

# AVANÇOS E PERSPECTIVAS NA GERAÇÃO ELÉTRICA NUCLEAR SUBMARINA

RENATO M. COTTA\*  
Professor

SYLVIA MARIA C. ANJOS\*\*  
Geóloga

FÁBIO M. PASSARELLI\*\*\*  
Consultor

LEONAM S. GUIMARÃES\*\*\*\*  
Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN)

---

## SUMÁRIO

Introdução  
Microrreatores Nucleares  
Reatores Nucleares Subsea  
Perspectivas para o Brasil

## INTRODUÇÃO

Os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície do nosso planeta, mas não exploramos, observamos ou mapeamos nem mesmo 20% desse imenso território. A ideia de explorar os recursos minerais

do fundo dos oceanos vem sendo discutida desde os anos 60. A exploração de petróleo e gás em águas ultraprofundas (>2.000 metros) é uma realidade na qual o Brasil, por meio da Petrobras, é pioneiro e líder mundial. Com o aumento e a diversificação dessa atividade, surge a oportunidade

---

\* Assessor da Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM) e da Amazul Tecnologias de Defesa S.A. Docente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe/UFRJ).

\*\* Assessora da diretoria da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras).

\*\*\* Consultor de Projetos de Desenvolvimento da Produção e de Implantação de Novas Tecnologias da Petrobras.

\*\*\*\* Presidente da Eletrobras Eletronuclear. Doutor em Engenharia Naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e mestre em Engenharia Nuclear pelo Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires da Universidade de Paris XI. Diretor técnico da Associação Brasileira para Desenvolvimento das Atividades Nucleares (Abdan). Colaborador assíduo da *RMB*.

de se acoplar a geração de eletricidade *in-situ*, para viabilizar a redução de custos e incrementar a produção de petróleo.

Este artigo visa fomentar a discussão sobre o potencial de geração de energia núcleo-elétrica para aplicação submarina, por exemplo, visando à exploração e produção de petróleo e gás no pré-sal brasileiro, a partir de sistemas submarinos de processamento, que incluem separação e reinjeção do gás produzido separado, rico em CO<sub>2</sub>, ao reservatório, a partir do fundo do mar, para aumento da produção de óleo. Essa solução pode ser especialmente interessante para viabilizar campos do pré-sal com elevada Razão Gás-Oleo (RGO) e elevadas concentrações de contaminantes distantes de locais já em desenvolvimento, onde uma fonte de energia autônoma seria viabilizadora de sistemas de produção. Adicionalmente, esta fonte de energia autônoma e descentralizada apresentaria potencial para reduzir os custos totais de soluções integradas de projetos de desenvolvimento da produção, destravando inclusive o potencial de aplicação de *subsea tie-backs* para se utilizarem infraestruturas existentes de produção, reduzindo o custo total.

Para estimular essa avaliação, identificou-se a necessidade de se realizar uma revisão preliminar de desenvolvimentos semelhantes disponíveis na literatura aberta, para nortear um possível projeto futuro visando à definição do *roadmap* de desenvolvimento de uma solução de geração núcleo-elétrica submarina, seja para exploração das riquezas dos oceanos, seja para gerar eletricidade de forma mais segura e sustentável a partir de plantas de potência submarinas próximas ao litoral. Sem o intuito de ser exaustiva, a presente revisão inclui uma discussão inicial sobre microrreatores nucleares (MNR) e, em seguida, uma breve descrição de dois proje-

tos de outros países (Rússia e França) que mais se relacionam com a discussão aqui estimulada. Nesse contexto, priorizam-se nesta revisão os sistemas que se assemelham à tecnologia dominada em nosso país, de reatores PWR (Pressurized Water Reactor), já tendo em vista a possível empreitada futura de avaliação e definição de um conceito de sistema submarino de geração núcleo-elétrica.

A pesquisa e o desenvolvimento eventualmente a serem propostos serão naturalmente influenciados pela experiência acumulada da Marinha do Brasil (MB) pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e seus colaboradores em universidades e institutos de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), no desenvolvimento do Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (Labgene) e do Submarino Nuclear Brasileiro (SN-BR) no contexto do Programa Nuclear da Marinha (PNM) e do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (Prosub), pela experiência de licenciamento da CNEN e da mais recentemente criada Agência Naval de Segurança Naval e Qualidade (AgNSNQ), bem como pela larga experiência da Petrobras e de seus parceiros no uso e no desenvolvimento de equipamentos *subsea* para águas ultraprofundas. Por outro lado, esta colaboração também oferece uma janela de oportunidades para aprofundamento e revisão do projeto do reator nuclear de propulsão naval para fins submarinos, bem como, em sentido mais amplo, para novos desenvolvimentos em tecnologia nuclear com fins duais.

