cadernos **PENSES**

SIMPÓSIO REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO

RMB







SIMPÓSIO REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO

RMB

Belo Horizonte Fevereiro / 2017



Universidade Estadual de Campinas

Reitor José Tadeu Jorge

Coordenador Geral da Universidade Alvaro Penteado Crosta



Fórum Pensamento Estratégico

Coordenador Julio Cesar Hadler Neto

Coordenadora Adjunta Adriana Nunes Ferreira

Denise Tukaça Guilherme Gorgulho Braz Luciane Politi Lotti Maria Luisa Fernandes Custódio Beatriz Alencar (estagiária) Gabrielle Albiero (estagiária) Luane Casagrande (estagiária)

cadernos **PENSES**

SIMPÓSIO REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO

RMB







Simpósio Reator Multipropósito Brasileiro – RMB Copyright 2017 Instituto Casa da Educação Física

Instituto Casa da Educação Física Rua Bernardo Guimarães, 2765 - Santo Agostinho CEP 30140-085 - Belo Horizonte - MG Tel.: (31) 3275-1243 - www.casaef.org.br

Este livro segue as regras do Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa.

Nenhuma parte desta publicação pode ser gravada, armazenada em sistema eletrônico, fotocopiada, reproduzida por meios mecânicos ou outros quaisquer, sem autorização por escrito dos editores.

Impresso em Belo Horizonte, MG - Brasil Coordenação: Julio Cesar Hadler Neto Coordenação adjunta: Adriana Nunes Ferreira

Edição: Guilherme Gorgulho

Assistente de edição: Gabrielle Albiero (estagiária)

Revisão: Grazia Maria Quagliara Projeto gráfico: Ana Basaglia | Uniqua

ISBN: 978-85-98612-40-9







Ficha Catalográfica

Simpósio Reator Multipropósito Brasileiro - RMB / coordenação S612 de Julio Cesar Hadler Neto e Adriana Nunes Ferreira. - Belo Horizonte: : Instituto Casa da Educação Física / Unicamp e Fórum Pensamento Estratégico - PENSES, 2017.

124p. (Cadernos PENSES)

1. Reator Multipropósito Brasileiro - RMB - Escopo e estrutura do empreendimento. 2. RMB - Importância para a medicina nuclear. no Brasil. 3. Programa nuclear - Brasil. I. Hadler Neto, Julio Cesar. II. Ferreira, Adriana Nunes.

CDD: 621.48981 CDU: 621.039(81)

Elaborada por: Maria Aparecida Costa Duarte - CRB/6-1047

MENSAGEM DO REITOR

UMA DAS formas pelas quais a universidade pública pode cumprir seu dever de retribuir o investimento que recebe da sociedade é por meio de sua participação na formulação de políticas que visem tornar o mundo em que vivemos mais justo e harmonioso.

A Unicamp, por conta de sua essência inovadora, da qualidade de seus profissionais e alunos e do alto nível do conhecimento que produz, tem plenas condições de desempenhar papel ainda mais relevante do que o que já desempenha como fornecedora de subsídios para políticas públicas de abrangência local, nacional e até mesmo internacional.

Foi exatamente para aproveitar melhor esse potencial que a Universidade criou, em julho de 2013, o Fórum Pensamento Estratégico, órgão articulador cuja principal função é aproximar as atividades acadêmicas dos anseios e necessidades da sociedade.

O PENSES vem, desde então, reunindo representantes da academia e de diversos outros setores para refletir e debater sobre grandes temas da atualidade a partir de uma perspectiva multi e interdisciplinar. A intenção é a de que dessas reuniões, todas elas abertas ao público, emerjam novas ideias, percepções e informações que possam servir de base para a elaboração de políticas públicas nas mais variadas áreas.

Os Cadernos PENSES reproduzem, na íntegra, o conteúdo de cada um dos encontros já promovidos pelo órgão — das palavras introdutórias às derradeiras considerações dos debatedores, sem deixar de fora as sempre enriquecedoras intervenções da plateia. Disponíveis nos

formatos impresso e eletrônico, constituem valiosa fonte de referência para formuladores de políticas públicas em todas as esferas de governo e, também, importante material de apoio às atividades de ensino e pesquisa da Universidade.

Ao publicar os Cadernos PENSES, a Unicamp reafirma seu compromisso com a sociedade, que a financia, ao mesmo tempo em que fortalece aquelas que são as suas missões fundamentais: formar recursos humanos qualificados e produzir e disseminar conhecimento. Que esses volumes possam contribuir, de fato, para que vivamos todos em um mundo melhor.

JOSÉ TADEU JORGE Reitor da Unicamp

SUMÁRIO

			~
	11/17		JCAO
11	11/11	וו וו זע	11
11	11 11 1	111111111111111111111111111111111111	JA.

17

Escopo e estrutura do empreendimento RMB José Augusto Perrotta – Ipen/CNEN

47 ||

Aplicações da análise por ativação com nêutrons Marina Beatriz Agostini Vasconcellos – Ipen/CNEN

61 |||

A importância do RMB para a medicina nuclear do país Celso Darío Ramos – Unicamp

82 IV

Utilização do feixe de nêutrons no RMB Fabiano Yokaichiya – Ipen/CNEN

110 V
Terapia de captura de nêutrons pelo boro
Sandro Guedes de Oliveira – Unicamp



INTRODUÇÃO

O SIMPÓSIO **Reator Multipropósito Brasileiro**, realizado na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em 10 de dezembro de 2013, detalhou de que maneira o investimento do governo federal nesse empreendimento permitirá ao Brasil mais do que dobrar a quantidade de exames e procedimentos de medicina nuclear e proporcionar uma independência inédita ao país na produção de radiofármacos. Durante o evento, ocorrido no Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW), pesquisadores apresentaram também as possibilidades de uso desse reator nuclear de pesquisa, que será construído em Iperó (SP), na região de Sorocaba.

Orçado em US\$ 500 milhões, o reator será edificado em uma área de dois milhões de metros quadrados ao lado do Centro Experimental de Aramar (CEA), da Marinha do Brasil. Estabelecido como meta do Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação (Pacti) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o RMB está sendo desenvolvido em parceria com a Argentina e terá um índice de nacionalização de cerca de 70%.

Parte da infraestrutura associada ao novo reator de pesquisa será composta por laboratórios, que executarão os objetivos do empreendimento, tais como: a produção de radioisótopos e de fontes radioativas usadas em aplicações na indústria, na agricultura e no meio ambiente; a realização de testes de irradiação de combustíveis nucleares e de materiais estruturais; e a condução de pesquisas com feixes de

nêutrons em várias áreas do conhecimento, entre elas a análise de materiais. A estrutura destinada às pesquisas com feixe de nêutrons será utilizada no modelo de laboratório multiusuário, aberto a pesquisadores externos.

Na abertura do Simpósio, organizado pelo Fórum Pensamento Estratégico (PENSES), o reitor da Unicamp, professor José Tadeu Jorge, destacou que o empreendimento representa uma importante estrutura para a pesquisa do país e reforçou o apoio institucional da universidade ao RMB, formalizado em moções da Reitoria e do IFGW. "A Unicamp tem plena consciência e entendimento de que o RMB irá beneficiar o país de forma bastante significativa", declarou Tadeu Jorge. "Uma universidade pública não pode se furtar a iniciativas como essa, que retornam os investimentos feitos com dinheiro público". Para o reitor, a parceria da Unicamp com o RMB deverá efetivar-se não só com o IFGW, mas também com outras unidades e órgãos da universidade. "Queremos colaborar o máximo possível para que isso se viabilize e que não percamos a chance de ter um projeto tão importante e tão tecnicamente bem elaborado".

Essa maior interação entre a universidade e o RMB será essencial para que o Brasil desenvolva novos radiofármacos e não se limite a reproduzir as inovações do exterior. Atualmente essa tarefa fica limitada pelo fato de o país importar a grande maioria da matéria-prima para esses procedimentos médicos. Segundo o médico Celso Darío Ramos, professor da Faculdade de Ciências Médicas (FCM) da Unicamp, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), que importa os radioisótopos para processá-los e fornecê-los às clínicas brasileiras, não consegue dedicar-se adequadamente à pesquisa. Ramos justificou a limitação do Ipen pela necessidade de suprir a demanda da medicina nuclear brasileira, já que o órgão tem o monopólio da atividade. Nos últimos 50 anos, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) já forneceu cerca de 50 milhões de doses de radiofármacos, e nunca houve relato de reação adversa grave que resultasse em morte ou internação. O Ipen é uma autarquia do governo paulista gerenciada técnica, administrativa e financeiramente pela CNEN.

O professor da FCM aponta que a área de radioatividade é um setor naturalmente de aglutinação em pesquisa, diferenciando-se de outros ramos da ciência que normalmente interagem menos. "Sobra pouco espaço no Ipen para se criar novos radiofármacos e isso seria uma vocação natural da universidade", defendeu o docente, que também é presidente da Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear (SBMN) e diretor do Serviço de Medicina Nuclear na Unicamp. No Brasil são realizados por ano cerca de dois milhões de procedimentos de diagnóstico médico com tecnécio-99. Esse radioisótopo é originado a partir do molibdênio-99, que por sua vez é um produto da fissão do urânio-235, minério radioativo encontrado na natureza. O país importa todo o molibdênio-99 necessário para esses procedimentos, ao custo anual de US\$ 10 milhões.

O coordenador do RMB, José Augusto Perrotta, estima que o empreendimento compensará, apenas com o molibdênio-99, o investimento feito em um prazo de 20 a 25 anos. De acordo com o engenheiro, que também é assessor da Presidência da CNEN, a dependência das importações de África do Sul, Canadá e Argentina é prejudicial porque deixa o Brasil sujeito a problemas externos. No segundo semestre de 2013, problemas com os reatores sul-africano e canadense fizeram com que o país só tivesse um terço de sua demanda por radiofármacos suprida pelos argentinos. Em 2008 e 2009, o problema foi ainda mais grave, pois o governo importava somente do Canadá.

A Argentina, que é parceira do Brasil no projeto do RMB, conta com uma medicina nuclear mais desenvolvida. "A medicina nuclear do Brasil é avançada, mas limitada a poucos centros. Em relação ao tamanho da população, a nossa medicina nuclear é quase três vezes menor do que da Argentina", constatou Ramos. O docente da FCM apresentou no simpósio dados de 2011 mostrando que, do total de médicos especialistas do Brasil, apenas 0,24% são especializados em medicina nuclear, o que totalizava cerca de 500 profissionais. Além do mais, a concentração desses médicos é muito maior nas regiões Sul e Sudeste.

Perrotta mostrou que o Brasil consumia 4% da produção mundial de radiofármacos em 2013. Depois que o RMB entrar em operação, no prazo de cinco anos, o país poderá responder pelo dobro desse percentual, previu o engenheiro. Além dessa utilização de grande importância social, o RMB também produzirá radioisótopos e fontes radioativas para aplicações na indústria, agricultura e no meio ambiente, e permitirá a realização de testes de irradiação de combustíveis nucleares e de materiais estruturais.

Durante o evento, o pesquisador científico do Ipen Fabiano Yokaichiya abordou outra utilização importante do RMB, na área de pesquisas com feixes de nêutrons em várias áreas do conhecimento, entre elas a análise de materiais. Essa estrutura destinada aos feixes de nêutrons será utilizada no modelo de laboratório multiusuário, aberto a pesquisadores externos, com função complementar à realizada pelo Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). "A grande vantagem da difração de nêutrons é poder obter estruturas magnéticas", explicou Yokaichiya, referindo-se às limitações da técnica de difração de raios-X, usada no LNLS, em alguns tipos de materiais. No simpósio, o pesquisador do Ipen mostrou utilizações práticas do feixe de nêutrons em pesquisas, como na análise de materiais arqueológicos para preservação e na construção civil, para melhoramento de produtos.

A professora Marina Beatriz Vasconcellos, pesquisadora científica no Ipen, abordou as "Aplicações da Análise por Ativação com Nêutrons" e trouxe exemplos dessa técnica, que emprega a formação de isótopos radioativos por meio de reações nucleares. As amostras, que podem ser das mais diversas origens, interagem com os nêutrons a partir de uma exposição e, por meio das radiações emitidas, podese fazer análise da concentração de elementos químicos presentes no material. Uma das principais vantagens é que esses elementos podem estar presentes na amostra em concentrações extremamente baixas. A Análise por Ativação com Nêutrons pode ser aplicada, por exemplo, em análises geológicas, plásticos, amostras arqueológicas, metais e ligas, alimentos e amostras ambientais.

O evento foi encerrado com a palestra do professor Sandro Guedes de Oliveira, do IFGW, que mostrou aplicações específicas na medicina sobre a "Terapia de Captura de Nêutrons pelo Boro", que consiste em uma nova forma de radioterapia, em que uma molécula de boro, carregada adequadamente à região do tumor, produz uma reação nuclear que elimina as células cancerígenas com pouco dano para os tecidos sadios das imediações. Essa nova técnica tem sido mais empregada em países como Japão, Finlândia, Itália e Argentina. Embora não tenha alcançado ainda a fase clínica, a terapia tem alto potencial para tratar de tumores em órgãos como fígado e pâncreas.

ESCOPO E ESTRUTURA DO EMPREENDIMENTO RMB

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Engenheiro civil, mestre em engenharia nuclear, doutor em tecnologia nuclear, assessor da presidência da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e coordenador técnico do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Possui graduação em fortificação e construção pelo Instituto Militar de Engenharia, mestrado em engenharia nuclear pelo Instituto Militar de Engenharia e doutorado em tecnologia nuclear pela Universidade de São Paulo. Tecnologista sênior da CNEN, exercendo a função de coordenador técnico do empreendimento RMB. É também inspetor de salvaguardas da agência Brasil-Argentina de contabilidade e controle de material nuclear. Tem experiência na área de engenharia nuclear com ênfase em engenharia do núcleo e engenharia do combustível nuclear.

O REATOR Multipropósito Brasileiro (RMB) é um empreendimento de Estado. Nós somos funcionários públicos do Estado brasileiro, temos obrigações com a sociedade, e é isso que estamos querendo fazer.

Na abertura deste simpósio foi mencionado o professor Marcello Damy de Souza Santos, a quem eu referencio na palestra na foto da inauguração do reator IEA-R1. Nós o classificamos como um dos pioneiros da área nuclear no país. Esses pioneiros iniciaram do nada e geraram toda uma infraestrutura de base, formação de recursos humanos e capacidade nacional na área científica e tecnológica, principalmente na área nuclear. Nosso grande legado é como continuar isso. Só que agora num patamar muito maior. Eles iniciaram, por exemplo, na radiofarmácia, os estudos de usar radioisótopos na medicina nuclear. Hoje nós temos dois milhões de procedimentos, ou mais, por ano no país, e isso ainda não é suficiente para o atendimento necessário. O nosso legado agora é em outro patamar. Só um programa de Estado, como o que apresentamos aqui no RMB, é capaz de observar e implantar essa infraestrutura efetiva ao país.

Na abertura foi mencionado também o investimento transversal, a distribuição de recursos por toda a área de pesquisa, que eu chamo de investimento horizontal e vertical. Eu sou tecnologista, engenheiro. Eu não tenho *papers* científicos, tenho vários *papers* técnicos e tenho muita engenharia realizada, como reator nuclear de pesquisa funcionando, combustíveis nucleares projetados, projetos de reatores de pesquisa e trabalhos em reator de potência operando. Ou seja, é tecnologia.

É difícil, às vezes, buscar recursos. Porque o grande recurso está nos grandes projetos, nas grandes obras. Então, é o que eu chamo de investimento vertical. A distribuição de recursos de forma horizontal, para cada pesquisador nos seus laboratórios, é extremamente importante e mantém a ciência viva, mas os grandes investimentos em infraestrutura e em institutos de pesquisa, e em grandes componentes de pesquisa, são fundamentais. É o que eu chamo de investimento vertical. Se você pegar o *per capita* depois da utilização dele, por pesquisador, vai ver que é muitas vezes mais efetivo do que o *per capita* no investimento horizontal, ou seja, você gera uma grande infraestrutura e atrai muitas pesquisas e muitos pesquisadores e dá outra qualidade ao investimento. Quando você caminha não só na teoria, mas no experimento, é fundamental.

O que eu vou apresentar aqui é esse projeto que é estruturante. Chamamos de arraste, na área nuclear, na Comissão Nacional de Energia Nuclear, e gostaria de dizer que eu sempre chamo de empreendimento porque não é um projeto de um reator, é um projeto de um novo centro de pesquisas com reator associado a vários laboratórios. Isso muda um pouco a perspectiva antiga nacional, em que a área nuclear era muito centralizada e fechada. A nossa proposta é o inverso. É ser um laboratório nacional aberto à comunidade científica brasileira. Tirar o máximo de proveito de uma instalação desse tipo e do que ela propicia à comunidade.

Vou começar a falar do empreendimento Reator Multipropósito Brasileiro. Vou mencionar a organização do Programa Nuclear Brasileiro, também falar um pouco sobre como está organizado e a proposta do reator, onde ele se insere. Também sobre o objetivo do RMB, o empreendimento em si, sua característica técnica e sua situação atual.

Quais são os principais usos no Brasil da energia nuclear? Reatores nucleares: no Brasil, nós temos reatores de pesquisa, basicamente para produção de radioisótopos, pesquisa tecnológica fundamental, e também são aplicações no RMB. Eu vou mostrar um pouco isso.

Nós temos no país um projeto de propulsão naval, um submarino nuclear, e temos duas usinas nucleares de geração de energia em operação, uma terceira em construção e proposta de novas centrais nucleares.

Na parte de reatores nucleares nós temos pesquisa, propulsão e geração de energia elétrica. Nós nos encaixamos tecnicamente como uma grande potência, um país avançado. Temos reatores, em menor escala em número, mas em qualidade como uma grande potência. Eu vou mencionar mais adiante o ciclo do combustível nuclear que o Brasil domina. Temos bastante reserva de urânio e dominamos tecnologicamente o ciclo do combustível nuclear.

Utilização de radioisótopos: nós temos a medicina nuclear, que é bastante ativa. Na indústria espacial ainda não, mas existem estudos para propulsão espacial em longas distâncias. Na agricultura e

no meio ambiente, e na radiação de alimentos, e esterilização. A área nuclear está hoje no dia a dia da sociedade e às vezes não se percebe isso, mas com certeza há sempre alguma coisa da área nuclear associada ao cotidiano das pessoas.

Sobre as perspectivas do Programa Nuclear Brasileiro: A CNEN se posiciona mais efetivamente na utilização de técnicas nucleares, com aplicação dessas técnicas e utilização de radioisótopos em benefício da sociedade. Isso inclui também o desenvolvimento tecnológico autônomo. Esse é um papel fundamental da Comissão Nacional de Energia Nuclear: gerar recursos humanos, gerar capacidade e prover a sociedade com itens da área nuclear que são necessários.

A propulsão naval está vinculada principalmente ao desenvolvimento da Marinha do Brasil. Sobre o combustível nuclear mencionado: nós temos reservas grandes, fazemos enriquecimento, conhecemos todas as etapas do ciclo e produzimos os combustíveis para as centrais nucleares e também para os reatores de pesquisa que temos no país. No RMB não vai ser diferente. Outra área é a da eletricidade gerada pelas usinas nucleares, como eu mencionei. Resumindo, o Programa Nuclear Brasileiro compreende aplicações sociais, propulsão naval, ciclo do combustível e produção de eletricidade.

Um detalhe para o qual eu chamo atenção: o ciclo do combustível não é aplicado somente para a central nuclear e para propulsão naval, é também para o hospital que recebe o gerador de molibdênio que tem o tecnécio. O tecnécio é fruto do decaimento do molibdênio-99, o tecnécio-99M; e o molibdênio-99 é produto de fissão. Você irradia com nêutrons o urânio, ele sofre fissão, e esse urânio vem lá desde a mina, todo o ciclo do combustível, irradiado no reator e depois processado e vai para o hospital. Se você fala isso para um leigo, ele vai achar que você está brincando porque nuclear é algo complicado. Mas o mesmo urânio que se tira da mina vai tanto para o hospital quanto para a central nuclear.

Dentro da organização do Programa Nuclear Brasileiro, temos o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e a Comissão Nacional de Energia Nuclear é vinculada ao MCTI. No passado não era assim. Antigamente a Comissão era vinculada diretamente à Presidência; em outra época, à Secretaria de Assuntos Estratégicos, e hoje está no MCTI. E na Comissão nós temos os institutos de pesquisa, as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e a Nuclebrás Equipamentos Pesados (Nuclep). INB e Nuclep vêm do programa de cooperação Brasil–Alemanha, da década de 1980, e hoje estão na CNEN. É sempre uma discussão se a fabricação, a parte industrial, deveria estar na Comissão Nacional de Energia Nuclear. Isso é questionado em vários fóruns.

Também integram a organização do Programa Nuclear Brasileiro o Ministério de Minas e Energia, incluindo as Centrais Elétricas do Brasil (Eletrobrás). A Eletrobrás coordena a Eletronuclear, que opera as centrais nucleares. Dentro do Ministério da Defesa, o principal é o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), onde é desenvolvida toda a parte do enriquecimento para o ciclo do combustível e a propulsão naval. A origem do Centro Tecnológico também começou em cooperação com a CNEN e o Ipen no passado.

Em outros ministérios, como o de Relações Exteriores, está toda a parte de salvaguardas e relações internacionais. Nas universidades há a formação de recursos humanos. No Ministério do Meio Ambiente, o Ibama também participa do licenciamento de toda a área nuclear. Aí está o governo federal mencionado.

Particularmente, no caso do MCTI, temos a CNEN. Nós temos como planejamento a criação da Agência Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Uma das diretorias da CNEN é a Diretoria de Radioproteção e Segurança, que vai ser separada da parte de pesquisa, tornando-se ANSN. As aplicações sociais são fundamentais; o RMB ganhou força através desse item. Sobre a gerência de rejeitos radioativos: vocês vão ver na imprensa, daqui a alguns dias, a definição de um local para o repositório de rejeitos de baixa e média atividade, que é uma obrigação da CNEN. Esse projeto está em andamento e daqui a pouco vai aparecer o local onde esse rejeito radioativo vai ser instalado. No ciclo do combustível nuclear, temos a parte de conversão e enriquecimento e fabricação de combustível. Cito

também as pesquisas em ciência, tecnologia e inovação e a formação de pessoal. Esse é o foco da CNEN, à qual nós somos subordinados e para quem trabalhamos.

A CNEN está dividida em três diretorias, uma parte de gestão, pesquisa e desenvolvimento, onde estão os institutos da CNEN. Na Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, o Ipen, em São Paulo, é o maior instituto. Temos também o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, e o CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear), em Belo Horizonte.

O Ipen, o CDTN e o IEN estão fisicamente localizados em cidades universitárias em São Paulo, Belo Horizonte e Rio de Janeiro. O CRCN (Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste) é um centro no Recife, também fisicamente localizado na Universidade Federal de Pernambuco. E o IRD que é o Instituto de Radioproteção e Dosimetria, no Rio de Janeiro. Esses são os principais institutos da CNEN. No Ipen, CDTN e IEN existem reatores nucleares e no CRCN, acelerador. No IRD está toda a parte de radioproteção e dosimetria.

O que vai existir de novo? A Diretoria de Radioproteção e Segurança vai virar uma Agência Nacional de Segurança Nuclear. Ou seja, a parte reguladora vai sair da CNEN e vai ficar independente.

Hoje temos a parte de pesquisa e desenvolvimento e a parte de regulação juntas na presidência. Vão ser separadas. É fundamental que a área da Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento se desenvolva cada vez mais porque os institutos têm uma certa idade, os equipamentos têm uma certa idade e precisam ser renovados. E é preciso renovar também o pessoal.

Ao mesmo tempo em que se cria uma agência reguladora, nós temos de fortalecer a área de pesquisa e desenvolvimento da CNEN. E esse é um dos temas de discussão. A área nuclear para ou continua? Ela é fundamental ao país ou não? Quer dizer, o que os pioneiros fizeram para ou continua? Continua, só que em outro nível. É isso que nós estamos querendo fazer. É um novo ciclo. O RMB vem para gerar um novo ciclo na área nuclear.

Nós temos no país quatro reatores de pesquisa. O primeiro deles, o IEA-R1, inaugurado em 1957, inicialmente de dois megawatts, no que hoje é o Ipen, mas antigamente era o Instituto de Energia Atômica, vinculado também ao Estado de São Paulo, à Universidade de São Paulo. Hoje com cinco megawatts, nós aumentamos a potência e alteramos o núcleo dele.

IPR-R1, de 1960, em Belo Horizonte, tem 100 quilowatts, é um reator Triga. Esse é um reator tipo MTR, piscina aberta, que é um multipropósito também. No Rio, o Argonauta, no Instituto de Engenharia Nuclear, iniciou suas operações em 1965. O Argonauta é uma unidade crítica, de 500 watts. Esses três reatores, do final da década de 1950 e início da década de 1960, formam o início da área nuclear no país, o desenvolvimento dela nas universidades, nos departamentos de física, normalmente. A partir daí começou a se desenvolver a área nuclear no país.

Depois, cada centro desses tomou um rumo. E o Ipen se transformou. Na época em que o IEA-R1 foi construído, em 1957, na Cidade Universitária não existia praticamente nada, como Cidade Universitária. E hoje a cidade de São Paulo envolveu a Cidade Universitária. O reator gerou, o que é importante, o maior centro de pesquisa nuclear do país. E o RMB tende a ir nessa linha. Ele começa com um reator em uma infraestrutura inicial, mas ele tem seu polo catalisador de um novo instituto, mas de outro patamar tecnológico, com outras instalações. Não pequenas instalações, mas instalações de maior porte e que façam esse sentido vertical que eu falei, de atração da comunidade científica. Esse é o objetivo do RMB.

Essa é uma imagem típica de desenvolvimento, em que uma unidade se transforma em um grande centro de pesquisa. Mas temos um grande problema. Antigamente, na década de 1950, essa era uma área um tanto quanto isolada, que de repente atrai desenvolvimento para todo o redor. Acho que aqui em Campinas deve acontecer a mesma coisa na Unicamp.

Em 1958, o presidente Juscelino Kubitschek inaugurou o reator. Juscelino já queria fazer um reator de potência, de 10 megawatts para

geração de energia elétrica no país naquela época. Ele estava pensando na utilização de energia nuclear porque nos Estados Unidos também estavam começando as centrais nucleares e a propulsão naval também. Jânio Quadros era o governador de São Paulo. Então, estavam presentes o Estado e a federação, o governo federal e o governo estadual, e o professor Marcello Damy de Souza Santos, que era o mentor desse reator e também foi presidente da Comissão Nacional de Energia Nuclear, que foi criada posteriormente a esse evento. A história mostra que a utilização de uma grande instalação nucleia desenvolvimento, ciência e tecnologia. Eu considero como pioneiros esses nomes que citei e temos de dar continuidade para isso. É fundamental. Então, por que um novo reator de pesquisa? Para dar suporte ao programa brasileiro, que manterá as atividades do setor nuclear. É um projeto estruturante. Outro motivo é dar suporte à medicina nuclear no país. Sua utilização é fortíssima e depende dos radioisótopos. De radioisótopos e aceleradores cíclotrons, mas também, fundamentalmente, de radioisótopos que vêm de reatores nucleares. Produzem radioisótopos os reatores nucleares e os aceleradores. É fundamental produzir radioisótopos para medicina nuclear. O novo reator também poderá dar suporte às aplicações industriais e estratégicas, como a tecnologia do combustível nuclear e o desenvolvimento autônomo de reatores nucleares. Como no caso da propulsão nuclear, já que ninguém vende isso. A tecnologia do reator de propulsão ninguém vende. Sobre a propulsão nuclear, o Brasil é o único país, acho que são dois, na verdade, que determina na sua Constituição a aplicação nuclear para fins pacíficos. O reator de propulsão naval é um motor, ele não tem ogiva nuclear. O Brasil não tem armamento nuclear, mas submarino com motor nuclear, com propulsão nuclear, que dá autonomia fantástica no poder de fogo. É isso que se está perseguindo.

Dar suporte à pesquisa fundamental e tecnológica. Se nós tivermos um reator de maior potência e melhor característica, será uma fonte de nêutrons fantástica. Por que não utilizá-la na comunidade científica? O RMB e o Sirius são parceiros nisso, quer dizer, são irmãos. Isso vai virar um único laboratório nacional. Eles vão se com-

plementar, essa é a nossa ideia. O RMB será complementar ao Sirius na parte de utilização para caracterização de materiais. E finalmente fortalecerá um importante polo de tecnologia no país. A proposta nossa em Aramar é torná-lo o grande polo de tecnologia nuclear do país. Aramar é onde está a Marinha, o ciclo do combustível, a propulsão naval e o RMB com todas as aplicações sociais e novas instalações e novos equipamentos de base científica.

O objetivo fundamental do reator, do empreendimento, é uma infraestrutura estratégica para o desenvolvimento próprio das atividades do setor nuclear e das aplicações sociais. Eu reforço sempre essa parte porque aplicação social nós falamos no sentido amplo. Não só na medicina, na indústria, mas também para a sociedade científica para o país como um todo, em desenvolvimento, fazer desenvolvimento tecnológico e científico. É um projeto estruturante e de arraste.

Na quinta-feira passada, eu fui a um simpósio de plasma e fusão em Brasília, a convite do professor Ricardo Galvão, do IFUSP, atual presidente da SBF. Vai ser instalado no sítio do RMB um laboratório de plasma para fusão controlada, como já existe no INPE, na USP, aqui em Campinas — Tokamaks. A perspectiva da área de fusão é de o pessoal ir ficando velho, professores irem se aposentando, com poucos alunos e pouco investimento. Como aglutinar isso? A proposta nova é a área de fusão ir para a CNEN. Com isso, os laboratórios são centralizados, cria-se uma nova capacidade para fazer uma interação posterior com outros projetos no mundo, como o ITER, projeto de reator experimental. Isso só é possível, só se dá sustentabilidade a isso, se você estiver vinculado a um centro que lhe dê suporte. Então, o RMB, como sítio, nós fizemos essa proposta para que o laboratório de plasma seja lá e isso dá uma nova perspectiva à área de fusão nuclear. O RMB começa a fazer um papel de arraste porque gera uma nova infraestrutura e você dá perspectivas a grupos no país que dependem não de pequenas verbas, mas de um projeto estruturante, um projeto estruturado como país, e não simplesmente como uma pesquisa.

Na parte de aplicações sociais, na parte de medicina, o professor Celso Darío Ramos vai dar uma palestra aqui. Eu vou só mencio-

nar que, na parte de molibdênio, do molibdênio-99, dos geradores de molibdênio, o crescimento tem sido contínuo. Hoje, nós estamos em 2013, já atingimos 450, 500 curies por semana de fornecimento de geradores de molibdênio para o país.



Fonte: CNEN

Ele vem sendo crescente. Houve um pico na crise de 2008/2009. Faltou o fornecedor, que era o Canadá, o único de quem nós recebíamos. Ele parou e faltou material. Hoje nós conseguimos contrabalançar isso com material vindo da África do Sul, da Argentina — que já produz há muito tempo — e também do Canadá. Então, nós dividimos um pouco o fornecimento para, se faltar um, ter outro substituindo. Na semana passada nós tivemos falta de fornecimento da África do Sul e do Canadá e a Argentina só cedeu um terço da nossa necessidade. É crítico o processo. Em 2016, 2017, vai ser mais crítico ainda porque esses reatores são antigos, os do Canadá e os da Europa vão fechar. A oferta vai diminuir. Todo mundo está se preparando para 2016, 2018. Existe um movimento mundial nessa perspectiva.

O que queremos produzir em termos de radioisótopos? Todos os radioisótopos que a medicina nuclear utiliza e que vêm de reator: molibdênio, iodo, cromo, samário, lutécio, irídio e assim por diante.

Molibdênio: nós consumimos hoje em torno de 450 curies por semana. E a nossa proposta no reator é que no mínimo ele forneça mil curies. O reator tem um potencial muito maior, e o laboratório está sendo previsto para dobrar sua capacidade ao longo do tempo. Nós vamos poder acompanhar a curva de demanda que o Brasil fizer. E aí vai depender da medicina nuclear. É isso que nós imaginamos. Vamos dar suporte a eles para crescer e vamos acompanhar a necessidade que eles exigirem. E com isso nós vamos poder também fazer pesquisa e desenvolvimento com outros radioisótopos, em que hoje estamos inibidos.

Dos radioisótopos para braquiterapia — iodo e irídio — nós importamos hoje, e grande parte disso nós vamos fazer. E para a indústria também: com maior atividade radioativa, vamos poder produzir no reator com melhores características.

Traçadores nós já produzimos hoje e vamos continuar produzindo. O RMB é fundamental para garantir segurança do suprimento dos geradores: o tecnécio, que é o principal item na radiofarmácia para medicina nuclear. Esse radiofármaco é produzido no Ipen, que recebe em suas instalações o radioisótopo importado — vem de avião, por Campinas e Guarulhos —, vai para o Ipen, é processado, diluído, fracionado para os geradores de molibdênio e mandado para todas as clínicas do país. São mais de 300 clínicas. Hoje são em torno de 400 geradores por semana. É um trabalho contínuo. Nós importamos esse material.

Uma característica: o decaimento radioativo continua, quer dizer, a cada 66 horas, a atividade do molibdênio-99 cai à metade (meia-vida). Queremos produzir num reator como produto de fissão. Depois de produzido, espera-se um tempo de decaimento para esfriar um pouco, processa-se, ele vem de avião, vai para a radiofarmácia, é fracionado e distribuído para todo o Brasil. É toda uma logística.

Dentro da cadeia de produção, depois da etapa de processamento do radioisótopo, o que inclui a fabricação dos geradores e a farmácia nuclear. O que nós precisamos é do reator e do processamento para obtenção do molibdênio-99. No RMB nós vamos ter os dois, o reator

em si, para irradiar os alvos, e o laboratório de processar o alvo e tirar o molibdênio. E mais ainda, o anterior, que é a produção dos alvos. Essa é outra tecnologia que nós produzimos no Ipen.

Nós temos um grande problema operacional, nós somos funcionários públicos. Então, a lei de decaimento radioativo não se aplica à lei de funcionamento de funcionário público. A lei de decaimento radioativo é contínua. Se chegou o material, você tem de correr para produzir, senão vai perdê-lo.

Cada curie de molibdênio custa em torno de US\$ 400, US\$ 500. Na crise custou US\$ 800 cada curie. E é aquele tipo de dinheiro que você tem, põe embaixo do colchão, volta e não tem mais. Lembrando que cada curie é 3,7x10¹⁰ decaimentos por segundo, nós estamos falando em quantidade menor do que um miligrama de material. O valor agregado específico é altíssimo.

O serviço público não permite trabalhar fora do horário, não pode pagar hora extra, tem certas limitações. O que é feito no Ipen é um trabalho hercúleo porque chegam três fornecedores diferentes, cada dia chega um em horas distintas. Às vezes temos de trabalhar sábado para produzir e para segunda-feira entrar na clínica.

Um dos itens do RMB que também tem de ser extremamente questionado, e isso eu acho que no Brasil inteiro, é o nosso sistema. O modelo de gestão. O modelo de gestão para você ser ágil, em ciência e tecnologia, e também no processamento. Ainda continua sendo monopólio da União. Você tem o monopólio e às vezes não tem os meios de realizar esse monopólio. É outra questão estratégica a ser pensada. O RMB é um problema, há várias situações que precisam ser discutidas e mudadas no país, do contrário não se anda.

Na parte de geração de energia elétrica e propulsão naval, a criação da capacidade nacional de testar e qualificar combustíveis nucleares, novos combustíveis e materiais para serem utilizados. O que é isso? Um reator de testes, de pesquisa, é como se fosse uma máquina do tempo. Ele tem um fluxo de nêutrons grande, maior do que as usinas, então você consegue gerar o mesmo dano em menos tempo. Você pode testar, qualificar, para depois usar com segurança nos reatores.

Quem desenvolve tecnologia de materiais e tecnologia de combustíveis necessita, efetivamente, de um reator de teste de materiais. Um grande exemplo que eu sempre dou, simples de verificar isso: os Estados Unidos construíram as usinas nucleares na década de 1970. Depois das décadas de 1980 e 1990, não construíram novas usinas, mas a parte de geração de energia elétrica nuclear continuou crescendo ou foi mantido o percentual na matriz. Mas como? O país não cresceu? Então: tecnologia. Eles tinham o ciclo do combustível nuclear de 13 meses nas usinas. Ou seja, a cada 13 meses você tinha de parar a usina, ficar um mês para trocar combustíveis e continuar depois.

Com 100 usinas, você parar por um mês, são 100 usinas/mês que você está parando. O que eles fizeram? Desenvolveram a tecnologia dos materiais e combustíveis para não fazer ciclos de três meses, fazer ciclos de 18 e 24 meses. Agora você para um mês a cada 24 meses. Você ganhou o equivalente a algumas usinas nucleares na matriz. E onde é que estava o truque? Tecnologia de materiais e combustíveis. Você testou novos materiais, e isso você faz em reatores e em laboratórios de testes de combustíveis.

Isso se aplica também na propulsão naval, com mais eficiência. Um submarino americano fica 18 anos sem trocar combustível. Os submarinos franceses, de oito a dez anos. Para ter isso, você tem de ter tecnologia e tem de testar os combustíveis. A disponibilidade de um armamento desse tipo é fantástica.

A produção de UF₆ antigamente era feita no Ipen, e industrialmente o Brasil ainda não faz. A INB importa esse material. Ela manda o *yellowcake* para o exterior, transforma em UF₆, uma parte ela enriquece no exterior e uma parte já está enriquecendo aqui no país. O enriquecimento é feito tanto pelos laboratórios da Marinha quanto no INB, com a tecnologia da Marinha, tecnologia desenvolvida no programa nuclear autônomo. Depois, é transformado o gás novamente em sólido, em diferentes combustíveis e aplicações. O mesmo circuito aqui se aplica a reator de pesquisa e reator de propulsão naval. E nós vamos usar esse mesmo circuito.

Sobre as aplicações: Angra 1 e 2, e Angra 3, que está em construção ainda. Temos também o submarino, cujo reator é a parte de propulsão. O resto do arranjo do submarino é igual ao convencional.

Na área de ciência, tecnologia e formação de recursos humanos, gostaríamos de ampliar a capacidade nacional em pesquisas e aplicações das técnicas nucleares, fazer um laboratório nacional de ativação, um laboratório de análise por ativação de uso nacional. Nós já temos um laboratório, a Marina Vasconcellos vai apresentar as aplicações, as análises por ativação, e a ideia é que no RMB isso ganhe uma importância maior.

Entre os objetivos do empreendimento RMB está a criação de um laboratório nacional para a utilização de feixe de nêutrons, complementar ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Isso aqui é fundamental. Muitos pesquisadores vão para fora do país e temos uma comunidade de usuários aqui no Brasil. Aqui presente nós temos dois usuários que vão fazer a palestra e utilizam nêutrons no exterior. Seria ideal que nós tivéssemos isso aqui. Eles vão mostrar alguns laboratórios no mundo e as técnicas aplicadas.

No caso do RMB, o que nós queremos é que ele se complemente ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. E que isso se torne o laboratório nacional utilizando radiação síncrotron, raio-X e nêutrons. E uma técnica se complemente a outra. Eu acho que isso fortalece a comunidade científica do Brasil enormemente. É isso que eu digo, eu sou tecnologista, e aqui se vai gerar um monte de ciência, um monte de coisa. Mas é preciso ter a instalação, sem ela nós não conseguiremos fazer nada.

O escopo do empreendimento tem em seu centro o reator nuclear. Mas não adianta só o reator nuclear, nós temos de ter todos os laboratórios associados. Por isso é um empreendimento. Não é um projeto de um reator, é um projeto de um reator mais todas as instalações necessárias para ele funcionar. Com que objetivo? Produção de radioisótopo, teste de combustíveis e materiais e aplicação de feixe de nêutrons.

RMB Dezembro 2013

RODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS RADIOISÓTOPOS PARA SAÚDE TESTE DE COMBUSTÍVEIS LICENCIAMENTO **E MATERIAIS** REATOR RMB APLICAÇÃO DE FEIXE DE NEUTRONS PROJETO / CONSTRUÇÃO COMISSIONAMENTO.

Escopo do Empreendimento

Essas são as aplicações fundamentais do reator e da infraestrutura. Se eu vou produzir radioisótopos para medicina eu tenho de ter um reator com bom fluxo, a engenharia dele tem de ser bem feita, mas eu preciso de um laboratório para processamento desse material. Não adianta só o reator, eu tenho de ter o reator e mais o laboratório de processamento. E é um laboratório específico, com células quentes e todo um processamento. Vocês imaginem, 1,4 grama de urânio-235 sendo irradiado por uma semana, tira esse urânio, dilui isso e você tira átomos de molibdênio e purifica esses átomos. E fazendo isso quimicamente, com alta radiação. Produtos de fissão gasosos, sólidos, todos os transurânicos ali, o próprio urânio, e depois você tem de tratar de todos os rejeitos. Não é simples.

Há toda uma tecnologia associada. E esses laboratórios têm de ser implantados. Para se fazer teste de combustíveis de materiais, tem de ter um reator de alto fluxo, um dispositivo de irradiação, que nós chamamos de cápsula de irradiação, são os rigs de radiação, que simulam as condições, por exemplo, da usina nuclear: alta pressão, 150

bar; temperatura, 300-350 °C, em uma pequena amostra. E o fluxo de nêutrons é dado pelo reator. Com isso você consegue testar e simular as condições que estão no reator efetivamente.

Depois de irradiar, o laboratório pós-irradiação. E finalmente, se eu vou aplicar feixe de nêutrons, eu tenho de ter um laboratório com todos os equipamentos, a exemplo do LNLS, tem o anel do feixe, e acoplado você tem todos os equipamentos. Nos nêutrons é a mesma coisa. Você tem o reator que gera o feixe, e associados, todos os equipamentos, difração, espalhamento, neutrongrafia.

Na parte de insumos, nós temos a capacidade de operar reatores nucleares. Nós temos quatro reatores de pesquisa e dois de potência. Nós temos o conhecimento. Nós temos como fazer o UF_6 enriquecido a 20%. Os combustíveis não são iguais aos de Angra, que são óxidos de urânio. Aqui são ligas de urânio e a 20% de enriquecimento. Nós temos essa capacidade nos laboratórios da Marinha e teremos exclusivamente uma linha produzindo para o RMB.

Nós temos a capacidade de fabricação de combustível no Ipen. Nós temos um pequeno laboratório, já produzimos mais de 100 combustíveis que são utilizados no próprio reator IEA-R1. Temos tecnologia de combustível, dispersão em alumínio, tanto em óxido quanto em silicetos, molibdênio, urânio e molibdênio, e nós vamos usar siliceto de urânio a 20%. Esse vai ser o combustível de base do RMB.

Na parte de licenciamento, nós temos uma legislação existente e obrigatória, tanto na parte ambiental como no licenciamento nuclear. Ibama e CNEN na parte de regulação. Nós temos de fazer isso, e é uma corrida de obstáculos. O Sirius já está fazendo terraplanagem. Imaginem, o Ibama perguntou por que eu coloquei uma torre meteorológica, questionou se isso não impactou o meio ambiente. Então, é complicado. Eu, para entrar na área e fazer terraplanagem, tenho de cumprir 24 programas ambientais, inclusive arqueológicos. Se descobrir alguns cacos no ambiente, então tenho de fazer um programa de arqueologia para determinar ali o sítio arqueológico. É muito complicado.

E finalmente, nós temos de fazer o projeto, a construção e o comissionamento. A utilização do reator e dos laboratórios é muito científi-

ca, e também a produção. Mas a construção é engenharia, e nós precisamos de empresas de engenharia. Os institutos de pesquisa do CNEN são institutos de pesquisa, não são empresas de engenharia. Temos de fazer projeto de concepção. Tudo bem, fazemos, até uma parte do projeto básico, mas para projeto detalhado, construção, para tudo, nós temos de contratar empresas. Empresas nacionais e empresas internacionais. Quando é muito específico, tem de ser empresa internacional, porque nós não temos essa capacidade no país. Engenharia civil, mecânica, aqui se faz. Agora, quando envolve especificamente o reator ou alguns itens de materiais específicos, temos de ir ao exterior. A ideia é fazer parcerias internacionais e utilizar empresas para construção.

Eu vou falar rapidamente do ciclo do empreendimento RMB e alguma parte tecnológica dele. A primeira etapa de implantação é a prospecção do local, concepção, o projeto básico de engenharia. Já chegamos ao projeto de concepção. Se Deus quiser, na metade de 2014 acabamos o projeto básico de engenharia, e depois vem o que chamamos de empreitada integral. O projeto, detalhamento, compra, construção e montagem. Para a fabricação do combustível, nós temos a competência e agora recebemos um projeto que vai trabalhar nas instalações para deixá-las aptas para a produção continuar depois do RMB. No RMB nós vamos produzir — temos de produzir — 60 combustíveis por ano e mil alvos para produção do molibdênio por ano. Para mil curies. Para obtermos isso, vamos ter de aumentar bastante a capacidade fabril.

Sobre o licenciamento, nós já começamos o licenciamento nuclear e ambiental, e o comissionamento só vem após começar a obra efetivamente. Nós iniciamos o Projeto Básico de Engenharia, nós temos recursos para esta fase. Só que a grande obra, o grande valor está na fase de empreitada integral (EPC), e é isso que precisa caminhar.

Na parte de operação, depois, nós temos a instalação de prestação de serviço e o modelo de gestão, que precisa ser definido. Se vai ser um modelo público, organização social (OS), parceria público-privada (PPP), é isso que nós temos de definir. O que é melhor para o país.

Obviamente, serviço público, funcionário público engessa a operação e OS flexibiliza. Temos de ver o que é importante.

Nós estamos trabalhando nisso, numa linha de combustível exclusiva para fabricação. Envolve a INB, o CTMSP e o Ipen. Novamente, é um projeto de Estado. Estamos usando a competência existente no país, não de uma única organização, mas de todas as organizações que trabalham no Programa Nuclear Brasileiro.

O urânio vem da INB, que pode enriquecer até 4%. O CTMSP vai enriquecer até 20% ou pode vir direto aqui e enriquecer até 20%. Nós temos as duas opções. O Ipen fabrica o combustível. Então, vamos usar toda a capacidade existente no país para utilização. Isso é um ponto importante. Em outros países às vezes você não tem, você só tem importado. Por que começamos a fazer combustível nuclear lá no Ipen? Na década de 1970, Jimmy Carter era o presidente dos Estados Unidos. Ele emperrou, proibiu o Brasil de comprar combustível, tanto para reator de pesquisa como para reator de potência. Isso foi para o Brasil um motivador ao desenvolvimento próprio. Hoje nós fazemos todo o nosso combustível. Mas naquela época íamos parar o reator porque não tínhamos combustível.

A operação do reator é contínua, 24 horas por dia, 24 a 30 dias por mês. De tal forma que tenhamos 80% do tempo, no mínimo, em operação. Isso garante a medicina nuclear e vai dar uma ferramenta fantástica para quem é pesquisador. Dou exemplo lá do pessoal do feixe de nêutrons, no Ipen. Eles têm um fluxo de nêutrons de 10⁴, 10⁵ n/cm² s no difratômetro, e o reator opera por ciclos pequenos; então, a estatística de medida deles é baixíssima. Aqui vamos ter um fluxo de 10⁷, 10⁸ no mesmo equipamento. Operação 24 horas por dia: a estatística de medida dele vai ser completamente diferente para o mesmo equipamento.

Eu mencionei aqui 60 combustíveis por ano; alvos de urânio, mil. E um custo previsto, mais ou menos, de US\$ 10 milhões por ano. Vejam que este custo aqui é semelhante ao que nós importamos só de molibdênio. O programa que fizemos para planejamento mostrou que esse reator tem 50 anos de vida. Em 20, 25 anos ele se paga só

com o radioisótopo. Porque nós não vamos produzir só o que consumimos hoje, vamos produzir muito mais. Vamos poder aumentar a produção. Até como negócio ele se pagaria. Tirando seus aspectos estratégicos.

São 50 anos de vida útil. O projeto está sendo levado dessa forma. As partes interessadas, o governo federal; o responsável: o Ministério da Ciência e Tecnologia, através da CNEN. Nós temos parceiros, e aqui na universidade, nós falamos publicamente da intenção dessa parceria, e é fundamental. Na parte de montagem e desenvolvimento das instalações, a parceria vai ser em pesquisa ou definição de equipamento, mas no futuro a utilização tem de ser maciça; então, mandar alunos e fazer pesquisas utilizando a ferramenta.

Usuários são vários. Órgãos financiadores, hoje, são: o governo federal, a Finep, através do MCTI, FNDCT, e a Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo. A indústria nacional participa. Cooperação internacional, hoje, nós temos entre a Comissão Nacional de Energia Nuclear e a Comissão de Energia Atômica da Argentina. Eles estão fazendo um reator igual, de 30 megawatts, lá em Buenos Aires. Eles já têm um de 10 megawatts operando e já produzem molibdênio. A ideia deles é ter um reator multipropósito e também produzir molibdênio para exportação mundial. Estão fazendo um reator a exemplo do nosso e nós cooperamos de tal forma que os dois reatores sejam complementares e semelhantes. Eles têm o reator da Austrália como reator de base.

A nossa organização está muito baseada na CNEN. Eu, particularmente, faço parte do comitê diretor e do comitê executivo e sou o coordenador técnico. Existe um coordenador de gestão, que é o diretor de pesquisa e desenvolvimento da CNEN.

Eu não tenho ninguém com responsabilidade direta abaixo de mim, eu uso toda a infraestrutura dos institutos para montar a competência de realização. Eu só tenho uma secretária e cinco bolsistas. Toda a capacidade está nos institutos da CNEN. Nas várias áreas eles são responsáveis. Isso, de certa forma, no início foi bom; hoje é ruim, porque agora o projeto requer dedicação integral. Colocar

um pesquisador para fazer dedicação integral em um projeto de engenharia às vezes é muito complexo. Mas, de qualquer forma, já estamos na fase de projeto básico tentando entrar na empreitada integral, desenvolvendo também estes dois campos, fornecimento de combustível e licenciamento.

Esse é um planejamento genérico. Nós hoje estamos em projeto básico. Em 2014 nós terminamos o projeto básico, já passamos pela parte de prospecção, projeto de concepção e já iniciamos o licenciamento tanto nuclear como ambiental e estamos trabalhando na parte de combustíveis. Essa é a grande etapa que vai consumir a maioria do recurso.

Nós, hoje, estamos trabalhando com 2018 para o início da operação. Já houve um atraso de mais de um ano. Nós conseguimos só contratar a empresa Invap, que é argentina, na parte do reator, em maio de 2013. Então, isso atrasou. E a empresa brasileira que nós contratamos para o projeto básico atrasou muito também. As empresas brasileiras são um caso sério. Empresa de engenharia brasileira, hoje, é assim. Antigamente, eu acho que tínhamos empresas cuja competência técnica total estava dentro delas; hoje, a empresa é um satélite, ela tem uma base e pega serviços de várias pessoas. E não faz a integração. Isso é ruim porque os serviços vêm desacoplados. Não se faz uma integração de engenharia. Na maioria das empresas está ocorrendo isso. Eu já ouvi reclamação de todos que têm grandes obras, é a mesma coisa. Eu não sei aqui, vocês devem sofrer em alguns aspectos.

Estimativa de nacionalização: dois terços da obra, e em alguns pontos nós precisamos de empresa estrangeira; por exemplo, o reator utiliza água pesada. O Brasil não produz água pesada. Instrumentação e controle, no passado tínhamos essa capacidade. Hoje, não temos. Então, temos de importar a parte de instrumentação e controle de reator. Detector de nêutrons: eu me lembro que no passado fazíamos detector, as câmaras de fissão e tudo mais. Não fazemos mais. Então, isso é uma das coisas que nós temos de revigorar. Com a parte experimental temos de começar novamente a revigorar isso.

Aqui estão mais dois terços da obra, fornecimento nacional e uma parcela internacional. Na parte de gestão, fizemos um estudo de viabilidade financeira e fomos aprovados no Ministério do Planejamento, contemplados, aprovados como projeto de grande vulto. Na época, em 2011, eram US\$ 500 milhões, que correspondiam a R\$ 850 milhões. Era R\$ 1,70 o dólar. Hoje, o dólar está R\$ 2,30. Mas nossa estimativa continua dentro dos US\$ 500 milhões. Isso foi feito com base na experiência internacional dos reatores de pesquisa. E com base nisso aqui foi criada uma ação PPA para 2012-2015, a 12P1, e lá contemplados R\$ 400 milhões. Já estamos entrando em 2014, ainda não recebemos esse dinheiro. Se viesse esse dinheiro, o projeto daria um impulso muito grande e é isso que estamos lutando para receber.

Nós temos também uma previsão do BNDES, a fundo perdido, de US\$ 100 milhões. Mas ele só dá esse dinheiro se o governo federal fizer a parte dele. Se o governo der esses R\$ 400 milhões, temos mais R\$ 200 milhões do BNDES. E aí o projeto ganha um impulso muito grande.

Local do RMB é o Centro Experimental Aramar. Por que escolhemos esse lugar? Porque é um lugar que já foi licenciado nuclearmente. E lá estão as instalações nucleares da Marinha. Então, é o grande polo de futuro da parte nuclear.

Dentro das instalações da CNEN, ou no Ipen, no CDTN, não caberia, são instalações pequenas dentro de cidades universitárias, dentro das cidades grandes. Então, o RMB não caberia. A escolha foi a região de Sorocaba. Poderia ser na INB ou em Angra, mas não faz sentido. Uma instalação dessa tem sentido perto da pesquisa, tem sentido perto da produção dos radiofármacos, que está no Ipen. Então, a escolha aqui é óbvia.

A propriedade: A Marinha nos cedeu um milhão e duzentos mil metros quadrados e o governo de São Paulo vai fazer a aquisição de 800 mil metros. E aqui nós fizemos a audiência pública, aqui está o grande problema porque nós estamos desapropriando pessoas, e lidar com pessoas é um problema. Querendo ou não, é um problema social você desapropriar pessoas. São poucas famílias, são 11 lotes, e desses

11 lotes, em cinco moram pessoas. Mas são cinco. Se fosse um seria o mesmo problema.

Então, é Iperó, próximo a Sorocaba, a Campinas. Estamos próximos. Acho que se gasta menos tempo para vir aqui a Campinas do que para ir a São Paulo. Ou é mais ou menos igual. Ao lado da área do RMB está a Flona — Floresta Nacional de Ipanema. E Aramar está ao lado também. Em Aramar estão instalações de enriquecimento, a produção de UF₆ e a planta do reator de propulsão naval que está sendo construído, que se chama Labgene.

A área cedida pela Marinha tem um milhão e duzentos mil metros quadrados. A posição em que estará o RMB é a ideal porque tem rocha no subsolo, então o reator vai estar assentado em rocha. A área total é de dois milhões de metros quadrados. É uma área significativa, que permite uma expansão futura muito grande. Às vezes uma pessoa pode dizer: "Poxa! O raio de exclusão do reator está em 800 metros. Talvez não precisasse pegar essas casas". Realmente, agora, talvez não. Mas no futuro esse espaço vai fazer falta. E se você não tiver esse raio maior, a cidade vai chegar próximo. Vai haver o colapso, como no Ipen, em que você acaba não podendo, depois, fazer grandes coisas.

Nós vamos preservar toda a mata ciliar. Então, da área total do RMB, 30% é preservada. Tanto a mata quanto a mata ciliar. No terreno nós já fizemos levantamentos topográficos, aquele primeiro ponto de conhecimento do terreno, fizemos sondagens na posição e instalamos uma torre meteorológica. A torre meteorológica é importante para o programa de monitoração ambiental e radiológica do empreendimento.

A rocha que nós temos lá e o arenito, a cinco metros de profundidade. Então, o reator vai ser instalado calçado em rocha. Isso é fantástico, em termos estruturais para um reator. Já fizemos uma sondagem de 100 metros de profundidade e já temos uma análise muito boa do local.

Sobre o projeto básico: nós recebemos R\$ 30 milhões em 2010, do FNDCT. Foi contratada a empresa brasileira Intertechne para par-

te do projeto básico de toda a infraestrutura, e agora em 2013 nós tivemos 20 milhões complementares da Finep também. É Finep e FNDCT, e contratamos a empresa Invap, da Argentina. A Invap é uma empresa argentina associada também à Comissão Nacional de Energia Atômica. Ela projetou o reator do Cairo, o reator de pesquisa da Argélia, da Austrália, do Peru, e da própria Argentina. Estão projetando o deles. Estava previsto para projetar o reator da Holanda. É uma empresa que tem experiência na área de reator de pesquisa. Estamos adotando o reator da Austrália como base tanto para o reator RMB quanto para o reator RA-10, que eles estão projetando lá.

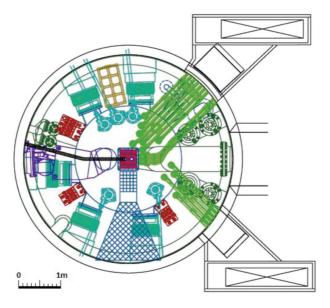
Então, o projeto básico do reator está sendo feito com a empresa Invap. Só que a nossa concepção do projeto básico é um pouquinho diferente daquela do projeto da Argentina. Nós usamos a nossa experiência também no projeto do reator.

O reator de referência começou a operar em 2007, na Austrália. Eles tinham um reator de 20 megawatts, substituíram por um novo, que é o projeto da Argentina. A Invap é a mesma empresa que faz desenvolvimento da área espacial na Argentina, área nuclear, espacial. É uma das grandes empresas hoje na Argentina.

Nosso reator é de 30 megawatts, o multipropósito, uma piscina e um núcleo que será compacto. Siliceto de urânio até 4,8 gramas de urânio por centímetro cúbico, por isso precisamos que seja 20% enriquecido, moderado e refrigerado em água leve, mas tendo água pesada e berílio como refletores. E o fluxo de nêutrons acima de $2x10^{14}$ n/cm² s. Em nosso reator do Ipen o máximo é $5x10^{13}$. Então, nós vamos estar quase uma ordem de grandeza acima. Para produção de radioisótopo, mesma massa, nós temos atividade maior, então atividades específicas bem melhores. Este é um dos objetivos.

Olhando o núcleo do reator na imagem a seguir. E essa já é a nossa concepção. Os tubos pneumáticos, irradiação de materiais no centro. Temos uma fonte de nêutrons fria para parte de feixe de nêutrons frios. Nós abrimos uma janela — este é um tanque de água pesada — de água leve para fazer teste de combustíveis. Irradiação de silício — eu vou mostrar mais adiante — e todo o complemento que vai ao

redor, os detectores de controle do reator, apoios laterais, tudo que é preciso para operar o reator. Esta é a nossa concepção, que é diferente daquela do reator argentino. Nesta área nós usamos um pouco da experiência passada de projeto de reatores e combustíveis com a Marinha desde a década de 1980.



Com isso temos um reator semelhante a um reator de teste de materiais. Multipropósito é porque faz várias funções, mas existem no mundo reatores só para testes de materiais combustíveis. Existem reatores só para uso de feixe de nêutrons. Existem reatores só para produção de radioisótopos. Nós estamos colocando num só as três funções. E particularmente aqui esta função foi um projeto que nós criamos no país.

Um dos lados do núcleo do reator funciona como se fosse um reator de teste de materiais. Em posições determinadas do tanque refletor de nêutrons nós vamos irradiar materiais para fazer os radioisótopos. Finalmente, em posições tangenciais ao núcleo do reator, vamos tirar feixes de nêutrons. O reator é compacto; então, ele tem um fluxo de água que passa de baixo para cima fazendo um primá-

rio dentro de um tanque de uma piscina aberta. Nessa concepção se consegue um reator compacto, com alto fluxo, alto desempenho e fazendo todas as funções que queremos.

Dentro do tanque refletor temos água pesada, D_2O . Isso nos permite fazer os feixes de nêutrons. Se não tivéssemos feixe de nêutrons, não precisaríamos de água pesada. Água pesada — aqui temos os físicos —, comparando a reação nuclear com nêutrons, entre o deutério e o hidrogênio, o deutério tem eficiência de moderação dos nêutrons mais ou menos semelhante ao hidrogênio, mas o deutério tem uma reação de absorção de nêutrons muito menor que o hidrogênio. Então, você consegue um livre caminho médio maior para os nêutrons. Mecanicamente você consegue arrumar. Quando há água leve, temos o fluxo térmico de nêutrons. No núcleo do reator nós colocamos berílio e água leve. Então, a concentração de fluxo está na posição onde está o berílio. Então, eu consigo irradiar muito bem amostras de combustíveis para reator de potência.

No centro do reator eu consigo irradiar materiais porque o fluxo de nêutrons "rápidos" é maior. Externamente ao núcleo predomina o fluxo de nêutrons "térmicos". No tanque moderador eu tenho uma banda com alto fluxo de nêutrons térmicos ainda e mecanicamente eu posso arrumar um dispositivo para extrair os feixes. Na posição com refletor de berílio e água leve eu não teria, mecanicamente, como extrair o feixe de nêutrons. Por isso nós usamos água pesada no tanque de refletor para produção de radioisótopos e extração de feixe de nêutrons. O nosso reator tem água pesada (um tanque de água pesada), berílio e água leve (na posição de teste de combustível nuclear). E a refrigeração do centro dele é com água leve. Esta é a nossa concepção do reator, um reator de pesquisa.

Em posições determinadas no tanque de refletor, nós temos irradiação de materiais para produzir radioisótopos radioativos, e a irradiação de alvos de urânio para produção de molibdênio. É alto o fluxo de nêutrons térmicos nestas posições. Há tubos pneumáticos no tanque refletor, onde eu posso irradiar materiais e mandar, pneumaticamente, para o laboratório e para o laboratório de produção

de fontes também. Há posições, também com tubos pneumáticos; com fluxos de nêutrons um pouco mais "duros", ou seja, fluxos de nêutrons térmicos, mas também com componente expressiva de fluxo de nêutrons "rápidos". A posição mais periférica do tanque refletor é adequada para o grupo da doutora Marina, para análise por ativação com nêutrons.

A amostra irradiada vai direto para o laboratório dela. Manda amostra para o reator, irradia, e volta ao laboratório. O operador do reator nem vê essa ação. Então, ela manda do laboratório dela para lá, irradia no tempo que ela quer e volta. A doutora Marina vai explicar o processo quando falar sobre a análise por ativação de nêutrons.

Em posições periféricas do tanque refletor, pode ser feita a dopagem de silício. Dopagem de silício para a área de eletrônica. E vamos tirar feixes transversais e feixes térmicos para o laboratório de feixe de nêutrons, e vai haver uma *Cold Neutrons Sorce*, uma fonte de deutério a 19 graus Kelvin para termalizar os nêutrons nessa temperatura. E aí você tira os feixes de nêutrons frios, como chamamos. Associados a isso você vai ter os equipamentos, espalhamento de baixo ângulo. O Fabiano Yokaichiya vai explicar um pouco isso.

Nós fizemos a concepção do reator para ser multipropósito mesmo. Com o dispositivo de irradiação da amostra de combustível eu aproximo ou afasto a amostra do reator. Com esse dispositivo eu posso simular uma operação de uma central nuclear, ou mesmo da propulsão naval, a operação do reator. Se eu aproximo, estou aumentando potência. Se eu afasto, estou diminuindo potência — porque eu estou tendo mais ou menos nêutrons; então, temos as taxas de reação. Com isso eu posso simular rampas de potências, seguimento de carga, toda a operação das usinas. E aí, testar, em funcionamento em um reator aqui, como o combustível vai se comportar.

No núcleo do reator os elementos combustíveis são do tipo placa. São 21 placas. E dentro dessa placa, que é de alumínio com dispersão de siliceto em alumínio, há duas posições centrais de irradiação para teste dos materiais. Os danos dos materiais são feitos basicamente com nêutrons rápidos. O espectro de nêutrons rápidos dentro do rea-

tor em que estamos produzindo as fissões é bem maior. Aqui eu faço o teste dos materiais.

Nós estamos falando de fluxos térmicos da ordem de 10¹⁴. Na posição de irradiação vai-se poder produzir irídio, molibdênio, e um fluxo de nêutrons, também, na faixa de 2x10¹⁴, ou seja, nós vamos ter um reator excelente para utilização de nêutrons.

As guias de nêutrons saem do reator, e no interior da blindagem de concreto ao redor do reator são posicionados o que chamamos de *shutters*, o "fechamento" das guias de nêutrons. Então, este é o princípio de funcionamento.

O laboratório vai funcionar assim: se abrimos a "torneira", fornecemos nêutrons para o laboratório; se fechamos a torneira... Com isso eu dei independência à operação do reator, eu opero o reator independentemente do laboratório. O laboratório pode funcionar a contento. A pessoa que opera, vamos dizer, o acelerador é diferente do grupo que vai utilizar o acelerador.

Na engenharia das estruturas, nós vamos terminar o projeto básico. Hoje nós temos figuras, eu poderia ficar aqui horas só mostrando várias figuras do reator.

Para a produção dos radioisótopos, eu já mencionei. A infraestrutura é bastante grande. Este é um processo que estamos desenvolvendo ainda em nível de laboratório. Para o industrial queremos contratar uma empresa especialista. Ou seja, sabemos como separar o molibdênio, precisamos dissolver o alvo — estamos fazendo o processo básico —, dissolvemos o alvo, sabemos como tratar o rejeito, mas tudo isso ainda em nível laboratorial, a planta industrial nós temos de contratar como engenharia.

No prédio de processamento, temos as células quentes. É uma infraestrutura bastante grande. Na parte de materiais, também teste, são vários laboratórios. O laboratório da Marinha, no passado, foi desenvolvido com o Ipen. Não foi construído ainda, só foi construído um *mockup*, um modelo, mas estes equipamentos são reais e isso está sendo passado do CTMSP para a CNEN para colocar no laboratório de pós-irradiação.

No laboratório de pós-irradiação nós temos uma linha para combustível e uma para materiais. Por exemplo, nós vamos poder testar os espécimes que estão sendo irradiados nos reatores de potência para verificar o envelhecimento do material com a irradiação. Temos equipamentos que são basicamente testes mecânicos, vão vir para cá e vão poder ser testados. Então, isso também é outra facilidade no país.

No laboratório de nêutrons, como eu disse, o reator vai ficar independente do laboratório. Quem comanda esse laboratório pode ser desacoplado de quem opera o reator. E a ideia é ao redor dele ter equipamentos e o prédio de feixe de nêutrons com os equipamentos.

O Fabiano Yokaichiya vai mostrar isso mais adiante e também os equipamentos. Também na parte de ativação por nêutrons, a Marina Vasconcellos vai falar. É esse o plano diretor do RMB, o reator e os laboratórios associados, a parte administrativa e a parte de infraestrutura. Há áreas em que vamos poder expandir, com grandes instalações. No sítio do empreendimento RMB, além do laboratório de fusão nuclear, acredito que possamos colocar aceleradores de maior potência, laboratórios de lasers de alta energia. No Ipen há um laboratório de laser de tera Joule, do doutor Nilson Dias Vieira Junior, pesquisador do Ipen e também ex-superintendente do Ipen. Aqui poderia ser instalado um grande laboratório de laser, talvez até com reações nucleares. Isso é um sonho. E aceleradores do tipo cíclotron, ou outro, que poderiam fazer outros radioisótopos, de meia-vida curta, vamos dizer, e também fazer outros experimentos. Espaço nós temos. Nós estamos fazendo infraestrutura: uma subestação elétrica, toda parte de tratamento de água, fornecimento de água. No plano diretor temos o reator com os laboratórios associados, a parte administrativa, inclusive com um auditório e salas de aula, com refeitório, um pequeno hotel, ambulatório, e a parte de infraestrutura de sítio, produção de água e o que se precisa para dar suporte ao sítio.

O laboratório em si é o reator, estocagem de combustível, o laboratório de nêutrons, o laboratório de processamento dos radioisótopos, testes de materiais, radioquímica, análise por ativação, um prédio para tratamento e armazenagem de rejeitos, uma oficina e o prédio dos pesquisadores. Haverá salas para seminários e a parte de suporte. Esse é o ambiente.

O licenciamento ambiental é uma fase importante, nós temos de fazer um licenciamento ambiental e nuclear, nós fizemos o EIA/Rima, colocamos para o Ibama, fizemos três audiências públicas, dias 22, 23 e 24 de outubro de 2013, em Iperó, Sorocaba e São Paulo, e também fizemos o relatório inicial para a parte nuclear. É uma corrida de obstáculos, a primeira aprovação é a licença prévia do Ibama. E o relatório de local, a licença de local da CNEN, ou seja, para o Ibama temos de demonstrar que a instalação não interfere no meio ambiente. E para a CNEN temos de mostrar que o meio ambiente não interfere na instalação. É o processo inverso. Temos de mostrar que não vai haver inundação, o vento não vai derrubar nada, e assim por diante. E para o Ibama temos de demonstrar que o meio ambiente não vai sofrer por causa das instalações.

Então, essa é a primeira licença. Nós já fizemos os relatórios e estamos esperando. As próximas licenças, com o projeto básico terminado, são a licença de instalação do Ibama e a licença de construção da CNEN. Eu só posso entrar no terreno quando eu tiver essas licenças. Eu estou obtendo esta que diz que eu posso usar o local, e aqui eu vou preparar os relatórios para pedir a licença para iniciar a construção. E depois temos de ter a outra licença de operação. Toda vez temos de demonstrar e a cada fase temos de fazer relatórios para cada um dos envolvidos. Nós já fizemos o EIA/Rima, se vocês acessarem o site do Ibama, vocês vão ver o estudo lá e o relatório Rima. E para a CNEN nós fizemos o relatório local. Essas são fases importantes. Aqui você demonstra que o projeto existe e que tem uma identidade, uma característica. Quer dizer, nós existimos.

Finalmente, a parte do combustível. Só queria frisar o seguinte: nós recebemos 25 milhões de reais e parte desse recurso é para o CTMSP, para a linha de enriquecimento, parte é para o Ipen, para a linha de fabricação dos combustíveis, e parte é para usarmos — eu não mencionei no início . O quarto reator de pesquisa que nós temos, que foi construído em 1988, é uma unidade crítica que nós projeta-

mos no Ipen, com a Marinha. É uma unidade para testar núcleos de reatores de potência. Eu acho que também pode servir para reatores de pesquisa. Neste projeto nós vamos fazer um núcleo do RMB na unidade crítica. Nós podemos testar a física de reatores desse núcleo na unidade crítica. Um reator de potência zero opera com 10 watts. É um brinquedinho na mão do pessoal da física de reatores. Você mexe como quer e calcula usando método de Montecarlo. Inclusive o reator vira benchmark porque nós controlamos muito bem a fabricação e conhecemos os materiais, a geometria. Então, os cálculos ficam precisos e ele é usado como benchmark no mundo também.

É um projeto de arraste. Está fazendo a roda girar. Temos mestrado, doutorado, temos gente trabalhando nisso. É esse o projeto.

APLICAÇÕES DA ANÁLISE POR ATIVAÇÃO COM NEUTRONS

MARINA BEATRIZ AGOSTINI VASCONCELLOS – Doutora em química analítica pela USP, atualmente é pesquisadora e professora titular do Ipen e orientadora no curso de pós-graduação na Universidade de São Paulo, na área de concentração de tecnologia nuclear. Tem experiência na área de química, com ênfase de análise de traços e química ambiental. Também é membro titular da Academia de Ciências do Estado de São Paulo desde 2008 e bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq, nível 1-B.

VOU FALAR um pouco das nossas atividades atuais, no Ipen, e futuras, no RMB. Aqui um pouquinho de história, como o doutor Perrotta já mostrou, um pouco da evolução de um reator nuclear do Ipen, que é um instituto da Comissão Nacional de Energia Nuclear em São Paulo.

O nosso orientador, o doutor Fausto Lima, talvez alguns aqui o conheçam, foi o pioneiro na análise por ativação no Brasil e uma pessoa que participou ativamente da instalação do reator, sem falar

que nos fins de semana ele ia colar os azulejos da piscina, que hoje em dia é de aço inox, tal era a paixão que ele tinha por esse projeto. Foi um projeto inédito, imaginem, nos anos 1950.

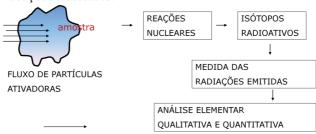
Nosso grupo é o grupo de análise por ativação com nêutrons, do Centro de Reator de Pesquisas (CRPq) do Ipen. Nós pertencemos ao grupo de pesquisa e desenvolvimento, à gerência de pesquisa e desenvolvimento do CRPq, que é o centro que opera o reator nuclear. Nós somos usuários, ou clientes, como é a palavra mais moderna, somos clientes dos nêutrons do reator.

O principio básico da análise da ativação com nêutrons, na verdade, é um método físico que serve para fins químicos. O nosso grupo de análise por ativação do Ipen é basicamente um grupo de químicos que usam um método baseado na formação de isótopos radioativos por meio de reações nucleares. Então, o princípio é totalmente físico.

Na nossa amostra, que pode ser das mais diversas origens, como eu vou mostrar, por interação com o fluxo de partículas ativadoras, no caso, os nêutrons, ocorre uma série de reações nucleares, formação de isótopos radioativos e, por meio da medida das radiações emitidas, no nosso caso, basicamente medida de radiação gama, por espectrometria de raios gama, podem-se fazer análises elementares qualitativas e quantitativas.

Análise por Ativação com Nêutrons

O método de análise por ativação baseia-se na formação de isótopos radioativos, por meio de reações nucleares.



Análises elementares significam o quê? Análise da concentração de elementos químicos nos mais variados tipos de amostras, e a característica é que se consegue determinar elementos em concentrações extremamente baixas.

Algumas características principais do método são: alta precisão e exatidão; alta sensibilidade e seletividade; possibilidade de análises multielementares. Em uma mesma amostra você pode fazer uma varredura às vezes de 20 a 30 elementos. Muitos métodos químicos permitem que você analise cada elemento individualmente. Outra característica é a possibilidade de análise não destrutiva: não é necessário fazer, geralmente, ataque químico da amostra. Um ataque químico real de uma amostra, em que você coloca todos os elementos em solução, não é uma tarefa trivial, é bastante complexa. Principalmente quando se lida com amostras geológicas, com que eu trabalhei muito. Elas são muito refratárias, difíceis de colocar em solução. Também é preciso usar reagentes químicos, e há problemas ambientais com isso. Nós utilizamos amostras muito pequenas, de 50 miligramas a 200 miligramas, sem necessidade de ataque químico. Isso é uma grande vantagem.

A análise por ativação com nêutrons recentemente foi considerada um método primário pelo CCQM (Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology), que é um órgão ligado ao BIPM (Escritório Internacional de Pesos e Medidas), responsável pela metrologia química. Esse é um aspecto extremamente importante, pois poucos métodos podem ser considerados primários ou de referência.

Não é porque somos da área que vamos falar só das vantagens: uma das desvantagens é ter de lidar com material radioativo, obviamente. Isso é uma questão não tão trivial também. É necessária toda uma proteção radiológica ao redor, todos os cuidados de treinamento, principalmente de alunos, pois somos responsáveis por eles, embora os níveis com que nós trabalhamos sejam muito baixos, na faixa de microcuries. Isso é totalmente diferente da produção de radioisótopos para medicina nuclear, que lida com atividades muito maiores.

Há também a questão do tempo. Ao lidar com radioisótopos de meia-vida curta, muitas vezes é necessário sair, literalmente, correndo para medir sua amostra. Nós lidamos com isótopos até de alguns segundos ou minutos, como é o caso do vanádio-52, com que eu trabalhei mais recentemente na área ambiental.

O Laboratório de Análise por Ativação Neutrônica (LAN) ocupa uma área bem considerável do centro. Ele tem laboratórios para preparação de amostras, para manuseio de materiais radioativos, medidas por espectrometria gama. Opera o sistema pneumático de irrradiações curtas do Ipen. Um dos grandes *upgrades* será, no RMB, ter a possibilidade de vários sistemas pneumáticos — há até certa disputa entre os pesquisadores por esse sistema pneumático. Originalmente, o reator do Ipen tinha quatro estações pneumáticas; hoje em dia, por uma série de questões, só temos uma.

ATIVIDADES DO LAN

- LAN ocupa 950 m² do CRPQ
- Laboratórios para preparação de amostras
- Manipulação de materiais radioativos e medidas por espectrometria de raios gama
- · Opera o sistema pneumático de irradiações curtas do Ipen

Equipe:

- 9 pesquisadores com Ph.D
- · 1 pesquisador com M.Sc
- · 2 técnicos de química
- 1 técnico de eletrônica
- 1 secretária
- Alunos de IC, mestrado e doutorado (25-30)



É uma grande vantagem você fazer irradiações curtas, porque o tempo de medida é muito curto. Essa é uma desvantagem da análise por ativação também para alguns elementos: muitas vezes, é preciso fazer longas medidas, principalmente de amostras biológicas, amostras médicas.

Nós somos um *staff* de nove pesquisadores com Ph.D, dois técnicos de química, um técnico de eletrônica e um número considerável de alunos que são pessoas extremamente importantes para o nosso grupo. Nós atuamos em nível de pós-graduação na Universidade de São Paulo. O Ipen é um instituto associado à USP na área de tecnologia nuclear. Então, nossos alunos se formam com a grife, vamos dizer, da USP. Mestres e doutores da USP na área de tecnologia nuclear. Obviamente, isso também vai continuar no RMB.

O número de aplicações é muito grande. Aliás, uma das características do método também é a interdisciplinaridade. Pode-se analisar ou atuar em campos muito diversos, como amostras geológicas, embalagens plásticas, amostras arqueológicas, metais, amostras agropecuárias, aplicações em medicina e biologia, alimentos e dietas, amostras ambientais e metrologia química.

Obviamente, nós temos projetos com apoio financeiro dos órgãos principais do Estado de São Paulo e do Brasil, e também da Agência Internacional de Energia Atômica, que é um dos grandes patrocinadores das pesquisas do Ipen, porque somos um instituto de pesquisa nuclear.

Temos cursos também: É extremamente importante a formação de recursos humanos, ainda mais porque vamos ter novos integrantes do laboratório, no caso, o RMB. Eu sou responsável principalmente pelos cursos de radioquímica e análise por ativação, que é um curso de pós-graduação na USP. Há algum tempo temos oferecido uma disciplina optativa na graduação da USP. É muito importante trazermos jovens alunos de iniciação científica e de mestrado, assim eles já vão sendo motivados desde novinhos.

Nós procuramos desmitificar um pouco essa questão de perigo de trabalhar com material radioativo. Muitas vezes o pai e a mãe dizem: "Ah, não! Você não vai entrar naquele instituto cheio de radiações e coisas perigosas". Então, nós mostramos que se trabalha com toda a segurança, que os níveis de radiação não são nada assustadores.

Rapidamente, algumas aplicações. Por exemplo, em arqueologia é uma das aplicações mais recentes do nosso grupo. Numa parceria com o MAE — Museu de Arqueologia da USP —, usa-se análise por

ativação com nêutrons para fazer o *fingerprinting* de artefatos arqueológicos. Os arqueólogos, normalmente, lidam com a morfologia das peças, com as pinturas, e isso nem sempre é tão matemático. Então, um colega nosso introduziu a arqueometria para eles, que são métodos matemáticos estatísticos que permitem identificar o centro de produção, as rotas de comércio e troca de materiais, e artefatos de povos pré-históricos. Isso é muito importante porque os povos pré-históricos brasileiros são considerados muito primitivos. E esses estudos estão lançando uma nova luz sobre a vida e a cultura deles. E a análise por ativação tem contribuído para isso.

Também há aplicações na autenticidade de objetos, principalmente no caso da cerâmica marajoara, muito valiosa e alvo de fraude ou tráfico. Pelo *fingerprinting* de elementos-traço e usando método de estatística multivariada pode-se entrar nesse campo, o que é muito interessante.

Entre alguns dos locais de amostra estão: Manaus, Ilha de Marajó e Xingó — existe um museu arqueológico muito importante no Estado de Sergipe. As cerâmicas do parque do Xingu, no Estado do Amazonas, têm sido analisadas pelo nosso grupo. Pelas cerâmicas marajoaras, belíssimas, pode-se ver que os nossos índios não eram tão primitivos. As cerâmicas são comparáveis até às de outros povos da América, e temos trabalhado com isso.

Há um trabalho de outra colega de avaliação de metais em solos de parques urbanos de São Paulo. Esse trabalho teve bastante atenção da mídia porque ela fez análise de elementos potencialmente tóxicos em parques onde circulam muitas crianças com suas babás. Ela verificou, pela análise por ativação ou fluorescência de raio-X, que em alguns casos os teores de alguns elementos tóxicos eram consideráveis e houve preocupação. Então, ela mostrou a situação de alguns parques, como o Parque da Aclimação e o Parque Buenos Aires, que tiveram valores mais altos desses elementos potencialmente tóxicos.

Um dos trabalhos que eu fiz é o estudo de contaminação de mercúrio nas populações brasileiras. Eu trabalhei mais no parque indígena do Xingu, com biomonitoração de mercúrio em populações indígenas por meio da análise de cabelo. O cabelo é considerado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como bom indicador de contaminação por mercúrio, principalmente mercúrio orgânico, metilmercúrio, que é oriundo do consumo de peixes, e os índios comem peixes todos os dias. Não como nós, que consumimos uma vez por semana, eles consomem todos os dias. Nós encontramos concentrações extremamente altas de mercúrio no cabelo deles. É uma questão que ainda está em aberto: Até que ponto essas populações têm sequelas devido ao teor muito alto de mercúrio? Os peixes bioconcentram mercúrio até mil vezes, 10 mil vezes. Então, é como dizemos: "É tão bom, é tão saudável comer peixe". Bem, até certo ponto.

Nos Estados Unidos, até as mulheres grávidas são aconselhadas a não comerem certos tipos de peixes predadores durante a gravidez, porque o metilmercúrio consegue passar a barreira da placenta; ele atua na divisão celular, na formação do cérebro. Em Minamata, no Japão, houve uma contaminação muito forte por mercúrio e nasceram muitas crianças com malformações devido à ingestão de peixes contaminados, mas nesse caso foi uma intoxicação aguda.

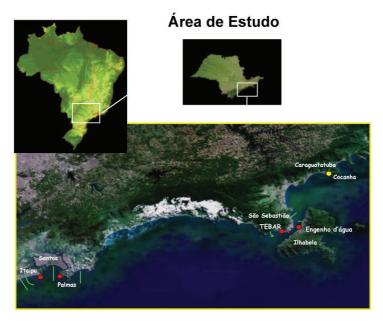
No nosso caso, a população brasileira tem cerca de 1 ppm de mercúrio no cabelo, em média. Aquelas populações indígenas que estudamos tinham teores muitas vezes maiores. Foi uma questão que também chamou muita atenção. Até hoje se discute. Nesse nível encontrado nos índios, será que há danos à saúde ou não?

Outro trabalho de uma colega foi também o conteúdo de mercúrio e metilmercúrio e outros elementos em peixes, cabelos e dietas de pré-escolares da região amazônica. As crianças também tinham teores altos de mercúrio pelo consumo de peixe.

Também fiz um trabalho de biomonitoração de alguns elementos tóxicos, principalmente, em regiões costeiras do Estado de São Paulo, usando um método de transplante de um mexilhão chamado *Pernaperna*. Esse trabalho é uma parceria com o Instituto Oceanográfico da USP. De modo geral, temos uma interação muito forte com os institutos da USP. Temos um método muito poderoso de análise química, mas temos de encontrar os parceiros que têm as questões em que nós vamos tentar atuar.

Por sinal, nós temos uma parceria muito forte há muitos anos com o Instituto de Geociências da Unicamp, com a doutora Jacinta Enzweiler. A Unicamp até adquiriu um espectrômetro de raios gama anos atrás e colocou no Ipen para facilitar as análises. Nós temos atuado muito com a Unicamp nessa área geológica.

No caso dos trabalhos com mexilhões, obtivemos os organismos de uma fazenda que existe em uma praia chamada Cocanha, em Caraguatatuba, na qual se cultivam mexilhões. O cultivo de mexilhões foi crescendo muito no Brasil. Em vários outros países praticamente não se coletam mais mexilhões da natureza, são todos de cultivos. Eles são retirados pequeninos, os bichinhos, as sementinhas, são colocados em uma corda, engordam dentro dessa praia limpa, e depois são comercializados.





Outras praias da região já estão tendo esse tipo de fazendinha. E nós fizemos um estudo que muito poucas pessoas fizeram no Brasil, porque é um estudo muito complicado. Se não fosse o pessoal do Instituto Oceanográfico, não teria sido possível. Você tem de colocar

essas cordas com mergulhadores. Nós colocamos no porto de São Sebastião, no terminal Tebar, em Ilhabela e na Baía de Santos, que é extremamente poluída. Então, a ideia é esta: retiram-se mexilhões de uma região limpa e transplantam-se para regiões contaminadas.

Na praia da Cocanha, que é uma praia lindíssima, os mexilhões já gordinhos ficam na corda, que fica pesadíssima. Os mergulhadores que fizeram esse trabalho são alunos do Oceanográfico. E depois há todo um extenso trabalho que os alunos fazem, de preparação da amostra.

Nós verificamos que, no caso do arsênio, houve valores muito mais altos do que os que a legislação brasileira permite para alimentos.

No caso do cádmio, felizmente, não. No crômio também os valores foram bastante altos. O mercúrio, felizmente, ficou bem abaixo do limite. O chumbo também. O selênio é um elemento nutricional, mas que a partir de certa concentração pode ser considerado tóxico. Isso foi uma tese de doutorado de uma aluna minha e estudamos a variação sazonal dos elementos nos vários sítios. E uma coisa que chamou atenção é que muitos elementos são muito altos na própria fazenda.

Fiz outro trabalho com uma aluna de mestrado sobre o vanádio, que é um elemento marcador de contaminação por petróleo, e o nível era muito mais alto na região da fazendinha de mexilhões do que em outras regiões contaminadas. Então, quando você faz um trabalho de pesquisa, muitas vezes as coisas são surpreendentes. A fazenda é supostamente um lugar limpo. Nós, como pesquisadores, temos de ter sempre a cabeça aberta, porque as coisas acontecem, muitas vezes, de forma diferente do que pensamos; fomos aprendendo muito nesse processo.

Outros trabalhos relacionados à área de nutrição: "Estimativa da ingestão dietética de elementos essenciais e tóxicos em dietas e alimentos de grupos populacionais brasileiros", que é uma parceria muito forte também com o Departamento de Nutrição Experimental da USP. Uma aluna minha começou com esse trabalho e depois outros colegas entraram. Nós fizemos a análise por meio da porção em duplicata, que também muito poucas pessoas aqui no Brasil fazem,

porque é muito trabalhoso, é preciso coletar tudo que a pessoa come todos os dias. Nós fizemos esse trabalho com as crianças da creche da USP. Esse processo é bastante difícil com crianças pequenas, que se movimentam muito e deixam uma boa parte da comida no prato. E os pais tinham de relatar o que elas comiam em casa, de manhã, à noite, tudo que elas comiam. Se as crianças comiam um iogurte de manhã, era preciso pegar o iogurte e misturar em toda a dieta composta da criança.

Isso foi feito também com trabalhadores industriais e com idosos. Verificou-se que existem deficiências de cálcio e deficiências de selênio, tanto nas crianças quanto nos idosos. Em alguns casos, principalmente nos idosos, é necessário suplementação. As crianças, nessa faixa etária, jogam muita comida fora. É preciso pesar o que sobrou na bandeja da criança; então, é muito trabalho. Você põe na bandeja, mas a criança não come tudo, então, significa que nem tudo que estava naquela bandeja foi consumido. Ela jogou muita coisa fora. E aí você pesa tudo depois para ver o que ela realmente comeu. Esse método é interessante porque mostra o que realmente a pessoa come o dia todo.

Também há um estudo mais recente, que foi feito por uma exaluna minha, que agora já é orientadora. Foram tomados dados do IBGE sobre o consumo da população de São Paulo. Foram analisados 72 itens alimentares. Neste caso já foram preparados para o consumo. E agora ela tem um projeto Fapesp, acabou de ganhar um novo espectrômetro, em função da importância desse tipo de projeto.

Na parte médica, a doutora Mitiko Saiki, uma colega nossa, trabalha há bastante tempo com diversos médicos da Faculdade de Medicina da USP, com o doutor Wilson Jacobi, um geriatra conhecido, com o doutor Nairo Sumita, que é chefe do Laboratório de Análises Clínicas do Hospital das Clínicas, e também com o doutor Paulo Saldiva, que trabalha na área ambiental. Então, um dos primeiros trabalhos que ela fez foi a análise de elementos-traço em soro sanguíneo da população idosa. O doutor Jacobi tem um ambulatório de nonagenários; então, interessa saber qual a concentração de elementos em idosos saudáveis. Ele tem um projeto chamado *Sucessful Ageing*, com pessoas em

idade superior a 60 anos. Foi coletado o sangue, separado o soro e determinada uma série de elementos importantes.

Para se saber o que há no sangue de idosos, por exemplo, é necessário saber os valores de referência. Como no caso do cabelo: para saber se alguém está contaminado com mercúrio, é preciso saber qual é o nível de mercúrio da população não contaminada. Nesse trabalho foram estabelecidos alguns níveis de referência para alguns elementos importantes. Essas concentrações variam com a idade também; então, o foco aqui foram os idosos. E verificou-se que, com a idade, os teores de selênio, que é um elemento importante, iam diminuindo. O sangue é uma amostra muito difícil para determinar elementos-traço, porque a simples coleta com uma agulha de aço inox já introduz contaminação de metais, tais como cromo, ferro e cobalto. Então, o pessoal até colocava uma cânula de teflon para evitar o contato com metais.

Outro trabalho que ela está fazendo é a determinação de elementos-traço em tecido cerebral humano. Porque o estudo de doenças neurodegenerativas, com o envelhecimento da população, é extremamente importante: saber qual é o papel de alguns elementos-traço, eventualmente, nas demências, como Alzheimer e outras.

A USP tem um banco de cérebros muito extenso e ela fez análise de diferentes partes do cérebro. O tecido cerebral também é uma amostra muito difícil de lidar, pois não se pode contaminar com metais. Por exemplo, quando vamos moer uma amostra desse tipo, como nosso método é muito sensível, não se pode colocar em um moinho com partes metálicas. Então, a preparação da amostra, nesse caso, é extremamente crítica. Nós precisamos fazer tudo com plástico ou nós temos liquidificadores em que substituímos as pás de aço inox por pás de titânio, que são feitas na oficina do Ipen. Porque o titânio é um metal que geralmente não é tão contaminante.

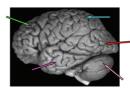
Então, a doutora Mitiko verificou que diferentes partes do cérebro apresentavam diferentes níveis de elementos, como ferro e zinco, que estão envolvidos no declínio da função cognitiva devido à formação de radicais livres de oxigênio e formação de placas senis.

É lógico que esses problemas são extremamente complexos, não sei dizer que elemento está causando que coisa; isso em seres humanos é bastante complicado. Eu já li muitos trabalhos sobre o papel do selênio que dizem que é protetor para certos tipos de câncer. Na Austrália, acharam, numa época, que o número de cânceres na população era muito alto porque o solo era muito pobre em selênio. No Reino Unido também, por isso estavam acrescentando selênio na farinha.

OBJETIVO: Contribuir para pesquisas sobre as causas de doenças <u>neurodegenerativas</u>

Amostras de cérebro:

- Banco de cérebros da FMUSP
- 602 cérebros coletados e classificados por Clinical Dementia Rating (CDR)



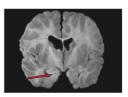
Partes do cérebro

Resultados preliminares:

Diferentes partes do cérebro apresentaram diferentes níveis de elementos

[Fe, Na, Se, Zn] demented > [Fe, Na, Se, Zn] normal

Fe e Zn estão envolvidos no declínio da função cognitiva - formação de radicais livres de oxigênio e formação de placas senis



Secção do cérebros mostrando o hippocampus



Então, o pessoal se debruçou a estudar o papel do selênio. Um estudo fala que suplementação de selênio funciona para homens e não funciona para mulheres. Outros mostram que funciona para determinados tipos de doença e não funciona para outras. O quadro é muito complicado. Nós somos químicos analistas, fazemos as análises quando os parceiros nos procuram. Porque a diversidade nos seres humanos é muito grande. Se você pega um ratinho da mesma linhagem, que fica em uma gaiolinha na mesma temperatura, com a mesma alimentação, é uma coisa. Agora, com grupos de seres humanos, a variabilidade é extremamente grande. Os métodos estatísticos,

nós sabemos, vão até certo ponto. Quando a variabilidade é enorme, os métodos estatísticos começam também a não ser tão eficientes.

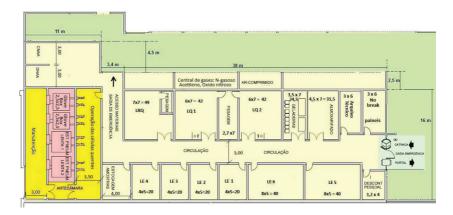
Metrologia Química: Nós participamos de muitas intercomparações de análises de elementos diversos organizados por entidades como a Agência Internacional de Energia Atômica e o Sistema Interamericano de Metrologia. De que adianta produzir dados se eles não têm qualidade? Então, se você não se debruça na área de metrologia química, sendo um químico, você não vai ter resultado com a qualidade necessária. A participação em intercomparações é de fundamental importância. Resultado de análise química parece uma coisa simples: coloca-se em um aparelho e lê-se no final. Mas, à medida que você toma amostras complexas e elementos em concentrações muito baixas, se não houver cuidados extremos, os resultados podem ser totalmente não significativos.

Nós estamos agora produzindo materiais de referência; é um projeto ambicioso de se tornar produtor de materiais de referência de peixe e mexilhão. Um aluno meu de doutorado preparou e caracterizou um material de referência de mexilhão e outra colega preparou, com apoio da Agência Internacional de Energia Atômica, um material de referência de peixes. Esses materiais de referência são extremamente caros. Esse pode ser um serviço importante para o RMB — ser um produtor de materiais de referência — porque o Brasil praticamente não produz materiais de referência biológicos. O nosso grupo está tentando se qualificar nesse aspecto de determinar os constituintes principais como elementos-traço, como arsênio, cádmio, mercúrio, chumbo e outros. E até fazer a especiação química, que é a análise de outras formas químicas.

Perspectiva da análise por ativação no RMB: É óbvio que nós vamos atuar num "outro mundo", com laboratórios moderníssimos, com projetos realizados sob medida para o nosso laboratório. Como o doutor Perrotta falou, o reator do Ipen tem mais de 50 anos, e os nossos laboratórios também são antigos. Então, nós vamos poder ampliar esse trabalho de pesquisa. Obviamente, os cursos vão ser extremamente importantes para a formação de recursos humanos. Vamos

ter ampliação de prestação de serviço de análise, com número maior de estações pneumáticas, laboratórios mais equipados, determinação de urânio por *delayed neutron activation analysis* — esse método tem uma importância muito grande na prospecção de urânio porque é um método muito rápido por contagem de nêutrons. *Delayed neutrons* (nêutrons atrasados) são os nêutrons emitidos por produtos de fissão do urânio. Embora tenham uma meia-vida curta, uma meia-vida máxima de 55 segundos, no caso do urânio, é bastante viável.

Laboratórios nas instalações do RMB



Teremos laboratórios melhores, condições melhores de manipulação de amostras, estações pneumáticas, e maior participação de usuários externos, que é um foco que o doutor Perrotta está enfatizando bastante. A posição do nosso laboratório será, obviamente, próxima ao reator. Nós vamos ter um número grande de laboratórios de espectrometria gama, estações pneumáticas lentas e rápidas, laboratório de *delayed neutron activation analysis*, e laboratórios químicos e radioquímicos. Portanto, nós vamos ter uma área bastante extensa. Então, isso vai nos trazer uma ampliação de perspectivas muito grandes com o RMB, com os pesquisadores antigos e, espera-se, com bastantes alunos e pesquisadores jovens que possam nos ajudar nessa empreitada.

A IMPORTÂNCIA DO RMB PARA A MEDICINA NUCLEAR DO PAÍS

CELSO DARÍO RAMOS - Doutor em ciências médicas pela Unicamp, é professor do Departamento de Radiologia da Faculdade de Ciências Médicas da Unicamp, diretor do serviço de medicina nuclear do Hospital de Clínicas da Unicamp, membro do Hospital Sírio Libanês, de São Paulo e presidente da Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear.

VOU FALAR rapidamente sobre a importância do RMB para a medicina nuclear do Brasil. Como algumas pessoas talvez não estejam familiarizadas com a área, vou fazer uma breve introdução sobre o que é, qual é a importância, para que serve a medicina nuclear. Vou citar alguns exemplos de procedimentos, dizer como os radioisótopos são produzidos e serão produzidos pelo RMB, sendo que já são usados pela medicina nuclear brasileira. E vou fazer uma reflexão, no final, sobre a situação da medicina nuclear da Unicamp e a sua possível interação com o RMB.

Então, o que é medicina nuclear? De maneira simplificada, é uma especialidade médica que faz diagnósticos e tratamentos utilizando a administração de pequenas quantidades de substâncias radioativas. Pequenas quanto? Muito pequenas. É isso que pretendo deixar bem claro. A medicina nuclear pode ser usada por praticamente todas as especialidades médicas.

Sua principal aplicação, sem dúvida, é produzir imagens. Talvez as três especialidades que mais a utilizem sejam a cardiologia, a oncologia — para poder mostrar a extensão de tumores — e a neurologia. Mas também é utilizada na nefrologia, ortopedia e dermatologia. A psiquiatria também pode usar, e até a oftalmologia: existem procedimentos para ver se o ducto nasolacrimal está pérvio ou não.

Pode ser usada em cirurgias também. É possível marcar uma substância que se quer procurar na cirurgia. Existe um equipamento, que se chama probe, para ser usado durante a cirurgia, que tem formato semelhante a uma caneta e que detecta a radiação. Assim, o cirurgião durante a cirurgia consegue, por exemplo, procurar um tumor que foi tornado radioativo. A utilização clássica em cirurgia é no câncer de mama, quando se quer detectar se já há metástase no linfonodo axilar. Antigamente se retirava toda a axila para procurar cerca de 10, 20 linfonodos: o patologista precisava examinar um por um. Agora, com essa técnica de medicina nuclear que usa tecnécio-99m, que será produzido no RMB, ele é injetado no tumor, e é captado pelo linfonodo sentinela, que funciona como se fosse um guarda sentinela: é o primeiro a receber a drenagem do tumor. E ele fica radioativo. O cirurgião, em vez de retirar 20 linfonodos da axila, retira apenas um, entrega para o patologista, que o estuda com muito mais acurácia, fatiando toda peça e ali ele consegue saber se há tumor ou não. Se não houver, não é preciso mexer no resto. Se houver, aí sim, opera-se o restante.

Também a medicina nuclear pode ser usada em tratamentos. Um exemplo é o uso em tumores neuroendócrinos que captam uma substância que pode ser marcada com tecnécio-99m para diagnóstico; mas também pode ser marcada com lutécio-177, que emite radiação

beta, que tem uma energia maior e com isso destrói esses tumores. O lutécio-177 também poderá ser produzido no RMB.

Voltemos às imagens, que representam 90% do que se faz em medicina nuclear. Por que elas não podem ser substituídas por outros métodos de imagem? Por que existe medicina nuclear, já que excelentes imagens podem ser produzidas com ressonância magnética, tomografia e ultrassom, sem ser preciso injetar material radioativo no paciente? Simplesmente porque a medicina nuclear tem a capacidade única de produzir imagens de substâncias em concentrações ínfimas, como glicose intracelular, hormônios, fosfatos, iodo, componentes de células vivas etc. E, quanto a esse aspecto de detectar o seu agente contrastante, a medicina nuclear é milhões de vezes mais sensível do que a tomografia, do que a ressonância magnética e do que o ultrassom para enxergar os seus contrastes. Esse termo "milhões de vezes" não é força de expressão.

Radiofármaco Contraste

Imaging Method	"Contrast Agent" Concentration (mol/kg Body Weight)
Sonography	10-3
Computed tomography (CT)	10-3
Single photon emission computed tomography (SPECT)	10 ⁻⁹ –10 ⁻¹²
Positron emission tomography (PET)	10 ⁻⁹ -10 ⁻¹²
MRI	10-5
MRS	10-5

von Schulthess, G. Molecular Anatomic Imaging (2007). Lipincott Williams & Wilkins, PA, EUA.

A tabela acima compara o método de imagem com o seu agente contrastante, em mol/kg de peso. Isso está publicado no livro do doutor Von Schulthess. A medicina nuclear está representada na tabela pelos dois itens do centro. O SPECT, sigla em inglês para tomografia por emissão de fóton único, é basicamente uma gama-câmara tomográfica que é utilizada para fazer imagens da maior parte dos

radiofármacos produzidos no reator (RMB) que emitem radiação gama. O item seguinte da tabela é o PET, que significa tomografia por emissão de pósitrons. Vejam que esses equipamentos detectam concentrações que variam de nanograma (10-9) a picograma (10-12) de mol/kg de peso, enquanto a tomografia e o ultrassom precisam de pelo menos milimol/kg de peso (10-3). Como 10-12 é 109 vezes menor que 10-3, verifica-se que a sensibilidade das imagens de medicina nuclear é até um bilhão de vezes maior do que a tomografia e o ultrassom para detectar os seus agentes contrastantes. Isso tem uma implicação direta, que é o fato de virtualmente não existir toxicidade grave aos agentes de medicina nuclear, já que a dose farmacológica utilizada é muito baixa.

Em junho de 2013, nós tivemos um simpósio na CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) no Rio de Janeiro, justamente para discutir a estratégia nacional para garantir o fornecimento de molibdênio-99 no país, já que existe o risco de os reatores internacionais pararem nos próximos anos. Essa é uma das justificativas para o grande empenho do governo em construir o nosso próprio reator, pois não podemos ficar à mercê da situação mundial.

E logo na abertura, o professor Ângelo Padilha, que é o presidente da CNEN, comentou que há mais de 50 anos a CNEN fornece radiofármacos no Brasil e, nesse período, estima-se que foram fornecidas 50 milhões de doses desses materiais e nunca houve nenhum relato de reação adversa grave. Paciente nenhum morreu por injeção de radiofármaco ou teve alguma reação que resultasse em internação. Isso nós verificamos na prática diária. Eu trabalho com medicina nuclear há 25 anos e nunca presenciei uma única reação grave a radiofármaco. Mas, logicamente, é preciso demonstrar isso de maneira controlada.

Um estudo apresentado no congresso americano em junho de 2013, em Vancouver, avaliou a prevalência de efeitos colaterais causados por radiofármacos. Em mais de um milhão de doses administradas de radiofármacos ocorreram 22 reações adversas, uma frequência de 2,1 para cada 100 mil administrações e, na verdade, dessas 22,

comprovadas mesmo foram apenas 15. E estes foram os efeitos adversos detectados: *rash* cutâneo, uma sensação de *flush* do radiofármaco passando no corpo, ou náuseas. São somente sintomas subjetivos. Nenhuma morte, nenhuma hospitalização causada por radiofármaco em mais de um milhão de pacientes de diversos centros, em diversos anos. Ou seja, mesmo mudando o enfermeiro que fez a injeção, o farmacêutico que preparou o material, quem quer que tenha feito a imagem, isso não muda o baixíssimo risco em relação a radiofármaco.

Comparem isso com essa notícia que saiu nos jornas do Brasil em outubro de que uma ONG americana divulgou que o analgésico comum acetaminofen (cujo principal nome comercial é Tylenol) causa 150 mortes por ano em consequência de reações adversas. Entrando na literatura médica, verifica-se que esse número é maior. Na verdade, um trabalho científico da revista *Hepatology* mostrou que ocorrem em média 450 mortes por ano por esse analgésico. Então, não é nenhum exagero dizer que é mais seguro injetar um radiofármaco do que tomar um analgésico comum como o acetaminofen. Os dados estão aí, não há como refutar.

E mesmo assim, a medicina nuclear sofre alguns mitos, alguns preconceitos, dizem que ela é perigosa. Ela não é perigosa nem do ponto de vista farmacológico nem do ponto de vista radiológico.

Outro mito, decorrente do fato de ser bastante desconhecida, é acreditar que a medicina nuclear seja utilizada apenas em pesquisas. É verdade, sim, que grande parte do conhecimento de fisiologia que se tem hoje decorre de descobertas feitas através de técnicas de medicina nuclear. Um hormônio que não se sabe onde atua pode ser marcado com um isótopo radioativo e, assim, pode-se verificar em quais tecidos do organismo ele vai se ligar. Por exemplo, descobriu-se que uma das causas da demência de Alzheimer é a deposição de uma proteína amiloide em certas regiões do cérebro. Então, marca-se esse amiloide com material radioativo e, assim, é possível estudar em que regiões do cérebro está ocorrendo a deposição desse material.

Mas é óbvio que medicina nuclear não é só pesquisa, tem bastante uso prático. Aqui no Brasil a maior parte dos procedimentos dessa

especialidade consta da tabela do SUS e, teoricamente, deveria ser oferecida a toda população do país.

Medicina nuclear também, muitas vezes, é confundida com radioterapia, e não tem nada a ver, são especialidades completamente diferentes. A radioterapia usa uma fonte de radiação externa e os materiais radioativos que usa não podem ser manipulados, ou seja, as fontes radioativas vêm lacradas e não podem ser abertas. Medicina nuclear é o oposto. A fonte radioativa vem aberta, não lacrada, porque ela vai ser manipulada, para que se retire e administre a dose adequada para cada paciente. E por isso mesmo os nossos radiofármacos tendem a ter meia-vida muito curta e energia de radiação muito baixa. O principal exemplo de radioisótopo usado em medicina nuclear é o tecnécio-99m, que tem meia-vida de 6 horas e energia baixa. Para comparar, podemos lembrar do césio-137 usado no passado em equipamentos de radioterapia (e não em medicina nuclear) que foi o radioisótopo responsável pelo acidente de Goiânia. Percebam que a meia-vida do césio-137 é de 30 anos, apresenta emissão gama de alta energia e emissão beta. Ainda não se passaram 30 anos do acidente, portanto não passou nem uma meia-vida. Mais de metade da radiação presente na época do acidente ainda permanece lá, logicamente acondicionada de modo apropriado.

Em medicina nuclear, não é possível acontecer um acidente grave com tecnécio-99m porque tem meia-vida de seis horas e emissão gama de baixa energia, sem emissão alfa ou beta. Quando há alguma contaminação, a limpeza é relativamente simples, semelhante à feita em caso de contaminação biológica, ou até mais simples. Por exemplo, a contaminação com secreções de um paciente tuberculoso é certamente mais perigosa que a contaminação com as doses diagnósticas usuais de tecnécio-99m.

A produção de imagens em medicina nuclear é, de certa forma, oposta à radiologia. Enquanto na radiologia o equipamento emite radiação, na medicina nuclear ele é um detector de radiação. Em radiologia, a radiação é transmitida através do paciente, enquanto que na medicina nuclear o próprio paciente é a fonte de radiação. Tudo

isso para que se obtenha uma imagem principalmente da anatomia do paciente na radiologia e da função dos órgãos e tecidos na medicina nuclear. O ideal é que possamos ter os dois tipos de imagens juntos. E isso é o que tem acontecido recentemente com novos equipamentos de medicina nuclear que eu vou comentar no final.

Quais substâncias podemos marcar com radioisótopos? Em princípio todas aquelas que a nossa imaginação e o nosso conhecimento de fisiologia permitirem. Alguns exemplos são intuitivos. A glândula tireoide utiliza iodo para produzir seus hormônios. Então, podemos utilizar iodo radioativo para estudar a tireoide e o câncer da tireoide. Para os pulmões há vários radiofármacos: pode ser inalado um gás ou um aerossol radioativo para se obter imagem das vias aéreas. Os tumores, para crescer, consomem muita glicose. Então, pode-se utilizar um análogo radioativo da glicose para verificar a extensão de um tumor no corpo. Também é possível marcar células vivas: uma infecção pode ser localizada após as células brancas do sangue serem marcadas com um isótopo radioativo. Os ossos são geralmente estudados com análogos radioativos do fosfato.

Por exemplo, no caso de um exame de imagem de um úmero — o osso do braço — fraturado. Pela imagem radiológica pode-se perceber a descontinuidade óssea no local da fratura. Já a imagem da medicina nuclear pode mostrar que no local da fratura há captação aumentada do análogo radioativo do fostato, porque nesse local as células ósseas chamadas osteoblastos estão muito ativas, tentando reparar a fratura. Isso significa que devemos utilizar o exame da medicina nuclear, que se chama cintilografia, para fazer diagnóstico de fratura? Óbvio que não, porque a radiografia fornece mais detalhes anatômicos, o que é fundamental para o ortopedista definir o tratamento, além de ser um exame mais barato e mais disponível. Mas imaginem que esse paciente voltou ao ortopedista meses após o tratamento e ele analisa a radiografia depois de três meses da fratura. Nesse momento, a cintilografia pode ser muito importante para o ortopedista: será que a fratura não se consolidou porque a imobilização não foi adequada ou, por exemplo, houve lesão dos vasos que irrigam essa área e não

está havendo irrigação sanguínea adequada para ocorrer a reparação da fratura? A primeira hipótese é a verdadeira: o aporte sanguíneo está certamente adequado, porque no local chega radiofármaco, que é intensamente captado pelos osteoblastos, que estão bastante ativos. Então, se a imobilização for mais adequada, com alguns tratamentos adicionais que o ortopedista pode fazer, isso aqui vai se resolver sem a necessidade de um enxerto, por exemplo.

Os principais radioisótopos utilizados para fazer imagens com equipamento que detecta radiação gama são produzidos por reator. Pacientes pediátricos não representam uma contraindicação para medicina nuclear. Ao contrário, existem alguns procedimentos específicos que são apropriados para serem realizados em crianças, inclusive em recém-nascidos.



Em seguida, vou citar alguns exemplos de exames de medicina nuclear que utilizam tecnécio-99m, cujo insumo, o molibdênio-99, é produzido em reator. No Brasil, os geradores de tecnécio-99m são produzidos pelo Ipen há muitos anos, com altíssima qualidade, com molibdênio-99 importado. Aproximadamente 80% dos procedimentos de imagem em medicina nuclear utilizam o tecnécio-99m como marcador das substâncias ou células. Como o doutor Perrotta mostrou muito apropriadamente em palestra anterior, o tecnécio-99m é produto do decaimento do molibdênio-99 produzido no reator.

Toda segunda-feira, os diversos serviços de medicina nuclear do país recebem um ou mais geradores de tecnécio-99m produzidos pelo

Ipen. Os geradores possibilitam que se façam exames durante toda a semana. A solução de tecnécio-99m extraída do gerador na forma química de pertecnetato de sódio é utilizada no dia a dia para marcar *kits* liofilizados, que contêm a molécula específica que será usada em cada exame de medicina nuclear.

Tecnécio-99m

Órgãos e doenças estudados:

- Cérebro
- · Ductos lacrimais
- Glândulas salivares
- · Tireoide
- · Glândulas paratireoides
- Ossos
- · Medula óssea
- · Sangue: glóbulos vermelhos
- · Sangue: glóbulos brancos
- Coração
- Pulmões
- · Vasos linfáticos

- Fígado
- Baco
- Linfonodos
- Rins
- · Bexiga/ureteres
- · Esôfago
- · Estômago
- Intestino
- · Divertículo de Meckel
- · Tumores neuroendócrinos
- · Tumores cerebrais, tireoide
- · Linfomas, infecções

Vejam que se podem produzir imagens dos mais diversos órgãos e tecidos com tecnécio-99m, algumas vezes na forma de pertecnetato, na forma química em que é extraído do gerador, ou, mais frequentemente, marcando alguma molécula específica que participa da fisiologia das células desses tecidos. Por exemplo, na cintilografia óssea, utiliza-se uma molécula chamada metileno difosfonato (MDP), que é ligada ao tecnécio-99m; essa molécula, então, transporta o tecnécio-99m para o osso.

Com isso, é possível fazer um diagnóstico do caso a seguir: uma criança chegou ao Pronto Socorro com dor no joelho direito, febre e radiografia absolutamente normal. O médico que estava de plantão suspeitou de uma infecção óssea, que demora um mês ou mais para causar alteração no raio-X. Ou seja, a alteração anatômica causada pela infeção aguda do osso demora pelo menos um mês para ocorrer, mas a alteração funcional é quase imediata. Existem estudos em animais mostrando que, horas após o início da infecção, o exame já se altera. Na fase de fluxo sanguíneo, imediatamente após a injeção

do radiofármaco, já é possível perceber um maior aporte do material do joelho direito, comparado ao lado esquerdo. Na imagem obtida após 5 minutos, pode-se notar uma intensa captação do radiofármaco nas cartilagens de crescimento da criança, o que é normal. Porém a acentuada radioatividade na região proximal da tíbia direita (osso da perna) é anormal. A imagem de corpo inteiro, feita depois de duas horas, também mostra as cartilagens de crescimento, que são normais, e, na região proximal da tíbia, evidencia-se a acentuada hipercaptação anormal. Levando-se em considerando que a radiografia dessa região é normal, não pode ser um tumor, porque tumor altera totalmente o osso. Então, essas imagens praticamente definem o diagnóstico de osteomielite aguda logo no início da doença, bem mais fácil de tratar nesta fase do que numa fase mais tardia.

O uso mais comum da cintilografia óssea é detectar metástases ósseas, como no caso de um paciente com câncer de mama ou com câncer de próstata. As áreas escuras das imagens representam metástases ósseas desses tumores. Essas lesões podem demorar até seis meses para aparecer em uma radiografia, e aparecem muito precocemente na cintilografia.

Em casos de dúvida sobre o significado de uma área de hipercaptação do radiofármaco, é possível realizar uma técnica mais moderna, que se chama SPECT/CT. Essa técnica permite fundir, num único exame, imagens funcionais de medicina nuclear (SPECT) e anatômicas de tomografia computadorizada (CT).

Por exemplo, se houver dúvida se as áreas de hipercaptação na coluna vertebral de um paciente idoso representam osteoartrose — que é uma doença benigna — ou metástase óssea. Pode-se recorrer à fusão das imagens SPECT e CT. Percebe-se, então, que parte das alterações são devidas a osteoartrose — doença comum em idosos —, mas a área com captação mais intensa no corpo de uma vértebra corresponde a uma metástase óssea.

Outro exemplo: é possível marcar o sangue pela marcação das hemácias. Isto é muito fácil de fazer e é usado para detectar sangramento intestinal. Como o sangue circulante fica radioativo, pode-se iden-

tificar, nessas imagens de abdome, o fígado, o baço, os grandes vasos, os rins. Na sequência das imagens, pode-se verificar o aparecimento de uma área focal de sangramento. Essa área pode ser localizada com maior precisão pela técnica SPECT/CT descrita acima.

Outro exemplo de uso rotineiro do tecnécio-99m é para a realização da cintilografia de perfusão miocárdica. O radiofármaco mais utilizado para esse exame se chama sestamibi, marcado com tecnécio-99m. De maneira bem simplificada, pode-se dizer que as imagens desse radiofármaco mostram quanto de sangue chega às células do músculo do coração. Esse exame ajuda a prever o risco que o paciente tem de sofrer infarto. O exame é feito em duas etapas. Na primeira, o paciente permanece em repouso, durante a injeção do radiofármaco. Na segunda, o material é injetado enquanto o paciente corre numa esteira ergométrica. Então, comparando as duas imagens é possível perceber se há alguma restrição ao fluxo sanguíneo para o músculo do coração e, assim, contribuir para o diagnóstico de isquemia e para a estimativa do risco de infarto, entre outras coisas.

A medicina nuclear também pode ser utilizada para tratar diversas doenças. Um exemplo é o tratamento de câncer de tireoide com um isótopo radioativo do iodo, que é o iodo-131. Esse radioisótopo apresenta emissão de partículas beta, com energia de aproximadamente 600 keV, principalmente. O iodo-131 também é produzido na fissão do urânio-235 e, portanto, também é produzido em reator. Atualmente já é produzido no Ipen, mas parte ainda é importada. Com o RMB em funcionamento, o Brasil ficaria autossuficiente em iodo-131 também.

Para finalizar, faço uma reflexão sobre o potencial de interação que existe entre a Unicamp e o RMB. O uso da radiação em benefício dos pacientes representa uma possível área de interação entre várias disciplinas e sua aglutinação dentro da própria universidade. Há uma tendência normal nas universidades de os diversos institutos promoverem uma progressiva especialização em cada uma de suas respectivas áreas. Esse processo, que é extremamente útil para o progresso do conhecimento, apresenta um efeito colateral indesejável que é a

ocorrência de um certo distanciamento entre os institutos, entre as várias áreas de um mesmo instituto.

A medicina é um bom exemplo de área em que naturalmente ocorre a ultraespecialização, o que é natural, porque cada especialidade médica tem seu foco, mas isso tende a distanciar as especialidades entre si. E também acontece isso, imagino, na química, na física, na biologia, nas engenharias. Mas, quando nós entramos nesta área de uso da radioatividade em benefício dos pacientes, há a necessidade de aproximação das diversas áreas do conhecimento. Certamente, o trabalho conjunto propicia o surgimento de ideias novas e melhores.

Na Unicamp existe um potencial grande para esse tipo de interação. Aqui já existe uma certa proximidade entre diversos institutos, em vários aspectos. Há o curso de Física Médica, em que os alunos de física têm aulas com docentes de diversas áreas da medicina. Há o curso de Radiofarmácia, recentemente implantado na Faculdade de Farmácia, em que os alunos de farmácia têm aulas com físicos, médicos, químicos, além de radiofarmacêuticos. Há um projeto de marcação de substâncias com materiais radioativos que está sendo realizado no Instituto de Química.

É necessário que se iniciem no Brasil pesquisas para criar novos radiofármacos. O Ipen é um instituto de pesquisa, mas, por uma forte pressão da sociedade, pelo monopólio estatal de parte dos materiais radioativos, o Ipen acaba consumindo boa parte de seus recursos para suprir o mercado. E, por isso, os recursos do Ipen são principalmente direcionados para que simplesmente se reproduza a produção dos radiofármacos já consagrados, que existem em outros países. O Ipen é obrigado a suprir a demanda nacional por esses insumos. Assim, sobra pouco espaço para o Ipen criar novos radiofármacos. E isso deveria ser a vocação natural das universidades.

Nas universidades, e na Unicamp em particular, há condições propícias para a pesquisa de novos radiofármacos, para testes iniciais e imagens pré-clínicas em animais, para a aprovação em comitê de ética em pesquisa e, finalmente, para se produzirem imagens clínicas de radiofármacos inéditos. Na Unicamp, felizmente, nos últimos anos, tem ocorrido a atualização dos equipamentos de medicina nuclear. Desde 2011, nós já temos o SPECT/CT, que é o aparelho que funde imagens da medicina nuclear, muito sensíveis para detectar doenças em fases iniciais, com a tomografia computadorizada, que tem uma excelente resolução anatômica. Em abril de 2013 foi inaugurado o equipamento PET/CT da Unicamp, um equipamento de última geração. Em maio de 2015 será inaugurado o Laboratório de Imagens Pré-Clínicas e o equipamento micro PET/SPECT/CT, que permite fazer, simultaneamente, imagens de medicina nuclear e tomografia computadorizada de pequenos animais, como ratos e camundongos. Isso vai permitir que as novas moléculas potencialmente criadas em conjunto com o Ipen, e futuramente com o RMB, possam ser testadas na Unicamp. Trabalhos científicos em conjunto com o Ipen, que já ocorrem, poderão ser ampliados.

O único equipamento importante para esta área de que nós ainda não dispomos na Unicamp é o cíclotron. Esse equipamento permite produzir radioisótopos de meia-vida ultracurta, como o carbono-11, com meia-vida de 20 minutos; oxigênio-15, que tem meia-vida de dois minutos etc. Essas substâncias têm de ser produzidas localmente. Do cíclotron também se pode extrair um feixe de nêutrons, que pode ser utilizado em pesquisas e até em tratamento de tumores.

No Brasil existem 11 cíclotrons em operação, sendo que seis deles são estatais: dois no Ipen, um no Hospital das Clínicas da USP, e três em outros institutos da CNEN localizados nas cidades do Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Recife. Há cíclotrons privados em Campinas, Brasília, Salvador e dois em Porto Alegre. Há vários outros em instalação no país.

A interação entre a Unicamp e o RMB certamente também irá contribuir para divulgar e expandir o uso social das radiações ionizantes no Brasil. A medicina nuclear é parte do programa de saúde, mas, através da CNEN, também é parte do Programa Nuclear Brasileiro. E sempre houve apoio da CNEN, que pertence ao Ministério da Ciência e Tecnologia, à medicina nuclear brasileira. O apoio do Ministério da

Saúde existe, mas poderia ser bem maior no sentido de proporcionar um crescimento adequado da especialidade no país.

O fato é que a medicina nuclear no Brasil é muito avançada, mas ainda limitada a poucos centros. Em relação ao tamanho da população, a nossa medicina nuclear é quase três vezes menor do que a da Argentina. E muitas vezes menor do que a americana.

Médicos nucleares no Brasil

- Médicos (total em 2011): 371.068
- Médicos especialistas: 204.500
- Médicos nucleares: 499 (0,24%)



Conselho Federal de Medicina (CFM), 2012

A figura acima mostra a distribuição de médicos nucleares no país. Até 2012, segundo o censo do Conselho Federal de Medicina, existiam cerca de 500 médicos nucleares no país; o que representa só 0,25% do total de médicos especialistas. E vejam que a concentração maior está nas regiões Sudeste e Sul, quase nada no Norte, muito pouco no Nordeste. Então, basicamente, de Minas Gerais para cima, tirando Brasília, são só as capitais e grandes cidades que têm medicina nuclear. Portanto, nós temos um grande potencial de crescimento, um mercado enorme para suprir. Nós temos de oferecer medicina nuclear e radioisótopos para toda a população, não podemos deixá-los restritos ao sul do país.

Em parte, isso acontece por causa do fato de a formação de médicos nucleares, radiofarmacêuticos e físicos médicos estar concentrada na região Sudeste. Os centros formadores estão praticamente limitados a essa região. E o que piora mais a situação é que cerca de um terço só dos centros formadores está em hospitais universitários.

Assim, para suprir essa necessidade do país, parte da formação de profissionais dessas áreas é feita por clínicas privadas. Uma clínica privada certamente pode ter uma medicina nuclear de excelente qualidade para treinar o médico nuclear. Mas, no hospital universitário, o centro formador é muito mais eficaz justamente pela interação entre as áreas e especialidades. Desse modo, médicos de outras especialidades aprendem a utilizar corretamente a medicina nuclear, além de haver a interação com outros profissionais da universidade, como o radiofarmacêutico, o físico médico, o radioquímico.

A presença de uma medicina nuclear atuante numa universidade favorece a formação de mão de obra especializada e a interação entre as diversas áreas do conhecimento: física, química, farmácia, biomedicina, biologia, engenharia. Além disso, há o viés científico: a possibilidade de geração de conhecimento e tecnologia próprios no nosso país.

Então, eu imagino o RMB como um potencial aglutinador de várias áreas. Nós estamos bastante focados na Faculdade de Ciências Médicas e no Instituto de Física, mas a Farmácia, certamente, vai se beneficiar muito desse tipo de interação, assim como o Instituto de Química e o Instituto de Biologia. Há, ainda, o uso de radioisótopos em Agricultura, na Faculdade de Engenharia Química, na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação.

Concluindo, a eliminação da dependência da importação de diversos radioisótopos, o que será proporcionado pelo RMB, é fundamental para expandir a medicina nuclear no país, principalmente para as regiões Norte e Nordeste. Além disso, o RMB poderá se tornar uma grande ferramenta de ensino, pesquisa e assistência para as universidades brasileiras em geral e para a Unicamp, em particular.

DEBATE

MEDIAÇÃO – Julio Cesar Hadler Neto, coordenador do Fórum Pensamento Estratégico (PENSES)

JUN TAKAHASHI – Na sua apresentação, doutor Perrotta, o senhor mostrou um cronograma da entrega do reator para mais ou menos 2017/2018. Há várias barras indicando as várias etapas, mas uma etapa que eu não vi é que o reator precisa de massa crítica, não só de material nuclear, mas massa crítica de pessoas. Nós temos pessoal? Por sinal, concordo com o Darío com o fato de que muita gente pode ser treinada, e a Unicamp entra nessa parceria, mas em 2018 você precisa de uma massa crítica para fazer tudo isso funcionar. Quer dizer, é óbvio que, depois de 2018, isso vai ser um grande propulsor para formar uma nova geração de estudantes, mas, em 2018, nós precisamos de uma equipe que faça isso funcionar. Nós temos essa equipe?

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Jun, obrigado pela pergunta. Eu voltei naquela figura de engenheiros, de insumos e está lá, nós temos quatro reatores de pesquisa, nós temos capacidade. Um operador de reator não se forma do dia para a noite. E também, ele tem de ser licenciado. Então, não está na barra de processo ali, mas, quando começar a obra, eu tenho de começar a ter os grupos operacionais, eles devem começar a ser montados.

A CNEN tem hoje em torno de dois mil funcionários nos seus institutos de pesquisa. Uma fração desses funcionários vai ter de vir para o RMB para começar a gerar. Se nós temos quatro geradores de pesquisa, por exemplo, o líder hoje do sistema de cooperação é um ex-chefe da operação do reator IEA-R1. Nós temos o reator Ipen/MB-01, que é uma unidade crítica que também tem pessoas qualificadas.

O próprio reator IEA-R1 e o Ipen/MB-01 vão ser as ferramentas de formação dos novos operadores como base de treinamento. Então, o que acontece? Quando começarmos a fase de contratação de equipamentos e construção, é a hora de montar esses grupos. Isso vai estar baseado nos líderes existentes e na nova camada de pessoas que virão.

Necessariamente, vamos ter de contratar. E aí a minha grande preocupação de determinar o modelo operacional para o RMB. Porque, se for depender de serviço de contratação, concurso, é um problema. É um grande problema. Então, essa é a parte em que se vai atuar fortemente em 2014, para que, em 2015, se comece a obra efetivamente com os recursos. Temos de começar a equipe de novos, a de antigos já existe e vamos ter de concentrá-la para essa operação.

Lembro que nós temos quatro reatores de pesquisa, existe a competência e existe o conhecimento nessa área. Agora, esse é o grupo operacional. Caminhando junto a isso, virá um grupo de pesquisadores, então, também, parte desses dois mil funcionários deve vir e abrir chance para novos.

E uma coisa importante: na hora de operar o reator, tem de operar a planta de radioisótopos, ou seja, o radioisótopo tem de estar produzido quando comissionar o reator. Isso também é muito importante. As outras partes — científica, laboratório de nêutrons — vão crescendo, depende da nossa capacidade de juntar pessoas. Mas hoje estamos tentando começar a juntar esse grupo, que é um grupo totalmente novo de pesquisadores, a CNEN não tem.

Mas, para essa operação inicial que você falou, já existe uma competência e, agregada a ela, novas pessoas para serem os novos operadores. Nós tivemos um concurso, há uns três ou quatro anos, e entraram algumas pessoas novas. Como se diz, eu estou de olho neles, olhando o perfil de cada um para efetivamente criar esse grupo. E eles já estão acompanhando o projeto, eles participam do projeto na parte de concepção e base. Então, certamente eles vão ser alguns dos condutores desse processo.

É importante eles estarem juntos na concepção e na construção. Mas é operação. Certo? O processo vai necessitar, depois, dos outros grupos de pesquisadores.

NÃO IDENTIFICADO – A moratória que está acontecendo no mundo, nos reatores para produção de energia nuclear, esse movimento favorece, pode ser um encaminhamento para esse projeto do RMB?

JOSÉ AUGUSTO PERROTA – Você diz a moratória de potência?

NÃO IDENTIFICADO – Dos reatores, de potência, de produção de energia, estão sendo paralisados.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Bem, a minha impressão. Eu fiz três audiências públicas recentes. Audiências públicas que o Ibama fez nas cidades de Iperó, Sorocaba e São Paulo. Em São Paulo foi feita uma audiência chapa branca, porque a maioria era técnicos e que entendem da área nuclear. Mas em Sorocaba, a manchete do jornal do dia anterior era: "Maior usina do país vai ser instalada em Sorocaba, R\$ 10 bilhões. Xô nuclear".

Nuclear. Aí, o que vem à mente? Fukushima, Chernobyl, TMI, isso não matou ninguém, mas aparece. E aí temos: na Câmara Municipal cria-se uma comissão, vai haver uma audiência. Na Câmara Federal cria-se uma audiência. Ou seja, todo mundo associa, normalmente, energia nuclear a bomba ou geração de energia elétrica.

O que estamos mostrando aqui é que energia nuclear, as técnicas de energia nuclear, as aplicações sociais da energia nuclear estão no cotidiano de cada um e ninguém se apercebe disso. Se você me perguntar: "Energia nuclear para fins de geração de energia elétrica é importante?", eu acho que isso é uma opção que o país tem de discutir muito para ter.

No caso do Japão, o país é o que é porque grande parte da energia elétrica foi gerada por centrais nucleares, embora ele tenha sofrido a bomba. A Coreia é o que é porque a energia nuclear é um fator preponderante. Então, cada país tem de decidir. O Brasil tem várias opções, pode decidir ou não.

Agora, o que não podemos é abrir mão da ciência e tecnologia nuclear e das aplicações que elas proveem. Disso não podemos abrir mão. Então, um reator de pesquisa não é um reator de potência. Ele não tem a característica de operação que um reator... Eu posso falar, simplesmente, o reator de Angra, são 4 mil megawatts. O reator nosso, 30 megawatts. Angra 2, 109 mil quilos de urânio. Nós temos 30 quilos de urânio. Nós operamos em temperatura ambiente e pressão ambiente, é uma piscina aberta. Angra, 150 atmosferas, 300 e pou-

cos graus, a energia armazenada é muito maior. O potencial é muito maior de eventual acidente.

Quando falamos que a nossa zona de exclusão, de emergência, está dentro do sítio, as pessoas querem saber como é que elas vão evacuar o local, porque vai matar todo mundo ou coisa desse tipo.

Então, voltando à origem. Energia nuclear para produção de energia elétrica é uma opção. E cada país pode ver se isso é importante ou não. Se você perguntar no Rio de Janeiro, eles vão dizer que é muito importante porque gera mais de 30%, 40% da energia elétrica deles lá. No Brasil, isso tem de ser analisado. Agora, tecnologias nucleares, aplicações na medicina nuclear, disso não temos de abrir mão nunca. Temos de esclarecer o público. Temos de esclarecer que isso é importante.

O doutor Darío falou lá na audiência pública sobre a importância. Uma das meninas questionou: "Para que medicina nuclear? Deve-se fazer o controle de doenças, deve-se trabalhar na prevenção de doenças". Quer dizer, temos de esclarecer essa menina que o mundo vai além do que ela está olhando. E esse é o nosso papel. Eu acho que nós levamos muita paulada, muito questionamento, mas eu fico contente aqui, até um pouco emocionado, vocês viram a aplicação que a Marina falou aqui, as aplicações que o doutor Darío mostrou aqui. Isso é fantástico. Isso é salvamento de vidas. Isso é qualidade de vida. E são técnicas, tanto a Marina quanto o Darío falaram: "Não há perigo!".

Aliás, lá no Ipen, nós tivemos uma amostra, com o professor Fausto Lima, o professor Marcello Damy, o professor José Goldenberg, todos eles lá em uma foto – o professor Damy tinha mais idade, entre 90 e 95 anos. E aí o pessoal tira foto disso porque acha que a radiação não faz envelhecer, ela preserva. Então, nós temos de acabar com esse mito da nuclear.

NÃO IDENTIFICADO – No Japão foi criado um Instituto de Estudos Nucleares. O Japão que sofreu a bomba, houve todo um movimento de físicos, o mais famoso é o Tomonaga, que é prêmio Nobel, ele se comprometeu com a população local a anualmente mostrar as atividades daquele instituto, ou seja, fazer uma *openhouse* anualmente. Foi dessa

forma que eles conseguiram convencer a população — e envolvê-la — de que estudos nucleares não significam bomba nem energia elétrica. Há outras coisas.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Isso. Há outro argumento do Xô nuclear que é assim: "Ah, rejeito radioativo vai ficar bilhões de anos". E aí, na audiência pública, era sempre isto: "Mas você afirma que vai ficar bilhões de anos?". Isso faz parte, na natureza há urânio, vai ficar trilhões de anos. A meia-vida do urânio é longa, então, está na natureza. Aqui há radiação. O nível de radiação que o Darío falou e tudo mais, aqui o nível médio do ser humano é 2.400 microsieverts por ano. Uma tomografia, que ele mecionou aqui, dá mais de 6 mil microsieverts. Enquanto a dose com que estamos trabalhando para fazer o projeto é de 10 microsieverts. É, no máximo, 100 microsieverts. E qualquer sistema de emergência é 5 mil, 10 mil microsieverts.

Nós tentamos trabalhar com nível de segurança. Temos de informar a população. Com relação a isso, o pessoal de Sorocaba, o prefeito é a favor — o de Iperó também —, ele entende a importância tecnológica, ele menciona até que não devia ser em Iperó, devia ser em Sorocaba, porque ele acha que isso é muito importante.

E aí um grupo, chefiado pela secretária de meio ambiente, foi lá no Ipen. Veio um grupo de 30 e poucas pessoas. E veio também o vereador que fez o pleito da audiência pública, ele tinha feito antes. E nós mostramos o reator, a radiofarmácia, mostramos os rejeitos radioativos. Está lá o primeiro tambor, o número 1 do Ipen está lá, guardado até hoje. E aí medimos a dose: "Aqui a dose é tanto, lá fora é tanto". Eles saíram, viram a importância da medicina nuclear, o empenho das pessoas.

Eles ficaram surpresos, como é que funcionários públicos fazem isso? Eles saíram de lá parabenizando-nos pelo trabalho. E, no final, uma das pessoas, uma senhora que é mãe de um dos secretários, veio, ela é professora, e no final agradeceu. Há 10 anos ela teve um câncer e usou o flúor, teve de ir para São Paulo para usar o flúor e ela está viva graças à técnica da medicina nuclear.

E isso ela falou para todos. E aí todo mundo: "Oh!". É isso, está no nosso dia a dia mesmo. Eu acho que nós não temos de abrir mão da tecnologia nuclear, da utilização das técnicas nucleares, da medicina nuclear. Podemos abrir mão de centrais nucleares? É discutível. É seguro? Elas são feitas para serem seguras. Mas é discutível. Mas a tecnologia nuclear, de nenhuma forma. E é por isso que estamos lutando.

NÃO IDENTIFICADO – Na China não estão sendo construídos vários reatores de potência? Então, é essa coisa: existem diferenças. Alemanha não quer mais, mas a China está lá investindo pesado, não é?

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Novamente, é questão de opção. Quem não quer mais é porque já chegou a um patamar de desenvolvimento que lhe permite, porque Estados que não têm esse patamar estão investindo ainda.

Quando você vê a quantidade de usinas sendo construídas na Rússia, na China, na Índia, no Brasil — estava com essa perspectiva —, a própria África do Sul, que são os Brics e tudo mais, são ávidos por energia ainda. Agora, quando você vê Japão e Alemanha, já estão em um nível de tecnologia que lhes permite ser menos ávidos por energia e vão fazer essa energia em outros lugares. Como o Japão, que veio fazer alumínio no Brasil, que é um pacote de energia. Então, ao invés de fazer lá, faz aqui. E aí há uma Tucuruí, que pode permitir isso. Então, aí fica fácil. É opção do país.

UTILIZAÇÃO DO FEIXE DE NÊUTRONS NO RMB

FABIANO YOKAICHIYA - Doutor em física pela Unicamp, pós-doutorado pelo Laboratório Louis Neel/CNRS, em 2005, pós-doutorado no National Synchrotron Light Source/BNL, em 2006, e pós-doutorado no Helmholtz-Zentrum-Berlin, em 2007-2010. Trabalhou por dois anos no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Tem experiência na área de física com ênfase em materiais magnéticos, propriedades magnéticas e sistemas biológicos, proteínas e fármacos, atuando principalmente nos seguintes temas: luz síncrotron, difração magnética de raio-X, sistemas fortemente correlacionados, difração de raio-X, difração de nêutrons e sistemas policristalinos.

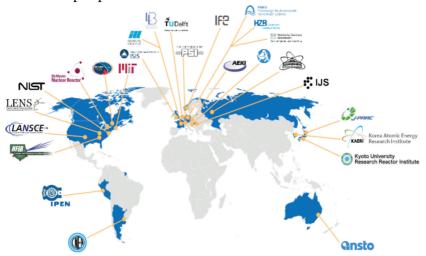
ANTES DE começar, eu queria mencionar que este trabalho, na verdade, está sendo desenvolvido por duas pessoas, eu e a doutora Margareth Franco, que se encontra hoje aqui. E atualmente ela também está trabalhando no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen) com o grupo para desenvolvimento de instrumentos para novo Reator Multipropósito Brasileiro.

Nesta apresentação, não vou colocar como uma técnica de competição ao Síncrotron, mas uma técnica de complementaridade, mos-

trando que nêutrons também são muito importantes na questão da pesquisa científica.

Primeiramente, o doutor José Augusto Perrotta falou na apresentação anterior sobre as aplicações do novo Reator Multipropósito Brasileiro. Então, eu não vou me ater à parte de produção de radioisótopos, como foi explicado pelo professor Celso Darío Ramos, nem à parte de radiação, irradiação em materiais, nem à questão de treinamento e educação. Eu vou me concentrar na parte da pesquisa científica utilizando as técnicas, os feixes de nêutrons.

Centros de pesquisas com nêutrons



Fonte: VEQTER: www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/neutron-diffraction. Consultado em 26/08/2015.

Primeiramente, trago o mapa acima só para vocês terem uma ideia dos reatores que existem espalhados no mundo, basicamente não há só os reatores, vamos dizer assim, mas todos os centros que utilizam nêutrons para pesquisa. Então, não são só os reatores, mas também temos o que eles chamam de *spallation source*, como por exemplo, o PSI (Paul Scherrer Institute), na Suíça, o IJS (Institut Jozef Stefan), na Eslovênia, que são fontes em que a produção de nêutrons é um

pouco diferente de um reator, mas também se usam essas fontes para pesquisas com feixes de nêutrons.

Aqui não estamos mostrando o Brasil, mas nós temos um reator, que fica no Ipen. Há outro reator no Peru, que por coincidência tem o mesmo nome. Aqui não está mostrado no mapa também um reator na África do Sul, que é o Safari. Todos utilizam o feixe de nêutrons. É um apanhado geral de todos os reatores e todos os *spallations sources* que existem no mundo. No nosso caso, o que vai ser feito é utilizar um reator tradicional, convencional, por fissão.

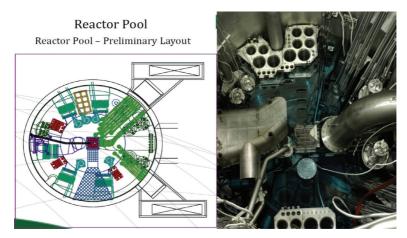
No momento atual, o que nós temos, no caso, por exemplo, da parte de feixes de nêutrons, como foi colocado pelo doutor Perrotta, é o reator IEA-R1, que foi fundado em 1957, com a potência, eu acho, de 4,5 megawatts. Atualmente está operando com 4,5 megawatts.

Em contrapartida, na parte de produção de luz, nós temos o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), que foi fundado em 1997. Então, no presente momento, nós temos esses dois, vamos dizer, entre aspas, esses dois grandes *facilities*, e atualmente, no caso do Síncrotron, não sei se eu estou enganado, ele tem 14 linhas de luz, com mais três sendo desenvolvidas.

Esses são os números que eu tenho atualmente. E no caso do reator no Ipen, atualmente nós temos dois instrumentos, sendo um para neutrongrafia e um para difração de nêutrons.

No futuro, o objetivo é que essas duas grandes, vamos dizer, empreitadas, Sirius e RMB, estejam prontas em 2018, sendo que o Sirius — eu acho que vocês até devem ter ouvido falar bastante dele — vai ser construído no próprio *site* onde está o LNLS. Já está sendo feita a terraplanagem, então já está sendo construído esse grande laboratório. Em contrapartida, também, nós já temos o projeto e o terreno para a construção do RMB. Só para mostrar a complementaridade dos dois.

A imagem a seguir mostra como vai ser o núcleo do Reator Multipropósito Brasileiro. É o esquemático do núcleo projetado para o nosso reator. Na foto, uma comparação com o reator no qual o RMB está sendo baseado, que é o ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation), na Austrália.



Fonte: Comunicação pessoal.

Eu vou explicar melhor, depois, detalhes de onde vão sair as guias desse reator. Como eu falei muito baseado no ANSTO, que seria o laboratório onde eles têm as linhas de instrumentos de nêutrons, onde eu tenho o que costumamos chamar de guide hall, o hall das linhas de nêutrons, e o experimental hall, onde ficam instrumentos muito próximos ao núcleo.

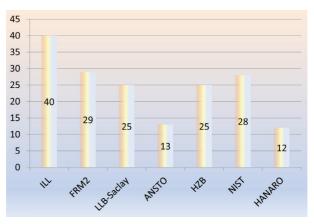
Em uma primeira fase, o RMB vai possuir basicamente esse esquema de distribuição de linhas. Só para vocês terem uma ideia, na planta do prédio das linhas de nêutrons do RMB, já existe um projeto de como vai ser esse *experimental ball*, onde teremos vários laboratórios-suporte para usuários, laboratório de raio-X para podermos ter também a complementaridade da técnica com o usuário de difratômetro de raio-X, de SAXs, de tomografia, e equipamentos, por exemplo, para alinhar cristais.

Teremos laboratórios químicos, laboratórios de biologia e laboratórios-suporte, porque, no caso de nêutrons, existem muitos equipamentos grandes, por exemplo, grandes criostatos, grandes magnetos, que frequentemente são utilizados para experimentos. Então, vamos ter laboratórios também para esse suporte.

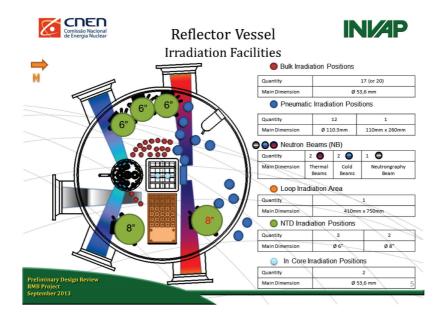
Ainda para comparar com os reatores que existem no mundo — eu não fiz um gráfico com todos, é impossível mostrar neste gráfico

— selecionei os que eu considero principais: o ILL (Institut Laue-Langevin), na França, a potência utilizada nele é de 58,3 megawatts, e atualmente eles têm 40 instrumentos disponíveis para os usuários; outro reator que seria mais ou menos da mesma qualidade do ILL é o FRM2 (Forschungsreaktor Munchen 2), em Garching, na Bavária, na Alemanha, que é um reator com potência um pouco menor, de 20 megawatts, mas, por ser um reator mais concentrado, alguns instrumentos têm a mesma capacidade dos instrumentos do ILL. E lá eles têm 29 instrumentos. Na sequência, eu peguei o LLB-Saclay (Laboratoire Leon Brillouin), em Paris, com potência de 14 megawatts. Eu vou comparar, então, os que são parecidos com os nossos. O Saclay, que tem 25 instrumentos; o NIST (National Institute of Standards and Technology), nos Estados Unidos, com 28 instrumentos; o Hanaro, na Coreia do Sul, com 12, que é também um reator bastante novo; e o reator em que estamos nos baseando, o ANSTO, na Austrália, que é de 20 megawatts. E eles possuem 13 instrumentos. Eu coloquei o HZB (Helmholtz-Zentrum Berlin) aqui porque eu trabalhei no HZB, então eu tenho uma ideia dos instrumentos. O HZB, apesar de ser um pouquinho menor em potência, tem disponível aos usuários 25 instrumentos.

Centros de pesquisas com nêutrons e respectivos números de instrumentos



Eu não vou dar muitos detalhes aqui com relação ao *core* do reator, mas só para explicar de onde vão sair os feixes de nêutrons. Os feixes de nêutrons vão sair de dois extratores; na verdade, eu tenho possibilidade de seis saídas de guias, e duas estariam no *experimental ball*, três, na verdade, porque haverá uma saída *beamhole* dedicada a neutrongrafia e tomografia de nêutrons.



Em uma primeira etapa, vai ser construído um guide hall, mas existe, para uma segunda fase, a possibilidade de expandir esses instrumentos para esta outra fase. Então, há espelho dos dois lados. Só para explicar, eu tenho o que eu chamo de termonêutrons, nêutrons térmicos. Na verdade, esses nêutrons térmicos são moderados pela água pesada que existe dentro do reator. E a faixa de comprimento de onda, só para ter uma comparação com o raio-X, vai de 1 a 4 angstrons, mais ou menos. No caso, os dois extratores seriam de cold neutrons, nêutrons frios. Eles são a fonte onde eu vou ter deutério resfriado. Alguns reatores usam metano congelado para produzir esses nêutrons frios; no nosso caso, vamos usar deutério, mais baixa

temperatura, e a faixa de comprimento de onda que esses nêutrons vão medir é de 3 a 30 angstrons. Eu tenho outra guia também de que vai sair termonêutron para tomografia.

Só para uma extensão, comparando com o grande reator na França, o ILL, além desses dois tipos de nêutrons, dos nêutrons frios e dos nêutrons térmicos, também existe a possibilidade de utilizar nêutrons quentes, *hot neutrons*, e, aí então, seria preciso um moderador. No caso do ILL, eles usam uma parede de grafite aquecida a 1.000 graus Celsius. E aí a faixa de energia ou o comprimento de onda que eu posso atingir com esses *hot neutrons* é menor do que 1 angstrom.

As outras partes aqui seriam as partes onde vão estar irradiadas. Como o doutor Perrotta disse, como este é um reator multipropósito, não vai ser só para a produção do feixe de nêutrons, mas também para a produção de radiofármacos, e você vai poder também irradiar tanto combustíveis quanto materiais para a indústria.

Há uns três anos, começaram algumas discussões em relação aos tipos de instrumentos que seriam utilizados nesse reator. E, nas primeiras reuniões, mais ou menos, ficou decidida, ou foi sugerida, vamos colocar assim, inicialmente, a construção desses oito instrumentos da tabela abaixo. Com o nosso reator tem-se a possibilidade de construir muito mais instrumentos, mas, inicialmente, a ideia é construir esses oito.

Proposta inicial de instrumentos para o RMB

Thermal Neutrons Beam	
Guide Hall	Experimental Hall
High Resolution Diffractometer	Triple-Axis Spectrometer
High Intensity Diffractometer	Neutron radiography
Time-of-Flight Spectometer	
Cold Neutrons Beam	
Small Angle Neutron Scattering	Reflectometer
Prompt Gamma Analysis	

Eu dividi esta apresentação em duas partes. Na primeira, vou sugerir uma ideia sobre alguns desses equipamentos, que são muito importantes para a comunidade científica. Inicialmente seriam construídos os difratômetros, os instrumentos de espalhamento em baixo ângulo — que vão atrair muito a comunidade de química e de biologia, principalmente —, e também a neutrongrafia. Já existe um grupo no Ipen que trabalha com neutrongrafia, o grupo do professor Reynaldo Pugliesi.

Os demais instrumentos eu vou colocar em uma segunda sessão, na qual vou explicar outros instrumentos que existem aplicando o feixe de nêutrons, e deixar em aberto, assim, para a comunidade decidir quais seriam os melhores instrumentos para serem acrescentados nesta lista que está sendo colocada aqui.

Tratando da técnica de nêutrons, posso trabalhar com nêutron em toda uma faixa tanto de comprimento quanto temporal. Posso trabalhar tanto a parte estrutural, indo de astrofísica até física nuclear, quanto a parte dinâmica, de picosegundos, fentosegundos, a horas, dias, anos. Então, a gama com que eu posso trabalhar com essa probe, essa sonda de nêutrons, é gigantesca.

Na parte estrutural, posso, por exemplo, estudar na faixa de metros, a radiografia, a tomografia de nêutrons. Na faixa de centímetros, a textura; podem-se fazer estudos de textura de materiais, principalmente aplicados à engenharia.

Depois eu tenho, na faixa de 10⁻⁴, estudo de grandes moléculas ou superfícies utilizando técnica de refratometria e espalhamento a baixo ângulo. Indo mais, na faixa de angstrons, eu tenho já as difratometrias; e, em comprimentos ainda menores, posso estudar até questões de física nuclear.

No outro caso, eu posso também fazer estudos dinâmicos de materiais, indo desde, por exemplo, estudos em escalas menores, de um segundo, estudar radiografia, refratometria, resolvidas no tempo, por exemplo; na faixa de 10-9 do segundo, eu posso estudar dinâmica de macromoléculas, posso estudar ondas de *spins* e materiais magnéticos, e mesmo vibração de rede, na faixa de 10-13, e cada uma dessas faixas temporais eu posso associar a um equipamento. Por isso que eu

não quis no primeiro momento falar assim: "Olhem, vai ser fechado nesses equipamentos", mas sim tentar abrir para a comunidade, mostrar que existe a possibilidade de usar outros equipamentos e estudar outras faixas temporais.

Resumindo, em relação a instrumentos de nêutrons, separei em três áreas, que seriam: espalhamento elástico, espalhamento inelástico e outras técnicas. No espalhamento elástico eu tenho toda a parte de estudos estruturais, por exemplo, difração, espalhamento de nêutrons de baixo ângulo, estudos de superfícies e interfaces, a parte de refletometria e espalhamento de nêutrons a incidência rasante. Em um segundo ponto, a parte de estudos de espalhamento inelástico, em que eu vou estudar a dinâmica das vibrações das moléculas, então eu incluí todas as espectroscopias — são várias espectroscopias, tempo de voo, backscattering, spin echo, triplo eixo —, e cada uma dessas espectroscopias vai atender a uma faixa do espectro temporal. Elas são parecidas, mas atendem a regiões temporais diferentes. E, terceiro ponto, outras técnicas: a neutrongrafia e a tomografia de nêutrons e análise de ativação de nêutrons, o que foi falado pela professora Marina, na apresentação anterior. Mas esse último eu não vou comentar agora. Eu vou comentar sobre as outras técnicas.

Na primeira parte, vou me ater a difração, baixo ângulo e neutrongrafia. Tratando de alguns esquemas de equipamentos de difração de nêutrons, cito dois exemplos do HZB, em que temos um exemplo de um difratômetro de pó. Há também um monocromador, para monocromatizar um feixe de nêutrons. Eu coloco a amostra policristalina e tenho um banco de refletores para poder obter os meus difratogramas.

Só para discorrer em palavras rápidas a respeito dos métodos de difração, eu posso fazer difração de pó, e aqui eu quero enfatizar que vocês podem perguntar: "Então, qual é a vantagem da difração de nêutrons em relação à difração de raio-X?". Vocês têm o Síncrotron aqui em Campinas, vocês têm acesso a raio-X. A grande vantagem da difração de nêutrons é a questão de poder obter estruturas magnéticas, por exemplo, através de amostras policristalinas; no momento, a

difração de raio-X não consegue para pó. Para monocristais é outra história. Existem algumas interações e, no caso de monocristais, há mais intensidade e consegue-se obter estrutura magnética. Agora, utilizando materiais policristalinos, a única técnica, comparando com raio-X, que pode obter estruturas magnéticas diretamente, fazendo refinamentos, é a difração de nêutrons. E, além disso, também posso estudar a questão de transição de fase feita com raio-X, mas, neste caso, estudando transição de fases em relação a estruturas magnéticas.

As demais aplicações são basicamente as aplicações que se observam em difrações de raio-X, mas o que quero deixar bem enfático aqui é a questão da parte magnética. Então, o nêutron, para a parte magnética, é essencial para obter estruturas. Tanto que escolhi dois exemplos — eu não vou me aprofundar nesses exemplos —, um de perovskita com tecnécio, em que utilizaram amostras policristalinas e utilizaram a única técnica de difração de nêutrons para obter a estrutura magnética desse material. E esse material possui uma transição magnética em 750 kelvin.

Outro exemplo que está muito na moda hoje são os pictinídeos, os supercondutores com ferro, e nesse caso também, porque muitas vezes as amostras são complicadas de obter monocristalinas. Então, graças à difração de nêutrons, eu consigo obter as estruturas magnéticas desses materiais. Cito o exemplo de um artigo que faz a substituição do arsênio pelo fósforo e vê o comportamento dessa estrutura com essa variação de dopagem.

Agora, falando um pouco de outra técnica, espalhamento a baixo ângulo — SANS. Neste caso, ela difere um pouco da difração a baixo ângulo de SAXS, o espalhamento a baixo ângulo de raio-X, porque aqui vou ter desde um monocromador até um seletor de velocidade, e, então, uma das diferenças é o jeito de você monocromatizar o feixe.

Eu também cito um exemplo do HZB em que, diferentemente do outro caso, posso usar um seletor de velocidade ou usar *shoppers*, que também fazem a monocromatização dos feixes.

Eu tenho um sistema de colimação, amostra e detectores. Só para

deixar mais detalhado, falando mais de SANS, comparando com a técnica de SAXS, também posso usar para estruturas grandes, de 1 nanômetro a 1.000 nanômetros. E uma grande vantagem da técnica de SANS é que eu posso trabalhar com contraste.

Por exemplo, em amostras biológicas ou mesmo macromoléculas sintéticas que têm hidrogênio, posso substituir o hidrogênio por deutério e conseguir contraste, só para ter um exemplo, em que ele mostra uma estrutura em que eu tenho basicamente todos os materiais que são nitrogênio, carbono. Dependendo do jeito como eu substituo hidrogênio pelo deutério, consigo visualizar melhor um pedaço da estrutura e outro pedaço da estrutura; então, essa é uma grande vantagem da técnica de SANS, o contraste.

No ILL, por exemplo, temos o seletor de energia, que é um seletor de velocidade. Depois, há os colimadores do feixe, temos diafragmas, para mexer com o tamanho do feixe, e um sistema em que podemos regular o detector para uma posição bem próxima ou bem distante da amostra. No caso do SANS, isso é interessante porque se pode medir valores em Q muito pequenos, no caso, deixando o detector bem distante da amostra, e valores em Q muito grandes, deixando próximo da amostra.

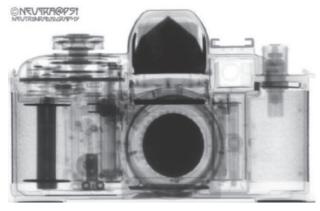
Como eu fiz com a difração, aqui no caso do SANS, eu peguei três exemplos. Esses exemplos são para mostrar a complementaridade da técnica de SANS em relação à de SAXS. Devido ao fato de o nêutron ter *spin* no meio, eu consigo fazer SANS com polarização. Então, por exemplo, no estudo *Dynamics of Field-Induced Ordering in Magnetic Colloids Studied by New Time-Resolved Small-Angle Neutron-Scattering Techniques*, de Wiedenmann *et al.*, de 2006, um trabalho feito em Berlim, eles conseguiram observar um fluido com cobalto e conseguiram observar a variação desse espalhamento quando aplicavam um campo magnético no material. Isso foi uma medida em tempo real. Mais ou menos eles mostram o comportamento dos espectros de SANS em função do campo magnético aplicado. E isso só pode ser visto, só pode ser medido usando a técnica de SANS polarizada. Essa é uma vantagem em relação à técnica de SAXS.

Em outro exemplo que eu achei interessante, do artigo Nanostructured Surfactant-Based Systems for the Removal of Polymers from Wall Paintings: A Small-Angle Neutron Scattering Study, de Baglioni et al., de 2012, relacionado a aplicações em arqueologia, eles estudaram o restauro de paredes. Por exemplo, a parede de uma igreja. Eles estudaram vários tipos de polímeros para poder atacar. Com o tempo, nessa parede vão se formando camadas que tornam difícil a visualização do cristal por trás. Então, eles estavam procurando materiais que pudessem utilizar para limpar essa parede sem prejudicar o que estava por baixo. E aí usaram a técnica de SANS para investigação desses materiais. Esse é um trabalho bastante interessante, que mostra que a técnica de SANS pode dar essa contribuição na arqueologia, ou seja, na restauração de materiais de arte.

Trago também outro exemplo, aplicado à construção civil. Eu sei que cimento parece uma coisa comum, tão banal, usado milenarmente, desde os romanos, mas nunca se entendeu realmente o processo de cura do cimento. Então, no artigo *Nonlinearity and Isotope Effect in Temporal Evolution of Mesoscopic Structure During Hydration of Cement*, de Mazumder *et al.*, de 2010, o que eles propõem é o estudo utilizando SANS da cura do cimento. Quando se hidrata com água e quando se hidrata com água pesada. Então, observam-se algumas diferenças usando a técnica de SANS para esses dois modos de tratar o cimento. E isso só poderia ser feito utilizando a técnica de SANS.

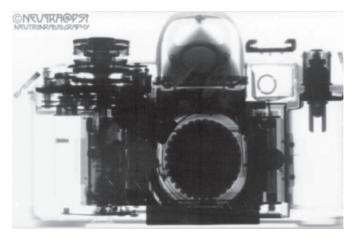
Continuando com os instrumentos propostos, a tomografia é um equipamento bastante simples em que, basicamente, eu tenho um porta-amostra, que posso colocar em algumas posições, e um detector bidimensional. Escolhi alguns exemplos para mostrar diferenças de tomografia, do que seria obtido no mundo. Abaixo a imagem mostra a diferença entre uma radiografia de raio-X e uma radiografia de nêutrons. O raio-X mostra as partes mais pesadas da máquina e o nêutron mostra as partes mais leves. Tudo isso tirado no PSI, na Suíça.

Aplicação das técnicas - Radiografia de nêutrons



Fonte: PSI.

Aplicação das técnicas - Radiografia de raios-X



Fonte: PSI.

Abaixo mais dois exemplos: de um compressor, também estático, é radiografia de nêutrons, e de um motor de motocicleta. Isso foi tirado na Alemanha, duas radiografias de nêutrons.

Aplicação das técnicas - Compressor - Radiografia de nêutrons



Fonte: FRM2.

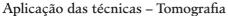
Aplicação das técnicas – Motor de motocicleta – Radiografia de nêutrons

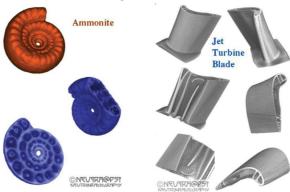


Fonte: FRM2.

Além disso, como foi colocado, é possível também fazer tomografia, ou seja, você tirar várias imagens, várias radiografias, e depois reconstruir essas imagens e obter uma imagem tridimensional. Então, abaixo, mostro dois exemplos, também tirados do PSI, em que eles estudaram esse animal, essa amonita, que tem basicamente

carbono e um pouquinho de ferro. Eles conseguem, com a técnica de nêutrons, tirando várias radiografias de nêutrons, obter a estrutura tridimensional desse animal, ou também eu posso estudar, por exemplo, turbinas de foguete. Eu faço também tomografias e consigo ver detalhes dessa turbina.





Fonte: PSI.

Além disso, você não vê bem tomografia, mas você vê radiografias, em função do tempo. Pode-se fazer um estudo de radiografia em tempo real: por exemplo, uma gota d'água sendo absorvida pela areia. Há um exemplo interessante também feito no PSI. Podemos fazer um estudo estroboscópico: por exemplo, se temos um motor ou um sistema que tem uma periodicidade no tempo, podem-se fazer imagens estroboscópicas do funcionamento desse motor.

Além disso, com a tomografia, variando o comprimento de onda que estou usando na tomografia, consegue-se fazer imagens seletivas do material. Por exemplo, em uma sonda de aço com vários comprimentos de onda consegue-se ver detalhes diferentes nessa sonda.

Por último, este é bastante interessante, trago três casos também tirados do HZB, em que se pode ter também tomografia de alta resolução. Pode-se ter detalhes de ranhuras, por exemplo. Ou eu posso estudar baterias, como uma bateria de lítio; usando a tomografia, pode-

-se ver como ela funciona. O lítio, para o nêutron, consegue espalhar bem, então, consegue-se ver detalhes do funcionamento da bateria. E uma coisa bastante interessante, que raio-X não conseguiria ver. Observar campos magnéticos, fazer radiografias de campos magnéticos usando a radiografia de nêutrons. Este é um exemplo famoso que saiu no HZB utilizando essa técnica de neutrongrafia com nêutrons polarizados. Isso mostra o poder da técnica de neutrongrafia e tomografia de nêutrons.

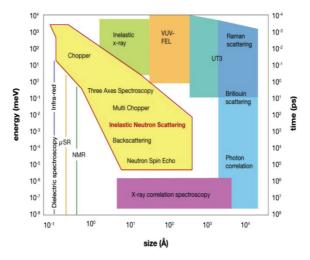
Agora, a segunda etapa, em que eu só vou apresentar os demais instrumentos que são possíveis de serem instalados no RMB. Não vou colocar muitos exemplos, mas depois podemos discutir a respeito desses instrumentos.

Primeiramente, cito o refletômetro, que, basicamente, é empregado para estudar superfícies ou interfaces de materiais. Há refletômetros usados para biologia, podem-se utilizar lipídeos em cima de substratos sólidos, ou para estudar multicamadas magnéticas, fazendo também, portanto, refratometria magnética.

Na sequência, outro equipamento interessante: se houver, no caso de uma superfície, certa periodicidade, como, por exemplo, se houver ondas, lamelas, ilhas no material, pode-se usar a técnica de SANS. Seria uma técnica de refratometria medida em outras direções para obter informações da superfície desse material.

Temos, relacionando a vários instrumentos de estudo dinâmico, os espectrômetros, só para fazer uma comparação com as outras técnicas, que também permitem um estudo dinâmico de materiais. Por exemplo, raio-X. Hoje em dia existem possibilidades de realizar estudos dinâmicos, como espalhamento de raio-X inelástico. Só que a faixa de dinâmica temporal dele é muito pequena em relação à faixa que o nêutron poderia estudar. Esta vai de 10^5 picossegundos até 10^{-4} ; então, é uma faixa bastante grande em que o nêutron pode permitir o estudo de dinâmicas com essas ordens temporais.

Métodos espectroscópicos



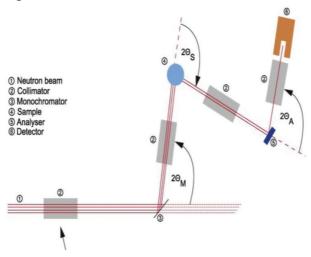
Fonte: Baseado no The ESS project volume 2 (2002).

Comparando com as técnicas ópticas, Raman, Brillouin e correlação de fótons também podem medir essa mesma faixa. Vocês podem perguntar: "Mas por que se precisaria de nêutrons, um equipamento tão caro, para estudar essa mesma coisa, se essas técnicas ópticas, em laboratório, também podem ser usadas?". Nesse caso, existe uma boa razão, aliás, duas: primeiramente, o nêutron, por não ter carga, vai atravessar o material. Então, ele tem a possibilidade de penetrar muito no material, o que as técnicas ópticas não fazem. E, segundo, a técnica de nêutron vai interagir diretamente com o núcleo do material, o núcleo dos átomos. Então, informações relacionadas à dinâmica dessas vibrações vão ser muito mais precisas usando as técnicas de nêutron. Não que elas substituam as técnicas ópticas, mas são um bom complemento e uma boa justificativa para podermos usar essas técnicas.

Nós podemos classificar essas técnicas espectroscópicas em três: tempo de voo, *spin-echo* e *backscattering*.

A técnica de tempo de voo de nêutron estuda determinada energia do material, se o material está absorvendo etc., e como esse fenômeno está se comportando.

Espectroscopia de três eixos

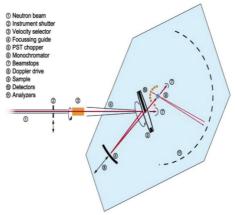


Fonte: HZB.

Na técnica de *spin echo*, diferentemente do que ocorre na de tempo de voo, haverá mudança na velocidade dos nêutrons. No instrumento de espectroscopia de três eixos eu tenho um monocromador para direcionar essa energia. Temos a posição da amostra, e mais um cristal analisador e um detector. O sistema é composto de três etapas: monocromatização, interação com a amostra e análise. Isso seria, basicamente, a concepção de uma espectroscopia de nêutrons.

E por fim a técnica de *backscattering*: também vai usar um monocromador, só que, como o próprio nome diz, ele tem a questão de bater no cristal e voltar a 90 graus. Então, a imagem abaixo traz basicamente o exemplo de um instrumento de *backscattering*. E a vantagem desse instrumento é que se podem estudar escalas temporais na ordem de nanossegundos.

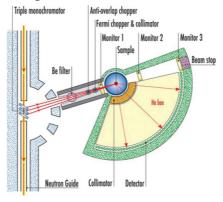




Fonte: ILL.

O tempo de voo vai medir o tempo do voo em que o nêutron, a partir do momento em que ele interagir com a amostra, chega no detector. Apesar de existirem duas técnicas, abaixo eu coloco uma das figuras, na qual tenho o feixe branco incidindo na amostra, e aí se mede o tempo de voo dele para atingir o detector. Este é um exemplo do ILL. Mas eu posso, em vez do feixe branco incidindo na amostra, monocromatizar antes esse feixe. Isso não está colocado aqui.

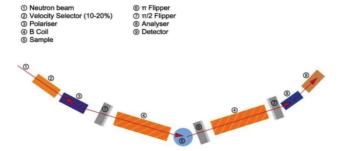
Espectroscopia de tempo de voo



Fonte: ILL.

Um último caso, bastante rápido, a técnica de *spin echo*. No caso, eu vou polarizar o *spin* antes da amostra. E eu vou analisar. Eu tenho duas polarizações do *spin* do nêutron, não da amostra, do nêutron, e polarizado ele interage com a amostra, e depois analiso com um analisador polarizado o efeito que ele deu na amostra, no caso aqui, a mudança de velocidade que ele recebeu da amostra, uma vez interagindo. Então, basicamente, a técnica de *spin echo* possui essas partes.

Espectroscopia de spin-echo



Fonte: FRM2.

Concluindo, o que estamos querendo propor, primeiramente, que seria realmente muito interessante, é a utilização do feixe de nêutrons para pesquisa científica. Porque não é uma técnica que vai substituir o Síncrotron, é uma técnica que vai complementar. Se você quer estudar estruturas com uma alta resolução, você vai em síncrotron, você não vai em nêutrons. Mas, se você quer estudar estruturas, por exemplo, magnéticas, em que você só tem amostra policristalina, você só pode utilizar nêutrons. Ou, por exemplo, se você quiser fazer alguma medida dinâmica relacionada a algum material, dependendo do que você vai estudar no seu laboratório ou no síncrotron, caso exista uma técnica de espalhamento inelástico de raio-X, dependendo da faixa dinâmica em que ele trabalha, eu não vou conseguir analisar com uma técnica de raio-X ou técnicas ópticas, e então, eu venho nas técnicas de nêutrons. Elas podem complementar essa parte que falta no estudo dinâmico de materiais.

DEBATE

MEDIAÇÃO – Julio Cesar Hadler Neto, coordenador do Fórum Pensamento Estratégico (PENSES)

JULIO CESAR HADLER NETO – Vamos para uma ou duas perguntas.

SÉRGIO – Eu acho muito interessante a proposta desses equipamentos, mas deve-se pensar também em coisas suplementares. Por exemplo, células de pressão, campo magnético. Isso está contemplado?

FABIANO YOKAICHIYA – Sim. Isso eu não coloquei aqui na apresentação, mas, sim. Existe toda uma ideia de desenvolver não só toda a parte de instrumentação, como foi colocado aqui, mas também a parte de ambiente de amostra. Sim, temos a ideia de construir criostatos, fornos, campos magnéticos, célula de pressão. Tudo isso é importante.

NÃO IDENTIFICADO – Detectores, existe algum trabalho específico para nêutrons também ou é tudo contato, como antigamente?

FABIANO YOKAICHIYA – Bem, no Ipen nós tivemos uma conversa com o CRPq, o pessoal do reator de pesquisa, e temos a ideia de desenvolver detectores. Até foi uma boa pergunta. No caso de detectores, sabe-se hoje, mundialmente, que vai haver uma grande escassez de hélio-3, e basicamente todos os detectores ou a grande maioria dos detectores usados em todos os instrumentos é abastecida com hélio-3, que, por estar escasso, é muito caro.

O hélio-3 é produzido em bomba nuclear. Então, como estão fazendo desarmamento, estamos tendo escassez desse material. Existem estudos para substituir o hélio-3. Um dos materiais para isso é o fluoreto de boro, se não me engano. Só que o único problema desse material é que ele é extremamente tóxico. Então, ainda estão sendo feitos estudos sobre isso. É uma coisa que nós estamos vendo se desenvolvemos lá no Ipen.

RAFAEL – Para a linha de tomografia, qual é a distância entre a fonte e a linha? Porque eu vi que ela vai ficar separada das outras, fora do *ball* experimental. Então, qual é a distância que vocês estão prevendo colocar do *beambole* de saída?

FABIANO YOKAICHIYA – Isso ainda está em discussão.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Há uma dimensão de pelo menos 10 metros entre a parede do reator e a outra ponta da estação de neutrongrafia. Então, foi especificado o mínimo de 10 metros de comprimento livre para poder utilizar.

RAFAEL – Quer dizer, vocês não estão pensando em imagem de rodagem de base ou uma grande coerência lateral lá na estação experimental?

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Eu não sou técnico, não sei te responder.

FABIANO YOKAICHIYA – Eu teria de falar com o Reynaldo Pugliesi, que é o especialista nessa área. Mas ele está desenvolvendo isso.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Complementando a sua pergunta, existe um grupo do Reynaldo Pugliesi que tem lá instalada essa parte de neutrongrafia. No passado, ele era feito dentro d'água. Hoje, estáse fazendo em um *beamhole* que sai do reator. Só que esse *beamhole* é radial. Então, a taxa de radiação gama é muito alta. Ele tem de ter uns filtros para filtrar gama. Para o reator aqui, eu não sei se você percebeu, colocamos tangencial, de tal forma que vamos colimar só nêutrons, evitando a dose gama, para ter nêutrons puros. Agora, toda a técnica, como ele faz e a característica do equipamento, aí é com o Reynaldo, que é o especialista. Talvez na próxima oportunidade possamos convidá-lo para falar um pouquinho sobre isso.

Só queria esclarecer, nessa parte de utilização do feixe de nêutrons, como vocês podem ver, é uma parte extremamente específica, vinculada à comunidade científica como um todo. Qual é o

exemplo que vamos estabelecer para dizer quais são os equipamentos que vão existir, qual a característica dos equipamentos? Qual é esse grupo? Vocês viram aqui, esses reatores que ele apresentou são específicos de feixe de nêutrons. ILL, inclusive utilizado por pesquisadores da Europa, não é simplesmente da França, é da Comunidade Europeia. São equipamentos caros, manter isso é caro. Construir esses equipamentos é caro e é necessário ter equipes associadas.

A ideia que estamos tendo, e é isso que está demorando um pouco, é que isso tem de nascer da comunidade científica. Então, o que estamos procurando é juntar a comunidade científica.

Nós fizemos um trabalho, há uns dois anos, acho até que você participou da primeira reunião que fizemos, em 2010. Foi uma primeira reunião da comunidade e foi lá que eu conheci o Fabiano. Eu sou da engenharia nuclear, mas os usuários de feixes apareceram, e nós estamos demorando exatamente porque precisamos ter uma flexibilidade. A nossa intenção é sempre fazer uma cooperação com o CNPEM e LNLS. Que esse laboratório seja um laboratório de nêutrons do CNPEM. Nós entramos com essa solicitação. A comissão superior do CNPEM disse que seria melhor começar com um processo mais de cooperação e aí, quando ocorresse mesmo a instalação, se tornaria um laboratório de nêutrons, e é isso que estamos procurando. E estamos tentando juntar a comunidade científica. Nós estamos nesse processo, estamos com pessoas de certo renome na área científica brasileira encabeçando, tentando montar esse grupo, e estamos tentando obter recursos no MCTI, e em outras fontes, para dar flexibilidade a esse grupo para chamar especialistas, discutir casos científicos, começar a formar esse grupo de especialistas. Não pode ser por concurso público, tem de ser por processo direto e de mérito efetivo e fazer intercâmbio com o exterior.

Nós tivemos proposta do HZB, nós tivemos propostas do ILL, nós tivemos proposta do ANSTO, e não fomos atrás porque ainda nós não temos essa equipe. Na hora em que tivermos essa equipe, vamos fazer isso, inclusive, talvez até tenhamos ofertas de equipamentos.

Um exemplo, o HZB vai parar em 2019. Ele vai parar o reator, e está produzindo equipamentos novos agora. E eles estão nos procurando, talvez até como uma forma de continuação do que eles têm hoje. Então, essa área é mais científica, necessitamos da comunidade científica. É ela que vai usar, é ela que tem de dizer. E é isso que estamos tentando fazer. É um pouco diferente da área do reator, da área de ativação, da área de produção de radioisótopos; para isso na CNEN nós temos uma competência.

Nós temos uma pequena competência na utilização de nêutrons, mas o grupo é extremamente antigo, está se aposentando, o sênior está com 70 e poucos anos e nós não temos como repor isso, como funcionários públicos.

Nós temos de mostrar mecanismo diferenciado. E é isso que está ocorrendo. Começa-se a ouvir pessoas que usam as técnicas, eles vêm e se interessam, e vamos montar esse grupo, se Deus quiser! Se um dia conseguirmos 12 equipamentos, graças a Deus. Se conseguirmos 28, aí é um gol de placa.

Voltando ao esquema do reator, na maquete do RMB, eu acho que a primeira figura que você colocou. Fabiano. Vou falar um pouquinho sobre isso. Então, veja, ontem eu dei os parabéns ao Fabiano, é uma felicidade colocar dessa forma na apresentação, é isso mesmo. Essa figura é muito interessante: a continuidade. Ou seja, você começou o processo, evoluiu e nós precisamos ir para frente. Outro processo tecnológico maior: O antigo serviu para você caminhar até um ponto, e agora você tem de ir para frente, em um sistema melhor e maior, mas com consciência. E é isso que está aqui, o Sirius é um brilho, é uma estrela, e o RMB, com 30 megawatts, com $2x10^{14}$ de fluxo — são poucos reatores no mundo que têm isso —, que vai estar disponível para utilização.

Presente



1957 - Potência: 4,5 MW 3 instrumentos



1997 - Energia: 1,37 GeV 14 beamlines

Futuro





Temos de utilizar isso e batalhar para que a comunidade científica e a sociedade utilizem essas ferramentas, que são caras, não são baratas, mas só pelo que se demonstrou aqui nas três últimas palestras, você tem a diversidade de itens. Eu não falei aqui de testes de materiais, podia até acrescentar, fazer outras coisas diferentes para mostrar aqui, como isso é rico para comunidade científica. E aqui foi mencionado, o Laboratório de Nêutrons está de um lado, mas do lado oposto há um campo de futebol aberto. Então, de um lado nós vamos ter um *ball*, um prédio grande com 70 metros de comprimento e 60 metros de largura e um campo de futebol do outro lado, em que se pode fazer outro prédio, de 60 metros, 70 metros, e ampliar.

No ILL, por que há outros tantos 40 equipamentos? Ele tem esses campos de futebol ao redor. Você pode usar. Então, essa é a ideia. Pensamos no futuro já no projeto do reator, deixando espaço, mas a competência de quem fizer é que vai usar isso ou não. O projeto é pensado assim, para futuro, mas inicia pequeno e a competência é que vai dizer como é que ele vai caminhar.

NÃO IDENTIFICADO – Já deve ter havido uma verba alocada para o desenvolvimento desse *ball* experimental e instrumentos no RMB, ou me engano?

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Não, os US\$ 500 milhões são para ter até a estrutura física e o *beam* de nêutrons. O equipamento, esse grupo, muito desse equipamento, a exemplo do LNLS, pode vir de projetos de pesquisas associados. O que nós vamos fazer é gerar infraestrutura de um projeto de reator muito bem feito, com aqueles *shutters* de fechamento muito bem feitos, linhas de nêutrons — eu acho que isso vamos colocar como parte do projeto —, mas a utilização dele, como se fala, podem ser cinco equipamentos no início, e 40 depois. E isso vai crescendo.

NÃO IDENTIFICADO – Eu participei da fase inicial do Síncrotron desde a década de 1980, e uma das coisas que seria interessante sugerir, e que existiu naquela época, seria a formação de um grupo de pessoas responsáveis somente por formar os pesquisadores que vão utilizar, os usuários que vão utilizar essas facilidades.

E nesse sentido, a associação com as universidades, com os grupos de pesquisas é essencial. Isso não pode só nascer do grupo de pesquisa da universidade, eu sugeriria que uma parcela do orçamento fosse investida em bolsas, alunos, viagens, treinamento.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – É isso que estamos querendo formar com esse grupo de pessoas com experiência, montar um grupo, e o investimento inicial não é em equipamento, é exatamente para formar essa competência, essa massa crítica, e aí cada equipamento, sim, depois de decidido, é um projeto à parte.

NÃO IDENTIFICADO – Mas isso tem de estar conectado com as pós-graduações dos nossos institutos, da USP, de todos.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Com certeza. Por isso estamos pegando

também, estamos tentando motivar os pioneiros dessa área de que você está falando.

NÃO IDENTIFICADO – Além do contato internacional.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Isso é fundamental.

NÃO IDENTIFICADO – E aquele grupo de comitê superior que tinha sido formado no começo, o pessoal do HZB?

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Então, não foi criado um comitê, foram feitas as primeiras reuniões para exatamente criar esse comitê. E ali meio que morreu, não foi adiante. E é isso que estamos tentando montar e ter o orçamento para fazer. Algumas dessas pessoas que iniciaram esse processo também saíram. E aí, enfraqueceu-se o sistema. E praticamente estou sozinho, temos de começar tudo de novo.

JULIO CESAR HADLER NETO – O Jun fez uma pergunta interessante nessa linha, na hora do almoço, e depois ficou conversando com o Darío, é preciso fazer treinamento técnico de pessoas. Eu acho que é uma ideia que está mais ou menos dentro do que vocês estão falando. O Jun é assessor do coordenador da Pró-Reitoria de Graduação, eu acho que essas conversas podem ser aprofundadas na direção em que vocês estão querendo ir.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Só para dar o fechamento. Nesse multipropósito, a parte de radioisótopos é inquestionável. Quando o reator operar, temos de produzir radioisótopos, essa é a função da CNEN e a busca disso, inclusive com parcerias. A parte de irradiação de combustíveis e materiais e o laboratório de pós-irradiação, mais ou menos com os usuários disso, ou seja, Eletronuclear, INB, CTMSP, são os que trabalham com reatores. A própria CNEN, os próprios institutos. Agora, essa parte de feixe de nêutrons, é a comunidade. Temos de organizar a comunidade científica para poder

tocar isso. E lembrando que é um laboratório nacional. Isso é sem sombra de dúvidas.

Na parte de ativação, já foi mencionado aqui, existe a competência e ela vai ser disponibilizada para a comunidade nacional.

TERAPIA DE CAPTURA DE NÊUTRONS PELO BORO

SANDRO GUEDES DE OLIVEIRA – Doutor em física pela Unicamp, atualmente é professor associado do Instituto de Física "Gleb Wataghin" da Unicamp e revisor das revistas *Chemical Geology* e *Radiation Measurements*. Tem experiência na área de física, com ênfase em desintegração nuclear e radioatividade, atuando principalmente nos seguintes temas: aplicação e metodologia de termocronologia por traços de fissão, contaminação ambiental por radônio e outras aplicações de detectores de partículas nucleares.

EU VOU falar de um assunto bem diferente do que foi tratado aqui até agora, na palestra anterior, na palestra de materiais. Uma parte diferente de materiais, que é uma aplicação mais voltada para a medicina: a terapia de captura de nêutrons pelo boro. A sigla em inglês é BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*), que é usual. Vou me referir como BNCT, mesmo sendo a sigla em inglês.

Essa terapia é baseada, como diz o nome, na captura de nêutrons pelo boro. Um feixe de nêutrons térmicos, preferencialmente, vai encontrar certa quantidade de átomos de boro. Existe probabilidade de acontecer uma reação, um átomo de boro reagir com um nêutron

e emitir um íon de lítio e uma partícula alfa. Essa probabilidade, na verdade, uma medida dessa probabilidade, é a seção de choque, que para o caso dessa reação é de 3.800 barns, trata-se de uma sessão de choque relativamente alta; por comparação, a sessão de choque do urânio-235 para fissão é 580 barns.

Essa reação tem dois canais possíveis, um com emissão de gama, que é o preferencial, e outro sem a emissão de gama. Quando acontece essa reação, partículas alfa e íons de lítio são emitidos. A energia das partículas é transferida para o meio. Chamamos de transferência linear de energia, que é a energia que é transferida para os elétrons do meio dividida pelo alcance da partícula.

É liberada muita energia em um alcance muito curto. A partícula alfa tem alcance da ordem de 7 micrometros, e o lítio, da ordem de 4 micrometros. O alcance combinado dessas duas partículas é da ordem de grandeza do tamanho da célula.

Se essa reação acontece dentro de uma célula, toda energia é liberada no volume dessa célula. A vantagem dessa terapia, se o nêutron térmico chega ao boro e a reação acontece, é que ela é uma reação local. As partículas vão interagir somente com a célula, que é o caso ideal.

Há várias outras reações que vão aparecer quando estivermos falando de tecidos. Os tecidos são formados por carbono, hidrogênio, nitrogênio, que também têm certa probabilidade de interagir com os nêutrons. A sessão de choque do boro é bem mais alta, algumas ordens de grandeza maior do que para as outras reações. Há a reação com o nitrogênio, que emite um próton, partícula que também surge de outras reações de espalhamento, principalmente de nêutrons rápidos com o hidrogênio, e essas reações vão acabar transferindo a energia também para o tecido.

A primeira preocupação numa terapia com o boro é não fazer mal para o paciente. Na definição do espectro de energia dos nêutrons é preciso levar em conta essa dose secundária. Esse é o princípio da técnica, que é simples, tanto que ela foi proposta bem cedo. Os nêutrons foram descobertos em 1932. A reação do boro com o nêutron, que dá origem a partículas alfa, foi descrita e foi vista em 1935. Em

1936, Locher já propôs que se usasse essa terapia. Foi uma proposta que apareceu bem rápido.

Os primeiros testes começaram a aparecer, começaram a tentar aplicar essa terapia, lá na década de 1950. Os primeiros alvos foram os tumores no cérebro, fizeram testes nos Estados Unidos, e nesses primeiros testes eles não tinham ainda muita noção — uma curiosidade: eles não fizeram testes em animais antes, os primeiros testes com animais foram feitos no final da década de 1960; então, eles foram direto nos humanos. Eles usaram uma droga, que não era bem uma droga, era basicamente ácido bórico, injetaram ácido bórico no paciente, irradiaram com nêutrons térmicos. E aí os resultados, obviamente, não foram bons, porque o boro se espalhou — duas coisas: primeiro, o boro se espalhou por todo o cérebro, sem especificidade nenhuma, causou danos graves aos cérebros das pessoas, mas uma coisa interessante é que matou o tumor. Mas matou também os pacientes. Causou danos graves.

O problema que ficou foi achar uma droga, uma molécula que fosse mais específica, que levasse, de fato, o boro ao lugar onde ele ia reagir. A primeira droga que apareceu, e se mostrou eficaz, foi o BSH, lá em 1967, eu não tenho nem coragem de pronunciar o nome, essa foi a primeira droga mais específica. Usando essa droga, no Japão, eles começaram com testes. Eu coloquei aqui BSH. O BPA é outra droga que apareceu. Eles começaram com essa droga (BSH) e conseguiram resultados melhores, melhores do que os americanos tinham conseguido, mas ainda não eram resultados tão bons. Para referência, a segunda droga foi aparecer 20 anos depois, em 1987, e é a droga que é usada até hoje, principalmente o BPA, depois falamos um pouco mais sobre isso.

Mas aqui eles resolveram muitos problemas. O problema que continuou foi o da energia dos nêutrons. Eles irradiaram com os nêutrons térmicos; como os nêutrons térmicos interagem com os tecidos, eles não conseguiam penetrar e chegar até o tumor. Para o tratamento ser efetivo, a dose tinha que ser muito alta, daí acabava danificando o tecido em volta, e esses nêutrons eram espalhados e jogados para

outras partes do corpo também. E a única solução que eles acharam para isso foi não usar nêutrons térmicos.

Para tratar um tumor de cérebro, por exemplo, você incide o nêutron com uma energia maior. As sessões de choque vão caindo com a energia, o nêutron interage menos, mas ele vai sendo termalizado, e chega térmico até o tumor. E o tratamento vai ser mais efetivo.

Os reatores começaram a ser preparados dessa forma a partir da década de 1990. Começaram a preparar linhas de irradiação que tivessem essas características.

Para o BNCT, as características que seriam desejáveis para uma fonte de nêutrons seriam: ter fluxo da ordem de 10º n/cm² s, o que dá um tratamento com duração de 15 minutos a uma hora. Seria interessante ter o feixe de nêutrons térmicos para experimentos com células e tumores superficiais. Uma coisa que se está fazendo bastante hoje são experimentos com melanoma, por exemplo, usando nêutrons térmicos. Seria interessante usar nêutrons epitérmicos para tumores mais profundos, para que eles tenham penetração e cheguem térmicos ao tumor. E o mínimo possível de contaminação de nêutrons rápidos e de gama, porque aí a dose depositada no tecido passa a ser maior do que a dose devido ao boro.

Alguns reatores que foram construídos ou tiveram linhas adaptadas na década de 1990 são: um nos Estados Unidos, um na Holanda, um na Suécia, um na Argentina, inclusive, e hoje em dia esses reatores estão sendo fechados. O da Holanda foi fechado por motivos econômicos. Os europeus, principalmente, estão sofrendo com a crise.

O reator do MIT foi um dos primeiros reatores que fizeram instalações apropriadas para BNCT. Ele tem uma linha de nêutrons térmicos para experimentos com células, pequenos animais e tratamentos superficiais. E há uma linha de nêutrons epitérmicos para tratamento. Eles, de fato, usam essa linha.

Há também o exemplo do Ipen. Temos feito alguns experimentos lá com eles, o doutor Paulo Coelho, que tomava conta, agora se aposentou, e estão o Paulo de Tarso e outros pesquisadores. Estão tentando melhorar ainda mais a linha; experimentos com células e pequenos ani-

mais estão sendo realizados, e o fluxo de nêutrons é perto do ideal, do que consideramos ideal, 10^9 n/cm² s. Agora, para o BNCT, os reatores têm um inconveniente: é necessário ter um hospital perto. Se você vai, de fato, tratar alguém, tem que ter um hospital perto do reator: é caro construir o reator perto do hospital, ou ter o hospital perto do reator. Para tratamento de pacientes é uma situação que em longo prazo não se sustenta. Para tratamento de pacientes, o que está sendo proposto é usar fontes de nêutrons baseadas em aceleradores. Essas fontes de nêutrons são baseadas em reações endotérmicas, principalmente, que são reações em que se precisa fornecer o mínimo de energia para o próton para a reação acontecer e o nêutron ser gerado, o nêutron ser emitido.

Uma das reações mais comuns é com o lítio-7, que captura um próton, gera o nêutron e vira o berílio-7. Essa reação não acontece naturalmente, quer dizer, não basta capturar o próton, esse próton tem de ter uma determinada energia. E essa característica é interessante porque, se a energia do próton incidente é controlada, controla-se a energia de saída dos nêutrons. Se a energia é muito próxima do limite, essa é a energia em que ele começa a gerar nêutrons. Os nêutrons saem com energia quase zero. Na prática, eles conseguem fazer isso com prótons de dois mega elétrons-volt e vão sair com nêutrons de 100 quilo elétrons-volt.

Em Kyoto, há um acelerador baseado num cíclotron. O cíclotron acelera os prótons, que vão colidir com uma fonte de berílio. Nesse caso também é uma reação endotérmica, os prótons precisam ter energia mínima para a reação acontecer, e isso vai gerar os nêutrons. Para tratamento essa é uma alternativa bem interessante.

E outra coisa que podemos melhorar ou o que podemos trabalhar no BNCT é a questão das moléculas. Como eu falei para vocês, a molécula que se usa hoje foi publicada pela primeira vez em 1987. Ela tem certa seletividade, que é da ordem de 3 a 4 para um; e é com base nessa seletividade que se define o fluxo de nêutrons. Quanto mais boro se consegue levar ao tumor, menor a fluência de nêutrons necessária, menos nêutrons você precisa para conseguir a mesma quantidade de reações.

Para essas moléculas, os requerimentos mínimos já existem. Deve haver baixa toxicidade, radiotoxicidade (essa molécula que já existe já passou nesse teste), altas razões de concentração do tumor para o tecido normal. O que tem hoje é isso, de 3 a 4 para um. Três vezes mais no tumor do que em tecido normal e no sangue. Mas, se essa razão é melhorada, aumentada, se, por exemplo, multiplica-se isso por dois, pode-se diminuir por dois o fluxo de nêutrons que se está incidindo, e diminuem também aquelas outras reações que não queremos, que são as dos nêutrons com o tecido normal. A quantidade de 15 µg/g é a mínima, um valor de referência; normalmente, tenta-se colocar mais que isso, mas este é o valor que é calculado com a razão de 3 a 4 para um e uma fluência de nêutrons de 10º n/cm² s para ter um evento por célula. Esse é o valor-limite que é colocado.

Várias moléculas foram propostas, mas as que se usam hoje ainda são estas: o BSH e o BPA, que apareceu depois. Há uma que é uma modificação do BSH. Muitas outras drogas são propostas. Mas o problema é que, para se ter a proposição de uma droga e o uso dela, há um longo caminho a ser seguido. Primeiro, é preciso mostrar que essa droga não é tóxica, você tem de fazer testes *in vitro* (em células), testes em animais, fazer testes clínicos com seres humanos. Para esses testes, os nêutrons já são necessários. É preciso mostrar que a droga sozinha não vai fazer mal para o paciente durante a irradiação. Há um longo caminho e, até agora, embora haja muitas propostas, ninguém fez esse caminho. O que se usa até hoje nos estudos novos que são propostos ainda é o BPA, principalmente, essa droga mais nova. Essa é uma das áreas de pesquisa que precisam ser desenvolvidas.

Vou mostrar para vocês alguns resultados de estudos clínicos da década de 1990, depois que os reatores foram modificados, as linhas foram modificadas para o BNCT. São resultados mais animadores. Um deles foi realizado no Brookhaven National Laboratory e em Harvard. Irradiaram 53 (Brookhaven) e 18 (Harvard) pacientes com câncer no cérebro e conseguiram uma sobrevida desses pacientes de 13 e 12 meses, respectivamente, e a parte mais importante — vocês verão que isso vai se repetir bastante — é a boa qualidade de vida.

Então, o que se chama de boa qualidade de vida? O BNCT tem uma vantagem em relação à radioterapia convencional: é que se consegue aplicar toda a dose em, no máximo, duas sessões, enquanto na radioterapia convencional são necessárias muitas sessões. O paciente vive melhor no tratamento com o BNCT.

Também nessa época, na Suécia e na Finlândia, 27 pacientes, mesmo tumor, BPA, uma mediana de sobrevida de 18 meses. Também com boa qualidade de vida.

E aí estudos bem mais recentes, feitos no Japão com 87 pacientes, tratando câncer de cabeça e pescoço, e de novo, a mesma droga, o BPA. Não há como mudar. Eles conseguiram uma mediana de sobrevida que foi de 10 meses. De novo, todo mundo relata boa qualidade de vida.

Na Argentina, é bem interessante, também recente, um estudo de melanoma, tratamento de melanoma. Eles irradiaram sete pacientes, usando BPA de novo, e obtiveram resposta em cinco pacientes. Os resultados foram bem efetivos. E estão sendo publicados muitos outros resultados que mostram também esses tempos de sobrevida, um pouco mais, um pouco menos. Todos relatam boa qualidade de vida.

Há um caso interessante em que a técnica de BNCT, na verdade, só foi aplicada em dois pacientes, foram só duas irradiações, em Pávia, na Itália: um foi em 2001 e outro, em 2002.

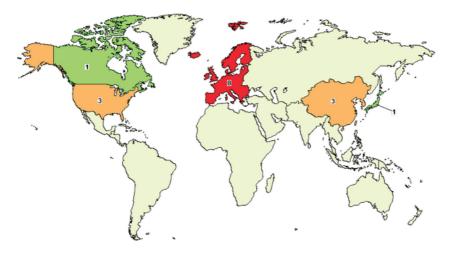
O que eles fizeram: eles operaram o paciente, tiraram o fígado do paciente, fizeram o sangue circular externamente, e drenaram todo o sangue do fígado, resfriaram o fígado. Eles colocaram o fígado em uma posição normal de irradiação, uma coluna térmica. A grande vantagem dessa técnica, desse tratamento que fizeram no fígado, é que permitiu que dessem uma dose muito mais alta do que a dose convencional. É uma ordem de grandeza maior. Nós vimos que o sangue é uma fonte de dose indesejável. Aplicaram uma dose 10 vezes maior do que eles aplicariam normalmente.

Eles relataram os dois casos em que as células tumorais ficaram necróticas, eles falaram que isso é bom, e eu acredito neles. Disseram que as metástases foram tratadas radicalmente: são as palavras deles, então, imagino que isso seja bom.

Dos dois pacientes, um sobreviveu 44 meses após o tratamento. Aqui, se for comparar com os outros estudos clínicos, é uma coisa muito além do que se relata. Teve boa qualidade de vida e, conforme observação do autor, ele até se casou.

Temos o outro caso em que nos relataram que o tumor foi completamente curado, a metástase foi tratada, mas o paciente morreu um mês depois por problemas cardíacos. Pelo menos no artigo eles não conseguem relacionar com a irradiação, com a dose de radiação que esse paciente sofreu. Não há uma relação aparente. E aí, segundo eles também, o estudo foi interrompido, mas pode ser continuado, eventualmente.

Estudos de BNCT registrados no National Institute of Health dos EUA



Fonte: clinicaltrials.gov. Consultado em 27/01/2015.

Esses casos são interessantes. E resumindo, esses são os estudos clínicos registrados no National Institute of Health dos Estados Unidos, só para mostrar a abrangência dos estudos clínicos que estão sendo feitos. São estudos registrados, acabamos de ver que há resultado na Argentina, deve haver em outros lugares também, há vários

casos acontecendo na Europa, pelo menos oito casos registrados, na China, no Japão. O Japão é um dos países que mais se registrou aqui; Estados Unidos e outros lugares também.

São estudos clínicos que estão sendo realizados para vários tipos de câncer: neuroblastoma, cérebro, melanoma, cabeça e pescoço, fígado, câncer oral. E as drogas que têm sido usadas são sempre as mesmas.

O que podemos fazer em um reator relacionado a BNCT? Podemos fazer estudos com células, eficácia e toxicidade de novas moléculas. Vimos que é muito importante ter moléculas mais eficientes, que sejam mais seletivas, ter estudos mais metodológicos, como identificar os mecanismos de morte das células, estudos de dose e resposta. E também outros testes pré-clínicos, pequenos animais, distribuição, toxicidade, estudos de radiometria e dosimetria para quantificar a radiação a partir da fluência de nêutrons. Nós conseguimos medir a fluência de nêutrons e temos de transformar essa informação em dose. É interessante usar o reator, os feixes de nêutrons do reator para esse tipo de estudo.

Há um exemplo de estudo do pessoal do Butantã, em São Paulo, que eles fizeram no Ipen. Eles estudaram a viabilidade em células de melanoma tratado com BPA e depois irradiadas com nêutrons. Observaram nas células tumorais uma redução na viabilidade celular, quer dizer, na sobrevivência das células. E nas células normais, eles não observaram modificação alguma. Não é que o BNCT não mate as células normais. Então, o que aconteceu? Nesses casos, a célula normal não absorveu o BPA, ao passo que as células tumorais absorveram e, quando foram irradiadas, sofreram os danos de radiação normal — o que se esperava delas.

É como o BNCT funciona e como podemos usar as linhas de nêutrons. No caso do Reator Multipropósito, poderíamos usar a linha de nêutrons térmicos principalmente nessa parte de estudos pré-clínicos com células, pequenos animais. Não queremos tratar ninguém no reator, gostaríamos de usar para fazer esse tipo de estudo.

DEBATE

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA – Na década de 1980, começamos a fazer o projeto de um reator de aplicação médica aqui para Campinas, lá com o projeto da Marinha, havia um que se chamava Repam — Reator para Aplicações Médicas, que seria instalado aqui em Campinas. E na época, BNCT era uma das técnicas a serem utilizadas.

Com o Paulo Rogério, em 2008, nós pensamos se o BNCT ia ser utilizado ou não. E eu particularmente não fui favorável a utilizá-lo para irradiação de ser humano. Porque eu visitei o reator no Japão e aí existe a sala de operação dentro do reator, na parte superior. E você tinha uma sala esterilizada onde você operava, abria o crânio da pessoa, irradiava o cérebro, e isso requer todo um cuidado extra — e para uma coisa específica, que era câncer no cérebro — para aplicação de BNCT.

No início, descartamos a utilização dessa sala esterilizada ou algum ato cirúrgico associado ao reator. Mas eu acho que, no caso aqui, como você apresentou, um melanoma, que é câncer na superfície, aí você tem, talvez, aplicação de feixes térmicos diretamente, não necessário, que é o que nós temos no reator, e eu vi que você falou da Argentina, em Bariloche. eu conheço o reator lá, e é um reator igual ao nosso, não tem salas, não tem nada. Então, o que eles fizeram, provavelmente, simplesmente pegaram o feixe, irradiaram direto o paciente, já que o melanoma, no caso da pele, é superficial, então você pode usar um feixe direto. Então, é igual a um experimento de irradiação, você extrair um feixe e aplicar. Não é preciso um setor cirúrgico.

Eu acho que, com o feixe de nêutrons que há, você pode fazer muito itens que estão aí, inclusive uma avaliação interessante é nêutrons térmicos, nêutrons frios.

NÃO IDENTIFICADO – É que, dependendo da localização do tumor, ele tem uma composição química diferente. Há algum estudo? O que eu

vi era mais aplicado a tumor cerebral, mas há algum estudo relacionado ao estágio desse tumor?

SANDRO GUEDES DE OLIVEIRA – No momento, eu não vou saber te dizer. Por que é mais câncer de cérebro? Porque é uma técnica experimental. Então, só há autorização para aplicar essa técnica em pacientes que não têm outra saída, que já tentaram tudo e não há mais o que fazer, então, aí se recebe uma autorização para tratar esse paciente. Por isso que câncer de cérebro aparece bastante. E o melanoma, porque é mais fácil, mais inofensivo, superficial.

EDISON SHIBUYA – Talvez a minha pergunta esteja um pouco fora do seu tema, mas é que nós tivemos dois colegas que faleceram de câncer de pâncreas. Existe alguma coisa feita com esse BPA?

SANDRO GUEDES DE OLIVEIRA – Eu também nunca vi. No pâncreas eu nunca vi. Melanoma, câncer de cérebro, fígado. Talvez o BPA não seja a droga indicada. O problema é a droga, se você acha uma droga que seja específica para um determinado tumor e que você consiga colocar o boro nela e entregar, nada impede de você fazer isso no pâncreas também.

O pessoal de São Paulo está estudando câncer de mama. O pessoal do Butantã está estudando um projeto agora para testar as células, uma droga que estão usando para radioterapia, eu não vou lembrar o nome, eles estão tentando colocar o boro nela para testar em câncer de mama. Se você consegue entregar o boro, pode fazer esse tipo de radioterapia.

JULIO CESAR HADLER NETO – Com a palestra do Sandro, encerramos o Simpósio, esperando que tenha sido bom para todos, que tenha sido elucidativo, principalmente em relação à utilidade, à importância que o RMB certamente terá para o país.

JOSÉ AUGUSTO PERROTTA - Eu gostaria de agradecer ao professor Ju-

lio por esta grande oportunidade, esta iniciativa de trazer à discussão esse projeto do reator. Isso é outra característica do reator, cada vez ele surge diferente. Trazer para discussão pública e da sociedade um reator nuclear e a área nuclear, isso é importante. A maturidade da sociedade tem de ser suficiente para decidir a utilização ou não de um reator deste tipo. Então, palestras deste tipo e fóruns deste tipo são fundamentais. Eu agradeço bastante a oportunidade.

Realizado pelo Fórum Pensamento Estratégico (PENSES) da Unicamp em Campinas (SP) em 10 de dezembro de 2013, o Simpósio Reator Multipropósito Brasileiro mostrou de que maneira o investimento do governo federal neste empreendimento permitirá ao Brasil mais do que dobrar a quantidade de exames e procedimentos de medicina nuclear e proporcionar uma independência inédita ao país na produção de radiofármacos. Durante o evento, pesquisadores apresentaram também as possibilidades de uso em pesquisas desse reator nuclear que será construído em Iperó (SP). Esta publicação traz a íntegra das palestras com a proposta de ampliar os debates sobre o tema.

