones de la teoría nuclear al cálculo de datos nucleares para el diseño de reactores, CIFT-Trieste, 28 de enero al 22 de febrero de 1980, IAEA-SMR-68/I (1981).
- ***Operational physics of power reactors*** (Física operacional para reactores de potencia), actas del curso de física operacional para reactores de potencia, incluidas la puesta en marcha, los ensayos y la gestión del combustible, CIFT-Trieste, 3 al 28 de marzo de 1980, IAEA-SMR-68/II (1982).
- ***Nuclear theory for applications-1982*** (Teoría nuclear para aplicaciones-1982), actas del curso sobre los avances en la teoría nuclear y los datos nucleares aplicados a los reactores, CIFT-Trieste, 25 de enero al 19 de febrero de 1982, IAEA-SMR-13 (1984).
- ***Applications in nuclear data and reactor physics*** (Aplicaciones en materia de datos nucleares y física de los reactores), actas de un taller, CIFT-Trieste, 17 de febrero al 21 de marzo de 1986, CIFT-Trieste, editadas por D.E. Cullen, R. Muranaka y J.J. Schmidt, publicadas por World Scientific Publishing Co. Pte/Ltd., Singapur (1986).
- ***Applied nuclear theory and nuclear model calculations for nuclear technology applications*** (Teoría nuclear aplicada y cálculos de modelos nucleares para su aplicación a la tecnología nuclear), actas de un taller, CIFT-Trieste, 15 de febrero al 18 de marzo de 1988; serán publicadas por World Scientific Publishing Co. Pte/Ltd., Singapur.

Repercusiones

Los cursos y talleres celebrados en el CIFT durante el último decenio han tenido importantes repercusiones en el desarrollo de la ciencia y la tecnología nucleares en los países en desarrollo. Diversas estadísticas muestran las repercusiones inmediatas. En este decenio, más de 350 científicos nucleares de 60 países en desarrollo han recibido capacitación de alto nivel en los últimos adelantos de la teoría nuclear y los modelos nucleares, la evaluación y aplicación de datos nucleares, la física de los reactores nucleares, y los códigos de computadora conexos. Durante igual período, se ha conferido a varios participantes la condición de miembros asociados o afiliados del CIFT en teoría nuclear aplicada y física de los reactores. Durante los cursos los participantes presentaron 40 seminarios especiales en que describieron su propio trabajo ante un auditorio de colegas, lo cual normalmente no habrían podido hacer en sus países de origen. El CIFT y el OIEA han publicado las actas de los cursos, y distribuido más de 500 copias como promedio en los países en desarrollo. (*Véase el recuadro adjunto.*) Las publicaciones científicas nucleares las citan a menudo y constituyen un material básico para la elaboración de planes de estudio en física nuclear y física de los reactores de algunas universidades de los países en desarollo. Varios participantes en cursos anteriores han dado muestra de un notable desarrollo al pasar

de participantes en los primeros cursos a conferencistas e instructores de ejercicios en los últimos talleres.

Los efectos a largo plazo de estas actividades científicas nucleares del CIFT se hacen sentir en un nivel más amplio que el de los participantes directos. Por ejemplo, a partir de 1980 el número de solicitudes recibidas por el OIEA, de científicos de los países en desarrollo en cuanto a datos nucleares numéricos, códigos para el proceso de datos, y documentación e informes científicos, aumentó notablemente de entre 200 y 300 en los años setenta a entre 700 y 800 en los años ochenta. Mediante la automatización simultánea de los procedimientos de reunión, ensayo y transferencia de datos, fue posible atender estas solicitudes cada vez más numerosas.

Los cursos elevaron considerablemente la interacción de los científicos nucleares de los países en desarrollo con el OIEA, el cual actúa cada vez más como guía y asesor en la generación, proceso y utilización de datos nucleares para cálculos prácticos en materia de física de reactores y de otro tipo. La participación en los cursos llevó también a la creación o consolidación o ambas cosas, de determinados grupos y centros de datos nucleares en varios países en desarrollo entre los que figuran Argentina, Brasil, China, India y Yugoslavia. Algunos de esos centros, como el de São José dos Campos en el Brasil y el Centro de Datos Nucleares de China, ubicado en el Instituto de Energía Atómica de Beijing, sirven como centros de coordinación para la generación, obtención, proceso y difusión de datos nucleares en sus países.