## MICRORREACTORES NUCLEARES

Os chamados Small Modular Reactors (SMR) são reatores nucleares de potência, em geral abaixo de 300 MWe [1], que têm

se mostrado promissores em termos de atendimento de demandas específicas na geração de eletricidade e aplicações não elétricas, redução de custos, aumento de segurança e outros aspectos industriais e comerciais relevantes. Sua concepção sempre foi associada ao emprego modular, ou seja, projetando-se o atendimento de toda uma faixa de potências pela agregação de diferentes números de unidades em uma única central. A palavra “modular” caracteriza-se pelo fato de o SMR poder ser fabricado e posteriormente transportado para o sítio da central nuclear em que será montado, seja como um reator isolado ou como um “módulo” de um *cluster* de SMR. Entretanto já foi identificada uma nova classe de pequenos reatores, tipicamente abaixo de 30 MWe e 100 MWt, chamados de Micro Nuclear Reactors (MNR) [2], que, em geral, visam ao atendimento de demandas pontuais e *off-grid*, seja em regiões remotas de difícil acesso, em áreas de desastres ou em instalações militares.

De acordo com a definição [3], microrreatores nucleares são pequenos reatores capazes de operar independentemente da malha de eletricidade para suprir potência de forma resiliente, mesmo para cargas críticas, bem como para fornecer potência primária para operação normal e em situações emergenciais. A World Nuclear Association, por outro lado, propõe uma subcategoria de reatores muito pequenos – vSMRs – para unidades com menos de 15 MWe [4], especialmente para comunidades remotas. A seguir revisamos alguns dos projetos de MNR em andamento, em particular em conexão

com o Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos [3].

### **General Atomics**

A General Atomics (GA) está desenvolvendo uma fonte de energia nuclear móvel que se encaixa em um contêiner Conex padrão e é capaz de geração autônoma de 4-10 MWe com um período de reabastecimento superior a dez anos. A fonte de alimentação compacta baseia-se no desenvolvimento de materiais e combustíveis de alta temperatura que resultam em excelente desempenho, um alto grau de segurança e proteção contra ameaças em potencial. Também é capaz de responder rapidamente a grandes flutuações em pequenas cargas

de uma base militar. Seus recursos autônomos derivam dos sistemas de defesa integrados da GA (por exemplo, missões de reconhecimento e interdição de aeronaves não tripuladas) e forneci-

mento de *hardware* militar para produção de energia, comunicações e controle de missão. O projeto também se baseia na experiência da GA no fornecimento de dezenas de reatores de pesquisa com menos de 10 MWt e na experiência anterior da GA em um reator comercial avançado.

### **NuScale**

A NuScale está avaliando vários conceitos de microrreatores na faixa de potência de 1 a 10 MWe. Dois desses conceitos, o NuScale Power Module (NPM) de unidade única e o NPM de tamanho reduzido, são microrreatores de água leve que alavancam os atuais esforços de pro-

**Microrreatores nucleares  
são capazes de operar  
independentemente da  
malha de eletricidade para  
suprir potência**

jeito e licenciamento da NuScale. Ambos os conceitos podem servir de base para uma plataforma energética diversificada que pode fornecer eletricidade, calor, dessalinização e produção de hidrogênio para as instalações do Departamento de Defesa, bem como para cidades e indústria. Esses conceitos utilizam salas de controle altamente automatizadas e circulação natural para resfriamento. Ambos os conceitos podem operar por dez anos ou mais sem reabastecimento, com o NPM de uma unidade usando combustível enriquecido a menos de 5% de U-235 e o NPM de tamanho reduzido usando o combustível Haleu (High-Assay Low-Enriched Uranium).

### **Oklo**

A Oklo está desenvolvendo um reator compacto de 2 MWe de espectro rápido. Ele foi projetado para atender comunidades remotas, rurais e nativas, bem como locais de difícil acesso para fins industriais e militares. O reator opera puramente com forças físicas naturais, com muito poucas partes móveis. O reator foi projetado para operar por até 20 anos antes do reabastecimento e usa combustível Haleu.

