

## **O ensino de tecnologia de reatores nucleares em um programa de pós-graduação de Engenharia Multidisciplinar**

### **The teaching of nuclear reactors technology in a graduate program of Multidisciplinary Engineering**

### **La educación de la tecnología de los reactores nucleares en un programa de postgrado de Ingeniería Multidisciplinar**

Amir Zacarias Mesquita, doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pesquisador titular do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN), docente permanente e membro do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: amir@cdtn.br.

Fernando Soares Lameiras, doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pesquisador titular do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN) e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN e da Rede Temática em Engenharia de Materiais (Redemat), Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: fsl@cdtn.br.

Maximiliano Delany Martins, doutor em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com pós-doutorado no Instituto de Tecnologia de Karlsruhe, na Alemanha, pesquisador do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN), docente permanente e coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: mdm@cdtn.br.

## Resumo

Este artigo descreve as atividades desenvolvidas e as inovações efetivadas na linha de pesquisa em reatores nucleares em um programa de pós-graduação multidisciplinar, o programa de pós-graduação do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN), em Belo Horizonte. O curso possui mestrado e doutorado (*stricto sensu*) e abrange as áreas de ciência e engenharia de materiais, física e química da matéria condensada, física e biologia na saúde, geociências e tecnologia mineral e aplicações de técnicas nucleares. Os cursos inerentes ao programa são ministrados em um centro de pesquisa de tradição nuclear que, apesar de possuir um reator nuclear em suas instalações, não tinha uma área de pesquisa em tecnologia de reatores. Com a possível retomada das atividades em Engenharia Nuclear no Brasil, criou-se uma nova área de concentração em tecnologia de reatores nucleares. Assim, os alunos do programa, que majoritariamente não são especialistas em energia nuclear, poderão ter noções sobre essa área, permitindo-lhes orientarem-se na terminologia relacionada com a energia nuclear e as possíveis aplicações, no âmbito de suas formações.

**Palavras-chave:** Reator Nuclear. Pós-Graduação. Ensino. Termo-Hidráulica. Neutrônica. Engenharia Nuclear.

## Abstract

This article describes the activities developed and innovations implemented in the research line of nuclear reactors in a multidisciplinary graduated program, the Graduated Program of CDTN/CNEN, in Belo Horizonte. The program offers a Master of Science and a Doctorate (*stricto sensu*), covering the areas of science and materials engineering, physics and chemistry of condensed matter, physics and biology in health, geoscience and mineral technology, and applications of nuclear techniques. The courses of the program take place in a traditional research center which has a nuclear reactor installation, but it did not have a research area in reactor technology in its graduate program.

Aiming at the possible resumption of activities in nuclear engineering in Brazil, a new Concentration Area in Nuclear Reactor Technology has been created. Students of the program, which are not nuclear energy experts, may have notions regarding this area, enabling them to be guided in the terminology related to nuclear energy and the possible applications within their chosen fields.

**Keywords:** Nuclear Reactor. Graduate. Education. Thermal-Hydraulic. Neutronic. Nuclear Engineering.

## Resumen

En este artículo se describen las actividades desarrolladas y las innovaciones realizadas en la línea de investigación en los reactores nucleares en un programa de posgrado multidisciplinario, el Posgrado Programa de CDTN/CNEN, en Belo Horizonte. El programa cuenta con maestría y doctorado (*stricto sensu*), cubriendo las áreas de la ciencia y la ingeniería de materiales, física y química de la materia condensada, la física y la biología de la salud, ciencias de la tierra y la tecnología mineral y aplicaciones de las técnicas nucleares. Los cursos del programa son ministrados en un centro de investigación nuclear tradicional que tiene un reactor nuclear en sus instalaciones, pero no tenía un área de investigación en tecnología de reactores. Con, la posible reanudación de las actividades en ingeniería nuclear en Brasil, creó una nueva Área de Concentración en Tecnología de Reactores Nucleares. Los alumnos del curso, que no son especialistas en energía nuclear, pueden tener nociones sobre esta área, lo que les permite orientarse en la terminología relacionada con la energía nuclear y las posibles aplicaciones dentro de sus formaciones.

