FUTURO TECNOLÓGICO DA GERAÇÃO ELÉTRICA NUCLEAR

A geração nuclear é uma tecnologia madura, disponível hoje para ampla utilização.

Existem 64 usinas nucleares em construção no mundo.

LEONAM DOS SANTOS GUIMARÃES*
Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN)

SUMÁRIO

Introdução
Geração III e III+
Geração IV
Pequenos Reatores Modulares (SMR)
Reatores a Fusão Nuclear
Conclusões

INTRODUÇÃO

O estado da arte da tecnologia de geração elétrica nuclear é o resultado de mais de 50 anos de pesquisa, desenvolvimento e engenharia. Essa tecnologia está consolidada nas 437 usinas nucleares atualmente em operação. A estas se somam as usinas já descomissionadas, e representa uma efetiva experiência operacional de cerca de 15 mil reatores/ano¹. Os mais modernos projetos de usinas nucleares, hoje em construção, incorporam lições aprendidas dessa experi-

ência, assim como os mais recentes avanços tecnológicos para melhoria da segurança e da produtividade. A geração nuclear é uma tecnologia madura, com muito baixa emissão de carbono, que se encontra disponível hoje para ampla utilização.

Existem atualmente 64 usinas nucleares em construção no mundo (Argentina – 1, Brasil – 1, China – 26, Taiwan – 2, Finlândia – 1, França – 1, Índia – 7, Japão – 2, Coreia do Sul – 3, Paquistão – 2, Rússia – 11, Eslováquia – 2, Ucrânia – 2 e EUA – 3). Novas construções na Grã-Bretanha, no Canadá, na

---

* N.R.: Chefe de gabinete da Presidência da Eletronuclear. Colaborador frequente da *Revista Marítima Brasileira*.
1 Reatores/ano é uma medida de experiência operacional. A operação de um reator por um ano representa um reator/ano. 400 reatores operando em 50 anos seriam 20 mil reatores/ano.

Lituânia, na Belarus e nos Emirados Árabes Unidos deverão se iniciar em breve.

Tem-se convencionado classificar os projetos de usinas nucleares em “gerações”. Assim, as primeiras usinas comerciais, basicamente protótipos de demonstração industrial, são chamadas de Geração I. As usinas que compõem o parque nuclear atual em operação são chamadas de Geração II. Os projetos modernos e em construção são chamados de Geração III. Eles incluem diversas evoluções tecnológicas em relação à geração anterior, como, por exemplo, Instrumentação e Controle (I&C) digital e dispositivos para enfrentar acidentes severos (como recuperador de *corium*). Alguns deles são chamados de Geração III+, quando incluem também dispositivos inovadores de segurança intrínseca, como resfriamento passivo por circulação natural. Os projetos de Geração III são considerados para utilização até o final da década de 2020.

Encontram-se também em pesquisa e desenvolvimento futuras usinas nucleares para emprego após a década de 2020, chamadas de Geração IV. São conceitos bastante diversos dos atuais, que são basicamente fundamentados em reatores resfriados a água com combustível óxido de urânio, empregando novos tipos de combustíveis e fluidos de resfriamento.

Existe ainda uma classe de potenciais futuras usinas nucleares em pesquisa e desenvolvimento, baseada em pequenos reatores modulares (SMR – Small Modular Reactors). Envolve diversos conceitos, alguns a água e urânio, mas outros próximos aos conceitos da Geração IV.

Finalmente, existem os continuados esforços em viabilizar o emprego da fusão

nuclear na geração comercial de eletricidade, promessa tecnológica antiga e ainda não concretizada. Os desenvolvimentos atuais, porém, se mostram promissores.