### **Westinghouse**

O microrreator eVinciTM da Westinghouse é um gerador de energia semiautônomo, transportável e escalonável, com potências variando de 200 KWe a 15 MWe. Ele é uma evolução do conceito Megapower e da tecnologia de tubos de calor do Laboratório Nacional de Los Alamos e foi projetado para fornecer calor e energia combinados para instalações militares, comunidades remotas e instalações de mineração, com operação de alta resiliência. O eVinciTM utiliza o combustível

Haleu e possui um reator de estado sólido com mínimas peças móveis, tendo como propósito operar por pelo menos dez anos sem reabastecimento e manutenção.

### **X-energy**

O X-battery da X-energy é um reator transportável por meio terrestre, refrigerado a gás e de alta temperatura, com uma potência térmica de 10 MWt. Emprega combustível Haleu com esferas de combustível UCO (Uranium Oxycarbide) Triso (Tristructural Isotropic). O reator pode ser operado de forma autônoma, sem a presença de operadores no local, ou em instalações com poucos operadores. O microrreator Xe-100 foi projetado para ser flexível em sua aplicação e pode ser configurado para incluir co-geração de eletricidade e calor para apoiar a produção de hidrogênio. Vários ciclos avançados de combustível foram testados no passado, como o (Th,U) O2, que pode operar por cerca de dez anos com uma única carga do núcleo.

### **Outros desenvolvedores**

Além dos desenvolvedores aqui revisados, há outras empresas que estão desenvolvendo projetos de microrreatores, como a HolosGen, LeadCold Nuclear, NuGen, Starcore Nuclear, Rosatom, Urenco e Ultra Safe Nuclear. Nem todas foram incluídas nesta revisão, pois não há informações públicas suficientes disponíveis. Por exemplo, a NuGen lançou um esforço empresarial autofinanciado para desenvolver um microrreator de 20 MWe, visando a seu uso em locais de pouso na Lua e em Marte, bem como para aplicações terrestres em regiões inóspitas. O consórcio UBattery, liderado pela Urenco, concluiu a primeira etapa do convite dos Laboratórios Nucleares Canadenses

(CNL) para instalar um pequeno reator modular (SMR) no sítio de Chalk River. O U-Battery é um microrreator nuclear de alta temperatura, refrigerado a gás, de 4 MWe (10MWt). O projeto foi iniciado pela Urenco em 2008, e o *design* conceitual foi desenvolvido pela Universidade de Manchester e pelo Dalton Institute, no Reino Unido, e pela Technology University of Delft, na Holanda.

Na referência [1] são revisados mais de 50 projetos de SMR, de diferentes países, incluindo aqueles acima citados, consolidando informações de pequenos reatores refrigerados a água, reatores de altas temperaturas refrigerados a gás, reatores rápidos, reatores refrigerados a sal fundido e outros.

### REATORES NUCLEARES *SUBSEA*

O desenvolvimento de centrais nucleares de potência *offshore* (ONPP, da sigla em inglês para Offshore Nuclear Power Plants) é um tema de interesse relativamente recente e crescente e inclui a configuração de reatores submersos como um caso especial, como esquematizado na Figura 1 [5]. Recentes avanços nas centrais nucleares oceânicas foram revisados em [5], incluindo sua disposição geral, parâmetros de projeto e recursos de segurança. Além das configurações apontadas abaixo, deve-se também destacar o

tipo submerso ancorado, em que a profundidade de posicionamento da ONPP pode variar, em geral entre 50-150 m, independentemente da lâmina d'água, sem requerer necessariamente seu completo posicionamento no leito marinho.

A primeira planta nuclear *subsea* projetada de que se tem registro na literatura foi proposta pela Rockwell International em 1974 [6], visando justamente viabilizar a produção de petróleo *offshore* com geração de 3 MWe. No conjunto de SMR revisado pela IAEA em 2018 [1], apenas seis reatores são considerados como de uso marítimo (um da China e cinco da Rússia), todos refrigerados a água. Apenas um, o Shelf da Rússia, foi projetado para uso tanto embarcado quanto submerso, e será aqui revisado. Destaca-se aqui também a plataforma submersível FlexBlue [7-10], desenvolvida pelo líder francês em tecnologia naval DCNS, que incorpora os principais méritos dos SMR. Finalmente, outras concepções, que não se transformaram em projetos, mas estão associadas a reatores de água leve pressurizada, serão brevemente discutidas.

