

PESQUISA - RESEARCH

Programa nacional para o desenvolvimento de energia termonuclear de fusão

Elza Kawakami-Savaget

Centro Interunidades de História da Ciência
Universidade de São Paulo

elzasavaget@me.com

Resumo: A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem incentivado a adoção de fontes energéticas de baixa emissão de carbono. Nesse contexto, a energia nuclear, especialmente a de fusão termonuclear, tem ganhado destaque internacional. O Brasil, embora possua uma matriz elétrica majoritariamente renovável, apresenta histórico nas pesquisas de fusão desde os anos 1970, com as construções de tokamaks – como o TBR-1 e o ETE, lideradas pelo IFUSP e INPE. Em 1981, a formulação do Programa Nacional de Física do Plasma e Fusão Termonuclear Controlada (PNFPFTC) representou um marco institucional, promovendo a formação de recursos humanos, estruturação de laboratórios e articulação internacional. Contudo, a descontinuidade de grupos de pesquisa, como o da UNICAMP, revela a fragilidade da política científica nacional frente à ausência de programas estruturantes e estáveis. A criação da Rede Nacional de Fusão, em 2006, e a proposta do Programa Nacional de Fusão Nuclear em 2021 visam retomar e consolidar os esforços. No cenário global, grandes empreendimentos, como o ITER, na Europa, o EAST, na China, e o KSTAR, na Coreia do Sul, demonstram que a pesquisa de fusão nuclear é de *large-scale science* ou *big science*, que precisam de consórcios internacionais e elevado investimento. O Brasil, apesar de não integrar o consórcio ITER, firmou acordo de cooperação com a EURATOM em 2009, viabilizando intercâmbios e desenvolvimento tecnológico. Assim, destaca-se o papel dos cientistas como agentes articuladores da pesquisa para a política e para a sociedade.

Palavras-chave: energia nuclear; fusão termonuclear; política científica; *large-scale science*.

National Program for the Development of Fusion Thermonuclear Energy

Abstract: The growing concern about climate change has encouraged the adoption of low-carbon energy sources. In this context, nuclear energy – especially thermonuclear fusion – has gained international prominence. Brazil, although it has a predominantly renewable electricity matrix, has a relevant history in fusion research

since the 1970s, with the construction of tokamaks such as the TBR-1 and ETE, led by institutions IFUSP and INPE. In 1981, the establishment of the National Program for Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion (PNFPFTC) represented an institutional milestone, promoting the training of human resources, structuring of laboratories, and international collaboration. However, the discontinuation of research groups, such as that of UNICAMP, reveals the fragility of national science policy in the face of the absence of stable and structuring programs. The creation of the National Fusion Network (2006) and the proposal of the National Fusion Program in 2021 aim to resume and consolidate these efforts. Globally, major projects such as ITER in Europe, EAST in China, and KSTAR in South Korea demonstrate that nuclear fusion research is an example of Large-Scale Science or Big Science, requiring international consortia and significant investment. Brazil, despite not being part of the ITER consortium, signed a Cooperation Agreement with EURATOM in 2009, enabling exchanges and technological development. Thus, the role of scientists as articulators of research toward policy and society is highlighted.

Keywords: nuclear energy; thermonuclear fusion; science policy; large-scale science.

Introdução

Acordos para enfrentamento dos efeitos da mudança climática têm incentivado os estados a tornarem suas fontes energéticas cada vez mais livres de emissão de carbono ou resíduos que impactam ainda mais o sistema terrestre. Análises e projeções do relatório *The path to a new era for nuclear energy* (2024) da *International Energy Agency* indicam que a demanda por energia nuclear deve aumentar em 3% ao ano até 2026: “Atualmente, o apoio à expansão do uso da energia nuclear já está estabelecido em mais de 40 países, à medida que as nações buscam fortalecer sua segurança energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Na conferência COP28, realizada em dezembro de 2023, mais de 20 países assinaram uma declaração conjunta comprometendo-se a triplicar a capacidade nuclear global até 2050” (IEA, 2024, p.4).

Atualmente, a energia nuclear de fissão é responsável por cerca de 9-10% da produção global de eletricidade, de acordo com dados da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). No Brasil, representa aproximadamente 1,2-2,5% da matriz elétrica, com geração concentrada nas usinas Angra I e Angra II, localizadas em Angra dos Reis-RJ. Segundo o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), está prevista a entrada em operação da usina Angra III em 2026, ampliando a capa-

cidade instalada do país. A justificativa para esse investimento é a produção de energia com baixa emissão de carbono, reforçando o papel da energia nuclear como alternativa estratégica para a transição energética de longo prazo.

Apesar das diretrizes rigorosas voltadas à proteção da saúde humana e do meio ambiente, os acidentes históricos em usinas nucleares de fissão marcaram negativamente a memória coletiva, consolidando a percepção desse modo de geração como arriscado. Em contraste, a energia termonuclear por fusão vem sendo apresentada como uma promessa de geração estável e robusta, sem a produção de resíduos radioativos de longa duração – o que a torna uma alternativa mais segura e ambientalmente sustentável em relação à fissão. Essa visão não é restrita ao discurso jornalístico: diversas instituições científicas e tecnológicas internacionais estão promovendo a fusão como uma das principais alternativas energéticas do futuro, especialmente no contexto da transição energética global e da descarbonização (EUROFUSION, 2024; IEA, 2021; ITER, 2023; MIT, 2022).

No Brasil, as pesquisas e os debates sobre fusão termonuclear têm sido impulsionados pela atuação da Rede Nacional de Fusão (RNF), criada em 2006 por meio de edital temático do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a partir de articulação entre grupos de pesquisa já consolidados na área de física de plasmas (RNF, 2025). Participaram do processo 17 instituições em todo o país. A RNF conta com a participação ativa de cerca de 90 pesquisadores. Um dos seus principais objetivos é manter uma rede de cooperação técnico-científico de fusão termonuclear controlada no Brasil, unindo universidades, institutos e laboratórios de pesquisas e órgão federais, como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o CNPq.

Em 2021, foi construída a proposta do Programa Nacional de Fusão (PNFN), articulada pela CNEN e liderada principalmente por pesquisadores do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), juntamente com o Laboratório Associado de Plasma (LAP), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e outros grupos vinculados à RNF. Mas, ainda em 2025, o PNFN não fora implementado, pois a proposta está vinculada à construção do Laboratório de Fusão Nuclear (LFN), que já conta com o equipamento principal, conforme planejado e construído por pesquisadores do LAP-INPE: o tokamak esférico (ETE).

Historicamente no país, a IFUSP mantém o protagonismo na pesquisa termonuclear de fusão no Brasil desde os anos 1970. Foram os pesquisadores da

IFUSP com colaboração de outros laboratórios que, com tecnologia nacional construíram o primeiro reator tokamak, o TBR-1. Atualmente opera o maior reator tokamak da América Latina, o TCABR. Por outro lado, um importante laboratório para a pesquisa de fusão termonuclear, como foi o Grupo de Física de Plasma e Fusão Termonuclear Controlada, do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) foi descontinuado. A partir dos anos 2000, à medida que o financiamento decaiu, o laboratório entrou em fase de abandono e, por volta de 2010, encerrou suas atividades.

Este foi um grupo fundamental para pesquisa de fusão nuclear no Brasil, pois por meio de articulações com a Universidade de Kyoto no final dos anos 1990, recebeu como doação o reator, conhecido como tokamak NOVA, na UNICAMP. Esse reator permitiu a realização de experimentos com plasma de hidrogênio e pesquisas teóricas. Diante das dificuldades enfrentadas, o NOVA foi transferido para a Universidade de Rio Grande (FURG) e atualmente está sendo operado no Laboratório de Plasma Térmico (LPT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Considerando as características de *large-scale science* ou *big science* das pesquisas de fusão nuclear, a descontinuidade do Grupo de Física de Plasma da UNICAMP evidencia a fragilidade estrutural que a pesquisa em fusão nuclear enfrenta no Brasil. Reflete a ausência de um programa nacional que forneça diretrizes estratégicas, coordenação institucional e financiamento contínuo. Em vez de políticas de Estado estáveis e estruturantes, a continuidade dessas iniciativas depende do esforço e da capacidade de articulação dos pesquisadores envolvidos e suas instituições. Assim, o encerramento do laboratório não deve ser interpretado como um episódio isolado, mas como reflexo de um vácuo institucional que compromete o avanço científico e tecnológico em áreas estratégicas para o futuro energético do país.