GERAÇÃO III E III+

O AP-1000 (Advanced Project) é o modelo emblemático da Westinghouse. Embora seja majoritariamente da Toshiba do Japão, a Westinghouse tem a sua sede nos Estados Unidos da América (EUA). O AP-1000 é um reator a água pressurizada (PWR) com capacidade de aproximadamente 1.200 MW, sendo que as quatro primeiras unidades encontram-se num estágio avançado de construção na China

e quatro outras unidades em estágio inicial de construção nos EUA. O modelo também foi selecionado pela maioria das novas construções americanas planejadas e tem sido oferecido no Reino Unido e em outros mercados.

O EPR (Evolutive Pressurized Reactor) é o produto principal da Areva, principal grupo industrial nuclear europeu, controlado majoritariamente pelo Estado francês. É também um PWR avançado, que terá uma capacidade de 1.600 a 1.700 MW. As duas primeiras unidades encontram-se em construção na Finlândia e na França, e duas unidades adicionais na China, com possivelmente mais uma a ser iniciada na França. Acredita-se que haverá encomendas adicionais no Reino Unido, enquanto que outros estão sendo considerados também nos EUA.

A Areva desenvolve ainda dois projetos de potência menor, na faixa dos 1.000 MW: Atmea e ACE. O Atmea é uma *joint venture* com a MHI (Mitsubishi Heavy Industries), que vem sendo desenvolvido há alguns anos e cujos princípios de segurança foram certificados pela Autoridade de Segurança

Existem continuados esforços em viabilizar o emprego da fusão nuclear na geração comercial de eletricidade

Nuclear (ASN) francesa. O ACE (Areva-China-EdF) é uma iniciativa mais recente, fruto da cooperação com a EdF (Electricité de France) e a CGNPH (China Guangdong Nuclear Power Holding Company).

O ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) é o único dos modelos recentes já em operação, com quatro unidades no Japão. Mais dois ABWR estão sendo construídos em Taipei, na China. Essas unidades têm uma produção em torno de 1.300 MW, mas versões que chegam a 1.600 MW também são oferecidas. O projeto básico foi desenvolvido em conjunto pela GE (General Electric), dos EUA, pela Toshiba e pela Hitachi, estas duas últimas do Japão. Posteriormente, a GE e a Hitachi fizeram uma fusão das suas áreas nucleares.

O ESBWR, um desenvolvimento avançado do conceito do ABWR, é o último modelo oferecido pela GE-Hitachi. Sua produção se situará em torno de 1.600 MW. Nenhum pedido foi feito até agora, mas o modelo foi selecionado para algumas possíveis novas usinas nos EUA e na Lituânia.

O APWR (Advanced PWR) foi desenvolvido para o mercado japonês pela Mitsubishi Heavy Industries (MHI), sendo que se espera o início da construção de duas unidades num futuro próximo. Sua produção será em torno de 1.500 MW por unidade. A MHI também está oferecendo uma versão do APWR no mercado americano e foi selecionada para um possível projeto.

O VVER-1200 (também conhecido como AES-2006) é a versão mais avançada da série VVER do projeto PWR produzido pela indústria nuclear russa, agora sob o controle do grupo estatal nuclear Rosatom. Quatro unidades do VVER-1200 estão em construção na Rússia, cada uma com uma produção de energia em torno de 1.100 MW, e duas outras na Índia.

O ACR (Advanced Candu Reactor) é o novo projeto da Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL), controlada pelo governo

canadense. O Candu utiliza água pesada para moderar (ou desacelerar) nêutrons, tornando possível usar combustível à base de urânio natural. Entretanto, os ACR 1.200 MW utilizarão combustível levemente enriquecido, o primeiro projetado para isso. A AECL também oferece o Enhanced Candu 6, uma unidade de 700 MW utilizando urânio natural. Não houve nenhuma encomenda firme para esses modelos.