### *Shelf* (Rússia)

Uma unidade de energia baseada no reator Shelf da Nikiet (Rússia) é uma cápsula para gerar 6,6 MWe (28,4 MWt), podendo chegar a 10 MWe com o reator

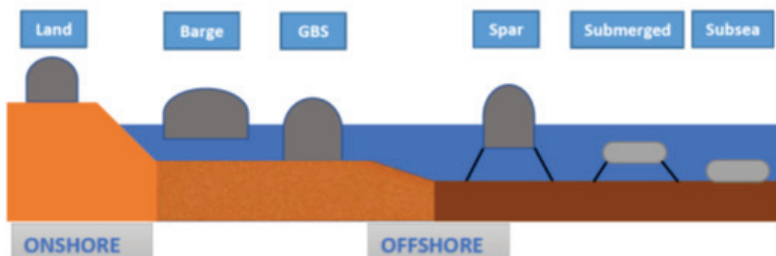


Figura 1 – Classificação dos tipos de centrais nucleares *offshore* (ONPP), adaptado de [5]



(a)



(b)

Figura 2 – (a) Ilustração do transporte marítimo das cápsulas (previsão de 400 t cada); (b) Detalhes do conceito do reator Shelf para aplicação submarina e em terra (sistemas completo e separado)

ABV-6E da OKBM, que foi projetada em duas opções: uma contendo apenas os componentes do reator; e outra cápsula de tamanho maior, que inclui o turbogenerador (TGP), o sistema automatizado e de controle remoto e sistemas de monitoramento, proteção e regulação da produção de eletricidade. A referência [1] reúne informações relevantes sobre o reator Shelf, que se encontra hoje na etapa de projeto detalhado.

A cápsula Shelf pode ser usada tanto em plataformas flutuantes como em usinas nucleares submersas, e seu projeto de engenharia é muito semelhante ao de reatores nucleares de propulsão naval. A unidade de energia é entregue como um único item, com todos os seus componentes acomodados dentro de um casco cilíndrico de alta

resistência, com diâmetro inteiro de 8 m e comprimento de 14 m, conforme a Figura 2(a). A concepção é de um reator PWR integral (IPWR), combinando circulação forçada e natural no circuito primário. A capacidade de operação autônoma a longo prazo do reator, do TGP e de outros equipamentos dentro do módulo Shelf elimina a necessidade de operadores dentro da unidade de potência e mantém o módulo não tripulado durante o período de operação. A recarga é programada para um tempo de operação de seis anos, com fator de capacidade de 80% e combustível de pastilhas de UO<sub>2</sub> a 19,7% de enriquecimento. O reator foi projetado para uma vida útil de 60 anos, com foco na utilização em regiões de difícil acesso, em particular na região do Ártico.

Apesar da dificuldade de se encontrar informações na literatura russa, foi possível apurar que o custo do primeiro Shelf girará em torno de 6,7 bilhões de rublos, a preços de 2017 (ou cerca de 113 milhões de dólares ao câmbio de 2017), reduzindo para cerca de 5,2 bilhões de rublos na produção em série (ou cerca de 88 milhões de dólares). A Figura 2(b) ilustra as diferentes concepções do reator Shelf, em sistema completo ou separado, para aplicações submersas ou em terra.

### *Flexblue (França)*

O coração do sistema Flexblue (Figura 3) consiste em um módulo com um projeto derivado de submarinos nucleares, porém sem tecnologia militar, sendo equipado com um reator nuclear PWR comprovado. O módulo foi idealizado para ser ancorado em águas territoriais (cerca de 5-15 km) do país anfitrião, a uma lâmina d'água de 60-100 m. Com

uma potência de cerca de 160 MWe (530 MWt), os módulos (~150 m de comprimento, 14 m de diâmetro e aproximadamente 12 mil toneladas) são fabricados combinando-se submódulos. Assim, qualidade e tempo de construção podem ser mais facilmente controlados. O Flex-Blue foi idealizado para ser facilmente transportável e disponibilizado onde e quando necessário.

