

# A UTILIZAÇÃO DO MODO SEGUIDOR DE CARGA PASSIVO EM PEQUENOS REATORES MODULARES

The use of passive load-following mode in small modular reactors

Rafael Castro Monteiro<sup>1</sup> , Rubens Seishi Wassano<sup>2</sup> , Eduardo Roberto Rodrigues de Brito Júnior<sup>3</sup> , Diogo Tertuliano Fernandes Pires<sup>4</sup> 

**Resumo:** Este trabalho examinou a operação de um Pequeno Reator Modular no Modo Seguidor de Carga Passivo, no qual as variações de demanda do secundário são acompanhadas pelo primário sem que sejam necessárias quaisquer ações ativas, quer manuais ou automáticas. As alterações na potência nuclear ocorreram apenas pela exploração das características de segurança intrínseca da planta, que foi operada como um reator livre de boro. Os resultados obtidos ao longo de toda a vida útil do núcleo são promissores, pois mostram a viabilidade de utilização do modo seguidor de carga passivo em pequenos reatores modulares que operam sem a utilização de boro.

**Palavras-chave:** PRM. Seguidor de carga passivo. Livre de boro.

**Abstract:** This work examined the operation of a Small Modular Reactor in the Passive Load-Following Operation Mode, in which demand variations on the secondary side are followed by the primary without the need for any active actions, either manual or automatic. The nuclear power changes occurred only due to the intrinsic safety characteristics of the plant, which operated as a reactor free of boron. The results obtained throughout the entire core lifetime are promising, as they demonstrate the viability of the passive load-following operation mode in small modular reactors that operate free of boron.

**Keywords:** Small modular reactor. Passive load-follow. Boron-free.

1. Capitão de Corveta. Mestre em Engenharia de Plantas Nucleares de Potência pela KEPKO Nuclear Graduate School (Coreia do Sul). Chefe do Departamento de Treinamento e Requalificação do Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar, Sorocaba, SP - Brasil. E-mail: monteiro.rafael@marinha.mil.br

2. Capitão de Corveta. Engenheiro eletrônico. Operador sênior do reator IPEN/MB-01, Sorocaba, SP - Brasil. E-mail: rubens.wassano@marinha.mil.br

3. Capitão de Corveta. Mestre em Aplicações Nucleares pela Universidade de Ciências Aplicadas de Aachen (Alemanha). Chefe do Departamento de Planejamento e Apoio ao Ensino do Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar, Sorocaba, SP - Brasil. E-mail: rodrigues.junior@marinha.mil.br

4. Capitão de Corveta. Mestre em Engenharia de Plantas Nucleares de Potência pela KEPKO Nuclear Graduate School (Coreia do Sul). Coordenador da Seção de Exames de Qualificação do Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar, Sorocaba, SP - Brasil. E-mail: tertuliano.pires@marinha.mil.br

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) (IAEA, 2025), um Pequeno Reator Modular (PRM) é uma instalação nuclear com potência tipicamente menor do que 300 MWe, fortemente associada à flexibilidade, modularidade e segurança intrínseca. Espera-se que os PRMs forneçam diferentes formas de geração de energia para atender a demandas específicas de carga, como a geração de eletricidade, especialmente em áreas mais remotas, a propulsão de embarcações marítimas e até o fornecimento de energia para espaçonaves. Nos últimos 70 anos, a maioria dos reatores nucleares destinados à geração de eletricidade foi projetada para atender à demanda fixa, atuando no modo de carga base, com pouco espaço para o modo seguidor de carga, que flexibiliza a geração de energia conforme a demanda (ZHANG; JIANG, 2024).

Em sistemas de propulsão nuclear marítima, as demandas de carga podem variar drasticamente tanto durante a aceleração quanto na desaceleração. Em um porta-aviões, o lançamento de uma aeronave por catapulta também provocaria um aumento muito acentuado na demanda de potência. Os reatores nucleares nessas aplicações devem ser capazes de responder ao comando com uma rápida variação de potência.

