

Situação atual do desenvolvimento de SMRs

O conceito de pequeno reator modular (SMR, na sigla em Inglês) tem sido visto há muito tempo por muitos dentro do setor nuclear e pelos decisores políticos como uma espécie de iniciante com promessas ousadas, mas sem credibilidade e sem histórico.

Os SMR foram alardeados como salvação da indústria nuclear dos seus pecados originais de atrasos e excessos de custos, típicos de todos os grandes projetos de infraestrutura, independentemente do setor, por oferecerem soluções de geração nuclear menores, mais econômicas e flexíveis. No entanto, durante quase duas décadas, ainda foi apenas um conceito baseado no pressuposto de que o bom e velho princípio da modularização, que funcionou notavelmente bem em muitos outros setores, funcionaria também para a energia nuclear. Contudo, sem exemplos operacionais, todos estes conceitos foram muitas vezes vistos como excessivamente otimistas ou especulativos.

A primeira instalação baseada em SMR do mundo, a central nuclear flutuante da Rússia [Akademik Lomonosov](#), lançada em 2019 e implantada no Ártico, continua a ser, até agora, o único projeto que atingiu a fase de operação comercial. Dos mais de 100 projetos de SMR anunciados nos últimos 20 anos como sendo desenvolvidos em vários estágios, cerca de metade foram descartados, arquivados ou colocados em espera. Enquanto a indústria nuclear como um todo lutava para ser aceita como sustentável e competitiva, a maioria das start-ups de SMR estavam principalmente esperando uma oportunidade.



A Akademik Lomonosov, uma central nuclear flutuante pioneira, foi totalmente colocada em funcionamento em Pevek, na região de Chukotka, no Extremo Oriente russo, em maio de 2020.

Uma mudança de rumo

Não seria exagero dizer que 2023 testemunhou uma mudança radical. A energia nuclear conseguiu finalmente um retorno poderoso, embora muito esperado. [Na conferência COP-28 em Dubai](#), 22 países, incluindo os EUA, o Reino Unido, o Japão, a Coreia do Sul e a França, [assinaram uma declaração](#) que reconhece “o papel fundamental da energia nuclear para atingir a meta zero líquido global” e comprometeram-se a triplicar a sua capacidade nuclear até 2050. A medida indica um consenso global emergente sobre o papel crítico da energia nuclear na transição energética. A declaração inclui um compromisso específico com “pequenos reatores modulares e outros reatores avançados” e promete apoiar o seu desenvolvimento e construção.

Em Bruxelas, a energia nuclear já não parece ser vista como "controversa". O Parlamento Europeu, que há muito estava [dividido sobre o reconhecimento da energia nuclear](#) como "verde" ou "sustentável" na taxonomia de investimento da UE, em 12 de dezembro de 2023, num movimento histórico aprovado por uma ampla margem (409 votos a favor contra apenas 173 contra) para apoiar a implantação dos SMR em toda a Europa. A Comissão Europeia declarou o seu compromisso em manter a “liderança tecnológica e industrial europeia no domínio nuclear” e ofereceu o seu apoio a uma recém-formada [aliança industrial europeia centrada em SMR](#).

Governos de todo o mundo, juntamente com investidores privados, desde Bill Gates e Sam Altman da OpenAI até investidores a varejo, estão na fila para obter ações quentes de start-ups de SMR antes das suas ofertas públicas e estão agora investindo bilhões no setor.

Neste contexto, o [New Nuclear Watch Institute](#) (NNWI), um *think tank* com sede em Londres e fundado em 2014, publicou um relatório, "[Scaling Success: Navigating the Future of Small Modular Reactors in Competitive Global Low Carbon Energy Markets](#)", que avalia cuidadosamente as perspectivas da construção dos SMR globais até 2050.

“Pensando grande, começando pequeno e caminhando rápido”

