

PROGRAMA DE REATORES RÁPIDOS DO INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS

Yuji Ishiguro

Instituto de Estudos Avançados do
Centro Técnico Aeroespacial

RESUMO

É considerado o problema do suprimento de energia elétrica no próximo século. O potencial hidrelétrico será limitado, realisticamente, a 150 GW e esgotado em cerca de 20 anos. As fontes alternativas confiáveis são poucas e a energia nuclear será a melhor opção nos aspectos de independência energética, riscos a saúde humana, e efeitos ambientais. Se o povo brasileiro deseja ter uma vida moderna, como a europeia atual, no próximo século, deve ser iniciada logo uma preparação adequada.

INTRODUÇÃO

No Instituto de Estudos Avançados do Centro Técnico Aeroespacial, foi iniciado, em 1979, um programa de estudos de utilização do reator regenerador rápido para o suprimento de energia elétrica no futuro do Brasil. Análises da situação energética do País, das fontes alternativas nacionais, e do potencial energético e avanço tecnológico da energia nuclear levaram à conclusão de que uma utilização intensiva do reator regenerador rápido será a melhor, praticamente a única, solução para garantir a continuidade do desenvolvimento econômico-social, a soberania nacional, e a proteção da saúde humana e do ambiente. Neste artigo, resumimos os resultados dos estudos e propomos um programa de desenvolvimento tecnológico do reator regenerador rápido.

NECESSIDADE DA ENERGIA NUCLEAR

O suprimento adequado e seguro de energia elétrica é um dos requisitos fundamentais para o funcionamento de uma sociedade moderna. A história dos países industrializados e a comparação das situações atuais no mundo mostram que o nível do padrão de vida é, em geral, proporcional ao consumo de energia elétrica. A atual capacidade de geração elétrica no Brasil é cerca de 44 GW, o que equivale a menos que 0,4 kW por habitante. Em comparação, a capacidade

geradora por habitante nos países europeus e Japão é ~1,4 kW e nos Estados Unidos ~2,9 kW. À medida que o Brasil for se industrializando, o poder aquisitivo do povo aumentará e a demanda de energia elétrica crescerá na direção dos níveis atuais nos países desenvolvidos. Uma estimativa da capacidade geradora necessária está mostrada na Tabela 1. Por outro lado, a projeção da capacidade instalada no ano 2020, feita pela SEPLAN e CNPq, é a seguinte: provável 269 GW, alta 331 GW, baixa 219 GW (Figura 1).

Tabela 1: Capacidade de geração elétrica

ANO	POPULAÇÃO ESTIMADA (milhão)	CAPACIDADE (GWe) CORRESPONDENTE AO CONSUMO ATUAL	
		EUROPEU	AMERICANO
1987	130	182	377
2010	200	280	580
2017	235	329	682

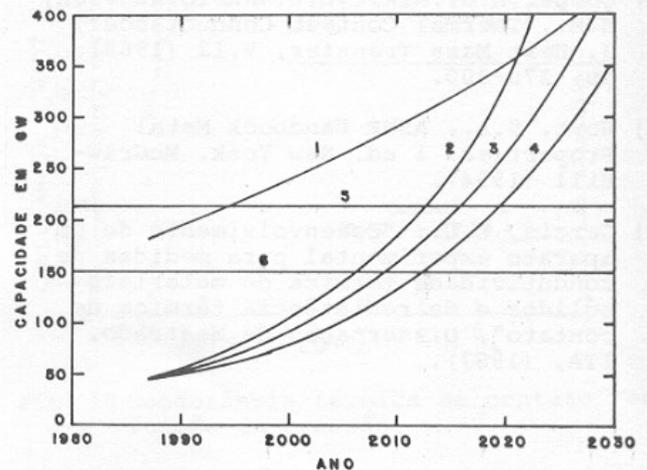


Figura 1: Capacidade correspondente ao nível de consumo per capita atual europeu e as projeções feitas pela SEPLAN e CNPq.

- 1- capacidade correspondente ao nível atual europeu com uma taxa de crescimento da população de 2% ao ano;
- 2,3,4 - projeção pela SEPLAN e CNPq, alta, provável e baixa;
- 5- potencial hidrelétrico estimado;
- 6- capacidade hidrelétrica máxima provável.