También ha aumentado la transferencia de códigos de computadora para modelos nucleares y física de los reactores hacia los países en desarrollo. Por ejemplo, el reciente taller de 1988 ofreció capacitación relativa a la explotación en 11 códigos de computadora avanzados sobre cálculos para modelos de reacciones nucleares en secciones eficaces nucleares. Al final del taller, se recibieron 58 solicitudes de participantes de ocho países en desarrollo para la transferencia de algunos de esos códigos; estas solicitudes se envían al banco de datos de la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE). Una parte importante de sus servicios de codificación se transfieren a los países en desarrollo, principalmente en los campos antes mencionados. En años recientes, el Banco de Datos de la AEN organizó también ejercicios de intercomparación entre diferentes laboratorios sobre códigos de computadora que abarcaban diversos aspectos de la teoría de las reacciones nucleares de baja energía, tales como el modelo estadístico, el modelo óptico del núcleo y la desintegración previa al equilibrio.

El CIFT ha resultado ser un lugar de reunión ideal para el encuentro de científicos nucleares de países en desarrollo y países desarrollados. Se iniciaron algunas actividades de cooperación entre científicos individuales y se iniciaron nuevos proyectos plurianuales elaborados por los participantes.

Un resultado sobresaliente del curso 1980 fue un proyecto interregional de cooperación técnica (CT) del OIEA en técnicas e instrumentación de datos nucleares, cuyos objetivos y alcance fueron fruto del trabajo de 40 participantes en el curso. Este fue el primer proyecto de CT del Organismo encaminado a elevar la capacidad de los países en desarrollo para realizar mediciones nucleares exactas, utilizando las técnicas desarrolladas en la esfera de los datos nucleares desde los inicios de la era nuclear. El proyecto interregional contó además con el apoyo de proyectos nacionales de cooperación técnica, y contribuyó a que varios laboratorios de países en desarrollo como Marruecos, Pakistán y Tailandia, alcanzaran la condición de laboratorios nucleares analíticos autosustentados. Estos y otros laboratorios más participaron en programas coordinados de investigación de alto nivel del OIEA encaminados a mejorar la situación de los datos de sección eficaz neutrónica para aplicaciones en reactores de fisión y fusión empleando la medición, el proceso por computadora y el análisis de esos datos.

Este proyecto interregional, en el que participaron 28 laboratorios de 25 países en desarrollo y 14 laboratorios tutoriales de otros 11 países, se ejecutó de 1982 a 1986. Después que los expertos del OIEA evaluaron los resultados y las repercusiones, se inició un segundo proyecto de cooperación técnica interregional para la capacitación en técnicas de medición nucleares, con un alcance más amplio que comprendía las principales técnicas de medición y análisis nucleares instauradas y apoyadas por el OIEA por medio de proyectos de esa índole en los países en desarrollo. Ese proyecto tenía como objetivo aumentar las capacidades de los laboratorios participantes para realizar mediciones de física nuclear aplicada exactas y fiables. Más de 40 laboratorios han mostrado interés y han comenzado a participar activamente en el proyecto, cuya duración abarcará el quinquenio 1987–1991.

Estos cursos también han fortalecido la interacción entre el OIEA y el CIFT. Durante los cursos científicos del OIEA ofrecieron conferencias sobre diversos aspectos del programa del Organismo, tales como las actividades de los Laboratorios de Seibersdorf, el programa nucleoeléctrico del Organismo, las secuelas del accidente de Chernobil, la protección radiológica de las instalaciones nucleares, y el programa de asistencia y cooperación técnicas. Ello favoreció una mejor comprensión entre los científicos de los países en desarrollo de los propósitos, objetivos y procedimientos del OIEA, y contribuyó a aumentar la eficacia de la cooperación entre el Organismo, en especial su programa de asistencia y cooperación técnicas, y las organizaciones e institutos nucleares de los países en desarrollo.

Durante los cursos de física nuclear y física de los reactores, los organizadores de los cursos ganaron y reunieron experiencias. Cada curso presentó nuevos problemas, y en las sesiones regulares de intercambio de experiencias muchos participantes resultaron de gran ayuda al formular sugerencias para mejorar la eficacia y las repercusiones de los cursos. Sobre la base de esas experiencias y sugerencias se mejora constantemente la organización de los cursos a fin de convertirlos en instrumentos eficaces para la transferencia de conocimientos especializados de física nuclear hacia los países en desarrollo. De este modo, los cursos se han hecho parte inseparable de las actividades científicas del CIFT y son un canal importante para la transferencia de conocimientos especializados de actualidad en materia de física nuclear y física de los reactores hacia un número cada vez mayor de científicos nucleares de los países en desarrollo.