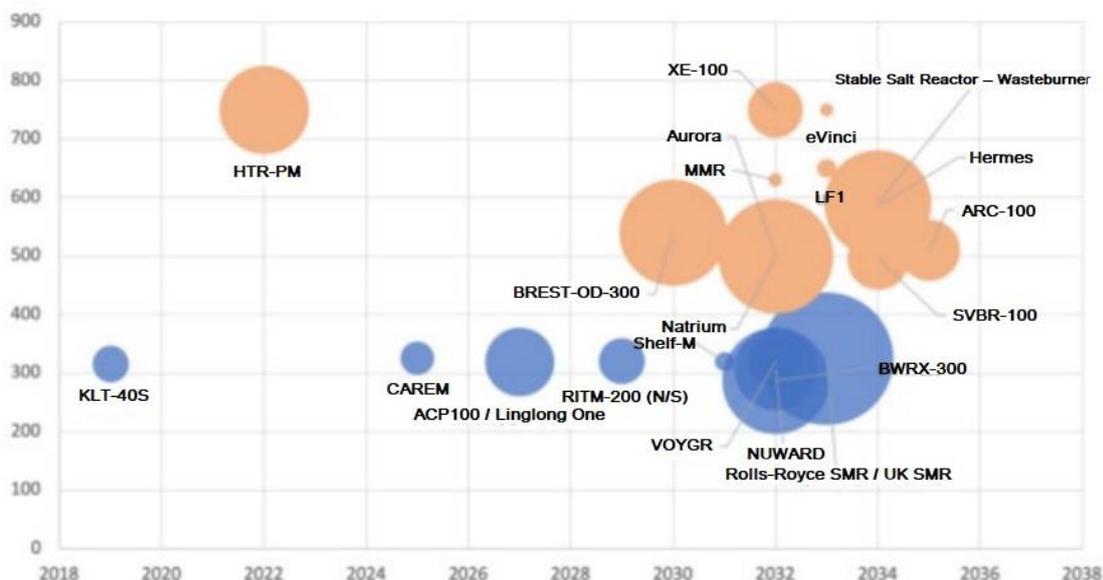
De acordo com o cenário base do NNWI, a capacidade total instalada da frota global de SMR até meados do século seria na casa de 150 a 170 GW(e). Cerca de um terço desse crescimento ocorreria nos EUA e no Canadá, quase um quarto na China e outro quarto nos mercados emergentes da África, Ásia e América Latina.

O relatório destaca que a implantação de SMR pode enfrentar desafios dentro do setor entre diferentes projetos de SMR (competindo por segmentos de mercado específicos, dependendo principalmente do tamanho e das opções de cogeração. No entanto, ela também poderá enfrentar desafios externos decorrentes de fontes alternativas de energia com baixo teor de carbono, como o armazenamento de energia para serviços públicos, tecnologias geotérmicas avançadas em alguns locais do mundo e a utilização e armazenamento de captura de carbono, que também estão avançando no sentido da plena comercialização. Segmentos de reatores de grande porte também representam concorrência.

Sob tais circunstâncias, a rápida expansão é crucial para que projetos bem-sucedidos possam alavancar as economias da modularização e da implantação em série. O esforço proporcionará reduções de custos num mercado limitado e fragmentado, que provavelmente será dominado por pioneiros.

O relatório examina dezenas de projetos de SMR que estão em desenvolvimento em todo o mundo. Ele identifica 25 projetos de “maior viabilidade”, com base em um conjunto de critérios abrangentes que incluem maturidade tecnológica, progresso de licenciamento, viabilidade do modelo de negócios, prontidão da cadeia de abastecimento, competitividade econômica, potencial de mercado, combustível irradiado e gestão de resíduos, ciclo e fornecimento de combustível, mecanismos de apoio financeiro e estatal e tamanho potencial do *cluster* de mercado e concorrência dentro dos respectivos *clusters*.

Primeiras ondas de implantação dos SMR



Este gráfico representa projetos com "apoio financeiro substancial que se encontram relativamente nas últimas fases de desenvolvimento, em termos do momento mais provável (cenário de base) da sua implantação". Fonte [NNWI/Rohunsih et al, 2023](#)

Os 25 projetos selecionados são então agrupados em categorias como “*first movers and front-runners*” (pioneiros e líderes), “*niche projects*” (projetos de nicho), “*high-risk potential disruptors*,” (potenciais disruptores de alto risco) e assim por diante. O grupo dos líderes inclui cinco projetos nos estágios mais avançados de desenvolvimento e implantação, que provavelmente capitalizarão o apoio institucional e financeiro disponível para se expandir primeiro, reduzir custos devido às economias da curva de aprendizado e implantação em série e garantir as maiores participações do mercado global até 2050.

O grupo inclui o RITM-200 da Rosatom, o ACP-100/Linglong One da China National Nuclear Corp. (CNNC), o VOYGR da NuScale, o BWRX-300 da GE Hitachi e o XE-100 da X-Energy. A seguir está uma breve discussão dos méritos e desafios que cada um dos líderes enfrenta.