Destas estimativas podem ser tiradas as seguintes conclusões: (1) mesmo com o crescimento mais rápido previsível, o Brasil precisará de mais que 30 anos para atingir o nível do padrão de vida europeu atual; (2) a capacidade de geração elétrica chegará ao nível de 300 GW em 30-40 anos e crescerá a uma taxa de 10-15 GW por ano; (3) é preciso um esforço enorme no sentido de aumentar a capacidade; e (4) por volta do ano 2010 em diante, o Brasil precisará de fontes alternativas.

As possíveis fontes para a geração elétrica comercial estão mostradas na Tabela 2 juntamente com os efeitos sócio-ambientais, as áreas de terra necessárias, os problemas particulares, e outros fatores.

Os potenciais hídricos são as fontes preferidas, mas não são desprezíveis os riscos associados a este modo de geração elétrica. A necessidade de alagamento de grandes áreas (de 10.000 até mais de 100.000 hectares por GW) pode causar transtornos sociais, perda de produção agrícola e efeitos adversos ao ambiente. Também, a barragem pode falhar e causar perda de vidas humanas. O potencial total é estimado em cerca de 200 GW. A maior parte deste poderá ser aproveitado no futuro próximo, mas o potencial realizável será, provavelmente, no máximo, 150 GW.

Nas primeiras décadas do próximo século, daqui a menos de 30 anos, o potencial hidrelétrico estará praticamente esgotado. O Brasil necessitará, então, de outras fontes energéticas para continuar o seu desenvolvimento ou, pelo menos, manter o nível do padrão de vida, face ao crescimento da população.

Hoje, nos países industrializados, os combustíveis fósseis estão sendo utilizados em grande escala para geração elétrica. A reserva mundial de carvão é grande, mas a brasileira é pequena. A emissão de ácidos e outros produtos, devido à queima do carvão nas usinas termoelétricas, causa danos à saúde humana e ao ambiente.

As reservas de petróleo e gás natural são bem limitadas no Brasil e no mundo e devem ser reservadas para usos mais específicos, tais como: combustível para transporte, combustível doméstico e matéria-prima para indústrias químicas.

A geração elétrica, em grande escala, com combustíveis fósseis só poderá ser realizada na base de importação. Além dos malefícios na balança comercial, a dependência de importação pode comprometer a soberania do País e aumentar a tensão internacional.

As recentes descobertas científicas indicam que as capacidades do planeta Terra são bem limitadas e podem ser afetadas por atividades humanas, com consequências graves de longa duração. A liberação em um ou dois séculos, do carbono acumulado nos combustíveis fósseis durante centenas de milhões de anos e o desmatamento que vem progredindo, em grande escala, mundialmente podem modificar o clima global. A utiliza

Tabela 2: Possíveis fontes para a geração elétrica

fonte	potencial GW. ano	estado da tecnologia	impacto sócio-ambiental	área da usina km ² /GWe	outros problemas
Hidro	< 213 GW	comercial	falha da barragem	100 - 1000	localização
Carvão	< 1500		ácidos, CO ₂	- 1	transporte
Petróleo	pequeno		ácidos, CO ₂	- 1] outros usos
Gás	pequeno		CO ₂	- 1	
Lenha	<100 GW		não comercial	erosão, poluição	- 2000
Turfa	-60	desconhecido		- 1	
Solar	grande	- 100 ?			
Eólica	?	?			
Mar	?				
Fusão	sem limite	não chegou ao estado da fissão em 1942		- 1	tecnologia mais difícil que fissão
PWR	~ 1500	comercial	mínimo	- 1] aceitação capacitação
RRR	>100.000	- comercial	mínimo	- 1	

ção da energia nuclear pode diminuir estes efeitos.

Os potenciais hídricos de baixa qualidade, tal como o de Balbina, causam efeitos sociais e ecológicos mais acentuados do que os discutidos anteriormente.

As energias solar e eólica não estão comprovadas sócio-econômico-tecnologicamente para a geração elétrica comercial. Os problemas principais são a necessidade de grandes áreas de terra, a dependência da potência do tempo e hora, e o alto custo.

A utilização da energia de biomassa parece tecnologicamente viável, mas precisa de grandes áreas de terra e a sua contribuição será limitada.

A utilização da energia do mar não está comprovada tecnologicamente para a geração elétrica de porte comercial e a sua contribuição será desprezível no futuro previsível.

A conservação é necessária, mas o seu efeito será bem limitado e não poderá eliminar a necessidade de uma maior capacidade de geração elétrica.