Sendo submerso, se beneficia da capacidade de resfriamento ilimitada. Na operação e em condições acidentais (mesmo acidentes graves), o casco, atuando como barreira, deve permanecer estanque. Além disso, a maioria dos riscos que podem prejudicar a integridade do casco, caso a instalação fosse em terra (explosões, acidentes de avião etc.), é inerentemente eliminada. Contaminação ambiental resultante de grandes acidentes nucleares (Chernobyl e Fukushima) foi essencialmente a consequência de transferências aéreas e depósitos de iodo e césio no solo.

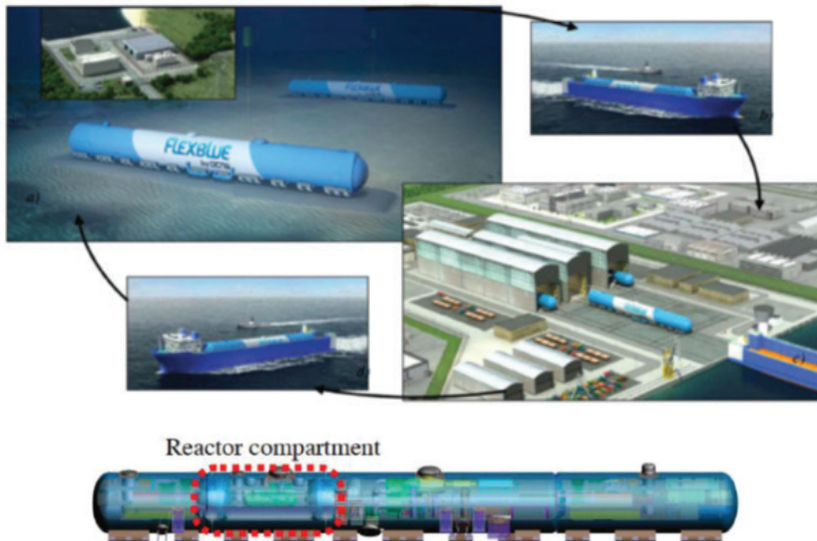


Figura 3 – Esquema da plataforma submersível Flexblue (DCNS), incluindo a instalação *subsea*, o transporte por navio, a manutenção em terra e o detalhe do posicionamento do reator [7]

No entanto, com um reator submerso, esse caminho aéreo de contaminação para seres humanos é intrinsecamente impedido.

O FlexBlue não é tripulado, exceto para visitas periódicas de inspeção e manutenção, o que deve resultar em redução de custos de operação e alta confiabilidade. A água do mar permite implementar e operar com facilidade sistemas de segurança passivos capazes de remover o calor residual dos sistemas secundário e primário, aumentando a segurança. Seu projeto prevê um tempo de vida de 60 anos, com ciclo de recarga de combustível de 40 meses.

### **Outras concepções**

Em um estudo do Massachusetts Institute of Technology (MIT), motivado e financiado pelo próprio projeto FlexBlue da DCNS [11], examinaram-se as opções de tecnologia nuclear mais viáveis para futuros projetos de reatores *subsea* que atenderiam a altos padrões de segurança, bem como apresentariam um bom potencial econômico, para possível construção no período de 2030 a 2040. Os cinco principais conceitos selecionados, a partir de uma pesquisa de 13 tecnologias nucleares, foram comparados ao caso-base de um pequeno reator modular de água pressurizada (PWR) projetado com um *layout* convencional. Em ordem de menor a maior tamanho do sistema primário, onde o reator e todos os sistemas de segurança estão contidos, os cinco principais projetos selecionados foram: (1) um reator rápido (*lead-bismuth*), baseado no reator russo SVBR-100; (2) um novo reator, resfriado por líquido orgânico; (3) um reator de vapor superaquecido inovador [12]; (4) um reator BWR, com base no LSBWR da Toshiba; e (5) um PWR integral com geradores de vapor compactos. Chegou-se

à conclusão de que o tamanho do casco resistente exigido pelo reator *subsea*, seus sistemas de segurança e o ciclo de potência podem ser significativamente reduzidos (de 50% a 80%) com esses cinco principais projetos, em comparação com o sistema PWR convencional.