**Palabras clave:** Reactor Nuclear. Posgrado. Educación. Termo-Hidráulica. Neutrónica. Ingeniería Nuclear.

## Introdução

O Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais (PPG-CDTN) iniciou suas atividades com mestrado acadêmico, em fevereiro de 2003, no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte. O CDTN é uma das Unidades de Pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI). Em agosto de 2010, iniciou-se o curso de doutorado no programa. Até 2013 o PPG-CDTN possuía três áreas de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais, Ciência e Tecnologia das Radiações e Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente. Apesar de o programa se situar em um centro de pesquisa de tradição nuclear e, inclusive, ter um reator nuclear de pesquisa em atividade em suas instalações, o curso não tinha uma área de pesquisa em tecnologia de reatores nucleares. O motivo disso, entre outros, foi o declínio das atividades em energia nuclear no Brasil na última década.

Mais recentemente, porém, tem ocorrido uma retomada das atividades em Engenharia Nuclear no país, como comprovam o término da usina nuclear de Angra 3 e a construção do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Conforme o planejamento energético brasileiro, pretende-se construir novas usinas nucleares no futuro. A Eletronuclear, empresa subsidiária das centrais nucleares brasileiras, também criou um programa de concessão de bolsas de estudos (mestrado, doutorado e pós-doutorado) para formar mão de obra para as futuras centrais. Prevê-se, portanto, um impulso nas atividades em Engenharia Nuclear no país.

Assim, em 2012, o programa de pós-graduação do CDTN/CNEN criou uma nova linha de pesquisa e uma área de concentração em Tecnologia de Reatores Nucleares. Hoje, o programa conta 16 alunos desenvolvendo trabalhos na área de reatores, sendo nove mestrandos, seis doutorandos e um pós-doutorando. Desses, nove recebem bolsas de estudo da Eletronuclear.

No PPG-CDTN, destaca-se também a inserção internacional da Linha de Pesquisa em Reatores. Um dos alunos de doutorado,

proveniente do Marrocos, conseguiu sua bolsa de estudos por meio do Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação do Governo Brasileiro – PEC-PG – Ministério Relações Exteriores (CAPES; CNPQ; MRE, 2014). Uma aluna, oriunda de Cuba, desenvolve igualmente seu pós-doutorado na área de reatores. Esses dois estudantes possuem bolsas de estudo administradas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Este trabalho descreve as atividades, a contribuição para o programa nuclear brasileiro e as inovações desenvolvidas na linha de pesquisa em reatores nucleares implementadas em um curso multidisciplinar, o Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN/CNEN.

### **Energia nuclear no Brasil**

Existem atualmente no Brasil quatro reatores nucleares de pesquisa em operação. Os reatores IEA-R1 (3000 kW) e o reator MB-01 (0,1 kW) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (São Paulo), o reator Argonauta (0,5 kW) do Instituto de Engenharia Nuclear (Rio de Janeiro) e o reator TRIGA IPR-R1 (250 kW) do CDTN (Belo Horizonte). Além desses reatores de pesquisa há também duas usinas nucleares em operação, Angra 1 e Angra 2, que geram cerca de 3% da energia elétrica do país. Angra 3, cujo projeto é bastante semelhante ao de Angra 2, deverá entrar em operação nos próximos anos e vai incorporar os avanços tecnológicos ocorridos após a construção de Angra 2. Essas usinas contribuem com a geração de energia, para que os reservatórios de água que abastecem as hidrelétricas sejam mantidos em níveis que não comprometam o fornecimento de água e de eletricidade da região economicamente mais importante do país, o Sudeste. Desde 2010 tem aumentado a participação das termoeletricas na matriz energética brasileira, em decorrência da falta de chuvas. O Plano Nacional de Energia (PNE 2030), que subsidia o governo na formulação de sua estratégia para a expansão da oferta de energia até 2030, aponta a necessidade de construção de novas centrais nucleares nas regiões Nordeste e Sudeste (ELETROBRAS ELETRONUCLEAR, 2015).