Todas estas possibilidades devem ser exploradas e aproveitadas o máximo possível, mas não poderão resolver o problema do suprimento de energia elétrica no próximo século. A utilização intensiva da energia nuclear será inevitável.

A energia nuclear tem sido utilizada para geração elétrica desde a década de 50 e, hoje, cerca de vinte países a estão utilizando intensivamente. A capacidade total das usinas nucleares no mundo é maior que 265 GW, cerca de seis vezes a capacidade atual de geração elétrica do Brasil, gerando mais que 16% da energia elétrica mundial. As maiores participações nucleares na geração elétrica são: 70% na França, 67% na Bélgica, 50% na Suécia, 44% na Coreia do Sul e Taiwan, 40% na Suíça, 38% na Finlândia e 30% na Bulgária, Espanha e Alemanha Ocidental. As maiores capacidades nucleares são: 90 GW nos Estados Unidos, 45 GW na França, 31 GW na União Soviética e 27 GW no Japão.

A emissão de materiais radioativos na operação normal das usinas nucleares é bem pouca e pode ser considerada insignificante, quando comparada aos níveis das radiações naturais. Lamentavelmente, alguns acidentes aconteceram em instalações nucleares. O de Chernobyl foi causado por uma série de erros humanos inacreditáveis no procedimento operacional de usinas ocidentais, tendo sido agravado pelas características do reator, inferiores às de Angra.

A despeito deste e de outros acidentes, a energia nuclear, usada para geração elétrica, é uma das tecnologias

menos poluentes e perigosas. Os povos dos países citados anteriormente reconhecem este fato e aceitam os riscos associados a sua utilização como um pequeno preço para melhorar as condições de vida. A dependência de importação dos combustíveis fósseis faz com que o desenvolvimento do País possa ser prejudicado pelo interesse de outros países, tais como os da OPEP, e que a balança comercial possa piorar, trazendo os economistas do FMI para o País. A utilização da energia nuclear pode diminuir estes perigos.

A área de terra, menor que 100 hectares, necessária para uma usina nuclear é insignificante se comparada àquela necessária às usinas hidrelétricas e às baseadas em energias solar, eólica, e de biomassa. Os efeitos ambientais e sociais são mínimos. A questão da terra é de difícil solução; mesmo com o imenso território que o Brasil possui, não será fácil reservar milhões de hectares para usinas elétricas. A utilização da energia nuclear alivia a demanda de terra e contribui para a proteção do ambiente.

Contudo, o urânio economicamente recuperável também é um recurso limitado e, se for usado somente nos reatores térmicos, tais como os de Angra, pode ser esgotado em algumas décadas.

Os reatores regeneradores rápidos, que produzem mais combustível do que consomem, podem aumentar este potencial por 50-60 vezes e tornar o urânio um recurso energético praticamente inesgotável. Os países industrializados estão desenvolvendo o reator refrigerado a sódio (liquid metal reator - LMR) desde a década de 40 e, atualmente, as tecnologias estão basicamente estabelecidas.

Os recursos de urânio e tório no Brasil são estimados em cerca de 300 mil e um milhão de toneladas, respectivamente. Considerando que 200 mil toneladas de urânio sejam recuperáveis, podem ser operadas menos que 40 usinas iguais à Angra II por 30 anos, sem reciclagem, com uma energia total menor que 1500 GWe.ano. Utilizado nos reatores rápidos, o potencial da mesma quantidade de urânio será da ordem de 100.000 GWe.ano. O tório também poderá ser utilizado eficientemente nos reatores rápidos com um potencial cerca de três vezes o do urânio.

A necessidade de energia nuclear no Brasil não é imediata. Um potencial hidroelétrico de mais de 150 GW ainda está disponível no País. Embora tenha efeitos sociais e ambientais adversos, devido à inundação de grandes áreas, e o problema das localizações em relação aos centros de consumo, a maior parte deste recurso pode e deve ser aproveitado no futuro próximo. Provavelmente, até o ano

2010, a utilização intensiva da energia nuclear pode ser evitada no Brasil. Por outro lado, uma vez que os recursos hídricos tenham sido esgotados, praticamente todo o aumento da capacidade geradora, de 10-15 GW por ano, terá que ser suprido por energia nuclear. A utilização de reatores rápidos será a melhor, realisticamente a única, maneira de satisfazer esta necessidade.

Daqui a 20 ou 30 anos no máximo, quando uma utilização intensiva da energia nuclear for inevitável no Brasil, o urânio natural estará escasso no mercado mundial e os países industrializados estarão numa fase de transição da utilização de reatores dos tipos tradicionais, tais como os de Angra, para reatores rápidos.

Os reatores rápidos são mais eficientes e ainda mais seguros do que os de Angra. A reserva brasileira de combustíveis nucleares (urânio e tório), se usada em reatores rápidos, terá um potencial energético suficiente para suprir toda a energia elétrica a ser consumida no País durante séculos. A importação de combustíveis fósseis e urânio, e a dependência ao interesse de outros países, para o suprimento de energia elétrica, não serão necessários. Acreditamos que seja este o tipo de reator utilizado no Brasil do futuro.

PROGRAMA DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR

O programa adotado nos países industrializados é o seguinte: (1) reatores térmicos, principalmente reatores a água leve (PWR e BWR), são operados com urânio enriquecido ou natural, (2) os combustíveis gastos serão reprocessados para recuperar o plutônio produzido, e (3) a medida que as tecnologias amadurecem e o urânio vai sendo esgotado, reatores rápidos serão introduzidos utilizando o plutônio produzido nos reatores térmicos. Este programa padrão não será adequado para o Brasil.

O programa melhor, e único, que satisfaz a necessidade brasileira é introduzir os LMRs com urânio enriquecido.

A utilização de reatores térmicos prejudicaria a capacidade do sistema nuclear de geração elétrica e deve ser limitada ao mínimo. Considerando que 200 mil toneladas de urânio estejam disponíveis e que usinas nucleares têm uma vida operacional de 30 anos, a capacidade de um sistema de PWRs será menor que 50 GWe. O plutônio produzido será suficiente para iniciar menos que 50 usinas (1 GWe cada) de reatores rápidos. Somente na terceira geração, isto é, após 50-60 anos, o efeito da

regeneração nos reatores rápidos aparece e a capacidade do sistema pode ser aumentada. Por outro lado, se os LMRs forem introduzidos com urânio enriquecido, a capacidade inicial poderá ser ~ 150 GWe e o efeito da regeneração aparecerá na segunda geração. Em uma maneira simplificada, as capacidades, em GWe, nos programas proposto/padrão serão: 150/50, 300/50, 600/100, 1200/200, etc, em gerações sucessivas.

A característica de segurança inerente do LMR é superior à do PWR devido à baixa pressão e alta capacidade térmica do refrigerante e à sua capacidade de remoção do calor de decaimento por circulação natural, demonstrada em reatores existentes. Esta característica não somente contribui para melhor segurança operacional das usinas, mas também pode melhorar a percepção e aceitação pelo povo, que é um dos obstáculos atuais para utilização da energia nuclear.

Para realizar o programa proposto, é necessária uma reorientação do programa nuclear brasileiro nos seguintes sentidos: (1) o desenvolvimento tecnológico e industrial para o PWR deve ser limitado à operação e ao serviço dos reatores existentes e de alguns outros que poderão ser importados, (2) os recursos humanos e financeiros, as instalações de pesquisa, e as indústrias existentes deverão ser reorientados para o desenvolvimento mais rápido das capacidades domésticas de utilização do LMR, e (3) a formação de recursos humanos deve ser intensificada. A necessidade de usinas nucleares pode surgir antes da capacitação plena para o LMR e a construção de algumas usinas de PWR pode tornar-se inevitável. O consumo de urânio em até ~ 10 usinas não prejudicaria significativamente a capacidade do sistema de LMRs. O estabelecimento de um programa nacional para o desenvolvimento mais rápido do LMR, juntamente com o uso de fontes alternativas, poderá evitar a necessidade de uma maior utilização do PWR e o reprocessamento do combustível gasto não será necessário.

O programa padrão, além de tornar a energia nuclear incapaz de satisfazer a demanda, não diminui a necessidade de reatores rápidos. A capacitação tecnológica e industrial para o LMR será necessária mais cedo ou mais tarde. Os recursos humanos e financeiros no País estão bem limitados e já é difícil a capacitação para um tipo de reator. A melhor maneira é desenvolver o reator mais seguro e mais eficiente que servirá o País por todo o futuro por vir.

PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO LMR

O programa de desenvolvimento da tecnologia do LMR, adotado nos países avançados na área, consiste basicamente de três fases: (1) é construído um (ou mais) reator experimental para o estabelecimento da base técnico-científica, (2) em seguida é construída uma usina protótipo de baixa potência para o estabelecimento da base tecnológica para aplicação comercial, e (3) por fim, é construída uma usina de porte comercial padrão (atualmente 1000-1200 MWe) para a verificação da tecnologia em escala comercial.

Propomos, para o Brasil, que seja construída, na segunda fase, uma série de usinas, de baixo e médio porte, com reatores projetados com ênfase na segurança inerente. Usinas pequenas são mais fáceis e rápidas de se construir e mais apropriadas para o estabelecimento de sólidas bases tecnológicas e industriais. A construção em série facilita o licenciamento, construção e operação e reduz o custo. A demonstração da segurança e confiabilidade destas usinas aumentará a confiança da população. À medida que as tecnologias e as experiências amadurecerem, poderão ser introduzidas unidades maiores, projetadas com ênfase na eficiência, para estabelecer um sistema permanente de geração elétrica.

Um dos objetivos principais do reator experimental é o desenvolvimento de combustível e componentes. Para este fim será necessária uma potência de pelo menos 40 MW. Além do reator, serão necessários um laboratório para ensaios de combustíveis irradiados, uma usina para fabricação e reprocessamento de combustíveis, e uma usina para enriquecimento do urânio. Para dominar a tecnologia do sódio e o desenvolvimento de componentes, serão necessários vários circuitos ("loops") de sódio. Em seguida são apresentadas as capacidades estimadas destas instalações tendo como base um projeto de reator experimental de 40 MW.

O inventário do combustível é de 336 kg de urânio enriquecido a 82%. Cerca de 54 toneladas de urânio natural precisam ser processadas. A capacidade da usina de enriquecimento será de ~ 20 t de unidade de trabalho de separação por ano, a ser instalada com 3 a 4 anos de antecedência. A capacidade do laboratório para ensaios de combustível será de ~ 70 varetas irradiadas por mês, e a da usina de reprocessamento e re-fabricação de ~ 15 kg de combustível por mês.

O custo do reator experimental, incluindo o combustível inicial, será de 80-100 milhões de dólares e o custo total de pesquisa e desenvolvimento, até o

início da construção da primeira usina, será da ordem de um bilhão de dólares, distribuídos em um período de 15 a 20 anos. O orçamento para 1987 do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social é relatado ser de Cz\$ 291 bilhões (~ em julho de 1987, 6-7 bilhões de dólares). É previsto, no Plano de Metas do Governo para 1986-1989, um investimento de 21,6 bilhões de dólares no setor da energia elétrica, correspondendo a mais de 4 bilhões de dólares por ano. Para o desenvolvimento do LMR seria suficiente um investimento anual de somente um por cento de qualquer destes valores.

Os recursos humanos necessários, na fase de pesquisa e desenvolvimento intensivo, serão de 500 a 1000 pessoas de nível superior. Além das atividades centralizadas no reator experimental, será necessário pesquisa e desenvolvimento em várias áreas de ciência e tecnologia. Será necessária uma coordenação das atividades em instituições de pesquisa, universidades e indústrias, incluindo a formação de recursos humanos.

O desenvolvimento tecnológico e industrial do LMR na França, o caso mais rápido, demorou cerca de 30 anos desde a fase de estudos básicos até a operação da primeira usina de porte comercial padrão, Superphenix. Este tempo pode ser diminuído substancialmente em nosso caso por aproveitamento dos desenvolvimentos realizados nos países mais avançados na área.

O Brasil ainda dispõe de tempo para fazer uma preparação adequada antes que a necessidade surja. O custo financeiro será bem pouco, comparado ao montante da economia nacional, e existem recursos humanos e instalações suficientes para se iniciar um programa nacional de desenvolvimento tecnológico do reator rápido. O que falta, hoje, no País é uma decisão política e planejamento a longo prazo.

A ENERGIA NUCLEAR TEM RISCOS

A aversão do povo à energia nuclear parece estar baseada, principalmente, no medo exagerado das radiações, devido à falta de informações corretas. Este medo tem sido aumentado pelo sensacionalismo, em assuntos nucleares, de algumas pessoas proeminentes e da imprensa e pelo silêncio das comunidades técnico-científicas. É natural ter medo do incógnito, mas este pode ser superado por familiarização e educação. Nos países industrializados, especialmente na França e no Japão, o povo reconhece a necessidade e aceitam, sem medo irracional, a energia nuclear. Cientistas e engenheiros têm a responsabilidade de

esclarecer a população sobre a necessidade e os riscos e méritos relativos. A utilização da energia nuclear envolve riscos a saúde humana e ao ambiente, mas estes são incomparavelmente menores do que os aceitos normalmente pela população e os resultantes da não-utilização da energia nuclear.

Todas as atividades humanas são acompanhadas de riscos. As sociedades aceitaram e deram boas vindas aos resultados do desenvolvimento técnico-científico, tais como: aviões, automóveis e indústrias químicas. Cada tecnologia tem seus riscos próprios. Os aviões caem e centenas de pessoas morrem. Nas ruas e estradas do Brasil, dezenas de milhares de pessoas morrem por ano em acidentes de trânsito. Também ocorrem acidentes em usinas químicas e intoxicações por materiais venenosos, tais como agrotóxicos. Lixos químicos devem ser tratados e armazenados em lugares seguros, reservados para este fim, por tempo indefinido. Contudo, estes desenvolvimentos técnico-científicos, além de trazerem confortos e conveniências, eliminam maiores riscos em outras atividades e diminuem o risco global por meio de, por exemplo, melhorias nas condições de saúde, aumento da produção de alimentos, e diminuição de trabalhos duros e perigosos. O resultado é mostrado pelo fato de que a expectativa de vida em uma sociedade aumenta com o seu desenvolvimento.

Todas as pessoas estão recebendo radiações naturais, a toda hora e em todos os lugares. O nível de radiação que cada pessoa recebe é mais de 100 mrem por ano. Além disso, ela recebe 70-80 mrem de radiações, principalmente raios X, em tratamentos médicos. Em comparação, as radiações que ela receberia, devido à operação de usinas nucleares, é da ordem de 1 mrem por ano. Alguns acidentes aconteceram e outros poderão acontecer no futuro, mas o número de vítimas dos acidentes nucleares, até hoje, é menor que 50.

Os lixos atômicos também são uma preocupação do povo, mas já existem tecnologias suficientemente desenvolvidas. Atualmente, eles estão sendo tratados e armazenados, sem riscos a saúde humana ou ao ambiente, de maneiras muito melhores do que os lixos químicos.

Hoje, uma falha no suprimento de energia elétrica paralisaria uma sociedade moderna e a falta de suprimento adequado prejudicaria o desenvolvimento e causaria, direta e indiretamente, a perda de vidas humanas. Infelizmente, é impossível eliminar todos os riscos e devemos procurar diminuir o risco global. A utilização da energia nuclear envolve riscos, certamente, mas, se todos os

aspectos forem comparados, é a melhor opção.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento do Brasil parece estar atrasado cerca de 30 anos em relação aos países industrializados. Hoje, o País está com uma série de dificuldades, tais como: dívida externa; desemprego; problema dos sem-terra; analfabetismo; migração da população rural para os centros urbanos; poluição; danos ambientais; e falta de: alimentos, saneamento básico e atendimento médico para uma parte da população. A melhor maneira, e a única comprovada mundialmente, de resolver estas dificuldades é a educação, a industrialização, e a mecanização da agricultura. Estas medidas necessitam de um suprimento adequado e seguro de energia elétrica e desenvolvimento técnico-científico em geral.

No futuro imediato, podem e devem ser aproveitados os potenciais hídricos ainda disponíveis e as fontes alternativas, juntamente com as medidas de conservação. Contudo, em menos de 30 anos, o Brasil precisará de uma utilização intensiva da energia nuclear e uma preparação adequada deve ser iniciada logo. O custo do desenvolvimento básico é pouco e existem recursos humanos e instalações suficientes para iniciar um programa nacional, faltando uma decisão política, planejamento e coordenação de pesquisa e desenvolvimento.

O medo irracional das radiações deve e pode ser superado pela divulgação de informações corretas sobre a necessidade de suprimento de energia elétrica, os méritos e riscos relativos das fontes disponíveis, e as radiações em geral. As sociedades técnico-científicas têm a responsabilidade de esclarecer a população.

O desenvolvimento de uma fonte energética nacional segura servirá como uma base para realizar a aspiração do povo brasileiro a uma vida melhor. Um programa nacional de tecnologias avançadas pode servir como foco de desenvolvimento técnico-científico em geral. O domínio das tecnologias do reator rápido e os avanços nas áreas relacionadas podem contribuir para a segurança do País e tornar-se objeto de orgulho nacional.