Uma abordagem proposta em [11] para aumentar a competitividade de um PWR para implantação *offshore* é reduzir o tamanho do casco (contenção) necessário para acomodar a planta. Para fornecer uma alternativa ao *design* típico de um PWR, como no reator do Flexblue, a configuração PWR integral (IPWR) foi escolhida devido ao seu potencial para reduzir o tamanho da contenção e eliminar por projeto acidentes de perda de refrigerante. Recentemente, PWR do tipo integral foram aplicados a SMR, como os projetos mPower e Nuscale, que ganharam atenção significativa. A configuração integral contém o núcleo, geradores de vapor, pressurizador e, possivelmente, bombas e unidades de barras de controle (CRDs) dentro da contenção do reator. Além disso, o uso de trocadores de calor compactos para reduzir o tamanho da contenção de um IPWR foi proposto por Shirvan *et al.* [13] e, mais tarde, adotado pela Westinghouse, na forma de trocadores de calor de circuito impresso (PCHE) [14]. O PCHE é um tipo de trocador de calor compacto comprovado que provê alta densidade de energia, juntamente com baixa perda de carga e requisitos de manutenção reduzidos, com aplicação atual e frequente na indústria de petróleo e de processamento de produtos químicos. Os PCHE são feitos de uma pilha de placas metálicas com passagens semicirculares que são unidas por *diffusion bonding* [14]. Recentemente, sua utilização em reatores de fusão nuclear também foi simulada e avaliada [15].

## PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

Em 2019, o Brasil manteve sua posição no *ranking* de produção de petróleo, sendo o 10º maior produtor no mundo, quase na sua totalidade com a produção em águas profundas e ultraprofundas por meio de plataformas do tipo FPSO (Floating Production Storage and Offloading).

Com os avanços na exploração do pré-sal e os recentes leilões promovidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), há o potencial de o país alçar posições ainda melhores no *ranking* de maiores produtores mundiais. Para descobrir as reservas do pré-sal, que figuram entre as mais importantes descobertas da indústria de Óleo & Gás (O&G) das últimas décadas, e operar com eficiência em águas ultraprofundas, a Petrobras, junto

a seus parceiros, desenvolveu tecnologias próprias e em parceria com fornecedores, universidades e centros de pesquisa. O desenvolvimento tecnológico da Petrobras em diversas áreas relacionadas ao setor de óleo e gás, em particular na engenharia submarina, explica a liderança do país na produção de petróleo em águas ultraprofundas, bem como o reconhecimento internacional pela conquista de quatro prêmios da Offshore Technology Conference (OTC), principal premiação internacional da tecnologia *offshore*, sendo o último recebido em 2020, pelo desenvolvimento do supergigante Campo de Búzios, localizado no pré-sal brasileiro. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2029), o pré-sal contribuirá com 77% da produção de petróleo e aproximadamente 80% da produção de gás natural do país em 2029, com investimentos que podem