O APR-1400 é o mais recente projeto PWR da Kepco (Korean Electric Power Company), de 1.340 MW, com uma unidade em operação e outra em comissionamento, mas com muitas outras planejadas na Coreia do Sul. Baseia-se numa tecnologia da Combustion Engineering, atualmente de propriedade da Westinghouse, que foi posteriormente desenvolvida pela indústria coreana numa série de projetos mais avançados. O acordo de licenciamento ainda limita sua disponibilidade nos mercados de exportação, mas, no final de 2009, um consórcio liderado pela Kepco (com a participação da Westinghouse) ganhou um contrato para construir quatro APR-1400 nos Emirados Árabes Unidos.

O CPR-1000 é o principal modelo que está sendo produzido na China, com 16 unidades em construção. Esse modelo de 1.000 MW é uma versão modernizada do modelo Areva Generation II de 1980, cuja tecnologia foi transferida para a China. Um acordo feito em 2007 com a Westinghouse para a construção de quatro AP-1000 inclui a transferência dessa tecnologia para a China. As primeiras quatro unidades encontram-se em construção. Em um processo de transferência de tecnologia similar, a China está desenvolvendo o projeto AP-1400. Espera-se que esse projeto forme a base da sua próxima geração de usinas nucleares.

Os modelos PHWR (Pressurised Heavy Water Reactor) da Índia baseiam-se em um primeiro modelo Candu exportado do Canadá

nos anos 1960. As últimas unidades têm uma capacidade de 540 MW, sendo que unidades de 700 MW estão sendo projetadas. Embora constituam desenvolvimentos importantes a partir do projeto original, esses modelos são menos avançados do que os modelos da Geração III.

GERAÇÃO IV

Alguns conceitos próprios aos sistemas de energia nuclear da Geração IV já foram selecionados para desenvolvimento e utilização de futuras tecnologias, para aplicação após 2020:

– Reator rápido refrigerado a sódio – *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR): Muitos protótipos do SFR já foram construídos e estão funcionando em alguns países, tornando-o uma das tecnologias mais solidamente estabelecidas da Geração IV. Os modelos SFR apresentam um espectro de nêutrons rápido, sistema de refrigeração por sódio líquido e um ciclo de combustível

fechado. Modelos grandes (que chegam a 1.500 MW) utilizam como combustível óxido misto de urânio e plutônio, com instalações de reciclagem centralizadas. Modelos pequenos na dimensão de 100MW, usando combustível metálico e instalações de reciclagem no mesmo espaço, também estão sendo considerados. Os modelos SFR têm uma temperatura de saída relativamente baixa (550 °C), limitando seu uso a aplicações não elétricas. A redução de custos de capital e o aumento da segurança passiva são importantes objetivos de P&D (pesquisa e desenvolvimento), juntamente com o

desenvolvimento de tecnologias avançadas de reprocessamento de combustível.

– Reator de temperatura muito elevada – *Very High Temperature Reactor* (VHTR): O principal interesse do conceito VHTR é a sua capacidade de produzir altas temperaturas (acima de 1.000° C), necessárias para a produção de hidrogênio e calor para processos industriais. Entretanto, os modelos VHTR não permitiriam o uso de um ciclo de combustível fechado. Os modelos de referência estão em torno de 250 MW de potência elétrica (600 MW de potência térmica), com refrigeração por hélio e espectro de nêutrons térmicos por moderação a grafite. O combustível tem a forma de partículas revestidas, formadas dentro

de blocos ou “pelotas” de acordo com o projeto de núcleo adotado. Os modelos VHTR baseiam-se em protótipos construídos no passado pelos EUA e pela Alemanha, incorporando grande esforço adicional de P&D. Os desafios restantes incluem o desenvolvimento de materiais com melhor resistência à temperatura e o projeto e produção do combustível.

– Reator supercrítico refrigerado a água – *Super-Critical Water-cooled Reactor* (SCWR): Os modelos SCWR são de água leve (*Light Water Reactor*, “família” dos PWR e BWR), operando em altas temperaturas e pressões, acima do ponto crítico termodinâmico da água; isso permite simplificação do projeto e grande melhoria de eficiência térmica. Os projetos de referência têm potência acima de 1.500 MW, usam urânio ou óxido misto e mantêm temperaturas de saída acima de 625 °C. Os modelos SCWR podem ter também um espectro de nêutrons térmico ou rápido; no caso rápido,

Alguns conceitos próprios aos sistemas de energia nuclear da Geração IV já foram selecionados para desenvolvimento e utilização de futuras tecnologias, para aplicação após 2020

poderá utilizar um ciclo de combustível fechado baseado em instalações de reciclagem associadas. Os desafios mais importantes de P&D envolvem a superação de questões relacionadas à segurança, assim como o desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão a altas temperaturas.

– Reator rápido refrigerado a gás – *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR): O projeto de referência do sistema GFR inclui um reator de 1.200 MW resfriado a hélio com um espectro de nêutrons rápidos e um ciclo de combustível fechado com uma usina de reprocessamento no próprio sítio. Emprega uma turbina de hélio de ciclo direto com alta eficiência térmica para geração de eletricidade. A mais alta temperatura de saída (850 °C) também pode ser desejável para produção de hidrogênio ou calor para processos industriais. Os principais desafios de P&D incluem o desenvolvimento de novos combustíveis (tal como combustíveis de cerâmica revestida ou partículas de combustível) e materiais, o projeto do núcleo e da turbina de hélio.

– Reactores rápidos refrigerados a chumbo – *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR): O sistema LFR apresenta um reator refrigerado a metal líquido com espectro rápido e um ciclo de combustível fechado, já bastante testado na propulsão de submarinos nucleares russos. O chumbo líquido é um fluido de resfriamento relativamente inerte, que oferece vantagens de segurança em relação ao sódio, sendo ao mesmo tempo abundante e barato. Os modelos pesquisados até hoje incluem as pequenas (20 MW) e médias (600 MW) unidades. O projeto típico seria composto por unidades modulares, com período de troca de combustível muito longo (15-20 anos). Inicialmente, os modelos LFR seriam desenvolvidos para produção de eletricidade, mas versões funcionando a alta temperatura poderiam permitir a produção de hidrogênio. As necessidades mais importantes de P&D

concentram-se em combustíveis, materiais e controle de corrosão.

– Reator a sal fundido – *Molten Salt Reactor* (MSR): Nos MSRs, o combustível é dissolvido em um fluido de resfriamento à base de sal fluoreto fundido. O combustível líquido evita a necessidade da fabricação e permite um ajuste contínuo da mistura combustível. O conceito corrente aplica-se a um reator de nêutrons rápidos de 1.000 MW, com ciclo de combustível fechado. Pode ser usado na composição do combustível tório, plutônio e outros actinídeos menores. Um HTR avançado resfriado a sal fluoreto líquido também está sendo estudado. A química do sal fundido, a resistência à corrosão e sua manipulação, assim como o ciclo do combustível e os materiais empregados, constituem os principais desafios em P&D.

Reactores de tório também têm sido oferecidos, utilizando o isótopo de tório naturalmente abundante, Th-232, como material fértil. No reator, o Th-232 é transmutado no isótopo de urânio artificial fissil U-233, que é o combustível nuclear. Ao contrário do urânio natural, o tório natural contém somente vestígios de material fissil (tal como Th-231), que são insuficientes para iniciar uma reação em cadeia. É necessária a presença de um material fissil adicional ou outra fonte de nêutrons para iniciar a reação em cadeia. Em um reator com combustível de tório, o Th-232 absorve nêutrons para produzir U-233. Isso é comparável ao processo em reatores de urânio através do qual o U-238 fértil absorve nêutrons para formar o Pu-239 fissil. Dependendo do projeto do reator e de seu ciclo combustível, o U-233 gera fissões no núcleo do reator ou é separado quimicamente do combustível usado e se transforma num novo combustível nuclear. O ciclo de combustível do tório mostra ter muitas possíveis vantagens sobre o ciclo de combustível do urânio, incluindo a grande

abundância do tório na crosta terrestre, propriedades físico-químicas e nucleares superiores, melhor resistência à proliferação de armas nucleares e menor produção de plutônio e actinídeos.

Algumas dessas tecnologias serão adequadas a uma ampla variedade de locais e a possíveis novas aplicações. Cada uma delas envolve um avanço tecnológico significativo e exigirá demonstração em escala real antes de sua utilização comercial. Tais sistemas poderão começar a contribuir para a capacidade nuclear antes de 2050.

PEQUENOS REATORES MODULARES (SMR)

Há também um renascimento do interesse em pequenas e mais simples unidades

para a geração elétrica nuclear, e para geração de calor para processos industriais, liderado pelo Department of Energy dos EUA (US-DOE). Esse interesse em pequenas e médias usinas nucleares é impulsionado pelo desejo de reduzir o impacto dos custos de capital e para geração em sistemas isolados, longe de redes de transmissão. As tecnologias envolvidas são muito diversas.

Hoje em dia, devido ao alto custo de capital das grandes usinas nucleares e à necessidade de manutenção de redes elétricas de pequeno porte, com menos de 4 GWe, há um movimento para desenvolver pequenas unidades. Estas podem ser construídas de forma independente ou como módulos de um complexo (*cluster*), com a capacidade adicionada incrementalmente conforme necessário. Economias de escala são for-

Reator médio e pequeno (acima de 25 MWe) com desenvolvimento avançado

Nome	Capacidade	Tipo	Desenvolvedor
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rússia
VK-300	300 MWe	BWR	Atomenergoproekt, Rússia
CAREM	27-100 MWe	PWR	CNEA & INVAP, Argentina
IRIS	100-335 MWe	PWR	Westinghouse-led, international
Westinghouse SMR	200 MWe	PWR	Westinghouse, EUA
mPower	150-180 MWe	PWR	Babcock & Wilcox + Bechtel, EUA
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, EUA
SMART	100 MWe	PWR	KAERI, Coreia do Sul
NuScale	45 MWe	PWR	NuScale Power + Fluor, EUA
ACP100	100 MWe	PWR	CNNC & Guodian, China
HTR-PM	2x105 MWe	HTR	INET & Huaneng, China
EM2	240 MWe	HTR	General Atomics (EUA)
SC-HTGR (Antares)	250 MWe	HTR	Areva
BREST	300 MWe	FNR	RDPIE, Rússia
SVBR-100	100 MWe	FNR	AKME-engineering (Rosatom/En+), Rússia
Gen4 module	25 MWe	FNR	Gen4 (Hyperion), EUA
Prism	311 MWe	FNR	GE-Hitachi, EUA
FUJI	100 MWe	MSR	ITHMSO, Japão-Rússia-EUA

HTR: High Temperature Reactor; FNR: Fast Nuclear Reactor; MSR: Molten Salt Reactor

neçadas não pela potência da unidade, mas pelo maior número de unidades construídas. Pequenas unidades são vistas como um investimento muito mais controlável do que as grandes.

Modernas pequenas unidades deverão ter maior simplicidade de projeto, economia de produção em massa e redução dos custos de implantação. São também concebidas para um elevado nível de segurança passiva ou intrínseca. Alguns dispositivos de segurança necessários nas usinas de grande porte não são necessários nos futuros projetos de pequeno porte.

REATORES A FUSÃO NUCLEAR

Em longo prazo, a utilização comercial de usinas nucleares a fusão não pode ser negligenciada. O ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) é um projeto internacional de construção do maior e mais avançado reator experimental de fusão nuclear do tipo *tokamak* em Cadarache, no sul da França. O projeto ITER tem a finalidade de realizar a transição, há muito desejada, dos estudos experimentais da física do plasma para as usinas nucleares a fusão para a produção de eletricidade em escala industrial. O projeto é financiado e realizado por sete membros: União Europeia (EU), Índia, Japão, China, Rússia, Coreia do Sul e EUA. A União Europeia, como anfitriã do complexo ITER,

contribui com 45% do custo, e as outras seis partes contribuem com 9% cada uma.

O reator a fusão ITER foi projetado para produzir 500 megawatts de potência de saída para 50 megawatts de potência de entrada, ou seja, produz dez vezes mais do que seu consumo. Espera-se que a máquina demonstre o princípio de balanço energético positivo no processo de fusão, algo que não foi atingido com os *tokamak* anteriores. A

construção da instalação começou em 2007, e o primeiro plasma é esperado para 2019. Quando o ITER se tornar operacional, ele será o maior experimento físico com plasma em confinamento magnético em uso, ultrapassando o Joint European Torus

(JET), em operação. A primeira demonstração comercial de uma usina nuclear a fusão, chamada Demo, propõe-se a continuar a partir do ponto em que chegou o projeto ITER para levar a energia de fusão ao mercado comercial.

Também em longo prazo, reatores nucleares híbridos fusão-fis-

são são um meio proposto para geração de energia elétrica, pelo uso do acoplamento dos processos de fusão e de fissão nuclear. O conceito vem dos anos 1950, e foi brevemente promovido por Hans Bethe durante os anos 1970, mas ficou inexplorado até o ressurgimento de interesse em 2009, devido aos atrasos na realização da fusão pura.

No projeto Life, do Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), utiliza-se

Modernas pequenas unidades deverão ter maior simplicidade de projeto, economia de produção em massa e redução dos custos de implantação

O reator a fusão ITER foi projetado para produzir 500 megawatts de potência de saída para 50 megawatts de potência de entrada, ou seja, produz dez vezes mais do que seu consumo

a tecnologia de fusão por confinamento inercial desenvolvida na National Ignition Facility (NIF). O objetivo é usar “pelotas” de combustível deutério-trítio revestidas por uma casca de material fissil (ou fértil) para produzir uma quantidade de energia maior do que a usada para a ignição do processo de fusão. O princípio é induzir a fusão nuclear por confinamento inercial por *laser* na “pelota” combustível, que atua como uma fonte de nêutrons altamente concentrada. Os nêutrons assim gerados transmutam e fissionam a casca externa, gerando aí a energia que será convertida em eletricidade.

Paralelamente à abordagem da fusão por confinamento inercial, a Universidade do Texas em Austin está desenvolvendo um sistema baseado no reator a fusão tipo *tokamak*. Os princípios básicos de utilização dos reatores de fusão por confinamento ou *tokamak* como uma fonte de nêutrons são fundamentalmente os mesmos. A diferença essencial é que o confinamento gera uma fonte de nêutrons pontual, enquanto os *tokamaks* são fontes toroidais, mais difusas.

CONCLUSÕES

Para atingir um corte de 50% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) no setor de geração elétrica mundial, um cenário viável seria chegar a 1.200 GW nucleares de potência instalada até 2050, fornecendo em torno de 24% da demanda global por eletricidade (hoje se tem mais de 370 GW fornecendo 14% da demanda).

Isso faria com que a geração nuclear desse uma contribuição ainda mais importante, compatível com suas potencialidades, para a “descarbonização” da economia global.

Chegar a esse nível de contribuição não exigirá grandes saltos tecnológicos. Os obstáculos para um crescimento nuclear mais rápido a curto e médio prazo estão ligados primeiramente às políticas industriais e econômicas. Entretanto, o desenvolvimento contínuo das tecnologias de reatores e do ciclo do combustível será importante para atingir seu pleno potencial em termos de

competitividade com outras fontes de baixa emissão de carbono.