RITM-200 (Rosatom, Rússia)

A [série russa RITM](#) inclui atualmente o RITM-200 e o RITM-400 para quebra-gelos; o RITM-200S, RITM-200M e RITM-400M para usinas flutuantes; e o RITM-200N para usinas nucleares terrestres. A série RITM aproveita uma “*plant-as-a-service*” (usina como serviço) integrada, essencialmente um modelo de negócios de “*one-stop-shop*” (que concentra serviços em um só lugar) que deverá dominar

o segmento fora da rede do mercado global de SMR. Devido ao apoio estatal abrangente, incluindo fundos atribuídos ao Ártico e ao programa de desenvolvimento da Rota Marítima do Norte para uma nova frota de quebra-gelos nucleares e centrais nucleares flutuantes baseadas em SMR, a Rosatom atingiu agora efetivamente a fase de produção em série de SMR. Até o momento, oito RITM-200 já foram fabricados e instalados em quebra-gelos e mais seis estão sendo fabricados para aplicações navais. Outros seis estão planejados para serem implantados como novas usinas flutuantes, juntamente com mais dois para uma usina terrestre em Yakutia. Até 2030, espera-se que a Rosatom tenha de 16 a 22 reatores RITM operacionais – um total de cerca de 900-1200 MWe de capacidade.

Ao contrário da maioria dos SMR baseados em projetos de reatores de água pressurizada (PWR, na sigla em Inglês), o RITM é projetado para usar combustível nuclear utilizando urânio de alta concentração e baixo enriquecimento (HALEU, na sigla em Inglês), que é material nuclear enriquecido a menos de 20%. Por enquanto, a Rosatom continua a ser o único fornecedor comercial de HALEU no mundo e controla totalmente a cadeia de abastecimento desse combustível.

Os conjuntos de combustível do RITM usam revestimento de vareta de liga em níquel-cromo aprimorado e tolerante a acidentes, apresentando uma geração de energia por vareta de 8 a 11 TWh (para RITM-200M). O combustível permite que o reator tenha uma manobrabilidade muito maior em comparação com o desempenho médio de um PWR "convencional", com a velocidade de variação de potência nominal de 6% por minuto, estendendo o período de tempo entre o reabastecimento para 6-7 anos (em comparação com a média de 2-3 anos). Ele também melhora a taxa de consumo para 109,5 GWh/t U. Esses recursos garantem versatilidade de aplicação, tanto em contextos "on-grid" (acompanhamento de carga) quanto "off grid" (incluindo locais remotos) e um fator de capacidade mais alto (de até 98% de disponibilidade), o que se traduz em menor custo nivelado de eletricidade (LCOE, na sigla em Inglês).

Aproveitando a sua vantagem de ser o pioneiro, o RITM-200 é o primeiro projeto que deverá atingir o estágio em que a curva de aprendizagem reduziria o preço-alvo para cerca de US\$ 50-60 em meados da década de 2030. Isto significa efetivamente paridade de preços com a produção de energia a carvão não subsidiada e com as grandes usinas nucleares existentes.

A Rosatom também deverá se beneficiar de uma cadeia de abastecimento praticamente "fechada", com praticamente tudo feito internamente para seu SMR, o que é fundamental para uma rápida expansão face aos desequilíbrios da cadeia de abastecimento. Embora a fragmentação geopolítica barrasse os SMR russos de praticamente todos os mercados dos países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a Rosatom provavelmente ampliará o seu domínio no setor de grandes reatores (com uma quota de mercado superior a 80% na exportação de novas construções), bem como no setor de SMR, principalmente nos mercados emergentes do Sul Global e no seu mercado interno. Espera-se que a série RITM da Rosatom capture cerca de 17 a 18% da capacidade da frota global até 2025.

ACP-100/Linglong Um (CNNC, China)

O ACP-100 da China, ou [Linglong One](#), é um PWR versátil com capacidade de 310 MWth (125MWe) projetado para uso terrestre e em plataformas flutuantes e diversas aplicações de cogeração, incluindo aquecimento urbano (300°/h de vapor quente + 62,5 MWe em cogeração). Espera-se que o Linglong One, incluindo o ACP100S projetado para usinas nucleares flutuantes, siga de perto, capturando 15-16% da frota global em 2050.

O Linglong One será o primeiro SMR terrestre em operação comercial de 2026 a 2027. A instalação inédita está em construção no local da usina nuclear de Changjiang, na província de Hainan, na China, onde a CNNC despejou o primeiro concreto em julho de 2021. No final de 2023, a cúpula de contenção de aço teria sido instalada.