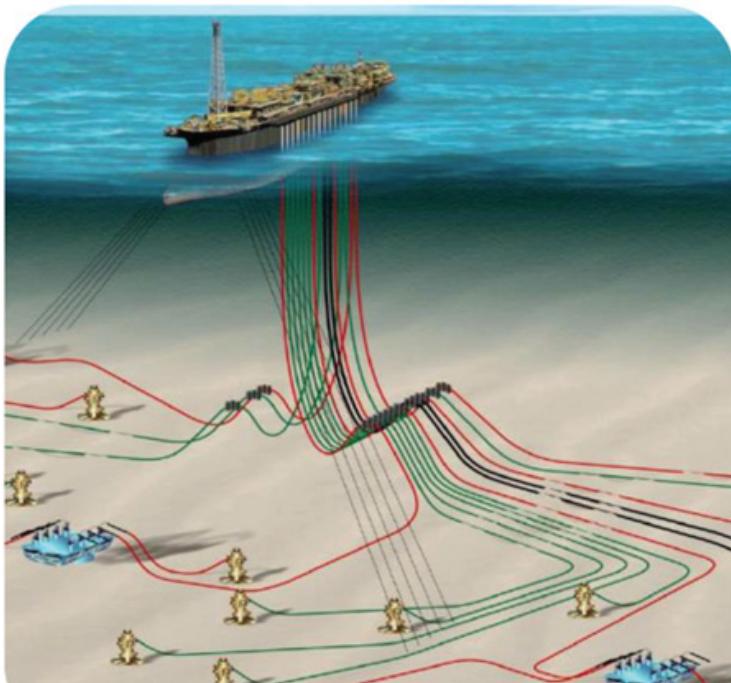


Figura 4 – Arranjo submarino típico dos sistemas de produção do pré-sal

chegar a 1,8 trilhão de reais entre 2020 e 2029. Como qualquer processo industrial, a produção de óleo e gás *offshore* é altamente demandante de energia, que, tradicionalmente, é fornecida por meio de turbinas que compõem o sistema de geração dos FPSO e que são responsáveis por alimentar as facilidades da plataforma, tais como bombas, compressores e os equipamentos situados no leito marinho para processamento e bombeamento de óleo, gás e água para a superfície.

Uma tendência mundial é marinizar os equipamentos de produção para instalação no fundo do mar (*subsea factory*), de forma a reduzir significativamente o tamanho das plataformas de produção, o custo de transporte através de dutos e *risers* em mais de 2.000 m de lâmina d'água, bem como os volumes de hidrocarbonetos manuseados nas instalações de superfície, para, conseqüentemente, aumentar a segurança operacional. O conceito *subsea factory* apresenta potencial para modificar significativamente o arranjo submarino tradicional de sistemas de desenvolvimento da produção (Figura 4), de forma a posicionar no fundo do mar uma série de sistemas, como processamento, separação e bombeio, desafogando as plantas de superfície e assim permitindo conceber sistemas mais sinérgicos cujo objetivo principal será a produção de mais hidrocarbonetos ao menor custo.

Um limitante do *subsea factory* é a dificuldade de prover energia elétrica, principalmente em regiões já em operação, nas quais o aumento da capacidade de geração dessa energia seria muito custoso ou mesmo inviável. Neste contexto, a energia nuclear *offshore* tem sido analisada [16] como uma fonte alternativa para suprir a demanda de sistemas submarinos, viabilizando inclusive a revitalização de campos em operação, em que a demanda

de geração de energia elétrica *in-situ* para exploração de petróleo está próxima ao limite técnico e econômico das plataformas atuais. Essa preocupação é ainda mais crítica ao se observar que, nos próximos campos do pré-sal a serem explorados, há uma tendência do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estar presente em quantidades ainda maiores do que nos campos já em produção, quando o teor do contaminante pode passar os 50% em volume, cenário que requer plantas de processamento na superfície maiores e mais complexas, que consomem mais energia para sua separação e reinjeção nos reservatórios.

O setor de energia nuclear no país caminha para um fortalecimento oportuno e necessário com a retomada, pela Eletro Nuclear, das obras da Usina Nuclear Angra 3 e a conclusão da fase de montagem eletromecânica do Labgene do CTMSP, protótipo em terra do reator para propulsão do nosso primeiro submarino nuclear, o SN-BR. Em paralelo, o IPEN/CNEN e a Amazul S.A., em parceria com a Inva, da Argentina, concluem o projeto executivo do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Além disso, estudos de concepção de um pequeno reator para dessalinização nuclear, o Dessal, prosseguem em colaboração entre a DGDNTM, Coppe/UFRJ, CNEN e Amazul [17]. Essas iniciativas induzem o reaquecimento do desenvolvimento científico e tecnológico em reatores nucleares e certamente requerem e acionam toda uma cadeia de conhecimento e de produção de bens e serviços, fortalecendo necessariamente toda a estrutura de análise de segurança e regulação nuclear [18]. A conclusão do primeiro reator integralmente projetado e construído no país, o Labgene, de certo será importante conquista da engenharia do nosso país e um indutor de novos projetos na área nuclear. A concepção

de um microrreator PWR integral para implantação, seja para exploração de petróleo, recursos minerais ou cogeração de eletricidade e dessalinização em regiões costeiras, poderá se beneficiar dessa experiência em projeto, construção

e operação revigorada, podendo vir a se constituir no próximo grande desafio de pesquisa e desenvolvimento na área nuclear no país, em uma parceria natural com a Petrobras e o parque tecnológico da área de petróleo e gás.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:  
<CIÊNCIA & TECNOLOGIA>; Desenvolvimento; Energia Nuclear; Inovação Tecnológica; Marinha;