O presente artigo tem como objetivo analisar o primeiro Programa Nacional de Física de Plasma e Fusão Termonuclear Controlada (PNFPFTC), de 1981, à luz do atual cenário internacional. A divulgação de iniciativas como a construção do maior reator de fusão nuclear na Europa e notícias sobre resultados obtidos por experimentos nos Estados Unidos, China e Coreia do Sul evidenciam que tais conquistas são fruto direto de programas nacionais de pesquisa sustentados por políticas de Estado de longo prazo. Nesse contexto, a ausência de continuidade institucional e de investimentos estratégicos no Brasil expõe uma fragilidade crônica de

sua política científica nesse tema. Ou seja, a falta de um programa nacional estruturado compromete a capacidade do país de acompanhar os avanços internacionais e de ocupar uma posição relevante em uma área crucial para a transição energética e a soberania tecnológica nacional.

Energia termonuclear de fusão no Brasil

As pesquisas sobre energia nuclear no Brasil tiveram início na década de 1950, impulsionadas pela atuação do Almirante Álvaro Alberto, figura central na institucionalização da ciência no país (MOTOYAMA; GARCIA, 1996). A participação ativa de físicos, geólogos, biofísicos, químicos e engenheiros foi descrita por Andrade (2006, p. 13) como “os principais protagonistas da história da energia nuclear do Brasil”. Para a autora, a chamada “opção nuclear” implantada nos anos de 1970, exigiu políticas públicas voltadas à formação e capacitação de pesquisadores e técnicos.

Entretanto, a questão não foi uma novidade, graças à participação ativa do Almirante Álvaro Alberto nas políticas internacionais de energia nuclear, nos anos 1940, principalmente após o final da II Grande Guerra. Em 1953, ele representou o Brasil na Comissão das Nações Unidas para os Usos Pacíficos da Energia Atômica, e desde esse período foi um crítico contra o monopólio dos países centrais sobre o ciclo do combustível nuclear. Em Genebra, na 1ª Conferência Internacional sobre os usos Pacíficos em Energia Atômica em 1955, como vice-presidente da Comissão Internacional de Energia Atômica (CIEA), defendeu o direito dos países em desenvolvimento ter acesso à tecnologia nuclear e, principalmente, à autonomia científica, conforme destacam Santos Filho e Cardoso (2023, p. 626): “Álvaro Alberto buscou defender a autonomia científica e o desenvolvimento tecnológico, visando que o Brasil pudesse assumir outro papel na relação com outros países, de fornecedor de matéria-prima para produtor de ciência e tecnologia. Essa foi uma de suas principais empreitadas.”

Ao destacar o esforço em reposicionar o Brasil de mero fornecedor de matérias-primas a produtor de ciência e tecnologia, tornam-se evidentes as principais motivações que levaram à criação do Conselho Nacional de Pesquisas (atual CNPq), à institucionalização do apoio à cooperação internacional e ao fortalecimento da base técnico-científica nacional. Essas diretrizes se concretizaram, entre outras ações, por meio de políticas voltadas ao intercâmbio de cientistas e pesquisadores, visando à formação de quadros qualificados e à inserção internacional da produção

científica brasileira. Tais iniciativas não apenas expressaram um projeto de emancipação científica, como também instituíram mecanismos institucionais duradouros que permitiram ao país reconfigurar sua posição no sistema global de produção de conhecimento.

Um dos desdobramentos dessas políticas foi a recepção, pela Universidade de São Paulo, do físico David Bohm, da Universidade de Princeton, reconhecido como um dos pioneiros na pesquisa sobre plasma. Conforme Pestana (2015, p. 237) destaca sobre um dos resultados da gestão do Almirante Álvaro Aberto à frente do CNPq (1951-1955): “valorizou-se a formação e a capacitação de cientistas, engenheiros e técnicos em energia nuclear – seja pela concessão de bolsas de estudo no exterior a brasileiros, seja pela atração de professores visitantes estrangeiros. Foi neste contexto que imigrou para o Brasil em 1951 um discípulo do Oppenheimer e de Einstein, o cientista estadunidense David Bohm.”

Bohm emigrou para o Brasil em decorrência da perseguição macarthista nos Estados Unidos, permanecendo no país até aproximadamente 1955. Apesar do curto período de sua estada, sua presença exerceu influência significativa sobre uma geração de pesquisadores e contribuiu para projetar o Brasil no campo da física teórica e da pesquisa nuclear. Mas, o Brasil já se dedicava à física experimental desde a década de 1930, com a incorporação de Gleb Wataghin ao corpo docente da recém-criada Universidade de São Paulo (USP). Wataghin desempenhou um papel central na formação da primeira geração de físicos brasileiros, sendo mentor de Cesar Lattes, que iniciou sua trajetória científica como seu assistente.

O êxito das pesquisas de Lattes no exterior provocou uma inflexão no cenário da física experimental no país. Como observa Cassio Leite Vieira (2017, p. 44), “o cenário da física experimental no Brasil iria mudar com a repercussão dos feitos de Lattes”. À época, a ampla divulgação de suas descobertas contribuiu decisivamente para o fortalecimento da pesquisa nuclear no Brasil. Para Vieira, foi o período da “Era Nuclear” no país: “Tempos em que a física nuclear era a grande vedete das ciências”, que conquistou o apoio de amplos setores da sociedade — incluindo empresários, artistas, jornalistas e, de modo expressivo, os militares, interessados em dominar o ciclo completo da energia nuclear (*ibid.*).

Porém, as pesquisas em fusão termonuclear começaram efetivamente no Brasil, em 1974, com o início de programas de pesquisa nos laboratórios de física experimental da USP e da UNICAMP. No campo da física teórica, destacava-se a

atuação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (NASCIMENTO *et al.*, 1990; PESTANA, 2015). Nesse mesmo período (final de 1974), após visitas a laboratórios no Japão e na França, o grupo de pesquisa do IFUSP avaliou a possibilidade de implantar programas de pesquisa e pós-graduação no país. Dois anos depois, decidiram construir um pequeno reator do tipo tokamak, o TBR-1, com o objetivo de adquirir experiência na construção de sistemas de confinamento magnético e formar pesquisadores qualificados para o desenvolvimento da física experimental em fusão termonuclear. Com esses propósitos, o grupo elaborou o projeto e obteve financiamento de diversas agências (Finep, CNPq, CNEN e FAPESP) para viabilizar a construção do tokamak, em uma iniciativa inédita no país (PESTANA, 2015).

O êxito na construção do TBR-1 representou mais do que uma conquista da equipe de pesquisadores, se tornou um marco decisivo, pois viabilizou o desenvolvimento de inúmeras pesquisas, dissertações, artigos e teses. Contribuiu para a formação de um corpo de cientistas, pensadores e pesquisadores no país. A difusão dos resultados gerados a partir do TBR-1 incentivou o Ministério de Minas e Energia (MME) e a CNEN a elaborarem o PNFPFTC, conforme apresentado a seguir.

Programa Nacional de Física do Plasma e Fusão Termonuclear Controlada (PNFPFTC)

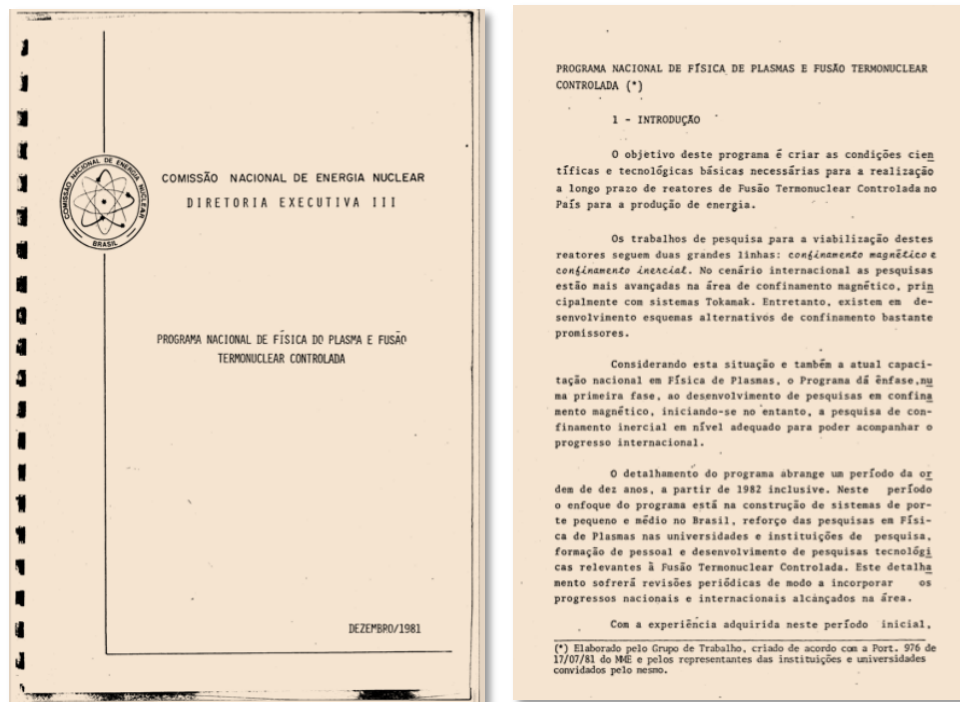
Por definição, um programa nacional é um documento do Estado que organiza o conjunto de ações necessárias para alcançar objetivos previamente estabelecidos. Ou seja, resulta de uma iniciativa ampla, geralmente coordenada por um órgão governamental, para atingir objetivos estratégicos ou estruturais em determinada área. Datado de dezembro de 1981, o PNFPFTC foi o primeiro programa nacional brasileiro voltado especificamente à fusão termonuclear. A instituição responsável PNFPFTC foi a CNEN, por meio da Diretoria Executiva III, no ano de 1981. Conforme foi registrado no “Relatório Anual das atividades da CNEN”, o grupo estava foi constituído sob a direção executiva de Ivano Humberto Marchesi na gestão de Hervásio Guimarães de Carvalho (1916-1999). Há também uma referência no *corpus* do PNFPFTC que registra a criação do grupo de trabalho (GT), por meio da portaria nº 976, de 17 de julho de 1981, do então MME, sob a gestão do ministro Cesar Cals (Figura 2). Embora o documento não mencione os nomes dos integrantes do GT ministerial, apresenta uma relação detalhada do nome dos