Beneficiando-se de capacidades de fabricação de baixo custo e técnicas de construção econômicas, como um método de construção aberto, estima-se que Linglong One tenha um custo médio de construção sem juros de US\$ 5.000/kW. Possui potencial de redução adicional devido à curva de aprendizagem e oportunidades de expansão. Com total apoio estatal, espera-se que o projeto seja amplamente implantado na China. Os casos de uso incluem fornecimento de energia e calor nas províncias de Liaoning, Jilin e Heilongjiang, no nordeste do país, usinas flutuantes no Mar de Bohai e fornecimento de energia e vapor junto com a dessalinização da água do mar nas províncias costeiras de Zhejiang, Fujian e Hainan. Entre os seus parceiros comerciais mais próximos e aliados no âmbito da iniciativa Cinturão e Rota. Além disso, é provável que a China promova a implantação dos seus SMR por mineradoras chinesas que operam na África.

NuScale VOYGR (NuScale, EUA)

Apesar dos recentes reveses [relacionados ao cancelamento de seu projeto de demonstração](#) no Laboratório Nacional de Idaho, nos EUA, o VOYGR da NuScale deverá garantir cerca de um décimo da capacidade instalada global até 2050 (incluindo a modificação de suas usinas flutuantes do VOYGR que está [desenvolvendo em conjunto com Prodigy Clean Energy](#)).

O VOYGR da NuScale é [atualmente o único projeto SMR americano totalmente licenciado](#) (e o segundo projeto totalmente licenciado no mundo depois do SMART coreano). A NuScale, no entanto, ainda está em processo de obtenção da licença para seu projeto atualizado e de maior capacidade de 77 MWe, que deverá ser concluído em 2025. É provável que seja o primeiro entre os fornecedores da OCDE a construir uma usina em operação comercial, expandindo-se rapidamente para a Europa Central e Oriental, auxiliada pela familiaridade dos reguladores nucleares europeus com a tecnologia PWR e as opções de localização. A empresa possui um ecossistema de fabricação maduro e formou uma parceria com a ENTRA1 como desenvolvedora, oferecendo modelos de implantação flexíveis, incluindo esquemas de construção, propriedade e operação, semelhantes ao adotado pela russa Rosatom.

Para melhorar suas capacidades de acompanhamento de carga, o projeto apresenta um sistema de desvio de turbina, por exemplo, que pode desviar até 100% do vapor na potência máxima do reator diretamente para o condensador, sem a necessidade de alterar o desempenho do próprio reator. A NuScale está trabalhando para estender as aplicações potenciais de seu reator ao setor industrial de calor de processo, que, devido às temperaturas de saída mais baixas em comparação com reatores avançados de próxima geração, foi considerado fora do alcance dos reatores de água leve (LWRs, na sigla em Inglês). O conceito é baseado na ideia de que o vapor gerado por um módulo de reator LWR padrão pode ser comprimido e aquecido para produzir vapor de processo. Atualmente a empresa atingiu uma temperatura de 500°C, com potencial adicional para estender a temperatura para cerca de 650°C. Isto permitiria à NuScale fornecer calor de processo para refino de petróleo, reciclagem de resíduos plásticos e assim por diante.

A empresa está atualmente no caminho certo para construir uma usina piloto de exportação em Doicesti, no condado de Dambovită, na Romênia. Na reunião de líderes do G-7 no Japão no início deste ano, a presidência dos EUA anunciou um compromisso público-privado de até [275 milhões de](#)

[dólares para apoiar a implantação do projeto romeno da NuScale](#). O financiamento, contribuído pelos EUA, Japão, Coreia do Sul e Emirados Árabes Unidos (EAU), ajudará na aquisição de materiais, trabalho de design, gestão de projetos e análise do local para o projeto em Doicești.

O Banco de Exportação e Importação dos EUA e a Corporação Financeira de Desenvolvimento Internacional dos EUA também emitiram Cartas de Interesse de até US\$4 bilhões em financiamento de projetos. A central VOYGR-6, que visa produzir 462 MWe, já está sendo licenciada pelo regulador romeno. O produtor polonês de cobre e prata [KGHM Polska Miedź](#) também planeja construir uma usina nuclear modular NuScale VOYGR com capacidade de 462 MWe, composta por seis módulos, até o início da década de 2030.

BWRX-300 (GE-Hitachi, EUA)

Espera-se também que o BWRX-300 da GE-Hitachi esteja entre os pioneiros, até 2050, detendo cerca de 5% da participação no mercado global.

[Selecionado pela Ontario Power Generation \(OPG, na sigla em Inglês\)](#) em dezembro de 2021, o projeto avança em direção a uma licença de construção para uma usina piloto na estação nuclear de Darlington. Se for bem sucedido, este representaria o primeiro contrato comercial de SMR nos EUA. O fornecedor e o operador planejam que a primeira unidade esteja operacional até 2029. Em dezembro de 2023, o Ministério do Clima e Meio Ambiente da Polônia aprovou provisoriamente a construção de [seis usinas BWRX-300 com 24 reatores BWRX-300](#) nesses locais (uma capacidade combinada de 7,2 GWe). Orlen Synthos Green Energy (OSGE, na sigla em Inglês) anunciou esses locais após selecioná-los para pesquisas geológicas.

As vantagens estratégicas do BWRX-300 [incluem sua natureza evolutiva](#) e (em comparação com os projetos mais avançados) exposição limitada aos riscos de segurança de abastecimento de combustível, já que o projeto usa conjuntos de combustível BWR padrão (reator de água fervente). No entanto, licenciar a tecnologia BWR em países sem experiência anterior em BWR pode ser demorado, uma vez que os BWR têm um perfil operacional e de segurança diferente em comparação com os PWR mais comuns. Além disso, devido ao seu tamanho, 300 MWe, o BWRX-300 compete no segmento de mercado altamente lotado da rede, o que limita seu potencial de implantação.

A [GE-Hitachi afirma](#) que o BWRX-300 permite economias de até 60% do custo de capital por MW “quando comparado com outros SMR típicos resfriados a água e grandes projetos nucleares no mercado” (US\$ 2.250/kWe pelo enésimo tipo) e “pode ser implantado globalmente já em 2029”. No entanto, historicamente, quase todas as metas ex-ante de custos e prazos na inovação em engenharia, tanto nuclear como não nuclear, tendem a subestimar – por vezes dramaticamente – os recursos necessários. Muitas restrições práticas de implementação permanecem desconhecidas até que a implementação seja tentada.

XE-100 (X-energy, EUA)

O reator XE-100 da X-Energy é um reator de gás de alta temperatura (HTGR, na sigla em Inglês) projetado para operar como uma unidade única de 80 MWe com uma configuração possível como uma planta de 320 MWe de quatro unidades. Está preparada para capturar uma participação de mercado significativa no cenário global de SMR, atingindo potencialmente 7% até 2050. A X-energy e a Dow [propuseram](#) uma instalação de reator nuclear avançado Xe-100 de 320 MWe de quatro unidades na Union Carbide Corp. Seadrift Operations, uma unidade de fabricação de materiais

químicos da Dow em Seadrift, Calhoun County, Texas. A X-Energy [também tem um acordo](#) com a Energy Northwest para trazer até 12 unidades XE-100 (960 MWe) para o estado de Washington, com o primeiro módulo previsto para estar online até 2030. Embora os prazos de implantação possam ser adiados, o apoio significativo do governo dos EUA posiciona o XE-100 como um dos primeiros reatores avançados a ser totalmente licenciado.

O XE-100 da X-Energy está preparado para capturar uma participação de mercado significativa no segmento avançado de co-geração e calor de processo industrial, beneficiando-se de vantagens competitivas como uma temperatura de saída mais alta (750°C em comparação com a média de 500°C), permitindo aplicações versáteis de calor de processo até agora inacessíveis por outras tecnologias com temperaturas de saída mais baixas. Possui suas próprias capacidades de fornecimento de ciclo de combustível com base na [inovadora tecnologia proprietária TRi-structural ISOtropic \(TRISO\)](#) apoiada pelo governo dos EUA, o que reduz riscos de segurança e de fornecimento de combustível. O relatório da NNWI estima que a empresa poderá implantar cerca de 100 reatores até 2050, alcançando economias de escala significativas e reduzindo custos.

Cinco pioneiros podem representar metade da frota global de SMR

De acordo com a NNWI, em conjunto, prevê-se que todos os cinco pioneiros representem mais de metade da frota global de SMR em 2025, por capacidade instalada. Os retardatários evolutivos de LWR, como o [NUWARD](#) e o [UK-SMR da Rolls-Royce](#), poderiam potencialmente garantir cerca de 5% da fatia de mercado global cada um, aproveitando o apoio estatal. Outros projetos estão atualmente nos estágios iniciais de desenvolvimento, mas carecem de apoio substancial, como os [projetos SMR da Holtec](#) (SMR-160 e SMR-300) e o [AP300 da Westinghouse](#), têm menos probabilidade de atingir o estágio de redução de custos da curva de aprendizado potencial total devido à alta concorrência em um segmento relativamente superlotado.

Os SMR avançados da Geração IV provavelmente enfrentarão desafios substanciais, com reguladores menos familiarizados com as tecnologias e cadeias de abastecimento menos maduras. Embora algumas unidades de demonstração possam estar online até 2035, a implantação completa e inédita e a fabricação em série de fábrica são mais prováveis por volta de 2040.