## REFERÊNCIAS

- [1] IAEA – International Atomic Energy Agency (2018). “Advances in small modular reactor technology developments”, Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARI), Vienna, Austria.
- [2] NUVIA (2016). “Market and Technical Assessment of Micro Nuclear Reactors”, Technical Report 80755/REP/01, p. 56, Warrington, UK, March.
- [3] NEI, Nuclear Energy Institute (2018). “Roadmap for the Deployment of Micro-Reactors for U.S. Department of Defense Domestic Installations”, NEI Project Lead: Marcus Nichol, Director New Reactor Deployment, Technical Report, p. 25, USA.
- [4] World Nuclear Association (2019). “Small Nuclear Power Reactors”, updated Oct. 2019.
- [5] Kang-Heon Lee, Min-Gil Kim, Jeong Ik Lee, and Phill-Seung Lee (2015). “Recent Advances in Ocean Nuclear Power Plants”, *Energies*, vol. 8, pp.11.470-11.492. doi:10.3390/en81011470.
- [6] Atomics International Division, Rockwell International (1974). “Design Report: 3000-kWe Subsea Nuclear Power Plant”, AI-AEC-1314, General Reactor Technology.
- [7] V. Gourmel, F. Puccetti, F. Revaud (2016). “Flexblue® Underwater Reactor: Introduction to the Concept and to the Passive Safety Strategy for a Steam Generator Tube Rupture Accident”, *KnE Energy*, vol. 2016, 18 pages. doi: 10.18502/ken.v1i1.475.
- [8] J.-J. Ingremeau and M. Cordiez (2015). “Flexblue® core design: optimisation of fuel poisoning for a soluble boron free core with full or half core refueling”, *EPJ Nuclear Sci. Technol.* Vol. 1, 11. doi: 10.1051/epjn/e2015-50025-3.
- [9] G. Haratyk and V. Gourmel (2015). “Preliminary accident analysis of Flexblue® underwater reactor”, *EPJ Nuclear Sci. Technol.* 1, 6. doi: 10.1051/epjn/e2015-50030-x.
- [10] M. Santinello, M.E. Ricotti, H. Ninokata, G. Haratyk, J.J. Ingremeau, V. Gourmel (2017). “External heat transfer capability of a submerged SMR containment: The Flexblue case”, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 96, pp. 62-75. doi: 10.1016/j.pnucene.2016.12.002
- [11] K. Shirvan, R. Ballinger, J. Buongiorno, C. Forsberg, M. Kazimi, N. Todreas (2016). “Technology Selection for Offshore Underwater Small Modular Reactors”, *Nuclear Eng. & Tech.*, vol. 48, pp.1.303-1.314.
- [12] K. Shirvan, M. Kazimi (2016). “Superheated Water-Cooled Small Modular Underwater Reactor Concept”, *Nuclear Eng. & Tech.*, vol. 48, pp.1.338-1.348.

- [13] K. Shirvan, P. Hejzlar, M.S. Kazimi (2012). “The Design of a Compact Integral Medium Size PWR”, Nucl. Eng. Design, vol. 243, pp. 393-403.
- [14] HEATRICTM. Disponível em: <http://www.heatric.com>.
- [15] A. C. P. Oliveira (2020). “Análise Numérica de Trocador de Calor do Tipo Circuito Impresso (PCHE) Aplicado a Reator de Fusão Nuclear”. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Nuclear (PEN) – Coppe/UFRJ.
- [16] R. Itiki, S. G. Di Santo, C. Itiki, M. Manjrekar, B. H. Chowdhury (2019) “A comprehensive review and proposed architecture for offshore power system”, Electrical Power and Energy Systems, vol. 111, pp. 79-92.
- [17] R.M. Cotta, A.C. Pontedeiro, P.A.B. Sampaio, Su Jian, C.A. Aragão de Carvalho, P. Carajilescov, C.P. Naveira Cotta, K.M. Lisboa, J.R.B. Souza, M.A.V. Freitas, G.M. Haguenuer, “Pequenos Reatores Modulares (SMRs): Perspectivas em Dessalinização Nuclear”, Conexão Nuclear, ABDAN, vol.1, n.1, p.19, 2019. Disponível em: [www.abdan.org.br](http://www.abdan.org.br).
- [18] L.S. Guimarães (1999). “Síntese da Doutrina de Segurança para Projeto e Operação de Submarinos Nucleares”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP.