



Catálogo da

Exposição



**Energia
Brasil!**

Energia nuclear para geração de energia elétrica

Ficha Catalográfica

A553

Andrade, Ana Maria Ribeiro de
Energia Brasil! Energia nuclear para geração de energia
elétrica / Ana Maria Ribeiro de Andrade. Rio de Janeiro :
MAST, 2007.
32p. :il.

Colaboração Antonio Carlos Martins

1. Energia Nuclear. Catálogo de exposição.
2. Divulgação científica. 3. Energia Brasil (exposição).
I. MAST. II. Título.

CDU 621.039

Organizada por



Museu de Astronomia e Ciências Afins
Rua General Bruce, 586
20.921-030 São Cristóvão Rio de Janeiro

Uma exposição sob a direção da
Coordenação de História da Ciência
Coordenação de Museologia

Com o apoio da
Coordenação de Educação em Ciência
Coordenação de Documentação e Informação

Curadoria da exposição e textos
Ana Maria Ribeiro de Andrade

Projeto gráfico
Thiago Alves

Revisão
Luiz Carlos Borges

Apresentação

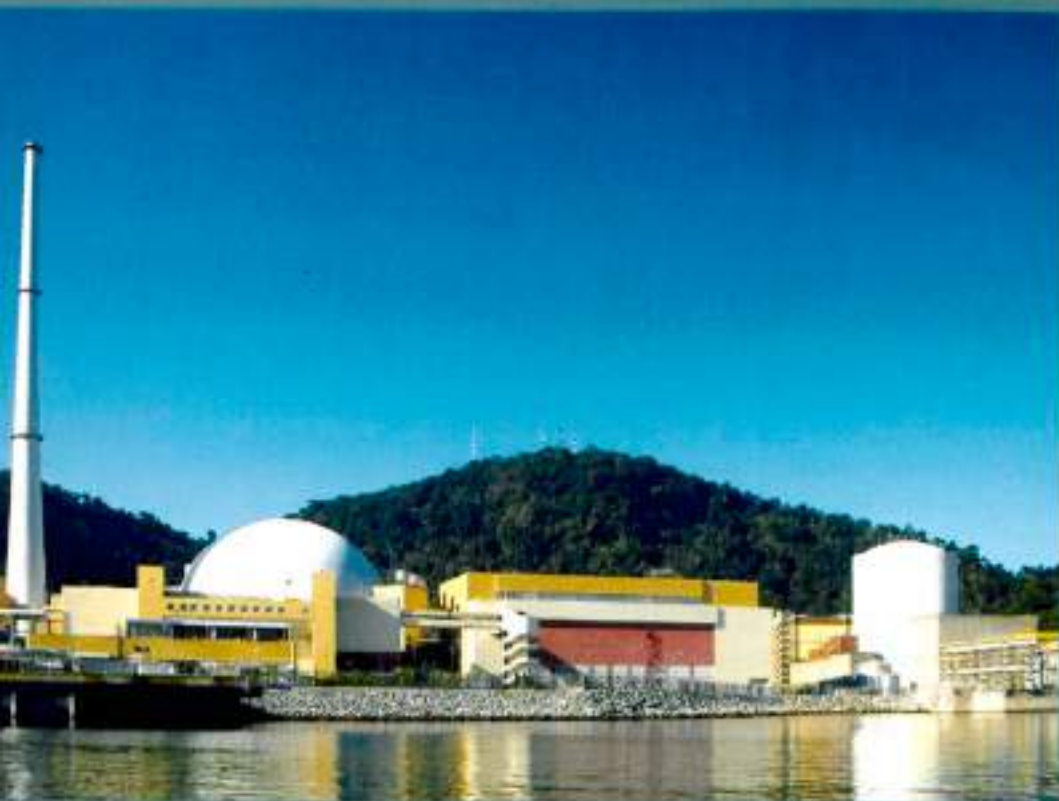
O impacto causado pelas bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki, em 1945, modificou radicalmente a forma de organização e o caráter das pesquisas científicas e tecnológicas nos Estados Unidos e Canadá, como nos países industrializados da Europa. Muitas pesquisas em física e no campo das engenharias visavam fortalecer o poder político-militar desses Estados e acelerar o crescimento da economia. Por isso, investiam em pesquisas direcionadas tanto para a aplicação militar, quanto para a utilização pacífica da energia nuclear. Isto é, cientistas e engenheiros buscavam aprimorar o conhecimento sobre as interações nucleares para a construção de armas, bem como para a utilização da energia nuclear na indústria, agricultura, medicina e geração de energia elétrica.

Já no Brasil, enquanto os cientistas defendiam que o desenvolvimento da ciência e da tecnologia era fundamental para superar o atraso crônico do país, e os militares atribuíam à energia nuclear um papel estratégico para a segurança nacional, alguns industriais e técnicos do governo acreditavam que era fácil e barato construir usinas nucleares para atender à crescente demanda de energia elétrica no Sudeste. Em meados do século XX, a pequena oferta e o racionamento de energia elétrica retardavam o crescimento econômico e comprometiam as expectativas de aumento da produção industrial nesta região. A situação era tão grave que foi criada uma CPI (Comissão Parlamentar de Inquérito) para investigar a Light and Power Company Ltd., então uma empresa de capital canadense responsável pelo fornecimento de energia elétrica ao Estado de São Paulo, sul do Estado do Rio de Janeiro e capital federal.

Na história da energia elétrica do Brasil, a alternativa nuclear sempre foi apresentada como uma solução para evitar racionamento de energia elétrica ou o risco de apagões. Contudo, os desafios enfrentados na construção e operação da primeira usina nuclear brasileira, Angra 1, mostraram que o domínio da tecnologia do ciclo do combustível nuclear é imprescindível para a autonomia do país no setor. Por isso, é fundamental que os brasileiros conheçam a história da energia nuclear e suas aplicações para que possam avaliar o valor social do emprego dessa fonte de energia, assim como os riscos e os cuidados necessários com os materiais e fontes radioativas.

Este catálogo é dedicado ao público visitante da exposição *Energia Brasil* e aos interessados na história da ciência e tecnologia nuclear, com o objetivo de contribuir para a reflexão sobre o significado do domínio de uma tecnologia estratégica, e para que mais brasileiros possam participar do polarizado debate acerca da construção de usinas nucleares no país e no mundo.

Ana Maria Ribeiro de Andrade
Curadora da exposição
"Energia Brasil"



Usinas nucleares Angra 1 e 2 (RJ)

O Projeto

A partir do momento em que as usinas termelétricas a carvão, gás e diesel foram também responsabilizadas pelo aquecimento global, as usinas nucleares ganharam novos defensores. Para que o público de museus de ciência e tecnologia possa participar de discussão tão atual é necessário que compreenda o que é energia, reação nuclear em cadeia e como a energia elétrica é gerada em uma usina nuclear. Outros pré-requisitos para identificar as vantagens e desvantagens dessa fonte de energia estão relacionados ao conhecimento acerca das etapas do ciclo do combustível nuclear desenvolvidas no Brasil, das outras fontes geradoras de energia elétrica, e da história da energia nuclear.

Diante da complexidade do tema e da impossibilidade de expor equipamentos de uma usina nuclear, o visitante encontrará, na exposição, uma maquete da usina nuclear Angra 2 e uma seção do elemento combustível lá utilizado, além de informações apresentadas em painéis com pequenos textos e fotografias, mapas, esquemas, documentários e filmes, aparatos interativos e jogos, amostras de minérios, documentos históricos e objetos em vitrines. Também são exibidos os equipamentos de proteção individual utilizados pelos técnicos e tambores usados para acondicionar o rejeito radioativo produzido nas usinas nucleares de Angra dos Reis (RJ).

Buscou-se abordar o conteúdo científico de uma maneira resumida, estimulando a leitura de material complementar na biblioteca do Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST) e em sites na Internet, uma vez que grande parte do público visitante da instituição é constituída por estudantes do ensino fundamental e médio.

Por ter sido montada no prédio principal do MAST – edificação construída entre 1913-1922 para sediar o Observatório Nacional e que, atualmente, é um bem cultural tombado pelo patrimônio histórico –, a equipe da exposição deparou-se com outra limitação: os espaços disponíveis para a mostra eram pequenos para a abordagem de um tema tão vasto. Por isso, ocupou-se todas as áreas livres de dois andares, como corredores, o mezanino e a escada do interior do prédio. Como fio condutor, elegeu-se o símbolo da radioatividade, visando, assim, chamar a atenção do público, sinalizar a continuidade narrativa da exposição, integrar os espaços e o conteúdo. Desse modo, o visitante se depara, logo na entrada, com um espaço expositivo construído no interior de um trifólio radioativo tridimensional.

A necessidade de utilização de múltiplos recursos técnicos, para superar as dificuldades de expografar o tema, aglutinou profissionais do MAST das áreas da história da ciência, educação em ciência, arquitetura, artes visuais e técnicos de informática. A concepção e montagem da exposição nortearam-se pelo princípio de subsidiar os visitantes com elementos históricos e científicos que lhes propiciassem refletir sobre a história e os desafios tecnológicos da produção de energia nuclear para geração energia elétrica.



MAST - Mezanino

Estamos mergulhados na radioatividade

Toda matéria emite partículas ou energia, isto é, radiação. O Sol e outras estrelas emitem grandes quantidades de energia em várias formas de radiação. A luz é uma delas. O som de um rádio ou a voz de uma pessoa ao telefone, assim como as ondas que transmitem as imagens que vemos na TV ou na Internet, também são formas de radiação. Vivemos em um ambiente naturalmente radioativo, embora esta radioatividade seja de baixa intensidade.

A radiação presente nos reatores das usinas nucleares e reatores de pesquisa é resultante da divisão do núcleo de um átomo. Este processo libera uma enorme quantidade de radiação que é chamada de energia nuclear.

Há inúmeras aplicações da energia nuclear. Infelizmente, algumas são utilizadas para fins bélicos, como guerra, ameaça e pressão políticas. Ao contrário dessas, as aplicações para fins pacíficos podem salvar vidas, alimentar mais pessoas, iluminar cidades, promover o desenvolvimento econômico e produzir novos conhecimentos. Estas aplicações, embora úteis à sociedade, podem ser perigosas. Por isso, existem normas rígidas de licenciamento, segurança e proteção dos cidadãos e meio ambiente para a utilização da energia nuclear.