## O CDTN

No Brasil, as atividades pioneiras em reatores nucleares para gerar eletricidade (os chamados reatores nucleares de potência) começaram no final de 1965, com o conhecido “Grupo do Tório”, que atuava no antigo Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), atual Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Esse grupo, formado por engenheiros nucleares, aproveitando a abundância de tório no país, tinha como um de seus objetivos a construção de um reator regenerador (reator regenerador rápido, *fast breeder*), que transforma tório-232 em urânio-233. Para conseguir o isótopo físsil (Pu-239) para a partida do reator a tório, construiu-se um reator de pesquisa a água pesada, o Capitu (Circuito de Água-Pesada Tório-Urânio). O Grupo do Tório realizou várias montagens experimentais de reticulados para posicionamento de combustíveis a urânio natural. Foram adquiridas seis toneladas de água pesada e realizados diversos experimentos de física de reatores (CAMARGO, 2006). O Grupo do Tório deu origem às primeiras instalações do atual CDTN aplicadas aos reatores de potência, como o Laboratório de Termo-Hidráulica e a unidade subcrítica Uranie (hoje desativada). Convém ressaltar que, atualmente, o conceito de reatores regeneradores (*breeder*), que utilizam os nêutrons rápidos para provocar as fissões, encontra-se novamente em destaque. Dos seis conceitos adotados para a nova geração de reatores (Geração 4), três são reatores rápidos (US DOE, 2002; MESQUITA, 2013).

O CDTN é uma das unidades de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear, autarquia vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Localizado no *campus* universitário da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), no bairro Pampulha, em Belo Horizonte, o CDTN atua na pesquisa e desenvolvimento, no ensino e prestação de serviços na área nuclear e em áreas correlatas. As principais atividades do centro envolvem atualmente as áreas de tecnologia nuclear, minerais e materiais, saúde e meio ambiente. Nas aplicações das radiações e técnicas nucleares, destacam-se o tratamento de rejeitos radioativos, monitoração e remediação ambiental, a metrologia das radiações, o desenvolvimento e produção de radiofármacos para aplicações em tomografia por emissão de pósitrons (PET), o aperfeiçoamento de

processos de extração e de purificação mineral, a nanotecnologia, a integridade estrutural e os serviços em radiologia. Há forte cooperação com os setores de energia, saúde, indústria do petróleo e meio ambiente (CDTN, 2015).

O CDTN é considerado uma instituição de pesquisa de grande porte e ocupa uma área de 240.000 metros quadrados, com 42.000 metros quadrados de área construída. Ele possui um reator nuclear de pesquisa do tipo TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomic*s), uma unidade de pesquisa e produção de radiofármacos, um laboratório de irradiação gama e instalações-piloto para processamento de bens minerais, além de um excelente parque laboratorial com cerca de 50 laboratórios de ensaios físicos e químicos (CDTN, 2015).

O CDTN tem forte atuação na formação de recursos humanos em áreas estratégicas, por meio do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, nas modalidades de mestrado e doutorado acadêmicos, de um amplo programa de bolsas de iniciação científica (graduação) e de cursos de curta duração nas suas áreas de competência. O CDTN sempre atuou em treinamentos especializados na área nuclear, como em cursos de proteção radiológica para profissionais da saúde, militares, professores etc. Um curso de destaque ministrado no centro desde 1974 é o Curso de Treinamento de Operadores de Reatores de Pesquisa (CTORP), por intermédio do qual cerca de 250 operadores e gerentes das centrais nucleares brasileiras foram treinados (CDTN, 1997). O CTORP é um curso de um mês, eminentemente prático, no qual o aluno tem oportunidade de operar o reator de pesquisa TRIGA do CDTN (MESQUITA et al., 2011).

### **O programa de pós-graduação do CDTN**

O Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN (PPG-CDTN) é um curso de mestrado e de doutorado acadêmicos. O objetivo é formar profissionais com alta qualificação científica, preparados tecnologicamente para atuar em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, tanto no setor

nuclear, como em áreas de pesquisa não convencionais de relevância estratégica para o estado de Minas Gerais e para o Brasil. Os futuros mestres e doutores são capacitados para contribuir no desenvolvimento de processos, na utilização eficiente de tecnologias avançadas e na formação de novos profissionais, tanto no setor produtivo especializado como em instituições de ensino e pesquisa (CDTN, 2015).

Assim, o enfoque de formação se fundamenta em um programa multidisciplinar que abrange as áreas de ciência e engenharia de materiais, física e química experimental da matéria condensada, física e biologia na saúde, geociências e tecnologia mineral e aplicações de técnicas nucleares em meio ambiente, indústria e medicina, áreas em que o emprego das radiações e o profundo entendimento das interações entre radiação e matéria são de fundamental importância. Ademais, conforme já relatado, em 2012 foi criada uma nova linha de pesquisa e uma área de concentração em tecnologia de reatores nucleares, abrangendo o estudo e a utilização da energia liberada pelo núcleo atômico.