Um comprometimento claro e estável em relação à energia nuclear, como parte de uma estratégia nacional para cumprimento de uma política energética e de objetivos ambientais, é um prerequisite para um programa nuclear de sucesso. Estruturas legislativas e regulatórias eficazes e efetivas também pre-

cisam ser instituídas. Particularmente, em países que estão iniciando ou reativando programas nucleares, os governos terão que assumir um papel ativo, trabalhando em conjunto com todos os interessados a fim de ultrapassar os obstáculos.

O financiamento dos elevados investimentos necessários para a construção de usinas nucleares será o maior desafio na maioria dos países. Os investidores do setor privado podem perceber os investimentos nucleares como demasiadamente arriscados, pelo menos até que haja uma trajetória de novos projetos nucleares de sucesso. Em alguns casos pode ser necessário o suporte do governo na

Chegar a 1.200 GW nucleares de potência instalada até 2050, fornecendo em torno de 24% da demanda global por eletricidade seria uma contribuição ainda mais importante, para a “descarbonização” da economia global

forma de garantia de empréstimos. A estabilidade de preços nos mercados de carbono e eletricidade também poderá incentivar os investimentos em usinas nucleares.

A capacidade industrial global para a construção de usinas nucleares precisará dobrar até 2020 para que a potência instalada venha efetivamente crescer daí em diante. As capacidades de produção relativas ao ciclo do combustível, inclusive a produção de urânio, também precisarão crescer na mesma proporção. Isso exigirá grandes investimentos nos próximos anos, e que somente serão realizados se ficar claro que há demanda suficiente no horizonte.

Uma indústria nuclear em expansão necessitará de recursos humanos consideráveis, incluindo cientistas e engenheiros altamente qualificados, além de pessoal técnico especializado. Instalações, reguladores, governos e outros interessados também precisarão de mais especialistas nucleares. Os programas de treinamento e recrutamento industriais deverão ser intensificados. Os governos e universidades também têm um papel vital no desenvolvimento de recursos humanos.

A gestão e a eliminação de resíduos radioativos são um componente essencial de todos os programas nucleares. Especificamente, devem ser feitos progressos na construção de instalações operacionais destinadas ao gerenciamento de combustível usado e dos resíduos de alto nível de atividade. Apesar das soluções técnicas estarem num estágio avançado de desenvolvimento tecnológico, com frequência existem dificuldades para conquistar a aceitação política e pública para sua efetiva implantação.

O regime internacional de salvaguardas em termos de tecnologia e materiais nucleares

deve ser mantido e reforçado sempre que necessário. A proteção física dos sítios nucleares e dos materiais também deve ser garantida. Evitar a propagação de tecnologias sensíveis, ao mesmo tempo em que se garanta acesso confiável ao fornecimento de combustível, será um desafio crescente. Esses problemas precisam ser resolvidos por meio de acordos e de cooperação internacional.

Muitas tecnologias em desenvolvimento voltadas para sistemas nucleares de última geração proporcionam possibilidades de avanços. Os sistemas de energia nuclear da Geração IV, para utilização após 2020, terão:

- Sustentabilidade: oferecer geração de energia sustentável, capaz de atender a objetivos de ar limpo e descarbonização da economia; promover garantias em longo prazo do fornecimento de combustível nuclear e utilização efetiva de combustível para a produção de energia global; minimizar e gerenciar de forma segura os resíduos nucleares, e, assim, melhorar a proteção aos trabalhadores, ao público e ao meio ambiente.

- Economia: produzir uma clara vantagem em termos de custo de ciclo de vida em relação a outras fontes de energia e ter um grau de risco financeiro comparável a outros projetos de geração elétrica.

- Segurança e confiabilidade: manter operações em alto nível de segurança e confiabilidade; manter a probabilidade e a gravidade de danos no núcleo do reator ainda mais baixas; eliminar a necessidade de resposta a emergências externa ao sítio da usina; resistência à proliferação e proteção física; inviabilizar o desvio ou roubo de materiais utilizáveis na produção de armas; e aumentar a proteção física contra atos de terrorismo.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Energia nuclear; Política nuclear;