O Brasil possui muitos minérios radioativos, como o lório e o urânio, elementos químicos usados na complexa produção da energia nuclear. Como o país possui a 6ª maior reserva mundial de urânio e domina a tecnologia do ciclo do combustível nuclear, os reatores das usinas de Angra dos Reis utilizam este minério para produzir reações nucleares em cadeia a fim de gerar energia elétrica.

A exposição *Energia Brasil* aborda a história da energia nuclear no Brasil e as etapas do ciclo combustível, misturando política, ciência e tecnologia. Na primeira parte apresenta a história da política nuclear brasileira, as descobertas científicas que permitiram o aproveitamento da energia nuclear, e os principais acontecimentos ocorridos no Brasil e no mundo relacionados ao assunto. Na segunda parte trata de cada uma das etapas do ciclo do combustível nuclear, especialmente daquelas cuja tecnologia o Brasil

domina, mostrando desde a mineração do urânio até como a energia nuclear é produzida nas usinas de Angra dos Reis.

Há também informações sobre outras fontes de energia utilizadas no Brasil para a geração de energia elétrica, sobre o número de usinas nucleares espalhadas pelo mundo, sobre o acidente de Chernobyl e os cuidados com o rejeito radioativo, para que os visitantes da exposição possam refletir sobre a contravenção atual: o Brasil deve produzir mais energia nuclear para gerar energia elétrica?



MAST - 1º pavimento

Ciência e Guerra

O Brasil participa da história da energia nuclear desde a Segunda Guerra Mundial, embora, por quase uma década, fosse apenas um simples exportador de minerais nucleares ou radioativos. Assim, enquanto as batalhas se sucediam na Europa e toneladas de areia monazitica eram enviadas do Brasil para os Estados Unidos, cientistas americanos, canadenses e refugiados europeus do nazi-facismo trabalhavam no ultra-secreto Projeto Manhattan. Esse esforço conjunto tinha por finalidade construir a bomba atômica, com base em recentes resultados de pesquisas científicas (a fissão nuclear e a possibilidade de uma reação em cadeia) e do desenvolvimento de métodos de enriquecimento do urânio, ou de utilização de outros minerais. O Projeto Manhattan era uma resposta à possibilidade da Alemanha nazista estar desenvolvendo a mesma tecnologia bélica, conforme alertaram físicos, em carta redigida por Leo Szilard, e do qual Albert Einstein foi co-signatário, enviada a Franklin Roosevelt, presidente dos Estados Unidos.

Um dos grupos de pesquisa do Projeto Manhattan era liderado por Enrico Fermi, físico italiano refugiado, nos Estados Unidos, do regime fascista de Benito Mussolini. Em 1942, após construírem o primeiro reator nuclear (o Chicago Pile-1) na Universidade de Chicago, produziram e controlaram a primeira reação nuclear em cadeia. Em outro experimento de sucesso, Fermi produziu plutônio em quantidades significativas, visando a fabricação da bomba.

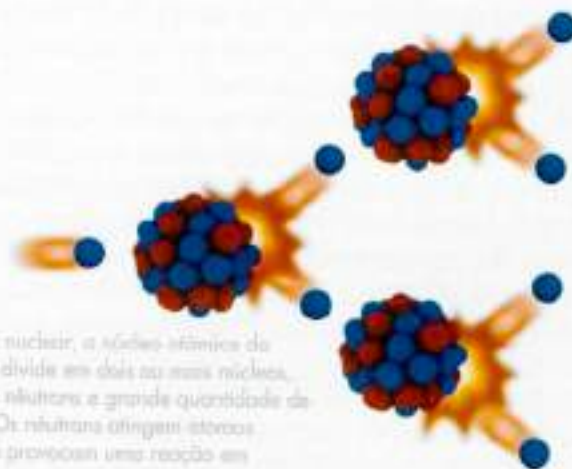


Toneladas de areia monazitica foram retiradas de praias brasileiras e enviadas aos Estados Unidos

A primeira bomba atômica foi testada no deserto do estado do Novo México, em 16 de julho de 1945. Em 6 de agosto do mesmo ano, Hiroshima foi vítima do poder nuclear e, três dias depois, uma segunda bomba foi lançada sobre Nagasaki. A atividade científica contribuiu de forma decisiva para a destruição das duas cidades japonesas e o final da Segunda Guerra Mundial ficou marcado pelo início da era nuclear.



Fermi e outros físicos da Universidade de Chicago controlaram a primeira reação nuclear em cadeia, em 1942.



Na fissão nuclear, o núcleo atômico do urânio se divide em dois ao ser atingido por um nêutron, liberando nêutrons e grande quantidade de energia. Os nêutrons atingem átomos vizinhos e provocam uma reação em cadeia.

Dois meses depois do fim da Segunda Guerra Mundial, a Organização das Nações Unidas (ONU) foi oficialmente fundada com a promulgação da Carta das Nações Unidas, assinada por 51 países, dentre eles o Brasil. No ano seguinte, o país foi convidado a participar da reunião da recém-criada Comissão de Energia Atômica da ONU, em função do potencial de suas reservas de minerais físséis e férteis, e dos acordos firmados com os Estados Unidos.

O interesse norte-americano pelas minérios radioativos brasileiros não era recente. Em 1940, Brasil e Estados Unidos iniciaram o Programa de Cooperação para Prospeção de Recursos Minerais, o que lhes possibilitou a obtenção de informações privilegiadas sobre as reservas brasileiras, especialmente a respeito dos ricos depósitos de areia monazítica (fosfato de terras-raras contendo quantidades variáveis de urânio e tório), localizados no litoral do norte do Estado do Rio de Janeiro até o sul da Bahia. Em plena Segunda Guerra Mundial, os dois governos ainda firmaram o Acordo Relativo ao Fomecimento Recíproco de Materiais de Defesa e Informações sobre Defesa, que assegurou a exportação de areia monazítica brasileira, possivelmente para atender às necessidades da indústria bélica, ou para ser estocada. Em julho de 1945 foi assinado o 1º Acordo Atômico Brasil-Estados Unidos, de caráter secreto, pelo qual o Brasil se comprometia a vender, apenas aos Estados Unidos, 5 mil toneladas anuais de monazita, durante três anos.

Em 1946, Estados Unidos, Reino Unido e Canadá constituiram a Agência Conjunta de Desenvolvimento, para adquirir a produção mundial de urânio do Canadá, Congo Belga, Austrália e África do Sul. Assim, tão logo se iniciaram as atividades da Comissão de Energia Atômica da ONU, em 1946, o chefe da delegação norte-americana, Bernard Baruch, propôs a gestão internacional de todas as reservas de urânio e tório, e das "atividades perigosas" ou que colocavam em risco a segurança mundial: a prospecção, mineração e beneficiamento de urânio e tório; o enriquecimento de urânio; a operação de reatores produtores de plutônio e de instalações para a separação e extração de plutônio; e a pesquisa e desenvolvimento de artefatos explosivos nucleares.

O então capitão-de-mar-e-guerra Álvaro Alberto da Motta e Silva, que participava da delegação brasileira como representante da



A primeira bomba atômica foi testada no deserto de Alamogordo, Novo México (EUA), 1945.



Hiroshima foi vítima do poder nucleario final da Segunda Guerra Mundial.

Marinha, era favorável ao Plano Baruch. Ele acreditava nas possibilidades de os dois países atuarem de forma complementar. Isto é, o Brasil venderia aos Estados Unidos minerais necessários à produção de energia nuclear em troca de tecnologia. Entretanto, a legislação americana de 1946 previa a obrigatoriedade do completo sigilo da tecnologia nuclear, junto com a pena de morte para os envolvidos na divulgação de informações a potências estrangeiras, mesmo em tempo de paz.

Os debates na Comissão de Energia Atômica da ONU foram acalorados, durante mais de duzentas sessões realizadas de 1946 ao início de 1948. A proposta americana de instituir uma "Autoridade de Desenvolvimento Atômico" provocou sérias desconfianças, pois a verdadeira intenção dos Estados Unidos era manter o monopólio da tecnologia nuclear. As discussões ficaram tensas quando a União Soviética propôs a destruição das armas nucleares existentes e a criação de um organismo internacional para evitar a proliferação das mesmas. Chegou-se ao impasse e as negociações do Plano Baruch foram interrompidas diante do antagonismo entre as duas maiores nações: Estados Unidos e União Soviética. Iniciava-se o período que ficou conhecido como Guerra Fria, durante o qual o poder ideológico das duas superpotências dividiu o mundo em dois blocos: os países capitalistas e os países comunistas.

O mundo ocidental foi surpreendido com a explosão da bomba atômica pela União Soviética, em 1949. A perda do monopólio nuclear norte-americano estimulou as pesquisas sobre a energia nuclear em vários países, tanto para as aplicações para fins bélicos, como para fins pacíficos. No Reino Unido, o primeiro reator produtor de plutônio começou a operar em 1952 e, no mesmo ano, os ingleses explodiram um artefato nuclear com potência de 25 quilotons, nas Ilhas Monte Bello (Austrália). Já que para os Estados Unidos não fazia mais sentido a aprovação do Plano Baruch, a Comissão de Energia Atômica da ONU foi dissolvida.

A rosa de Hiroshima

Pensem nas crianças
Mudas telepáticas
Pensem nas meninas
Cegas inexatas
Pensem nas mulheres
Rotas alteradas
Pensem nas feridas
Como rosas cálidas
Mas oh não se esqueçam
Da rosa da rosa
Da rosa de Hiroshima
A rosa hereditária
A rosa radioativa
Estúpida e inválida
A rosa com cirrose
A anti-rosa atômica
Sem cor sem perfume
Sem rosa sem nada

Vinicius de Moraes¹

O Brasil não pode ficar pra trás

A potencialidade do uso da energia nuclear na guerra, medicina, agricultura, indústria e para a geração de energia elétrica motivou vários países a criar uma comissão de energia atômica para organizar as atividades de pesquisa científica do setor e, principalmente, regulamentar e fiscalizar seu uso para fins militares. Na França, o Commissariat à l'Énergie Atomique foi criado em 1945 e, nos Estados Unidos, a Atomic Energy Commission iniciou suas atividades em 1946, substituindo o Projeto Manhattan. Naquele ano, diplomatas e militares brasileiros também defendiam a criação de uma comissão de energia atômica no Brasil, para proteger as reservas de minerais radioativos. Mas a articulação fracassou.