### **Linha de pesquisa em tecnologia de reatores nucleares**

A linha de pesquisa em tecnologia de reatores iniciou suas atividades em março de 2013. No momento, são ministradas apenas três disciplinas, sendo a primeira oferecida no primeiro semestre e as outras duas no segundo semestre:

- Introdução à Tecnologia de Reatores Nucleares;
- Neutrônica de Reatores I;
- Termo-Hidráulica de Reatores I.

Essas disciplinas são disponibilizadas para todos os alunos do programa. A primeira, Introdução à Tecnologia de Reatores Nucleares, foi elaborada de modo que os alunos que não são especialistas em energia nuclear possam ter, em sua formação, noções básicas e práticas referentes à Engenharia Nuclear, pois lhes proporciona orientações acerca da terminologia referente a esse campo e o acompanhamento do recente impulso dessa área da Engenharia e das possíveis aplicações.

A disciplina foi planejada a fim de auxiliar os alunos no conhecimento dos princípios necessários à compreensão da tecnologia dos reatores nucleares a fissão. O objetivo não é aprofundar o tema, nem a ementa é definitiva.

Para um conhecimento mais específico, foram disponibilizadas as duas matérias complementares, Neutrônica e Termo-Hidráulica, que propiciam aos alunos uma visão mais aprofundada do tema. Neutrônica (ou física de reatores) e Termo-Hidráulica (ou transferência de calor) são as duas áreas em que, normalmente, é dividido o estudo dos reatores nucleares. A carga horária das três disciplinas tem um total de 60 horas/cada com duração de quatro meses.

Uma disciplina complementar (igualmente de 60 horas) denominada História da Ciência – Tecnologia Nuclear, foi também adicionada à grade curricular do programa. Com essa disciplina busca-se apresentar ao aluno um enfoque mais humanístico, político e social da evolução da ciência nesse campo. A Filosofia, a Sociologia e a História têm sido, cada vez mais, oferecidas como disciplinas nos cursos de Engenharia como elo entre as ciências exatas e o humanismo (SANTOS, 2014). No âmbito dessa disciplina, são apresentados os grandes personagens, fatos, eventos, ideias e teorias no campo das ciências nucleares. Em todas as aulas são apresentados vídeos e realizados debates entre os alunos. Os temas apresentados vão desde a contribuição da Antiguidade Clássica Grega até acontecimentos mais recentes, como os acidentes de Chernobyl e Fukushima, passando pelo Projeto Manhattan e os grandes personagens, como os Curies, Mendeleev, Fermi, Einstein etc.

### **Introdução à tecnologia de reatores nucleares**

Foi elaborada uma apostila, por Mesquita (2013), com cerca de 150 páginas divididas em sete tópicos:

1. Conceitos fundamentais;
2. Interação da radiação com a matéria;
3. Física de nêutrons em reatores;

4. Transferência de calor em reatores;
5. Tipos de reatores nucleares;
6. Ciclo do combustível;
7. Noções de fusão nuclear.

Não se pretende com esse material substituir os grandes autores, Lamarsh e Baratta, Duderstadt, Hamilton, El-Wakil, Glasstone e Sesonske, Hore-Lacy, Murray, Shultis e Faw, nos quais o texto foi baseado. A intenção é auxiliar o estudante, fornecendo, de modo resumido e em linguagem simples, uma visão geral dos fenômenos ligados à liberação de energia pelas fissões (e fusão) nos reatores nucleares.

No Capítulo 1 são revistos os conceitos fundamentais essenciais para o entendimento da Engenharia Nuclear. A interação da radiação com a matéria é mostrada no Capítulo 2. Em seguida, é iniciado o estudo dos parâmetros operacionais dos reatores, com uma introdução à Física de nêutrons (Capítulo 3) e ao estudo da transferência de calor nos reatores (Capítulo 4). No Capítulo 5 são apresentados os tipos mais comuns de reatores nucleares, tanto de pesquisa como de potência, com uma breve introdução aos reatores das novas gerações. No Capítulo 6 tem-se uma apresentação rápida sobre o ciclo do combustível. Finalmente, no Capítulo 7, é feita uma pequena abordagem sobre os reatores a fusão nuclear. Esse tópico foi introduzido no último semestre, a pedido dos alunos, devido à relevância do assunto e à atual projeção na mídia em razão das atividades do *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER) na Europa.

Temas como fator de multiplicação de nêutrons, criticalidade, reatividade, período, venenos queimáveis, nêutrons atrasados e valores das barras de controle são discutidos de modo que mesmo alguém não familiarizado com a física e cinética de reatores possa facilmente seguir a disciplina. Algumas poucas equações são usadas, e várias figuras, tabelas e gráficos ilustram o texto e as aulas.

Além do material didático próprio, todas as aulas são ilustradas com vídeos técnicos e/ou educacionais disponíveis na Internet e mídias fornecidas pelas empresas e órgãos da área da energia nuclear,

tanto brasileiros quanto internacionais (Figura 1). Entre as fontes de informação, podem ser citadas: Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Fábrica de Elementos Combustíveis (FEC), Eletrobras/ Eletronuclear, Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), *International Atomic Energy Agency* (IAEA), Areva e *Ontario Educacional Communications Authority*.

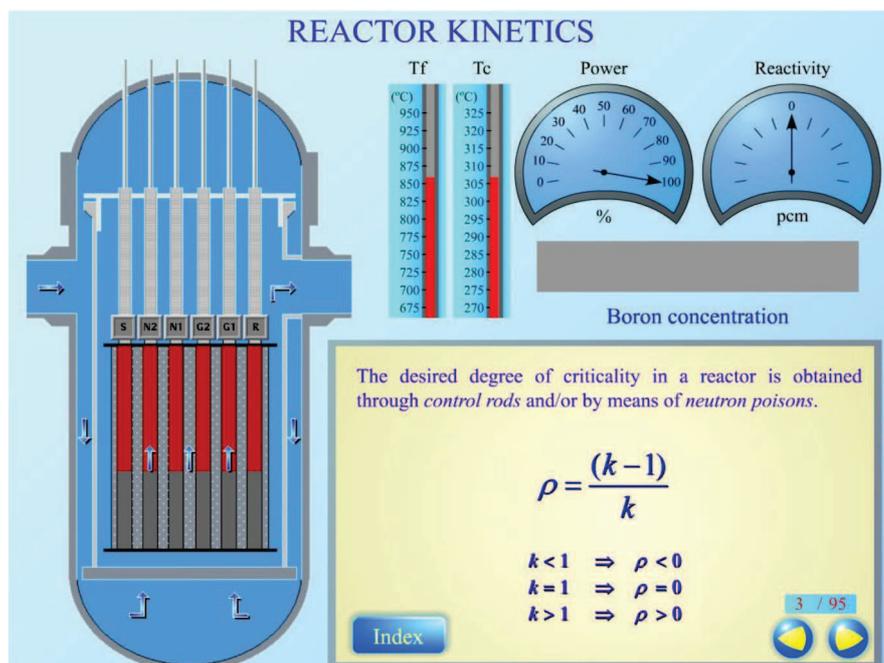


Figura 1. Recurso de multimídia utilizado nas aulas

Fonte: Puig; Dies; Pereira, 2012.

## Neutrônica de Reatores I

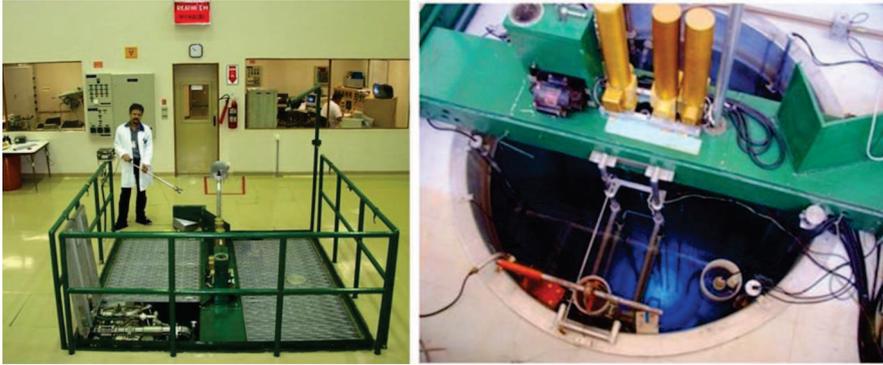
Nesta disciplina são estudados os conceitos fundamentais de física de reatores. Pretende-se, no futuro, aprofundar os estudos com mais uma matéria, em atendimento ao possível crescimento da demanda em razão da construção de novas centrais nucleares no país. Em seguida, é apresentada a ementa da disciplina (CDTN, 1997, com base em Lamarsh e Baratta, Duderstadt e Hamilton, El-Wakil, Glasstone e Sesonske e Puig, Dies e Pereira:

1. Combustíveis nucleares, componentes dos reatores nucleares;

2. Interações de nêutrons com a matéria, reações nucleares;
3. Energia de ligação, fissão nuclear, energia liberada, reação em cadeia, balanço de nêutrons;
4. Seções de choque, moderação de nêutrons, reatores térmicos;
5. Fator de multiplicação, multiplicação subcrítica e criticalidade, massa crítica;
6. Fórmula dos seis fatores;
7. Período e reatividade, equação do *inhour*;
8. Nêutrons prontos, efeito dos nêutrons atrasados;
9. Cinética e dinâmica de reatores;
10. Equações de transporte e difusão de nêutrons, fluxo de nêutrons, fontes de nêutrons;
11. Cinética pontual, teoria de multigrupos;
12. Barras de controle, controle químico, coeficiente de vazios;
13. Efeitos de temperatura, produtos de fissão, envenenamento, queima, venenos queimáveis;
14. Códigos neutrônicos.

O principal destaque desta disciplina são as aulas práticas realizadas no reator de pesquisa TRIGA do CDTN (Figura 2). Entre as aulas práticas no reator podem ser citadas: aproximação subcrítica, equação do *inhour*, valor de barras de controle, mapeamento de fluxo neutrônico e balanço térmico.

Os reatores TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomic's*), conforme indica sua sigla, foram projetados para treinamento e pesquisa. Uma atividade importante realizada no TRIGA do CDTN ao longo dos anos é a formação de muitos operadores das centrais nucleares brasileiras, por meio do Curso de Treinamento de Operadores em Reatores de Pesquisa (CTORP) (CDTN, 1997).



**Figura 2. Reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1 do CDTN**

Fonte: acervo pessoal de Amir Z. Mesquita.

### **Termo-Hidráulica de Reatores I**

Nesta disciplina são apresentados os conceitos fundamentais de transferência de calor em reatores nucleares refrigerados a água. A intenção é, no futuro, aprofundar os estudos com a continuação de seu ensino, em atendimento ao possível crescimento da demanda. Em seguida é apresentada a ementa da disciplina, tendo como base os grandes autores da área: Murray, Todreas e Kazimi, Collier e Thome, Tong e Weisman e Tong e Tang:

1. Revisão de conceitos básicos de engenharia nuclear;
2. Conceitos fundamentais de termodinâmica de usinas nucleares;
3. Conceitos fundamentais de termodinâmica e fenômenos de transporte,
4. Geração e remoção de calor em reatores, combustíveis nucleares;
5. Transferência de calor por condução e convecção;
6. Condutividade térmica e coeficientes de transferência de calor;
7. Fundamentos do escoamento bifásico e regimes de ebulição;
8. Crise de ebulição, fluxo de calor crítico, análise de acidentes;
9. Principais tipos de centrais nucleares;
10. Ciclos termodinâmicos de centrais nucleares, eficiência térmica;

11. Distribuição de entalpia/temperatura em canais de refrigeração;
12. Queda de pressão em canais de escoamento;
13. Análise térmica de elementos combustíveis; propriedades térmicas; condução de calor no elemento combustível; determinação da distribuição de temperatura no combustível;
14. Critérios do projeto térmico e hidráulico de um reator nuclear; fatores de canal quente, calor de decaimento.
15. Análise termo-hidráulica de reatores, ferramentas numéricas, códigos termo-hidráulicos, acoplamento neutrônico;
16. Fundamentos de análise por subcanais.

Na disciplina são realizados experimentos no Laboratório de Termo-Hidráulica do CDTN (Figura 3). É também utilizada a infraestrutura computacional do laboratório para simulações em termofluidodinâmica computacional – CFD (código CFX) (ANSYS, 2012). As seguintes práticas também são realizadas no reator TRIGA: monitoramento e calibração da potência, mapeamento de temperaturas, monitoramento da vazão e da velocidade do refrigerante nos canais do núcleo.



**Figura 3. Laboratório de Termo-Hidráulica do CDTN**

Fonte: acervo pessoal de Amir Z. Mesquita.

### Considerações finais

O Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN/CNEN, criado em 2003, apesar de situar-se em um centro de pesquisa de tradição nuclear e de possuir

em suas instalações um reator nuclear de pesquisa, não tinha uma área de pesquisa em tecnologia de reatores nucleares. Com a retomada das atividades em Engenharia Nuclear no Brasil, criou-se um novo interesse nas atividades nesse campo. Consequentemente, prevê-se uma grande procura por formação em tecnologia de reatores. Assim, o programa de pós-graduação do CDTN está se preparando para a formação de mestres, doutores e pós-doutores, com a criação, em 2012, de uma linha de pesquisa em Tecnologia de Reatores Nucleares.

O CDTN tem tradição na formação dos operadores de reatores para o programa nuclear brasileiro, utilizando seu reator nuclear de pesquisa TRIGA. A formação na área de reatores dispõe de boa infraestrutura laboratorial, pois, além do reator TRIGA, os alunos têm acesso ao Laboratório de Termo-Hidráulica, para realização de suas práticas.

Atualmente, o programa conta com 16 alunos desenvolvendo trabalhos na área de reatores: nove mestrandos, seis doutorandos e um pós-doutorando. Desses alunos, dois são provenientes de acordos internacionais (Cuba e Marrocos). Nos três anos de atuação da linha de pesquisa em reatores nucleares, o interesse de candidatos em realizarem seus estudos na área tem aumentado, evidenciando uma conscientização do público quanto à necessidade de utilização da energia nuclear.

### **Agradecimentos**

Esta pesquisa é apoiada pelas seguintes instituições brasileiras: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), às quais agradecemos.

Recebido em 20/12/2015

Aprovado em 22/03/2016

## Referências

ANSYS, Inc. **CFX®-14 User's Guide, Release 14.5.7**. Canonsburg; Ansys, 2012. 344 p.

AREVA. **Vídeos Educacionais**. Disponível em: <[www.aveva.com](http://www.aveva.com)>. Acesso em: 6 nov. 2015.

CAMARGO, G. **O Fogo dos deuses** – uma história da energia nuclear. Rio de Janeiro: Editora Contraponto, 2006. 344 p.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR – CDTN. **Curso de Treinamento de Operadores de Reatores de Pesquisa – CTORP**. 5 ed. Belo Horizonte, 1997. v. 2, 379 p.

\_\_\_\_\_. **Pós-Graduação**. Disponível em: <<http://www.cdtm.br/pos-graduacao>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR – CAPES; CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO – CNPQ; MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES – MRE. **Manual do Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação (PEC-PG)**. Brasília, 2014. 31 p.

ELETROBRAS ELETRONUCLEAR. **A Eletrobras Eletronuclear**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa.aspx>>. Acesso em: 5 dez. 2015.

INDÚSTRIAS NUCLEARES BRASILEIRAS – INB. **Vídeos educacionais**. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/default.aspx>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

MESQUITA, A. Z. **Introdução à tecnologia de reatores nucleares**. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais do CDTN/CNEN. Belo Horizonte, 2013. 118 p.

MESQUITA, A. Z. et al. The utilization of IPR-R1 TRIGA nuclear research reactor for educational purposes in Brazil. In: NESTET, 2011 – NUCLEAR EDUCATION TRAINING, 2011, Praga. **Anais...** Praga, 2011.

PUIG, F; DIES, J., PEREIRA, C. **Multimedia on nuclear reactors physics.**

International Agency Energy Atomic – IAEA Regional TC Project, RAS/0/047. Version 4.1. 2012.

SANTOS, S. B. et al. A disciplina de história da ciência e da técnica: contribuições para o ensino e a formação de professores de química.

**Educación Química**, Universidad Nacional Autónoma de México, v. 25, n. 1, p. 71-81, 2014. DOI:10.1016/S0187-893X(14)70527-0.

US DOE. **A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems**, GIF-002-00, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. 2002. 97 p.