pesquisadores responsáveis pelos laboratórios e os grupos de pesquisa da UNICAMP, USP, INPE-CNPq, UFRGS, UFF e ITA.

Além de ser um Programa Nacional é também um dossiê sobre o desenvolvimento da pesquisa no campo da física de plasma no país. Um dossiê é um conjunto de documentos reunidos sobre um tema específico, organizado para informar sobre as ações das instituições relacionadas. Dessa forma, o PNFPTC é também um dossiê que detalha as principais ações institucionais desenvolvidas pelas universidades desde o início da criação de suas linhas de pesquisa até as que estavam em andamento no período; também contém uma relação de artigos publicados, participações em congressos e seminários, tanto no Brasil quanto no exterior.

Os principais objetivos do PNFPTC foram: consolidar e ampliar a capacidade científica e tecnológica em fusão nuclear controlada; promover a formação de recursos humanos qualificados; estimular a cooperação entre universidades, centros de pesquisas e agências de fomento; propor linhas de financiamento específicas para pesquisas em física do plasma; integrar laboratórios brasileiros ao esforço internacional de desenvolvimento de fusão como fonte de energia. O documento é também a memória sobre a atuação dos pesquisadores, além de representar um marco na institucionalização da pesquisa em fusão nuclear no Brasil. Mas ainda assim, as universidades continuaram enfrentando desafios orçamentários e limitações de infraestrutura.

Figura 1 – Capa do PNFPFTC e página de Introdução



Fonte: Biblioteca do CNEN.

Figura 2 – Detalhe da nota de rodapé da página de introdução do PNFPFTC

(*) Elaborado pelo Grupo de Trabalho, criado de acordo com a Port. 976 de 17/07/81 do MME e pelos representantes das instituições e universidades convidados pelo mesmo.

Fonte: Biblioteca do CNEN.

Ainda que aparente ser um esboço, as metas estão bem delimitadas, com o objetivo principal voltado para a produção de energia (Figura 3): “criar as condições científicas e tecnológica básicas e necessárias para a realização *a longo prazo* de reatores de Fusão Termonuclear Controlada no país para a *produção de energia*” (CNEN, 1981, s/p. grifo nosso).

Figura 3 – Detalhe do objetivo descrito na introdução do PNFPFTC

PROGRAMA NACIONAL DE FÍSICA DE PLASMAS E FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA (*)

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste programa é criar as condições científicas e tecnológicas básicas necessárias para a realização a longo prazo de reatores de Fusão Termonuclear Controlada no País para a produção de energia.

Fonte: Biblioteca do CNEN.

Considerando a carência de informações históricas, esse documento revela por meio dos objetivos, que a produção de energia foi o principal propulsor para incentivar as pesquisas no país a partir de 1982 até 1992.

Figura 4 – Detalhe das diretrizes do PNFPFN

2 - DIRETRIZES

As diretrizes do Programa Nacional são as seguintes:

(a) Desenvolvimento paralelo da Física de Plasmas e da tecnologia relevantes à Fusão Termonuclear Controlada;

(b) Coordenação e estímulo ao desenvolvimento da capacitação técnica e científica em Física de Plasmas, relevante à Fusão Termonuclear Controlada, nas universidades e instituições de pesquisa;

(c) Desenvolvimento de sistemas fechados de confinamento magnético, dando ênfase às máquinas de geometria toroidal do tipo Tokamak, manutenção e incentivo às pesquisas em sistemas alternativos;

(d) Realização de convênios de colaboração internacional para programas de pesquisas bi-e multilaterais.

Fonte: Biblioteca do CNEN.

As quatro diretrizes sintetizam as prioridades do período, destacando a opção tecnológica pela fusão termonuclear controlada, como descrito no próprio título, bem como a importância do desenvolvimento da física de plasma, associado à capacitação técnica e científica de pesquisadores. Essa ênfase está explicitada, por exemplo, no item b, que prioriza reatores baseados em confinamentos magnético e inercial.

Se atualmente o Brasil participa de projetos e fóruns internacionais na área, isso se deve, sobretudo, ao empenho de seus pesquisadores e instituições – e não ao investimento direto do Estado. O próprio texto do PNFPTC reconhece a limitação de recursos à época, descrevendo-os como “bastante modestos e insuficientes para o engajamento imediato num programa de grande porte” (CNEN, 1981, p. 3), desvelando, portanto, que houve uma transferência de responsabilidade para as universidades e seus institutos de pesquisa. Assim, além de desenvolverem pesquisas, coube aos coordenadores e pesquisadores a responsabilidade de elaborar projetos, captar recursos junto a agências de fomento e estabelecer parcerias internacionais, inclusive para obter equipamentos essenciais à pesquisa em fusão termonuclear no Brasil. Exemplos disso são os projetos para a construção do reator TBR-2 (*Brazilian Tokamak Reactor 2*, (1990) e do *TBR-E Project* (1991), ambos coordenados e desenvolvidos por pesquisadores brasileiros em colaboração com pesquisadores de outros países.

Figura 5 – Tabela que descreve a capacidade técnica das instituições de pesquisas

TABELA 1

RESUMO DOS RECURSOS EXISTENTES E ATIVIDADES PRINCIPAIS
NAS UNIVERSIDADES E INSTITUTOS DE PESQUISA (DEZ/1981)

Instituição	Recursos Experimentais Principais	Atividades Principais
USP	Tokamak TBR	Estudo teórico/experimental de plasmas confinados em tokamak.
UNICAMP	Theta-Pinch Tupã Espelho Magnético Múltiplo	Estudo teórico/experimental de sistemas alternativos de confinamento magnético e aquecimento por rádio-freqüência de plasmas.
UFRGS		Estudo teórico da interação de ondas de rádio-freqüência com plasmas.
UFF	Máquina Linear LISA	Estudo do aquecimento de plasmas por rádio-freqüência.
INPE	Máquina de Plasma Duplo Laser de rubi/neodímio	Estudo teórico da interação de feixes de partículas e radiação laser com plasmas. Estudo de ondas em plasmas.
ITA	Tubos de descargas	Desenvolvimento de métodos de cálculo para reatores de fusão. Estudo experimental de produção de plasmas.
LEA	Laser de CO ₂	Estudo da interação laser-plasma e desenvolvimento de lasers de alta potência.

Fonte: Biblioteca do CNEN.

Um dos objetivos estratégicos previstos no documento foi a proposta de criação do Centro Nacional de Física do Plasma e Fusão Nuclear Controlada (CNFPFNC), cuja implementação dependeria dos avanços internacionais e da experiência nacional: “O progresso internacional e a experiência nacional acumuladas indicarão qual o tipo de sistema mais viável visando os reatores a fusão nuclear” (CNEN, 1981, p. 4). Esse projeto, contudo, foi posteriormente substituído pela proposta atual de construção do Laboratório Nacional de Fusão. Enquanto o local inicialmente previsto em 1981 era o Campo de Roma, em São José dos Campos-SP, o novo projeto, formulado em 2021, prevê sua instalação em Iperó-SP – ainda condicionado à implementação efetiva do PNFN (CNEN, 2021).

Artigos listados no PNFPTC

As publicações científicas desempenham um papel fundamental na construção de políticas nacionais, especialmente em áreas estratégicas, como ciência e tecnologia. Elas oferecem uma base empírica sólida, com dados validados por meio de revisões por pares, que orienta a tomada de decisões com fundamento técnico, e não apenas político. Além disso, contribuem para o reconhecimento institucional de campos emergentes, como ocorreu com a física de plasma no Brasil, cuja consolidação como área autônoma foi precedida por intensa produção acadêmica divulgada em encontros da SBPC. As publicações também funcionam como memória documentada do progresso científico, registrando o acúmulo de conhecimento e os avanços experimentais ao longo do tempo, o que permite justificar investimentos e formular diretrizes de longo prazo. Ao facilitar o diálogo entre pesquisadores, elas fomentam a articulação de redes de colaboração que fortalecem a comunidade científica e ampliam sua capacidade de influenciar agendas governamentais.

Ademais, ao circular fora dos círculos acadêmicos – em jornais e revistas – esses resultados podem gerar visibilidade social e política, mobilizando apoio e financiamento. Por fim, servem como critério objetivo de avaliação de produtividade e impacto, sendo indispensáveis para medir os resultados de políticas públicas já implementadas. Dessa forma, as publicações científicas não apenas registram o conhecimento, mas são instrumentos ativos na formulação, legitimação e avaliação de políticas nacionais.

No anexo do PNFPTC (CNEN, 1981) contém com uma relação de artigos produzidos a partir de 1978 até 1981, publicados em diversas revistas internacionais e em algumas nacionais; trabalhos apresentados e registrados nos anais de conferências internacionais e nacionais; assim como resumos de apresentações em conferências nacionais e internacionais, dissertações e teses e participação em livros. Relaciona as publicações e participação em congressos, evidencia o esforço de comunicação por parte dos pesquisadores brasileiros em figurar no ambiente internacional, mas também para mostrar à comunidade científica nacional os avanços alcançados.

Delimitamos esta análise aos resumos do anuário da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) – “Ciência e Cultura – Suplemento” – pela relevância nacional das reuniões anuais da SBPC como um espaço de comunicação e difusão para a comunidade científica e a sociedade, por ressonância. A partir do levantamento das publicações, destacamos dois objetivos específicos: o reconhecimento do campo da pesquisa da física nuclear de fusão; o processo de construção do primeiro reator nacional, o TBR.

Marco do reconhecimento do campo da física nuclear de fusão nos registros

Consta nos anais das reuniões anuais da SBPC, entre 1976 e 1979, que as pesquisas em fusão nuclear eram classificadas de forma genérica como “Física Geral”. Somente em 1980, a Física de Plasma foi reconhecida como um campo temático específico. Mesmo assim, diversos trabalhos relevantes já vinham sendo publicados desde 1975, destacando-se, por exemplo, a atuação do Grupo de Física de Plasma e Fusão Controlada da UNICAMP. Registros da produção científica de 1975 a 1980 relacionam dezenas de resumos apresentados nas reuniões da SBPC, com ênfase nos: (i) experimentos com *theta-pinch*, tokamaks e vedação magnética; (ii) estudos sobre estabilidade de plasma, diagnóstico ótico e simulações magnéticas; (iii) registros importantes não apenas como produção científica, mas também como memória do percurso institucional da pesquisa em fusão no Brasil.

As publicações desse período se concentram na construção do tokamak TBR no IFUSP. As primeiras apresentações do projeto ocorreram na SBPC em 1978, com destaque para o resumo: “O Projeto TBR de construção de um tokamak de pequeno porte: estágio atual”.

Os resumos registrados nos anais documentam detalhadamente as etapas de planejamento, montagem, testes e diagnósticos do reator. Também as adaptações e atualizações, em relação à proposta original, foram apresentadas e estão registradas. Vale ressaltar que o reator foi inteiramente construído com tecnologia nacional.

Em 1979, conseguiram o primeiro plasma confinado, com temperatura de 7 milhões de graus Celsius – evento que ganhou destaque na primeira página da Folha de S. Paulo (07/10/1979), com a manchete: “Brasil domina 1ª etapa de fusão nuclear”. Foi um acontecimento importante para a pesquisa, que também chamou a atenção do pesquisador Augusto Pestana (2015, p. 239): “Em projeto 100% nacional, com componentes adquiridos no mercado de eletroeletrônicos da São Paulo da década de 1970 e artesanalmente adaptados na própria Universidade, o TBR-1 alcançou seu primeiro plasma – sete milhões de graus centígrados – em 4 de outubro de 1979, feito que chegou, três dias depois, à primeira página da “Folha de S. Paulo”.

Figura 6 – Primeira página da Folha de S. Paulo, de 7/10/1979



Fonte: Arquivo Folha de S. Paulo.

Para além da repercussão na mídia na época, o projeto simbolizou o ineditismo da realização e a capacidade da ciência brasileira de liderar projetos de alta complexidade. Em 1980, um ano antes da criação do PNFPFTC, foram apresentados os primeiros resultados sistemáticos dos experimentos realizados com o TBR-1. As pesquisas abrangeram desde o funcionamento do reator, diagnósticos com sondas, formação do plasma, até análises de estabilidade e colaborações interinstitucionais.

Ao listar as produções científicas e inseri-las no corpo de dados do PNFPFTC, foi possível evidenciar a maturidade científica; verificar os resultados concretos dos investimentos públicos, destacando o retorno em forma de conhecimento produzido e disseminado; identificar quais instituições, grupos e pesquisadores atuavam na área, favorecendo a coordenação de redes e políticas de fomento; registrar o percurso científico nacional nesse campo. A memória institucional da pesquisa junto a indicadores objetivos de produtividade científica permite avaliar o impacto do programa ao longo do tempo.

Como resultado, o PNFPFTC mapeou e organizou a infraestrutura científica nacional, reunindo informações sobre laboratórios, equipamentos e equipes distribuídas por instituições, como USP, UNICAMP, UFRGS, INPE e ITA. Também incentivou a cooperação internacional, permitindo que grupos brasileiros acessem equipamentos e conhecimentos de ponta, por meio de acordos com instituições estrangeiras. Por fim, lançou as bases para políticas futuras, como a proposta do Centro Nacional de Física de Plasma e, posteriormente, a atualização das propostas dos PNFNs de 2008 e 2021. Dessa forma, o documento de 1981 não apenas reconheceu um campo de pesquisa, mas também, de certa forma, conseguiu manter o desenvolvimento da energia de fusão no Brasil.

Além do reconhecimento oficial do campo da física de plasma como área estratégica, o PNFPFTC conferiu legitimidade institucional às pesquisas sustentadas pelo esforço isolado de universidades e centros de pesquisa, articulação dos cientistas e pesquisadores para buscarem recursos e financiamento a longo prazo, mas também parcerias para atualização tecnológicas e troca de conhecimento. Nesse sentido, o programa nacional de 1981 representa uma tentativa importante de transição de um modelo puramente acadêmico para outro articulado com a política pública. É um exemplo da ciência empreendedora, na qual o cientista exerce o papel de um agente propulsor, tanto para influenciar e orientar a política pública,

mas também para difundir o conhecimento junto aos meios de comunicação. Essa prática tem sido tema de estudo da sociologia ambiental, que analisa o papel do cientista como ponte entre conhecimento e decisão e propulsores de políticas que visam a conservação ambiental e a sustentabilidade (CASH *et al.*, 2003; HANNIGAN, 2009).

Mesmo sem recursos específicos do Estado, pesquisadores dos institutos e laboratórios mantiveram parcerias entre si. Em 1990, por exemplo, planejaram e detalharam o Projeto TBR-2, com apoio de instituições internacionais, como *Institute of Plasma Physics* da China e o JET, da Agência de Energia Atômica da Comunidade Econômica Europeia (EURATOM), sob liderança do Dr. Ivan C. Nascimento do IFUSP. Uma frase na introdução do projeto para construção do tokamak TBR-E revela o esforço: “*In 1987 the University approved the construction of a new building for the Plasma Laboratory and from 1987 to 1988 a concentrated effort was made to complete the first conceptual design of a versatile tokamak suitable for a university group. The device, called TBR-2 [...]*” (IFUSP, INPE, UNICAMP, 1991, p. 2)¹.

Tendo em vista esse histórico, ao considerarmos as características das pesquisas em fusão nuclear, no contexto da *science large-scale* ou *big science*, observamos que os cientistas brasileiros envolvidos desempenham papéis que vão muito além da produção técnica de conhecimento. Esses pesquisadores atuam como agentes híbridos, articulando demandas científicas com diretrizes institucionais, mobilizando recursos financeiros e construindo pontes entre a comunidade acadêmica, as agências de fomento e formuladores de políticas públicas. Não se trata apenas de captar investimentos, mas de moldar e negociar agendas de pesquisa em sintonia com interesses nacionais e com os marcos regulatórios internacionais da ciência e da energia. São agentes propulsores que conectam o país na formulação e institucionalização de políticas científicas de longo alcance, contribuindo para a inserção estratégica do Brasil em redes globais de produção de conhecimento e para a consolidação de uma agenda nacional de ciência orientada por missão.

1 Tradução livre: “Em 1987, a Universidade aprovou a construção de um novo prédio para um Laboratório de Plasma e, de 1987 a 1988, um esforço concentrado foi feito para concluir o primeiro projeto conceitual de um tokamak versátil, adequado para o grupo universitário. O dispositivo, denominado TBR-2”.

Resultados de experimentos internacionais termonucleares de fusão

Um dos conceitos que caracteriza as pesquisas de fusão termonuclear no mundo, é o que o físico nuclear Alvin Weinberg (1961) chamou de *science large-scale* ou *big science*. Por meio de analogias, o autor relacionou monumentos culturais de civilizações como as pirâmides do antigo Egito, as grandes catedrais da Idade Média e, nesse sentido, *big science* simboliza o século XX, a exemplo das corridas espaciais. O modelo *science large-scale* tem sido aplicado em diversos campos no século XXI para refinar o conhecimento em temas urgentes, como compreender o papel do bioma amazônico na mudança climática e encontrar soluções tecnológicas para produção de energia limpa. Nesse sentido, o projeto ITER é um exemplo da construção de enormes reatores para produção de energia por fusão termonuclear. Considerado o maior e mais ambicioso projeto de geração de energia por fusão nuclear, este projeto reúne cientistas de diversos países para construção da maior máquina tokamak do mundo, conforme a descrição no site oficial do ITER.

In southern France, 33 nations are collaborating to build the world's largest tokamak, a magnetic fusion device that has been designed to prove the feasibility of fusion as a large-scale and carbon-free source of energy based on the same principle that powers our Sun and stars².

Coordenada e administrada pela EURATOM, a iniciativa formou um consórcio internacional composto por 33 nações. Integram esse grupo os 27 Estados-membros da União Europeia, além da Suíça e do Reino Unido, bem como o Estados Unidos, a Federação Russa, o Japão, a China, a Índia e a República da Coreia do Sul. Essa aliança reflete a natureza multilateral e estratégica dos esforços globais em torno da pesquisa em fusão nuclear.

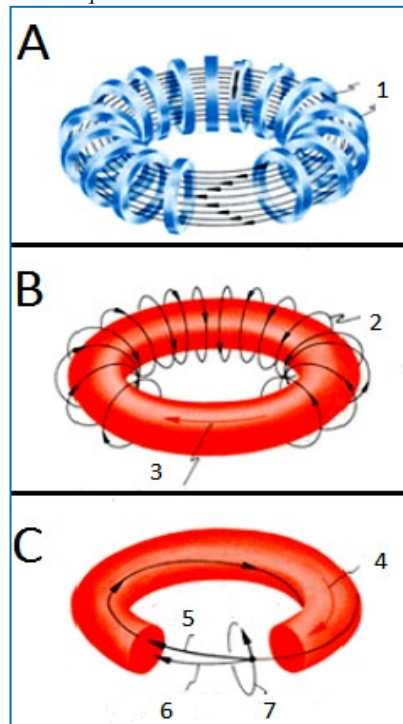
A história do ITER, conforme informado no site oficial, revela processos de negociações internacionais de países que optaram pelo desenvolvimento da tecnologia de energia termonuclear de fusão, iniciadas na década de 1930, antes da Segunda Guerra. Com os primeiros resultados promissores, as nações industrializadas estabeleceram seus laboratórios de física de fusão, logo depois do término da

² Tradução livre do original: “No sul da França, 35 nações estão colaborando para construir o maior tokamak do mundo, dispositivo de fusão magnética projetado para provar a viabilidade da fusão como uma fonte de energia em larga escala e livre de carbono com base no mesmo princípio que alimenta nosso Sol e estrelas”. Disponível em: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>. Acesso em: 16 nov. 2022.

guerra. Assim, as "máquinas de fusão" já operavam na União Soviética, no Reino Unido, Estados Unidos, França, Alemanha e Japão.

Somente em 1968, os cientistas soviéticos conseguiram atingir níveis de temperatura e tempos de confinamento de plasma – dois dos principais critérios para alcançar a fusão – feitos que nunca haviam sido alcançados antes. Um ano depois, pesquisadores e cientistas britânicos do *Culham Centre for Fusion Energy* (CCFE)³ viajaram a Moscou para conhecerem os resultados promissores da máquina russa, o Tokamak T3, que havia conseguido atingir temperaturas de plasma acima de 10 milhões de graus Celsius, que indicaram que o reator no formato tokamak seria a melhor tecnologia para alcançar o objetivo na geração de energia termonuclear de fusão.

Figura 7: Esquema interno de um reator tokamak



Os principais campos magnéticos de um tokamak são:

A: (1) bobinas (azuis) que geram o campo toroidal (setas pretas);

B: (2) campo magnético poloidal gerado pela corrente no plasma (3);

C: (6) campo toroidal + (7) campo poloidal gerando o campo resultante helicoidal (5).

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tokamak>, acesso em 4 de julho de 2025.

³ O centro foi construído em 1965 para desenvolver o programa de pesquisa de fusão do Reino Unido. Disponível em: <https://ccfe.ukaea.uk/about-ccfe/history/>. Acesso em: 23 mar. 2023.

Tokamak é o acrônimo em russo de *toroidalnaia kamera magnitnaya katushkami* – Câmara Toroidal com Bobinas Magnéticas. Trata-se de dispositivo de confinamento magnético de formato toroidal, que veio a se tornar o conceito dominante de máquinas nos experimentos de pesquisas de fusão, difundidas pelo mundo⁴, a começar pelo britânico *Joint European Torus* (JET) do CCFE que desde os anos de 1970 concentrou suas pesquisas nesse formato de reator. Intensificada durante a crise mundial do petróleo dos anos de 1973, um ano após a 1ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (1972), época que circulou o discurso sobre a finitude dos recursos naturais, incluindo o petróleo. A EURATOM iniciou o esboço de um tokamak multinacional com dimensões adequadas para produzir, por meio da fusão, uma quantidade significativa de energia. Em 1977, o *Culham Laboratory* do CCFE, no Reino Unido, foi escolhido para sediar a máquina, que se tornaria mundialmente conhecida como *Joint European Torus* (JET).

Os primeiros grandes êxitos vieram em 1991, quando o reator conseguiu realizar fusão nuclear controlada. Seis anos depois, em 1997, o JET atingiu um recorde mundial ao produzir a maior quantidade de energia já obtida a partir de um plasma de fusão. Os resultados acumulados ao longo desses experimentos contribuíram diretamente para que, em 2001, a EURATOM finalizasse o projeto do ITER, cuja concepção havia sido iniciada em 1988. Planejado para ser um projeto experimental com vida útil limitada, o JET foi o maior reator tokamak operacional da Europa. Após cumprir os experimentos com sucesso, com recordes em 2021/2022, começou a encerrar suas atividades em 2023/2024.

Esse experimento é um exemplo do conceito *big science* ou *science large-scale*. Planejado e construído pelo consórcio EUROfusion, o JET é considerado um modelo paradigmático desse tipo de empreendimento científico. O financiamento foi viabilizado pelos países europeus, membros da EURATOM, que escolheram o Reino Unido como local de construção, mas a propriedade, operação e benefícios foram compartilhados por toda a comunidade científica europeia.

Historicamente, desde a sua criação, em 1957, a União Europeia tem desempenhado um papel central e estratégico na coordenação e financiamento das pesquisas em fusão nuclear na Europa por meio da EURATOM. Este foi o pilar

⁴ Disponível em: <https://www.iter.org/sci/BeyondITER> e <https://www.iter.org/fusion-links>. Acesso em: 16 de nov. 2022.

institucional que viabilizou o JET, articulou o empreendimento do ITER e já está planejando o DEMO, pré-projeto para uma futura usina de demonstração de fusão nuclear, prevista para ser construída entre 2040 e 2050, sucedendo o ITER. A operação está prevista para o ano de 2055, com objetivo de mostrar que é possível operar uma usina de fusão comercialmente útil.

Os avanços recentes em países como EUA, China e Coreia do Sul tornam mais evidentes o papel de programas a longo prazo, que garante a estabilidade e sustenta os avanços. Nos Estados Unidos, os esforços estão concentrados no *National Ignition Facility* (NIF), onde experimentos com fusão por confinamento inercial atingiram, em 2022, a chamada ignição – um marco histórico amplamente noticiado na mídia internacional. A China, por sua vez, tem investido fortemente em programas de longo prazo, com destaque para o reator EAST, que vem batendo sucessivos recordes de temperatura e tempo de confinamento, consolidando sua posição como referência global em pesquisas com tokamaks. Também a Coreia do Sul tem obtido resultados expressivos com o KSTAR, seu “sol artificial”, demonstrando avanços notáveis na estabilidade e duração do plasma em altas temperaturas – feitos que têm repercutido tanto na mídia especializada quanto nos principais veículos de comunicação internacionais. A ampla visibilidade desses programas evidência não apenas os avanços científicos e tecnológicos, mas também o valor estratégico das iniciativas nacionais de fusão nuclear, que combinam investimento público consistente, articulação institucional e projeção internacional. Nesse contexto, ganha ainda mais relevância o esforço da RNF para a consolidação da proposta brasileira do Programa Nacional de Fusão Nuclear de 2021, como expressão de um projeto alinhado às tendências globais.

A seguir, apresenta-se um panorama resumido dos programas com maior destaque na mídia internacional, impulsionados pelos resultados de impacto e pelo fortalecimento de seus respectivos sistemas nacionais de ciência, tecnologia e inovação

Programa de pesquisa nos EUA

Em 1951, os Estados Unidos criaram o *Project Sherwood* para o desenvolvimento de pesquisas e experimentos termonuclear de fusão controlada, ainda no âmbito da Comissão de Energia Atômica AEC (*Atomic Energy Commission*), órgão

ligado à presidência e ao congresso, que financiou os primeiros experimentos com confinamento magnético e lançou as bases para todos os programas de pesquisas e experimentos termonucleares de fusão controlada no país. Atualmente, o *Project Sherwood* está sob responsabilidade do *U.S. Department of Energy* (DOE), coordenado pela *National Nuclear Security Administration* (NNSA) – órgão semiautônomo responsável pela segurança nacional e acompanhamento de todas as atividades acadêmicas, civis e militares relacionados à ciência nuclear.

Os resultados das pesquisas em fusão termonuclear divulgados em dezembro de 2022 com ampla repercussão na mídia internacional foram alcançados pelo Laboratório Nacional Lawrence Livermore (LLNL). O comunicado público do DOE comemorou o “equilíbrio de energia científico” no experimento de fusão nuclear controlada, um marco inédito, pois, pela primeira vez, um experimento de fusão nuclear (nos EUA) produziu mais energia do que aquela consumida para iniciar a reação, caracterizando o que se convencionou chamar de ignição de fusão. Foram utilizados cerca de 192 raios *lasers* sobre um minúsculo cilindro de ouro, contendo uma cápsula de diamante, onde foi colocado um *pellet* congelado com isótopos de hidrogênio, deutério e trítio, a forma mais pesada de hidrogênio. Os *lasers* desencadearam uma implosão que gerou calor e pressão, permitindo que os isótopos de hidrogênio se fundissem, resultando num plasma em chamas, que durou menos de um bilionésimo de segundo.

Programa Nacional de Alta Tecnologia, Pesquisa e Desenvolvimento na China

Na China, os experimentos do Tokamak Supercondutor Experimental Avançado (EAST) é um experimento do *Institute of Plasma Physics* da Academia Chinesa de Ciências (CAS – *Chinese Academy of Sciences*), oficializado em 1990, no âmbito do Programa Nacional de Desenvolvimento de Energia de Fusão da China. Porém, o início da construção do EAST aconteceu em 1986, viabilizada por meio de um programa estratégico focado em ciência e tecnologia do Estado chinês, chamado: *National High Technology Research and Development Program*, que ficou conhecido como *Program 863* (86 por causa do ano 1986 e 3 por iniciar no mês de março).

O projeto foi proposto por quatro cientistas ligados a instituições científicas e acadêmicas de alto nível na China de áreas estratégicas de tecnologia nuclear, espacial e computacional. Eles são conhecidos como os “Quatro Senhores do 863”⁵. A proposta foi enviada diretamente ao líder Deng Xiaoping, que rapidamente aprovou. O empreendimento sempre foi financiado pelo governo chinês por meio do Ministério de Ciência e Tecnologia da China (MOST) e da Academia Chinesa de Ciências (CAS). O *Program 863* garantiu suporte político, financeiro e técnico necessário para que a China se tornasse líder global em pesquisas de fusão nuclear.

Em 2006, obtiveram o primeiro plasma e, desde então, têm conseguido resultados importantes para o desenvolvimento da tecnologia. Em 2025, anunciaram que o EAST, conhecido também como “Sol Artificial Chinês”, conseguiu por 1.066 segundos gerar energia, decorrente de fusão nuclear, ou seja, cerca 17 minutos e 46 segundos. Assim, a China tem o maior tempo de confinamento de plasma do mundo, ficando na vanguarda da pesquisa de fusão nuclear demonstrando a viabilidade de manter plasma quente e confinado, por períodos comparáveis à operação contínua de futuros reatores. O EAST é uma peça-chave no ecossistema global da fusão nuclear. É um laboratório avançado que valida e aprimora as tecnologias a serem utilizadas pelo ITER, pois o EAST é o primeiro tokamak com configuração do tipo ITER e serve de base experimental para tecnologias que serão utilizadas no ITER e para projetos futuros. A China é um dos sete países fundadores do ITER ao lado da União Europeia, EUA, Índia, Rússia, Japão e República da Coreia do Sul.

Programa de pesquisa na República da Coreia do Sul

Em 1995, a República da Coreia do Sul, por meio do *Ministry of Science and ICT* (MSIT – Ministério da Ciência e Tecnologias da Informação e Comunicação) começou oficialmente a planejar a construção do *Korea Superconducting Tokamak Advanced Research* (KSTAR), como parte do *National Fusion Energy Development Promotion*

⁵ Wang Daheng, do Instituto de Instrumentação e Engenharia Ótica e membro da CAS; Wang Ganchang, do *Institute of Modern Physics* da Academia Chinesa de Ciências em Lanzhou – da área de física nuclear e de partículas e membro do CAS; Yang Jiachi, do Instituto de Automação e membro do CAS, da área de automação e sistemas espaciais; Chen Fangyun, do Instituto de Engenharia Eletrônica, membro do CAS, da área de engenharia eletrônica, comunicações via satélite.

Plan, que teve como objetivo desenvolver um reator tokamak supercondutor experimental de longo prazo. Com isso, desenvolver tecnologias nacionais em fusão controlada e preparar o país para participar de grandes projetos internacionais, como o ITER. A construção do KSTAR começou em 2001 e foi concluído em 2007. Após a conclusão, no ano de 2008, foi gerado o primeiro plasma considerado o marco inicial dos experimentos do KSTAR.

Contudo, o processo do desenvolvimento da pesquisa começou muito antes. Iniciado nos anos de 1960 o *Korea Atomic Energy Research Institute* (KAERI), responsável pela área nuclear no país coordenou os projetos iniciais antes da criação do *National Fusion Research Institute* (NFRI). Nos anos 1970, o interesse do Estado na ciência nuclear de uso pacífico aumentou, visto que neste período, países como Japão, Rússia, EUA e a União Europeia haviam intensificado o investimento em fusão termonuclear. Mas na Coreia do Sul, as primeiras pesquisas em física de plasma e a construção de reatores tokamaks pequenos foram nos laboratórios universitários, como na *Seoul National University* e no *Korea Advanced Institute of Science and Technology*. Durante esse período, pesquisadores passaram a participar de programas internacionais de fusão no Japão, Estados Unidos e Europa, adquirindo conhecimento técnico, formando especialistas e realizando intercâmbios no campo da física de plasma, da engenharia criogênica, do controle magnético e das matérias para alta temperaturas, com o objetivo de construir uma infraestrutura nacional em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em fusão. Assim, desde esse período até o ano de 1995, o país se preparou para lançar o plano nacional de fusão, com o KSTAR, “o sol artificial Coreano”, como projeto central. Portanto, houve colaboração direta das universidades. Outro fator importante foi a contribuição com tecnologia e infraestrutura das indústrias nacionais, como a *Hyundai Heavy Industries* e a Samsung.

Em 2024, o reator KSTAR sustentou o plasma por 48 segundos a uma temperatura de 100 milhões de graus Celsius, alcançando o maior controle de estabilidade em alta temperatura já registrado. O experimento teve como foco demonstrar a manutenção precisa do plasma confinado na temperatura ideal para a fusão com deutério-trítio. O reator sul-coreano está na vanguarda da pesquisa em fusão magnética, ao lado de tokamaks como o EAST, da China, e o JET, do Reino Unido. Seus resultados contribuem diretamente para o avanço do ITER e para a preparação de uma futura geração de reatores comerciais. Além disso, o projeto representa uma

aposta estratégica da Coreia do Sul na soberania energética por meio da inovação científica.

Relação do Brasil com o ITER

O Brasil optou por não fazer parte do consórcio para a construção do ITER. As justificativas envolvem inúmeras questões, detalhadas na tese do diplomata Augusto Pestana (2015), intitulada: “ITER, os caminhos da energia de fusão e o Brasil”. Segundo o autor, um dos fatores que justificaram a opção do Brasil em não se juntar aos 35 países membros da Organização ITER foi pelo fato de dispor de matrizes energéticas consideradas limpas e porque a energia de fusão era, ainda, uma promessa, além de ser dispendiosa: “É certo que, mesmo nos 35 países participantes do ITER, a fusão não passa de uma promessa para as autoridades responsáveis por planejamento energético” (p. 236). Nos dados divulgados pelo Balanço Energético Nacional (BEN) de 2014 do MME consta que: “De acordo com o BEM/MME, a geração elétrica no Brasil é dominada em 79,3% pelas fontes renováveis (70,6% hidráulica; 7,6% biomassa; e 1,1% eólica), seguida pelas fósseis com 18,3% (11,3% gás natural; 4,4% petróleo; e 2,6% carvão e pela fissão nuclear com 2,4%.” (PESTANA, 2015, p. 233).

Os dados mostram que 79,3% da geração de energia no período era de fontes renováveis, e que cerca de 70,6% eram geradas por hidrelétricas. Esses dados subsidiavam o discurso de que as hidrelétricas são fontes renováveis, geradoras de energia limpas. Atualmente o discurso que relaciona “usina hidrelétrica como fonte renovável” merece mais debates e mais pesquisas, sobretudo as hidrelétricas na Amazônia. De acordo com os estudos de Bertassoli Jr. *et al.* (2021), usinas hidrelétricas de grande porte, como a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, no estado do Pará, são fontes geradoras de gases de efeito estufa, além dos altos passivos sociais e ambientais.

Outras justificativas para não aderirem ao consórcio do ITER foi que no início dos anos 2000 ainda havia a incerteza do resultado da fusão, além da falta de definição do modelo de associação proposto pelo ITER para países considerados periféricos como o Brasil e, por fim, a ausência de um programa nacional robusto de inovação e tecnologia para a energia de fusão no Brasil (GALVÃO, 2021; PESTANA, 2015).

Atualmente, a geração de energia por fusão termoelétrica é mais do que uma promessa de energia mais limpa e segura capaz de enfrentar demandas energéticas no mundo, e o desenvolvimento dessa tecnologia já é uma realidade:

[...] seu efeito de arraste tecnológico já é uma realidade do ponto de vista das autoridades de fomento à inovação tecnológica (sobretudo em duas áreas de inegável interesse para um país como o Brasil: novos materiais e supercondutores de nióbio). Chineses, europeus, indianos, japoneses, russos, sul-coreanos não investiriam sem boa razão um volume de recursos públicos da ordem de 2,5 bilhões de dólares ao ano [...]. (PESTANA, 2015, p. 236-237, parênteses no original).

Apesar de o Brasil não ter se tornado oficialmente membro do consórcio EUROfusion nem ter aderido à estrutura organizacional do ITER, firmou em 2009 um acordo de cooperação científica bilateral com a Comunidade Europeia da Energia Atômica (EURATOM). Esse acordo visava, sobretudo, o intercâmbio técnico, a realização de visitas de pesquisadores e a participação em projetos exploratórios de fusão nuclear conduzidos na Europa, com ênfase no ITER. Como consta na introdução do referido acordo: “Promover a cooperação na área das atividades de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico, desejando continuar a incentivar o desenvolvimento da energia de fusão como fonte de energia potencialmente aceitável do ponto de vista ambiental, economicamente competitiva e virtualmente ilimitada” (Acordo Brasil – EURATOM, 2009).

Dessa forma, por meio desse instrumento de cooperação, o Brasil está inserido em iniciativas voltadas ao desenvolvimento tecnológico de experimentos com energia de fusão, com ênfase tanto nos tokamaks quanto em alternativas a essa tecnologia. O artigo 1º do acordo estabelece o objetivo de:

“[...] intensificar a cooperação entre as Partes nos domínios abrangidos pelos respectivos programas de fusão, com base no princípio da mutualidade e da reciprocidade em geral, a fim de desenvolver os conhecimentos científicos e a capacidade tecnológica subjacentes a um sistema de energia de fusão” (Acordo Brasil – EURATOM, 2009).

As áreas de conhecimento previstas no Acordo incluem “tecnologia de energia de fusão magnética; teoria do plasma e física de plasma aplicada; políticas e planos de programas, e outras áreas estabelecidas de comum acordo entre as partes por escrito, na medida em que sejam abrangidas pelos respectivos programas”. Além da valorização dos recursos humanos, Pestana (2015) e Galvão (2021) destacam a relevância do Brasil no cenário internacional da pesquisa em fusão nuclear,

sobretudo por deter jazidas de nióbio e lítio — matérias-primas fundamentais para a produção dos metais supercondutores utilizados no ITER. O nióbio é extraído de minérios como columbita-tantalita, loparita e pirocloro, abundantes no território brasileiro. Já o lítio, um metal extremamente leve, é obtido a partir de sais minerais e minérios amplamente utilizados em tecnologias de ponta, como os supercondutores empregados em reatores de fusão nuclear.

Além disso, por meio de acordos de cooperação, pesquisadores continuam apresentando resultados para a pesquisa no Brasil, como: “O desenvolvimento de algoritmos no processamento de imagens de alta velocidade para a detecção em tempo real de MARFES no JET e o aprimoramento do sistema de diagnósticos ativos de auto modos torodais de Alfvén” (GALVÃO, 2021). Resultados demonstram que, com ênfase no JET, do Reino Unido, o Acordo Brasil-EURATOM de 2009 tem sido um instrumento importante para o intercâmbio de pesquisadores brasileiros que no futuro executarão o Programa Nacional de Fusão Nuclear, que ainda não fora implantada.

Considerações finais

Conforme Pyenson e Sheets-Pyenson (1999) descreve sobre a militarização da ciência em países como França, Reino Unido e Estados Unidos, que incorporou o conhecimento científico às estratégias de poder e soberania nacional, no Brasil, esse processo se intensificou durante o regime militar (1964-1985), quando a formulação de políticas científicas passou a privilegiar áreas consideradas sensíveis ou estratégicas para o Estado, principalmente no campo da energia nuclear. Nesse contexto, a formulação, em 1981, do Programa Nacional de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada (PNFPFTC) pode ser compreendida como uma tentativa de institucionalizar uma iniciativa originalmente acadêmica, desenvolvida desde a década de 1970, sobretudo porque não recebeu o investimento necessário, conforme o texto do PNFPFTC explicita, que para alcançar as metas propostas os recursos eram escassos. Por outro lado, o dossiê do PNFPFTC representa um importante documento de memória das atividades desenvolvidas desde o início dos anos 1970 até 1981. Nele constam a lista dos equipamentos existentes nos laboratórios

nacionais, informações detalhadas sobre as linhas de pesquisa, nomes dos coordenadores e pesquisadores, equipes técnicas envolvidas, e os recursos materiais disponíveis em cada instituição.

O ano de 1974 é tido como o marco inicial das pesquisas em fusão no Brasil, embora a energia de fusão não tenha figurado entre as prioridades centrais da política nuclear brasileira, a formulação em um programa nacional revela o reconhecimento de seu potencial estratégico, ainda que limitado. Contudo, a ausência de investimentos estruturantes impediu a consolidação dessa política como uma diretriz de Estado, transferindo para os pesquisadores a responsabilidade pela manutenção e articulação das iniciativas, o que marca a persistente fragilidade da governança científica nacional em áreas de fronteira. Pois a opção do Brasil foi pela energia nuclear de fissão, que concentrou os principais investimentos e esforços por parte do Estado, dessa forma, os investimentos para as pesquisas de energia termonuclear de fusão nunca receberam a atenção necessária, apesar dos resultados alcançados e o esforço dos pesquisadores em construir propostas de projetos importantes como foi com o TBR- 2 e o TBR-E.

Em 2018, foi apresentado o Programa Nacional de Fusão Nuclear (PNFN), cuja meta central é a construção de um Laboratório Nacional de Fusão — proposta que remonta ainda aos anos 1980, conforme já indicava o Programa Nacional de Física de Plasma e Fusão Termonuclear Controlada (PNFPFTC). Em agosto de 2021, durante o I Seminário de Fusão Nuclear, o novo PNFN foi oficialmente apresentado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) pela CNEN, com apoio do INPE e do IFUSP. Sua implementação está estruturada em três eixos principais: (1) a atualização tecnológica dos tokamaks atualmente em operação no país — o TCABR (IFUSP), o ETE (INPE) e o NOVA (UFES); (2) a concepção do futuro Laboratório de Fusão Nuclear (LFN), previsto para ser instalado em Iperó-SP e ainda em fase de projeto e articulação; e (3) a ampliação da formação de pesquisadores, uma vez que o número atual de especialistas e estudantes ainda é insuficiente para sustentar uma infraestrutura nacional de grande porte de forma autônoma. Apesar da apresentação oficial, o novo programa ainda não foi formalmente sancionado como política de Estado, nem conta com previsão orçamentária plurianual ou metas definidas.

A consolidação do Programa Nacional de Fusão Nuclear dependerá, portanto, não apenas da continuidade dos esforços científicos e institucionais, mas também de uma decisão política clara que o eleve ao status de política de Estado. Somente com financiamento estável, metas de longo prazo e integração efetiva entre instituições de pesquisa, governo e setor produtivo será possível ao Brasil ocupar um papel relevante no cenário internacional da fusão nuclear e garantir soberania tecnológica em uma das áreas mais promissoras da transição energética global.

Agradecimentos

Ao Dr. Gildo Magalhães dos Santos Filho, pela supervisão e acompanhamento.

Ao Dr. Munemasa Machida, do Grupo de Física de Plasma e Fusão Termonuclear Controlada do Laboratório de Física Gleb Wataghin da UNICAMP, pelas informações e acesso ao arquivo particular.

A Maria Emília Frade de Mello, da Biblioteca Técnico Científico da CNEN, pelo apoio e acesso irrestrito aos documentos do acervo.

Referências

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR (ABEN). *Brasil Nuclear 53*. Disponível em: <https://aben.com.br/download/brasil-nuclear-53/>. Acesso em: jan./maio 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES (ABDAN). Disponível em: <https://abdan.org.br>. Acesso em: 29 jun. 2022.

BERTASSOLI JR., Dailson J.; SAWAKUCHI, Henrique O.; ARAÚJO, Kleiton R. de; CAMARGO, Marcelo G.P. de; ALEM, Victor A. T.; PEREIRA, Tatiana S.; KRUSCHE, Alex V., BASTVIKEN, David; RICHEY, Jeffrey E.; SAWAKUCHI, André O. How green can Amazon hydropower be? Net carbon emission from the

largest hydropower plant in Amazônia. *Science Advances*, v. 7, eabe1470, 2021. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abe1470>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. Acordo entre o Governo da República Federativa do Brasil e a Comunidade Europeia da Energia Atômica sobre Cooperação no Domínio da Pesquisa em Energia de Fusão. Bruxelas, 22 jul. 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/mre/pt-br>. Acesso em: novembro de 2022.

CANAL, Gustavo Paganini; LUDWIG, Gerson Otto; GALVÃO, Ricardo Magnus Osório. Proposta do Programa Nacional de Fusão Nuclear. CNEN, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/fusao-nuclear-seminarios-tecnicos>. Acesso em: julho de 2022.

CASH, D. W. et al. Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 100, n. 14, p. 8086-8091, 2003. DOI: 10.1073/pnas.1231332100.

CHINA. Ministry of Science and Technology. The National High Technology Research and Development Program (863 Program). Beijing: MOST, 2020. Disponível em: <https://en.most.gov.cn>. Acesso em: 26 jun. 2025.

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Biographies of CAS Academicians. Beijing: CAS, 2020. Disponível em: <http://english.cas.cn>. Acesso em: 26 jun. 2025.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Diretoria Executiva III: Programa Nacional de Física do Plasma e Fusão Termonuclear Controlada. Rio de Janeiro, 1981.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear. Brasília, 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assuntos/pesquisa-e-tecnologia/fusao-nuclear/arquivos/programa-nacional-de-fusao-nuclear.pdf>. Acesso em: jul. 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Biblioteca Digital Memória CNEN. Disponível em: <http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Brasil>. Acesso em: 3 jul. 2022a.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Proposta do Programa Nacional de Fusão Nuclear. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/fusao-nuclear-seminarios-tecnicos>. Acesso em: jul. 2022b.

- CULHAM CENTRE FOR FUSION ENERGY (CCFE). Disponível em: <https://ccfe.ukaea.uk/about-ccfe/history/>. Acesso em: 23 mar. 2023
- EMPRESA PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: jul. 2022.
- EUROFUSION. Fusing energy: the road to sustainable fusion power. Disponível em: <https://www.euro-fusion.org>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- FERREIRA, Júlio G. Modernização do Experimento Tokamak Esférico – ETE. Apresentação PPT, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/fusao-nuclear-seminarios-tecnicos>. Acesso em: jul. 2022.
- GALVÃO, Ricardo M. O. Acordo Brasil Euratom. Apresentação PPT, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/fusao-nuclear-seminarios-tecnicos>. Acesso em: jul. 2022.
- GONÇALVES FILHO, Orlando J. A. Laboratório de Fusão Nuclear. Apresentação PPT, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/fusao-nuclear-seminarios-tecnicos>. Acesso em: jul. 2022.
- HANNIGAN, John. Sociologia Ambiental. Tradução de Annahid Burnett. Petrópolis: Vozes, 2009.
- IFUSP, INPE, UNICAMP. The TBR-E Project. Basic Engineering Design. São Paulo: INPE, 1991.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Disponível em: <http://www.lap.inpe.br/>. Acesso em: 5 mar. 2022.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Overview of fusion research and development in Korea. IAEA–TECDOC–1250 CD, 2001. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/p1250-cd/papers/ppca2-iv.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Nuclear power and secure energy transitions: from today’s challenges to tomorrow’s clean energy systems. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The path to a new era for nuclear energy. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>. Acesso em: 21 jul. 2025.

INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR (ITER). Disponível em <https://www.iter.org>. Acesso em: 16 nov. 2022.

INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR (ITER). The way to new energy. Disponível em: <https://www.iter.org>. Acesso em: 20 jun. 2025.

KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE (KAERI). História institucional e projetos de pesquisa. Disponível em: <https://www.kaeri.re.kr/board/view?boardStyle=Text&linkId=4792&menuId=MENU00718>. Acesso em: 27 jun. 2025.

MIT PLASMA SCIENCE AND FUSION CENTER. Fusion research overview. Disponível em: <https://www.psfc.mit.edu>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MOTOYAMA, Shozo; GARCIA, João Carlos V. O Almirante e o Novo Prometeu: Álvaro Alberto e a C&T. São Paulo: Editora da UNESP; Centro de Interunidade de História da Ciência e Tecnologia, 1996.

NASCIMENTO, Ivan Cunha; MACHIDA, Munemasa; TUSZEL, André Gustave; SHAO-HUA, Wang; YUN-HUI, Chen; BRUSATI, Marco; PAULETTI, Ruy M.O; SÁ, Wanderley Pires de; DEGASPERI, Tadeu; CALDAS, Iberê Luiz; FAGUNDES, Aluísio Neves; ELIZONDO, Juan Iraburu; VANNUCCI, Álvaro; GALVÃO, Ricardo M.O; SILVA, Ruy Pepe da. TBR- 2 Project. Brazilian Tokamak 2 (preliminary report). São Paulo: Instituto de Física – USP, 1990.

NUCLEAR FOR CLIMATE. European Nuclear Society. Disponível em: <https://euronuclear.org>. Acesso em: 29 jun. 2022.

PESTANA, Augusto. ITER: os caminhos da energia de fusão e o Brasil. Brasília: FUNAG, 2015.

PYENSON, Lewis; SHEETS-PYENSON, Susan. Servants of nature: a history of scientific institutions, enterprises, and sensibilities. New York: W.W. Norton & Company, 1999.

SANTOS FILHO, Gildo Magalhães dos; CARDOSO, Camila Martins. Álvaro Alberto: do arquivo à vida. Revista Brasileira de História da Ciência, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 618-631, jul./dez. 2023. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/930>. Acesso em: jul. 2025.

VIEIRA, Cassio Leite. Cesar Lattes arrastado pela história. Rio de Janeiro: CBPF, 2017.

WEINBERG, Alvin M. Impact of large-scale science on the United States. *Science*, Washington, v. 134, n. 3473, p. 161-164, 21 jul. 1961. DOI:10.1126/science.134.3473.161.

WIKIPÉDIA. Tokamak. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tokamak>. Acesso em: 4 jul. 2025.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). Nuclear for climate. Disponível em: <https://euronuclear.org/nuclear-for-climate/>. Acesso em: 29 jun. 2022.