Quando retornou ao Brasil em 1948, Álvaro Alberto foi promovido a contra-almirante e colocou o presidente da República, general Eurico Gaspar Dutra, ciente das dificuldades enfrentadas pela delegação brasileira na ONU, enfatizando que "(...) o Brasil era o único que não dispunha de órgãos necessários para se colocar em idêntico nível de progresso cultural e econômico à altura dos países civilizados"². Álvaro Alberto foi então designado para coordenar os trabalhos de uma comissão encarregada de elaborar um anteprojeto de lei de criação de um conselho de pesquisas, similar ao que existia na França, Estados Unidos e Canadá, mas que seria responsável também pela área nuclear.

A iniciativa agradou a cientistas e professores de ciência, membros da Academia Brasileira de Ciências, setores das Forças Armadas e da indústria, técnicos da administração pública, e teve apoio de deputados. Em 15 de janeiro de 1951, poucas dias antes de deixar a Presidência da República, o general Eurico Gaspar Dutra sancionou a lei, aprovada no Congresso Nacional, que criava o Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), para estimular o desenvolvimento da pesquisa científica e tecnológica em qualquer domínio do conhecimento, e gerir as atividades referentes à utilização da energia nuclear.

O Programa Nuclear de Vargas

Na volta de Getúlio Vargas ao poder, o almirante Álvaro Alberto foi nomeado presidente do CNPq. As diretrizes políticas do novo presidente da República coincidiam com as posições de Álvaro Alberto: desenvolvimento da ciência e produção de energia nuclear. A proposta de política nuclear do CNPq foi aprovada pelo Conselho de Segurança Nacional e pelo presidente da República, ficando conhecida como o Programa Atômico de Vargas. Contudo, para que o país pudesse produzir e utilizar a energia nuclear era preciso superar vários obstáculos: formar físicos, químicos, engenheiros e técnicos especializados; montar a infra-estrutura para pesquisa (laboratórios, equipamentos, bibliotecas, etc.); identificar as reservas, explorar e industrializar o urânio ou tório.

Getúlio Vargas garantiu os recursos para o CNPq conceder, anualmente, dezenas de bolsas de graduação e pós-graduação, auxílio à pesquisa e para estágios de capacitação técnica em universidades nos Estados Unidos e Europa, sobretudo nas áreas das engenharias, química de radioisótopos, radioproteção, física e eletrônica. Também promoveu a vinda de professores estrangeiros para desenvolver pesquisas fundamentais e aplicadas em física nuclear. Os esforços se direcionaram para um grande projeto de aceleradores de partículas, equipamento fundamental para pesquisas em física. O Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) ficou encarregado de executar o ambicioso Projeto dos Síncrotrons do CNPq – um tipo de acelerador comprado da Universidade de Chicago (EUA) –, embora o grupo de físicos da USP (Universidade de São Paulo) tivesse mais tradição em pesquisa, e na Universidade de Minas Gerais tivesse sido criado o Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR).

Projetos grandiosos estimulavam Álvaro Alberto, para quem não havia obstáculos intransponíveis. Na República Federal da Alemanha, ele comprou três ultracentrífugas para enriquecer urânio, que foram apreendidas antes de serem embarcadas com destino ao Rio de Janeiro. Como a Alemanha estava submetida ao controle de tropas de ocupação dos Aliados (Estados Unidos, Reino Unido e França), estes não deixaram sair um equipamento tão estratégico para o domínio do ciclo do combustível nuclear.

Em colaboração com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), o CNPq investiu na localização de jazidas de urânio e tório. Contratou empresas para realizar levantamentos geológicos aéreos, enquanto geólogos americanos do Bureau of Mines e do Geological Survey, assim como os brasileiros do DNPM, continuavam os trabalhos, iniciados na década de 1940, de prospectar o litoral do Espírito Santo e o interior de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia. Em 1952, o geólogo americano Max G. White observou a presença de urânio nas jazidas de caldazito de Poços de Caldas (MG) e, imediatamente, o CNPq encomendou na França um projeto para a instalação de uma usina de beneficiamento no local.

A política de exportação da monazita para os Estados Unidos prosseguiu: o 2º Acordo Atômico Brasil-Estados Unidos foi assinado em fevereiro de 1952 (em troca da dispensa do envio de tropas brasileiras para a Guerra da Coreia, 1950-1953), e o 3º Acordo Atômico Brasil-Estados Unidos, em 20 de agosto de 1954. Desta vez, trocavam-se 5 mil toneladas de monazita e 5 mil toneladas de sais de cério e terras-raras por 100 mil toneladas de trigo. Mais uma vez, Vargas cedeu para minimizar os conflitos com o governo americano, que se opunha ao monopólio estatal do petróleo (Petrobrás), ao projeto de nacionalização das empresas de energia elétrica, etc. Os problemas enfrentados na política de relações exteriores refletiram no ambiente político e acirraram as forças de oposição ao governo. No dia 24 de agosto daquele ano, o país silenciou diante do suicídio de Getúlio Vargas.

O fim da era Vargas coincidiu com a perda da sustentação política do almirante Álvaro Alberto, cuja última estratégia consistiu na criação da Comissão de Energia Atômica do CNPq. Tentava-se manter o Programa Nuclear de Vargas e pôr fim às renegociações dos Acordos Atômicos firmados com os Estados Unidos. Em primeiro lugar, considerava-se que os acordos de exportação da monazita eram desfavoráveis ao Brasil, porque não envolviam a troca do minério por tecnologia nuclear, isto é, tinham caráter puramente comercial. Em segundo, a Comissão de Energia Atômica constatou que as estimativas do tamanho das reservas de urânio e tório existentes no território nacional eram totalmente divergentes.

Como todos os assuntos relativos à energia nuclear passaram para a alçada da Comissão de Energia Atômica, tão logo o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica incluiu, em suas metas de 1955, a construção de uma pequena usina nuclear para ampliar o sistema gerador de energia elétrica do estado do Rio de Janeiro, a Westinghouse Electric International Company e a American & Foreign Power Co. Inc. (AMFORP) apresentaram uma proposta para venda de reator e instalação de usina nuclear. Uma curiosidade destaca-se neste episódio: a Westinghouse não tinha experiência comprovada no setor, visto que a primeira usina nuclear americana entrou em operação dois anos depois!

Uma das principais realizações da Comissão de Energia Atômica foi o convênio, assinado em janeiro de 1956 entre o CNPq e a USP, para a compra de um reator de pesquisa nos Estados Unidos pelo programa Átomos para a Paz, do que resultará na criação do Instituto de Energia Atômica (IEA).



Curso do Marinha/Arquiveo/Flacis/Unicamp

O CNPq comandou o programa nuclear entre 1951-1955, com o almirante Álvaro Alberto à frente lutando pela energia nuclear



O presidente Vargas (esquerda) observa um contador Geiger-Müller e amostras de urânio e tório ao lado do físico Joaquim da Costa Ribeiro (centro) e do almirante Álvaro Alberto, 1952

Amy Maguiness Corneil



Inauguração do reator do Instituto de Pesquisas Radioativas, adquirida pelo programa "Átomos para a Paz" (EUA), para formação de especialistas e pesquisa. Belo Horizonte, 1960

Entre os anos de 1961 e 1964, a cooperação entre a CNEN e o Commissariat à l'Énergie Atomique acelerou o ritmo dos levantamentos geológicos e contribuiu para a formação de uma geração de técnicos especializados em pesquisa de urânio. João Goulart foi mais um presidente que falou à nação sobre a indispensabilidade da energia nuclear como fonte complementar para a geração de energia elétrica, tendo contratado um consórcio de empresas estrangeiras para realizar levantamento do potencial hidrelétrico do país. Com base nesse estudo, o Plano Trienal de Desenvolvimento Econômico e Social (1963-1965) do governo Goulart previa a utilização da energia nuclear, "dado o esgotamento progressivo do potencial hidráulico economicamente explorável"⁵³ e o crescente desenvolvimento industrial. O Plano Trienal ainda fazia menção à decisão de construir uma usina a urânio natural, prevendo-se o aproveitamento do plutônio em uma segunda linha de reatores, funcionando no ciclo tório-plutônio e tório-urânio²³³.

A escolha do reator que mais se adequasse à realidade brasileira ficou a cargo de engenheiros nucleares da CNEN, que contaram com a colaboração de especialistas em reatores do Instituto de Energia Atômica e de técnicos franceses do Commissariat à l'Énergie Atomique. Recomendaram a utilização da linha urânio natural, moderado a grafite ou à água pesada, e a criação de uma subsidiária da Eletrobrás para construir e operar a usina nuclear. Entregue às vésperas do golpe militar de 1964, certamente as conclusões do relatório técnico desagradaram os Estados Unidos, uma vez que poderiam perder um mercado promissor para sua linha de reatores PWR (urânio enriquecido) mas, principalmente, perder o controle político da área nuclear brasileira.

CNEN



Marcello Damy, à direita do Primeiro Ministro Tancredo Neves, integrou os três institutos de pesquisas nucleares (IPR, IEA, IEN) ao Plano Nacional de Energia Nuclear



O presidente da República João Goulart e o da CNEN, Marcello Damy de Souza Santos, examinam a construção do reator de pesquisa do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). 1962

Energia nuclear na ditadura

O golpe de 1964 depôs o presidente João Goulart e uma Junta Militar assumiu o comando político. Em seguida, o marechal Humberto Castello Branco tomou posse como presidência da República, com o compromisso de uma intervenção transitória com a finalidade de afastar as lideranças políticas de oposição e de realizar reformas econômicas liberais. Era o início de vinte e um anos de ditadura militar, durante os quais as cassações políticas atingiram mais de uma centena de militares e civis, dentre os quais físicos e engenheiros que defendiam o desenvolvimento da ciência e da tecnologia nuclear no Brasil.

Como a grande hidrelétrica de Furnas havia entrado em operação em 1963, afastando o risco do colapso do fornecimento de energia aos estados de São Paulo e Minas Gerais, Castello Branco garantia que "a energia atômica não deve ser considerada, no presente estágio, como fonte geradora de energia elétrica em larga escala". Mesmo assim, ele encarregou a CNEN de avaliar as perspectivas de utilização da energia nuclear para produção de energia elétrica na região Centro-Sul, em 1965. Engenheiros da CNEN e dos três institutos de pesquisas nucleares - Instituto de Energia Atômica, Instituto de Engenharia Nuclear e Instituto de Pesquisas Radioativas - consideraram as condições favoráveis. Os estudos apontaram que os reatores a tório poderiam ser a melhor alternativa, uma vez que havia indícios da existência de grandes reservas em Minas Gerais, e as reservas de urânio eram pouco conhecidas. Mas como o tório não é fissionável, necessitando de adição de urânio enriquecido ou de plutônio, o projeto só seria exequível a longo prazo.

Enquanto eram desenvolvidas pesquisas visando o domínio da tecnologia de reatores e de enriquecimento de urânio, contraditoriamente, Castello Branco assinou o Acordo de Cooperação Referente aos Usos Cívicos da Energia Atômica, com os Estados Unidos, em 1965. Os dois países se reaproximavam e os Estados Unidos ofereciam projeto, construção e operação de reatores de pesquisa e para usinas nucleares, e também a vender urânio enriquecido e plutônio para os reatores. O acordo não se concretizou.

A vinculação entre desenvolvimento econômico e segurança nacional caracterizou os governos militares brasileiros, que também se mostraram empenhados em reduzir a dependência frente aos Estados Unidos. A estratégia da política exterior, inaugurada no governo do marechal Arthur da Costa e Silva, valorizava os vínculos com as pequenas e médias potências no eixo Norte-Sul. Assim, convênios de cooperação técnica e científica foram particularmente aproveitados para a formação de especialistas em energia nuclear na França e República Federal da Alemanha.



Folha Imagem

O marechal Castello Branco inverteu a direção da política nuclear: tentou um acordo com os Estados Unidos

Angra 1



U. D'Amico/Foto Imagem

As Diretrizes da Política Nacional de Energia Nuclear foram lançadas em janeiro de 1968. Prevvia-se a construção de uma usina nuclear de 500 MW e de hidrelétricas para atender à crescente demanda de energia elétrica. Eram o resultado das previsões otimistas do milagre brasileiro.

A Eletrobrás delegou a tarefa de construção de usinas nucleares à sua subsidiária Furnas Centrais Elétricas S.A. que, em janeiro de 1969, criou o Departamento de Engenharia Nuclear. Furnas escolheu a praia de Itaorna (Angra dos Reis, RJ) para a instalação da primeira usina nuclear, Angra 1. Os critérios levados em conta foram: topografia, população, utilização das cercanias, hidrologia, meteorologia, sismologia, geologia, acesso ao local, integração ao sistema de transmissão de energia elétrica e o destino a ser dado aos rejeitos radioativos.

A empresa americana Westinghouse Electric Company venceu a concorrência para a venda de um reator PWR (água leve pressurizada e urânio enriquecido comprado dos Estados Unidos). A concorrência para as obras civis foi vencida pela Construtora Norberto Odebrecht S.A. em 1972, e deveriam ser entregues em cinco anos.

No mesmo ano foram assinados o Acordo de Cooperação Referente aos Usos Cíveis da Energia Atômica Brasil-Estados Unidos, em substituição àquele firmado em 1965 que não se concretizou, e um acordo de salvaguardas entre o Brasil e a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). As severas cláusulas de salvaguardas visavam impedir o uso militar da energia nuclear no Brasil e garantiam aos Estados Unidos o direito de fiscalizar o reator de Angra 1 e os

reatores de pesquisa que utilizavam urânio enriquecido de origem americana. Mesmo assim, o Acordo de Cooperação de 1972 acabou sendo retirado pelo próprio governo americano, que alegou modificações em sua legislação interna. Os atritos entre os Estados Unidos e o Brasil se agravaram depois da insubmissão da política externa brasileira ao Tratado de Não-Proliferação Nuclear de 1968.

A compra do reator da Westinghouse foi considerada inadequada aos interesses nacionais por uma ala dos militares, por parlamentares da oposição e por engenheiros da Eletrobrás e CNEN e físicos nucleares. Advertiam que este tipo de reator significava um risco enorme para o país pelo fato de os Estados Unidos deterem, no mundo ocidental, o monopólio do suprimento de urânio enriquecido.

Paralelamente, constituiu-se a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN), empresa de economia mista subsidiária da CNEN, para desenvolver pesquisas tecnológicas e fabricar, no futuro, elementos combustíveis, componentes de reatores e enriquecer o urânio extraído no Brasil. A CNEN era responsável pela fiscalização das obras de Angra 1 e planejamento da prospecção de minérios nucleares realizada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Em 1970, as reservas de urânio estavam estimadas em 7.000 toneladas, o que era pouco para atender às necessidades de Angra 1. Porém, as sondagens duplicaram de volume nesse ano, quando comparadas ao anterior, e abrangeram os projetos Maranhão-Piauí, Jatobá (PE), Tucano (BA), Sergipe-Alagoas, São Francisco (MG), Paraná, sudoeste do Estado de São Paulo e Poços de Caldas (MG), onde foram obtidos os melhores resultados e instalada, em 1974, uma usina piloto.

Estudos de viabilidade econômica do Programa de Centrais Nucleares realizados na CBTN concluíram que havia necessidade de mudança de estratégia para a política nuclear brasileira. Em especial, defendia-se a transferência de tecnologia com participação crescente da engenharia e indústria nacionais; a implantação gradativa das usinas do ciclo do combustível; a escolha de tecnologia nuclear que melhor atendesse aos interesses nacionais a médio e longo prazos; a padronização tecnológica de quatro usinas nucleares a serem construídas; a negociação conjunta da importação dos equipamentos para as usinas, em contrapartida à transferência de tecnologia de reator e de tecnologia para o desenvolvimento do ciclo do combustível, sobretudo as tecnologias sensíveis (enriquecimento e reprocessamento) de tecnologia; e a criação de empresas mistas, em parceria com o país fornecedor da tecnologia, para otimizar o processo. Eram os fundamentos para o futuro Acordo Nuclear Brasil-Alemanha.

Angra 2

O milagre brasileiro chegara ao fim e o mundo assistia à escalada internacional dos preços do petróleo quando o general Ernesto Geisel assumiu a presidência da República em 1974. A preocupação com a crise energética estava evidente no planejamento do governo (II PND 1975/1979), no qual era destacado a necessidade de estimular a pesquisa de petróleo, construir grandes hidrelétricas (Tucuruí, Sobradinho e Itaipu), e investir nos programas do álcool, carvão e nuclear.

A reestruturação do setor nuclear tinha por finalidade acelerar o ritmo da criação de uma indústria do ciclo do combustível, isto é, do material necessário para produzir energia em um reator nuclear. Objetivava-se o domínio nacional da tecnologia do combustível, desde a mineração do urânio até o reprocessamento do rejeito radioativo produzido no reator. Para isso, o governo brasileiro firmou com a então República Federal da Alemanha o Protocolo de Brasília, em outubro de 1974, e, em seguida, substituiu a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN) pela Empresas Nucleares Brasileiras S.A. (Nuclebrás). Organizada como holding de várias empresas subsidiárias binacionais e subordinada ao Ministério das Minas e Energia, coube à Nuclebrás a execução do Programa Nuclear Brasileiro sob a presidência do embaixador Paulo Nogueira Batista.

Em junho de 1975 os ministros das Relações Exteriores do Brasil e da República Federal da Alemanha assinaram, em Bonn, o Acordo sobre Cooperação no Campo dos Usos Pacíficos da Energia Nuclear e, em seguida, o Protocolo de Bonn, no qual foram ajustados os procedimentos comerciais, societários e contratuais para a venda ao Brasil de oito usinas nucleares (para serem construídas em Angra dos Reis, Pernalve e Iguape), transferência de tecnologia do ciclo do combustível nuclear e capacitação de pessoal (cerca de dez mil técnicos de nível médio e superior).

As negociações rápidas e secretas envolveram autoridades alemãs e brasileiras. Os acordos foram relativamente fáceis. O Acordo Nuclear Brasil-Alemanha estava alicerçado em acordos anteriores: o Acordo de Cooperação sobre as Utilizações Pacíficas da Energia Atômica entre o Brasil e a Euratom (1961), o Acordo de Cooperação Científica e Tecnológica entre o Brasil e a Alemanha (1969) e as Diretrizes para a Cooperação Industrial entre o Brasil e a Alemanha (1974), conhecidas como Protocolo de Brasília. O acordo de salvaguardas entre o Brasil, a Alemanha e a Agência Internacional de Energia Atômica data de fevereiro de 1976 e estendeu as salvaguardas para o material e equipamento especificados, assim como para informações tecnológicas relevantes. Era a primeira vez que a AIEA fazia tais exigências e com tanto rigor.



Foto: Inepren

Geisel reorientou a política nuclear para acelerar o ritmo da prospecção de urânio, obter a tecnologia do ciclo do combustível e construir usinas e equipamentos nucleares.

Os antigos parceiros, Estados Unidos e França, foram preteridos com a promessa alemã de transferência de tecnologia para implantação de todas as etapas do ciclo do combustível, o que garantiria no futuro ao Brasil autonomia e capacitação tecnológica para se tornar a grande potência sonhada pelos militares. O Acordo Nuclear Brasil-Alemanha ficou mundialmente conhecido como o "acordo do século", por se tratar de um negócio da ordem de dez bilhões de dólares. As autoridades brasileiras contra-argumentavam, com base em estudos da Eletrobrás, que, com o crescimento populacional e a expectativa do aumento da produção industrial, os recursos hídricos para geração de energia elétrica se esgotariam na década de 1990, principalmente no Centro-Sul.

A Nuclebrás ficou encarregada da execução do acordo teto-brasileiro, cabendo-lhe as atividades de pesquisa e prospecção de minerais nucleares, desenvolvimento do ciclo do combustível, construção de usinas nucleares e montagem de um parque industrial destinado à fabricação dos equipamentos para as usinas. Para esses fins, foram constituídas imediatamente subsidiárias sob a forma de *joint ventures* com empresas alemãs e uma companhia austríaca: a Nuclebrás Auxiliar de Mineração (Nudam), com participação da Urangesellschaft (UG), para atuar na prospecção, pesquisa, mineração e beneficiamento de

Declaração do Presidente E. Geisel



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

O acordo e o tratado assinados
que incluem os acordos com a Alemanha
e a grande importância para o desenvol-
vimento tecnológico e industrial do Brasil.

Este não é a primeira vez que
fomos capazes de atingir a mesma meta
com uma tecnologia avançada e a mesma
profundidade, no longo prazo e no uso da
energia nuclear, a fim de alcançar o desenvolvimento
econômico, para o progresso científico que todos
desejam.

Angra, 20 de junho de 1977

E. Geisel

Sob os protestos dos Estados Unidos e de físicos brasileiros, Geisel assinou o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha e o acordo de salvaguardas com a AIEA para a construção de oito usinas nucleares no Brasil.

urânio; a Nuclebrás Engenharia (Nucen), em associação com a Kraftwerk Union (KWU), grupo Siemens, para realizar serviços de engenharia para as usinas nucleares; a Nuclebrás Equipamentos Pesados (Nuclep), em acordo com a KWU, a Gute Hoffnungs Hütte (GHH) e a austriaca Voest, para a fabricação de reatores, geradores de vapor, componentes pesados e protótipos de carros blindados; a Nuclebrás Enriquecimento Isotópico (Nuclei), em associação com a Steag e a Interatom, para a produção de urânio enriquecido; e a Nuclebrás-Steag Companhia de Exploração de Patentes de Enriquecimento por Jato-Centrífugo (Nustep), a única com sede na Alemanha e associada à Trenndüsen Entwicklungs Patentverwertung GmbH & Co. KG, criada para o desenvolvimento do método de enriquecimento por jato centrífugo. A Nuclebrás tinha participação majoritária no capital das subsidiárias: 51% na Nucam, 75% na Nucen e Nuclei, e 98,2% na Nuclep.

Furnas ficou encarregada da construção das duas primeiras usinas do acordo (Angra 2 e 3) e a Nucen ficou com a parte de engenharia dos demais projetos. As obras de construção civil de Angra 2 foram iniciadas em 1977 e os primeiros problemas apareceram na etapa da fundação, atrasando de forma irrecuperável o cronograma.

A controvérsia em torno da necessidade de reforço das estacas da fundação de Angra 2 coincidiu com as primeiras críticas ao acordo, vindas da Sociedade Brasileira de Física (SBF). Além de denunciar as deficiências técnicas do acordo, o qual não garantiria o domínio das tecnologias sensíveis, a SBF questionava a necessidade do Brasil utilizar a energia nuclear em larga escala, com base na alegada taxa de crescimento da demanda de energia elétrica e na escassez de recursos hidrelétricos. Havia também os que defendiam opções brasileiras. Entre elas, o aproveitamento do potencial hídrico da Amazônia. Neste

caso, a tecnologia de linha de corrente contínua que estava sendo desenvolvida para a hidrelétrica de Itaipu solucionaria o problema do transporte. Aos opositores do meio acadêmico, juntaram-se outros setores da sociedade, como os ambientalistas, preocupados com o destino e guarda do rejeito radioativo.

Praticamente todos os países detentores de tecnologia nuclear criticaram o acordo bilateral Brasil-Alemanha, uma cooperação para uso pacífico de energia nuclear e com salvaguardas da AIEA. A única exceção foi a República Popular da China com a qual o governo Geisel havia restabelecido as relações diplomáticas. O acordo gerou uma crise nas relações Brasil-Estados Unidos durante o governo de Jimmy Carter, em 1977, cujo pretexto foi a inclusão da transferência de tecnologia de enriquecimento e reprocessamento de urânio. Como o Brasil não era signatário

E. Geisel



O embaixador Paulo Nogueira Batista (esquerda), presidente da Nuclebrás, inaugura a primeira etapa da Fábrica de Elemento Combustível no governo do general Figueiredo (direita). Resende (RJ), 1982.

do Tratado de Não-Proliferação Nuclear (TNP), a sociedade americana via no acordo um "perigo potencial (...) por um aliado no nosso próprio quintal (...)". Como nem a Alemanha e nem o Brasil cederam às pressões, o governo Carter contra-atacou denunciando o desrespeito aos direitos humanos pelas autoridades brasileiras durante a ditadura militar e interrompeu o suprimento de combustível para Angra 1 e reatores de pesquisa do Brasil, a despeito da existência de um contrato comercial e, no caso dos reatores de pesquisa, da inspeção internacional.

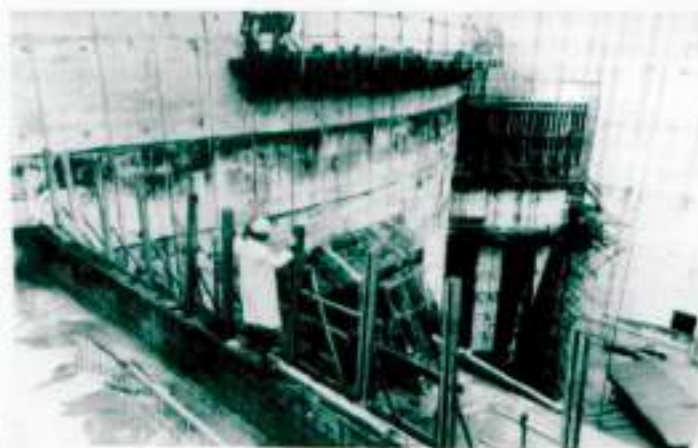
A polêmica relativa à transferência de tecnologia para enriquecimento de urânio não foi adiante. Como a tecnologia de enriquecimento de urânio por ultracentrifugação era de propriedade da Urenco (um consórcio de empresas da Inglaterra, Holanda e Alemanha), a objeção dos holandeses inviabilizou o negócio. O Brasil teve que se contentar com o processo alemão de enriquecimento por jato centrífugo (*jet nozzle*), sabidamente em fase experimental e não representando nenhuma ameaça.

A oposição ao Acordo Brasil-Alemanha aumentou quando a imprensa alemã, sobretudo o *Der Spiegel*, denunciou irregularidades na sua execução. As críticas se estenderam às bases em que o acordo fora feito, que representava muito mais uma simples compra de equipamentos do que transferência de tecnologia, ou seja, a venda de processos sem garantia de sucesso, como foi o caso da tecnologia de enriquecimento de urânio pelo processo de *jet nozzle*. O Senado Federal instalou uma CPI sobre o Acordo Nuclear, em 1978, mas os parlamentares da oposição renunciaram, inclusive o presidente da CPI, senador Itamar Franco, pouco antes da conclusão dos trabalhos.

O acidente na usina nuclear de Three Mile Island (EUA), em 1979, foi um duro golpe no setor nuclear internacional ao abalar a confiança na tecnologia de reatores. Exceto no Brasil, onde o Programa Nuclear era considerado uma questão de segurança nacional. Razão pela qual, os habitantes de Angra dos Reis não podiam escolher o prefeito da cidade, que era nomeado pelo governo federal.

O general João Figueiredo, que assumiu a presidência da República em 1979, afirmou a uma emissora de televisão alemã que seu governo manteria os objetivos iniciais do acordo. Embora as obras civis de Angra 2 tenham sido aceleradas, o país começava a enfrentar sérios problemas de inflação e de estabilidade econômica-financeira. Tornou-se impossível dar prosseguimento ao Acordo Nuclear Brasil-Alemanha diante da elevação dos custos financeiros. Assim, assistiu-se a sucessivos atrasos do Programa Nuclear Brasileiro, à paralisação das obras de Angra 2; à ociosidade da fábrica de equipamentos pesados da Nuclep, em Itaguaí (RJ); ao insucesso da unidade de enriquecimento isotópico da Nuclei, em Resende (RJ), devido ao fracasso da tecnologia importada da Alemanha; à desativação da Nucon, em 1984 e, por fim, à redução geral das atividades da Nuclebrás, gerando evasão de pessoal qualificado.

As obras de Angra 2 se estenderam de 1976 a 2000 e faltou dinheiro para a construção das outras sete usinas. Esse quadro geral não afetou, no entanto, as atividades de prospecção, mineração e de beneficiamento de urânio no Complexo Industrial de Poços de Caldas (MG), cujo projeto da empresa francesa Société Chimie Ugine Kuhlma foi inaugurado em 1982. Com a grande injeção de recursos, as reservas de urânio identificadas ultrapassaram 300 mil toneladas e o Brasil passou a ocupar o 6º lugar no ranking mundial, mesmo que apenas 25% do território nacional tenham sido prospectados.



O Acordo Nuclear Brasil-Alemanha não atingiu os metas: as obras de Angra 2 se estenderam de 1976 a 2000 e faltou dinheiro para a construção das outras sete usinas.

O retorno à democracia deu visibilidade às atividades do Programa Nuclear Brasileiro a partir de meados da década de 1980. A liberdade de imprensa, possibilitando a divulgação de informações sobre os sucessivos defeitos do equipamento vendido pela Westinghouse à Furnas, contribuiu para a organização de manifestações populares. Ações judiciais foram movidas contra o funcionamento de Angra 1, especialmente por falta de plano de emergência em caso de acidente. Finalmente, a produção de energia nuclear deixava de ser tratada como um assunto de segurança nacional e passava a ser discutida na sociedade.

No governo José Sarney o programa nuclear foi revisto por uma comissão que defendeu a conclusão de Angra 2 e Angra 3, cujos equipamentos já haviam sido pagos. A Nuclebrás foi transformada na Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB), que iniciou a readaptação de seu complexo industrial para atender às necessidades das duas usinas nucleares brasileiras. O beneficiamento de urânio foi transferido de Poços de Caldas (MG) para a INB Caetité (BA), e a fabricação de pastilhas e elementos combustíveis permaneceu a cargo da unidade de Resende (RJ), onde desde 2006 o urânio é enriquecido em escala industrial. A tecnologia de enriquecimento cedida para a INB foi desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP Iperó), quando lá se realizava o projeto de construção de um submarino nuclear.

A retomada da construção de Angra 2 foi decidida no final do governo de Itamar Franco, abrindo caminho para Fernando Henrique Cardoso fazer a concorrência em 1995 para as obras civis de Angra 3. Naquele mesmo ano, as empresas do sistema Eletrobrás foram incluídas no Programa Nacional de Desestatização, mas o segmento da geração nuclear foi excluído do processo por impedimento constitucional. Diante disso, a fusão da Nuclen com o Departamento de Engenharia Nuclear de Furnas deu origem à Eletrobrás Termonuclear S.A. (Eletronuclear) que, desde 1997, passou a responder pelo projeto, construção e operação de usinas nucleares.

A Alemanha rompeu o acordo nuclear com o Brasil, em novembro de 2004, e propôs um acordo de cooperação na área energética. O fim da parceria não impediu o prosseguimento do Programa Nuclear Brasileiro nem causou problemas diplomáticos entre os dois países. Para o Itamaraty, o acordo de cooperação nuclear entre os dois países cumpriu seus objetivos centrais.

As obras de implantação de Angra 3 não se iniciaram, sendo que 43% de seus equipamentos estão guardados na Central Nuclear Almirante Álvaro

Alberto e na Nuclep. Totalizam cerca de 10 mil toneladas de equipamentos adquiridos na Alemanha e que chegaram ao Brasil a partir de 1986. A discussão sobre Angra 3 foi retomada no governo de Luiz Inácio Lula da Silva, com apoio dos Ministérios da Ciência e Tecnologia e de Minas e Energia. Calcula-se que será necessário um montante aproximado de 1,7 bilhão de dólares para as obras civis e montagem eletromecânica. Há controvérsia entre os próprios especialistas do setor nuclear sobre a conveniência de construir Angra 3, discussão da qual também participam setores da sociedade ligados ao meio ambiente.



MAST - 1º pavimento

INES - International Nuclear Event Scale
Escala Internacional de Eventos Nucleares

Ciclo do combustível

1



2



3



4



7



5



8



9



6



Quando se planeja construir uma usina nuclear o domínio da tecnologia do ciclo do combustível nuclear é fundamental. De nada adianta possuir um reator de potência e todas as instalações de uma usina nuclear se não se dispuser de combustível para a produção de energia. Como mostra a história, é muito arriscado depender de outro país para obter o combustível, especialmente quando este detém o monopólio.

O ciclo do combustível nuclear é o conjunto de etapas para transformar o mineral urânio em combustível para o reator. Veja a ilustração ao lado para acompanhar a descrição dos processos industriais realizados em cada uma das etapas do ciclo do combustível nuclear:

1ª etapa: mineração e produção do concentrado de urânio (yellowcake)

2ª etapa: conversão do yellowcake em hexafluoreto de urânio (UF_6)

3ª etapa: enriquecimento do urânio

4ª etapa: reconversão do UF_6 em pó de urânio

5ª etapa: fabricação de pastilhas de urânio

6ª etapa: fabricação e montagem do elemento combustível

7ª etapa: produção de energia no reator

8ª etapa: reprocessamento do combustível utilizado

9ª etapa: armazenamento do rejeito radioativo final



INB Coslit (BA)

- 1 Bacias de estocagem de efluentes líquidos
- 2 Pátio de britagem
- 3 Pátios de lixiviação: o minério britado é empilhado e irrigado com solução de ácido sulfúrico para a retirada do licor de urânio
- 4 Bacias de estocagem do licor de urânio
- 5 Área de tratamento químico: o licor de urânio é transformado em concentrado de urânio



Luz Petróleo/PAZ



O yellowcake – ou concentrado de urânio U_3O_8 – é obtido pela extração e reprecipitação do licor de urânio por solventes orgânicos.



As pesquisas para enriquecer urânio no Brasil tiveram início na década de 1950, com o apoio do CNPq e, depois, também da CNEN. Concentraram-se principalmente no Instituto de Energia Atômica, atual Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). A expectativa de sucesso aumentou com o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha (1975), mas logo militares brasileiros, envolvidos em pesquisas na área nuclear, deram-se conta de que não haveria, por parte da Alemanha, a transferência dessa tecnologia.

A Marinha iniciou um programa paralelo visando a construção de um submarino nuclear e, evidentemente, o desenvolvimento da tecnologia de enriquecimento de urânio. A cargo do Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo (CTMSP), o principal parceiro foi o IPEN. No final de 1981, a primeira centrífuga estava pronta e, no ano seguinte, foi realizado o primeiro experimento. O programa CTMSP/IPEN era secreto, mas contou com a colaboração da CNEN, e de setores da indústria nacional. A primeira minicascata de centrífugas entrou em operação em 1984, porém o sucesso só foi anunciado em 1987. No ano seguinte, o programa da Marinha foi incorporado às pesquisas oficiais.

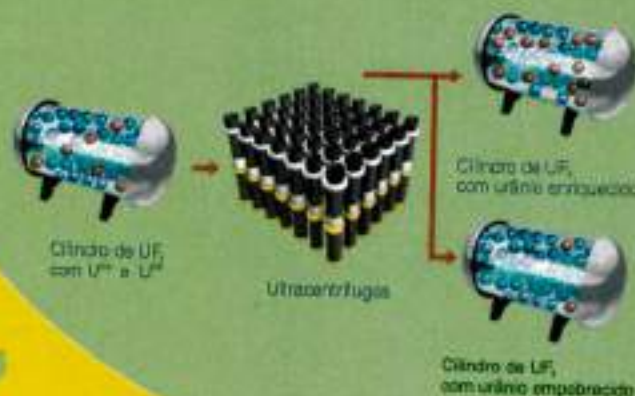
Os planos de autonomia nuclear do país despertaram a desconfiança de observadores da Agência Internacional de Energia Atômica. Embora o CTMSP tenha transferido as centrífugas para a empresa estatal Indústrias Nucleares do Brasil (INB Resende), os ânimos dos inspetores da AIEA se acirraram com o início dos testes das centrífugas, em 2004. A imprensa norte-americana induzia os leitores a verem o Brasil como uma ameaça internacional em potencial. A situação ficou tensa quando o governo brasileiro impediu o acesso dos inspetores da AIEA à área das centrífugas, alegando o direito de preservar o segredo industrial de tecnologia desenvolvida para fins pacíficos.

A primeira cascata de centrífugas da INB foi inaugurada em 2006, após o comissionamento e assinatura de acordos de salvaguardas com a AIEA e com a Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC). Com isso, ambas inspecionam periodicamente o local para impedir o desvio de urânio enriquecido e de outros materiais para atividades nucleares clandestinas ou proibidas, como a fabricação de bomba atômica.



Foto: Imagem

Urânio enriquecido a 3,5% na INB Resende é usado nas usinas nucleares de Angra dos Reis.



QUER SABER +?

Com as centrífugas girando a uma velocidade de 70 mil rotações por minuto (rpm), o U²³⁸ é jogado para a borda do cilindro, porque é um pouco mais pesado, e o U²³⁵ concentra-se no centro, de onde é recolhido por uma tubulação para passar por outras centrífugas até chegar à concentração desejada.

Reconversão

A reconversão é o retorno do gás UF₆ ao estado sólido, sob a forma de pó de dióxido de urânio (UO₂). Trata-se de um processo químico para concentrar o urânio de maneira apropriada para sua utilização como combustível do reator.

Esta etapa é realizada na Fábrica de Combustível Nuclear das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), em Resende.



Alencar Campos/Folha Imagem

Filtro para secar o tricarbonato de amônio e urânio, resultado da reação química entre urânio enriquecido (UF₆), gás carbônico (CO₂) e gás amoníaco (NH₃).

O tricarbonato de amônio e urânio é levado ao forno com gás hidrogênio (H₂) e vapor d'água, para produzir o pó de dióxido de urânio (UO₂).



Igor Passos/INB

Pó de dióxido de urânio (UO₂)



Igor Passos/INB



A mistura do pó de dióxido de urânio (UO_2) com o U_3O_8 é levada para esta prensa

Foto: Assessoria/INB

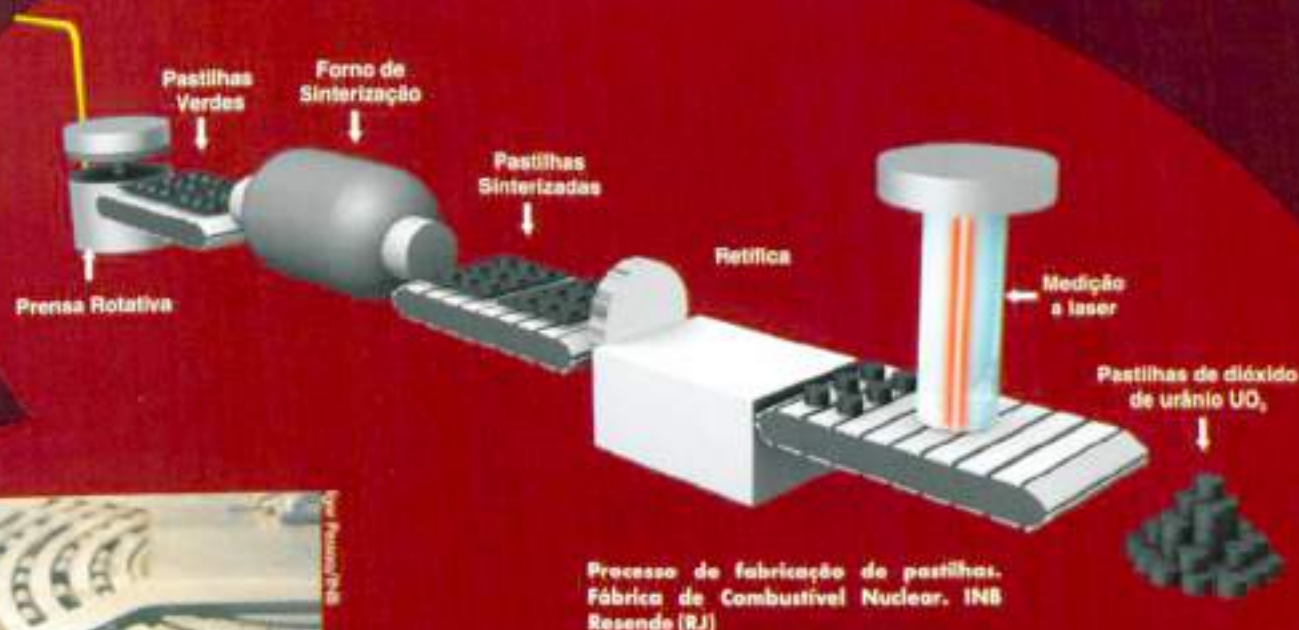


As "pastilhas verdes" adquirem resistência ao serem submetidas à temperatura aproximada de $1750^{\circ}C$ em forno de sinterização

Foto: Assessoria/INB



Bandeja de pastilhas de urânio sinterizadas sendo alimentada no processo de retificação



Processo de fabricação de pastilhas. Fábrica de Combustível Nuclear. INB Resende (RJ)



Foto: Assessoria/INB

Prato de secagem das pastilhas após terem sido retificadas a úmido

6

Elemento Combustível

Elemento combustível é o conjunto de 235 varetas recheadas com as pastilhas de dióxido de urânio, que irá produzir calor para gerar energia elétrica



Igor Passos/INB

As varetas são tubos de liga metálica especial. INB Resende (RJ)



Igor Passos/INB

Inspecção visual do travamento dos parafusos que fixam o bocal inferior no elemento combustível



INB/Resende RJ

Técnico solda o bocal superior na extremidade de um elemento combustível para o reator de Angra 1



Alexandre Campionelli/Prota Imagem

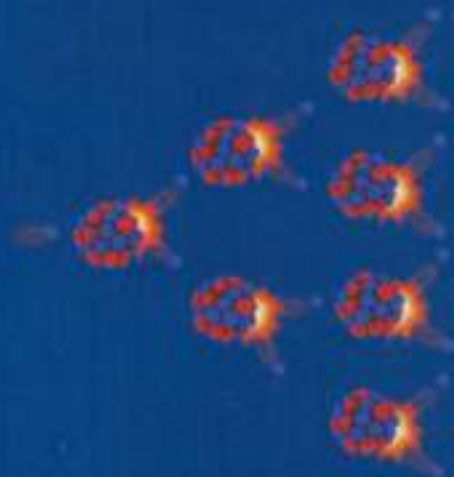
O calor produzido por um elemento combustível é capaz de gerar energia elétrica para 42 mil residências durante um mês

PWR - REATOR DE ANGRA 1 e 2

PWR significa, em português, reator à água pressurizada. A água serve como moderador e condutor de calor. Metade da energia nuclear no mundo é produzida em reatores PWR

**Partículas fundamentais**

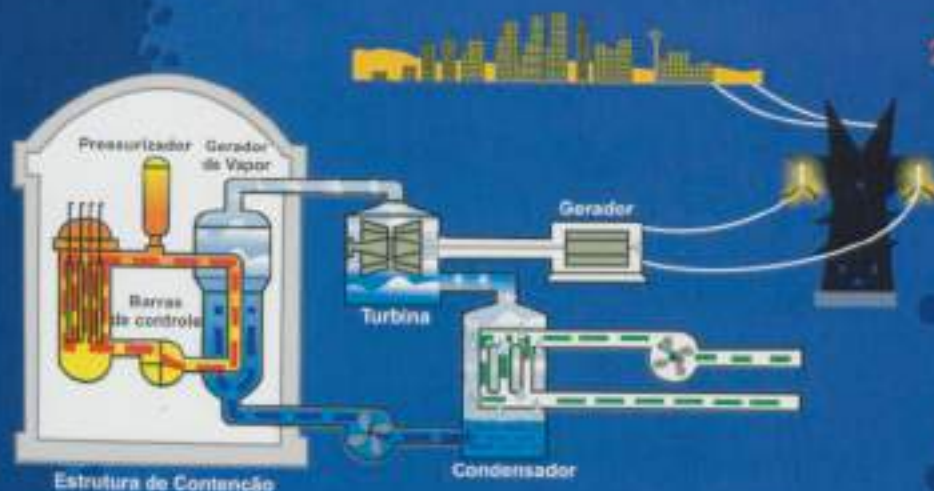
As mais conhecidas são o próton, o nêutron e o elétron. O próton e o nêutron fazem parte do núcleo do átomo e o elétron orbita o núcleo

**Fissão nuclear**

Divisão do núcleo atômico (do urânio, por exemplo) em dois ou mais núcleos, fenômeno que libera nêutrons e grande quantidade de energia

Reação em cadeia

Nêutrons liberados na fissão nuclear atingem átomos vizinhos e provocam outras fissões, que liberam outros nêutrons e assim sucessivamente



O reator PWR combina o sistema de água pressurizada com as reações nucleares em cadeia

1º sistema de circulação (amarelo): água desmineralizada em contato com as barras de controle. A energia liberada pelas reações nucleares aquece a água ($\sim 315^{\circ}\text{C}$) sem transformá-la em vapor, porque está submetida a uma grande pressão ($\sim 150\text{ atm}$)

2º sistema de circulação (azul): água aquecida pelo 1º sistema. A água se transforma em vapor e este adona a turbina, que transfere sua energia ao gerador de energia elétrica

3º sistema de circulação (verde): água para resfriamento do 2º sistema. Nas usinas de Angra utiliza-se a água do mar

Reprocessamento é a obtenção de combustível nuclear a partir do reaproveitamento de combustível utilizado.



Eletronuclear

Como o Brasil não desenvolveu a tecnologia de reprocessamento do urânio, os elementos combustíveis utilizados ficam guardados na piscina do reator.



Alexandre Caspelli/Folia Imagem

No reprocessamento, o urânio é separado do combustível utilizado e enriquecido para fabricar novos pastilhas para os elementos combustíveis.



Eletronuclear

Em outras partes, os resíduos do reprocessamento vão para depósitos permanentes.

Material radioativo: roupas, máscaras, luvas e materiais contaminados, e combustível exaurido de reatores.

Níveis de rejeito: baixo (LLW), intermediário (ILW), alto (HLW) e transurânico (TRUW)



Interior de depósito de rejeito.
Usina de Angra (RJ)



Sempre que possível, o rejeito radioativo é triturado e compactado porque ficará armazenado por muitos anos



O rejeito radioativo é estocado em instalação de segurança, para impedir acidentes, vazamentos ou deterioração. A CNEN é a responsável pela guarda.
Usina de Angra (RJ)

Maiores usinas geradoras de energia elétrica



Nº	Nome	Potência MW	Nº	Nome	Potência MW
1	Igarapé	210,0	41	Uruguiana	639,0
2	Marechal	210,0	42	Cachoeira	640,0
3	CST	210,2	43	Cachoeira Dourada	658,0
4	Furnas (Rj)	216,0	44	Henry Burden	689,0
5	Samuel	216,0	45	Lajeado	902,5
6	Termoceará	220,0	46	Macedo Mesquita	922,6
7	Passeo Fundo	220,0	47	Estrela	1.050,0
8	Bom Esperança	235,3	48	Sobradinho	1.060,0
9	Birta	236,0	49	São João	1.078,0
10	Angue	231,8	50	Embarcação	1.136,0
11	CTE 2	235,2	51	Machadinho	1.140,0
12	Batiana	250,0	52	Furnas	1.216,0
13	Copete	250,4	53	São Carlos	1.240,0
14	Capiari/Cachoeira	260,0	54	Segredo	1.260,0
15	Promissão	264,0	55	Serra da Mesa	1.275,0
16	Porto Colônia	320,0	56	Três Irmãos	1.290,0
17	Nova Avenhandava	347,0	57	Água Vermelha	1.396,2
18	Rosário	372,0	58	São Santiago	1.420,0
19	Corumbá I	375,0	59	Maribondo	1.440,0
20	Eleitobol	379,0	60	Ita	1.480,0
21	Nilo Peçanha	380,0	61	Itaperiça	1.500,0
22	Volta Grande	380,0	62	Paulo Afonso 1, 2 e 3	1.524,0
23	Miranda	390,0	63	Porto Primavera	1.540,0
24	Três Marias	396,0	64	Jupia	1.551,2
25	Chavantes	414,0	65	São Simão	1.606,0
26	Maxaú	440,0	66	Foz da Anã	1.676,0
27	Barragem	445,5	67	Angra 1 e 2	1.966,0
28	Presidente Médici A/B	446,0	68	Jumbiaí	2.082,0
29	Jaguara	448,0	69	Paulo Afonso 4	2.460,0
30	Cana Brava	450,0	70	Xingó	3.000,0
31	Itaipu	450,0	71	Ilha Solteira	3.444,0
32	Piratininga	472,0	72	Itaipu (parte bras.)	6.300,0
33	Piccola	476,0	73	Tucuruí 1 e 2	6.125,0
34	Anacostia	484,5			
35	Nova Ponte	510,0			
36	Itaipu	512,4			
37	Colaba	529,2			
38	Tegucigalpa	584,0			
39	Santa Cruz	600,0			
40	Jorge Lacerda 1, 2 e 3	625,0			

Notas

¹ ANDRAES, Vinícius de. A rosa de Miraflores. In: CÍCERO, Antonio; FERREZ, Eucanã (Org.). *Novo antologia poética de Vinícius de Moraes*. São Paulo: Cia das Letras, 2003. p. 150.

² Atto de número 134 de 1949. AA/CNP/009 (Arquivo Álvaro Alberto).

³ BRASIL. Decreto n. 49.308 de 12 de dezembro de 1960, que vinde recursos da Fundação Federal de Classificação e de outras providências.

⁴ BRASIL. Congresso Nacional. Senado Federal. A questão nuclear. Política Nuclear. Brasília: Senado Federal, 1983. v. 3, p. 41.

⁵ BRASIL. Presidência da República. Plano Trienal de desenvolvimento econômico e social, 1963-1965. (sintese). Brasília: Imprensa Oficial, 1962. p. 113.

⁶ BRASIL. Congresso Nacional. op. cit., p. 46.

⁷ *Jornal do Brasil*, 5 jun. 1975, p. 4.

Bibliografia citada e consultada

ANDRADE, Ana Maria Ribeiro de. A opção nuclear: 50 anos rumo à autonomia. Rio de Janeiro: MAAT, 2006.

SANDERA, Moira. Brasil-Estados Unidos. A simbiose emergente. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1989.

BRASIL. Congresso Nacional. Relatório da Comissão Parlamentar Mista de Inquérito, destinada a investigar o Programa Autônomo de Energia Nuclear, mais conhecido por Programa Parallel. Brasília: Cartão Gráfico, 1990. [versão original].

———. Presidência da República. O programa nuclear brasileiro. Brasília: [s.n.], 1977.

———. Presidência da República. Plano Trienal de desenvolvimento econômico e social, 1963-1965. (sintese). Brasília: Imprensa Oficial, 1962.

———. Senado Federal. A questão nuclear. Política Nuclear. Brasília: Senado Federal, 1983. 3.

CÉRVO, Arnaldo Luiz; BANDERA, Moira; BIERER, Isidoro; SARAYA, José Flávio Simões; BARBOSA, Antonio José. O Desafio Internacional. Brasília: UnB, 1994.

CÍCERO, Antonio; FERREZ, Eucanã (Org.). *Novo antologia poética de Vinícius de Moraes*. São Paulo: Cia das Letras, 2003.

GUILHERME, Olympio. O Brasil e a era atômica. Rio de Janeiro: Vitório, 1957.

HOBBSBAWM, Eric. A era dos astros. O breve século XX, 1914-1991. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

LEFECKI, W.; WYLLIS, C. Gênese do programa brasileiro de energia nuclear. Rio de Janeiro: Nuclear, 1996. [ms].

MARZO, Nélio Antonio Saraceni; ALMEIDA, Silvio Gonçalves de. A evolução do controle de armas nucleares. Desarmamento e não-proliferação. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2006.

Sites consultados

<http://www.cdas.br/>

<http://www.cnen.gov.br/>

<http://www.energia.nuclear.gov.br/>

http://www.iaea.org/About/history_speech.html

<http://www.sen.gov.br/>

<http://www.irb.gov.br/>

<http://www.nds.iaea.org/>

<http://www-nics.iaea.org/>

<http://www.ipen.br/>

<http://www.inl.gov.br/>

<http://www.world-nuclear.org/>

<http://www6.senado.gov.br/sicov>



A Experimentação da forma na exposição Energia Brasil!

Antonio Carlos Martins

"O importante é perceber a forma por ela mesma; vê-la como 'todos' estruturadas, resultado de relações. Deixar de lado qualquer preocupação cultural e ir à procura de uma ordem, dentro do todo".

Este texto tem por objetivo mostrar como as leis da *gestalt* foram utilizadas na concepção projetual e na adequação dos procedimentos técnicos visando a sua inserção nos elementos de museografia na exposição *Energia Brasil!* O espaço disponível para a exposição era o edifício principal do MAST, construído entre 1913-1922 e onde anteriormente funcionou o Observatório Nacional. O prédio é um bem tombado pelo patrimônio histórico federal e estadual, assim como o todo o conjunto arquitetônico de cúpulas e pavilhões de observação astronômica. Como o edifício abriga atividades administrativas e a biblioteca do MAST, os espaços para exposição são reduzidos. Por isso, todas as áreas livres, inclusive corredores de interligação e escada, precisaram ser ocupados diante da dimensão do projeto de concepção dessa exposição.

Apesar de experiências anteriores no desenvolvimento de projetos museográficos no mesmo espaço, ou seja, a necessidade de operar intervenções em um edifício de estilo eclético, este projeto foi um novo desafio. Em primeiro lugar, porque a exposição *Energia Brasil!*, inaugurada em 13 de julho de 2006, traça um panorama histórico da energia nuclear, com ênfase no seu uso para a geração de energia elétrica no Brasil. Desse modo, a projeto de exposição concebido pela curadora contemplava, além de todo o processo histórico da produção de energia nuclear no país, o estágio atual do ciclo do combustível nuclear. Estava presente em sua concepção original a preocupação em utilizar recursos técnicos para superar as barreiras relativas às dificuldades de museografar o tema, tais como: recursos multimídia, aparatos interativos, instrumentos científicos, objetos utilizados nas usinas nucleares, maquete, vídeos, etc. Enfim, adequar à linguagem própria da divulgação científica informações históricas, científicas e tecnológicas, para apresentar ao público de museus um tema sobre o qual há muito desconhecimento e controvérsia.

No processo de concepção espacial, definiu-se na planta arquitetônica as áreas conceituais, distribuindo e valorando os conteúdos do tema abordado, bem como respeitando o mapa cognitivo e os aspectos intelectuais e emocionais em função do espaço físico disponível. O circuito de visita à exposição foi pré-estabelecido, em decorrência das experiências anteriores com o público visitante, da complexidade do tema e das características arquitetônicas do prédio. Na concepção da forma foi criado um padrão de composição visual, agregando-se os elementos tridimensionais aos valores visuais e, ao mesmo tempo, estabelecendo uma relação intrínseca com o espaço. Elegeu-se o símbolo da radioatividade para sensibilizar o visitante, sinalizar a continuidade da exposição, e integrar as áreas e o conteúdo do tema abordado.

Na entrada da exposição, onde o visitante tem o primeiro contato com o tema, buscou-se obter a sensação de fechamento visual, através da forma do símbolo de radioatividade (trifólio). A estrutura circular empresta um sentido de proteção e permanência no espaço, favorecendo a direção das pessoas na exposição. Como é uma passagem obrigatória, entrada e saída linear da exposição, também favorece o fluxo contínuo e diário no espaço que originalmente era o hall de distribuição e acesso a todas as áreas do prédio.

No processo de desenvolvimento e de definição dos fundamentos para o design da exposição, isto é, a composição visual do todo e das partes no espaço físico a ser explorado, partiu-se do projeto de concepção da exposição (no qual estavam explícitos o conteúdo científico e histórico resultante das atividades de pesquisa). Para estimular a percepção do tema pelo visitante e como recurso de expografia, utilizou-se o espaço físico da escada para dar sentido de continuidade. Foi então possível estabelecer um elo de interligação entre dois andares e surpreender o visitante.

O espaço arquitetônico do mezanino permite ao visitante observar o andar inferior (inclusive o trifólio radioativo tridimensional), visualizar o todo e as partes dos elementos que compõem a expografia, e com isso formar uma unidade. As unidades formais da arquitetura do mezanino são percebidas por meio da relação entre os seus elementos, tais como: as colunas, o balaústre, os planos das paredes e os ornamentos do teto. As unidades formais da exposição aproveitam e reforçam as unidades formais da arquitetura por meio de estruturas transparentes com filme *back-light*, que deixam transparecer a verticalidade das colunas com capitéis coríntios, e a maquete de uma usina nuclear que se encontra livre no espaço aberto. Os elementos se interligam, quando vistos de maneira isolada ou em conjunto, através de pontos, cores, volumes, sombras, brilhos e texturas.

Na unificação a composição da imagem formada pela verticalidade da estrutura construída de perfis de alumínio – linhas retas, repetição, simetria das partes e a presença da iluminação nos painéis, expandindo parte dessa luz para as colunas da construção – reforça a unidade e a semelhança dos estímulos produzidos no campo visual, para obter e enfatizar o caráter da organização formal e a compreensão.

AGRADECIMENTOS

ANEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Centro de Memória do CNPq
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
Folha de São Paulo – sucursal RJ
Folhapress
GloboNews
IEN – Instituto de Engenharia Nuclear
INB – Indústrias Nucleares do Brasil
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Planetário da Cidade do Rio de Janeiro
VM – Empreendimentos Artísticos e Culturais

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Claudia Souza
Lúcia Aguiar
Marco Antonio Alves
Maria da Conceição Magalhães Mello
Marisa Basso
Paulo Cruz
Roberto Muniz
Vladimir Dynnikov
Witold Lepecki

FICHA TÉCNICA

CURADORIA E TEXTOS

Ana Maria Ribeiro de Andrade

PROJETO MUSEOGRÁFICO

Antonio Carlos Martins

PROGRAMAÇÃO VISUAL

Ivo Almico

Thiago Alves

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

Ana Maria Ribeiro de Andrade

Bruno Jorge da Silva

Tatiane Lopes dos Santos

COORDENAÇÃO PEDAGÓGICA

Douglas Falcão

SUORTES E MOBILIÁRIO

Wilson Pontes da Cruz

EQUIPE DE MONTAGEM

Tarcísio Ferrari Saramella

Wilson Pontes da Cruz

Luiz Ramiro

Cremilson da Silva

Fernando Ramiro

Paulo Roberto Rigueira Jr

Luciene Pereira da Veiga

CONSULTORIA

Carlos Coimbra

Gilson Vieira

Maria Esther Valente

Sibele Cazelli

APOIO A PESQUISA

Araci Lisboa

Barbara Skaba

Flávia Requeijo

Franciane Lovati

Laélia Montysuma

Luci Mari Guimarães

Renata Borges

CONSERVAÇÃO DE ACERVO

Ozana Hannesch

Ricardo Dias

APOIO ADMINISTRATIVO

Marcelo Mendes

Daniel Firmino

Rafael Lagrotério

Tiago Figueiredo

SECRETARIA

Simone Santos

Michelle Gonçalves



Ministério da
Ciência e Tecnologia