Dada a importância do modo seguidor de carga, tanto na compatibilização do consumo com a demanda de energia quanto na propulsão naval, a maioria dos PRMs é projetada com a capacidade e a flexibilidade de variar seu nível de potência de saída. Existem diversos tipos de projetos de PRM, incluindo os reatores de água leve pressurizada (PWRs, pressurized light water reactors). Este artigo apresenta a análise desse tipo de reator, com ênfase especial em suas capacidades de acompanhamento de carga quando o boro (tipicamente associado a variações lentas de reatividade) não é utilizado diretamente no controle de reatividade.

O Modo Seguidor de Carga Ativo (MSCA) é o mais utilizado na atualidade, no qual são necessárias ações ativas, podendo ser manuais ou automáticas. Dentre as ações mais comuns estão a movimentação de barras absorvedoras de nêutrons e a alteração da concentração de boro (também absorvedor de nêutrons) dissolvido na água. Este estudo, contudo, teve como foco o Modo Seguidor de Carga Passivo (MSCP), que explora a capacidade de autorregulação da instalação em diversas faixas de variação de potência, em diferentes momentos da vida útil do núcleo e sem a necessidade

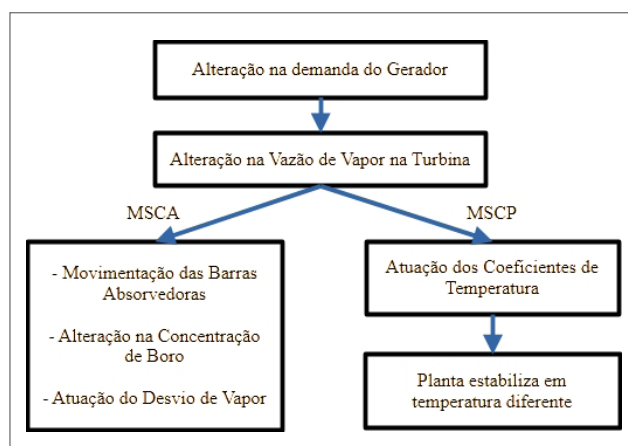
de qualquer intervenção ativa. Nesse caso, as alterações de reatividade e potência decorrem da realimentação termo-hidráulica dos chamados Coeficientes de Temperatura do Moderador (CTM) e do Combustível (CTC). Ambos são negativos e atuam na manutenção da segurança intrínseca das plantas nucleares do tipo PWR.

Para facilitar o entendimento da dinâmica do modo seguidor de carga, foi elaborado um fluxograma simplificado mostrando a diferença entre MSCA e MSCP para um PWR (Figura 1).

No MSCA, o objetivo das ações ativas é exatamente manter as temperaturas relativamente constantes. Em contrapartida, no MSCP, é obrigatório que a planta estabilize em temperaturas diferentes para que a potência se mantenha no novo patamar. Para que a variação de temperatura não seja muito acentuada, o CTC deve ter contribuição mínima (alteração impraticável neste trabalho) e o CTM deve ser o mais negativo possível, o que é obtido, entre outras formas, ao se operar sem boro solúvel no moderador (ABDELHAMEED *et al.*, 2018).

## 2 METODOLOGIA

Para este trabalho, foi utilizado o simulador de um PRM, o iPWR, desenvolvido pela empresa Tecnatom e disponibilizado gratuitamente pela AIEA aos seus Estados-membros, dentre eles o Brasil. Apesar de essa planta ser normalmente utilizada no modo MSCA, com a alteração da concentração de boro e da posição das barras absorvedoras para variar a



**Figura 1.** Fluxograma comparativo entre o modo seguidor de carga ativo (MSCA) e o passivo (MSCP).

reatividade, essas funcionalidades não foram utilizadas nos experimentos de variação de potência deste artigo. Foram utilizados cenários de Início, Meio e Fim de Vida do núcleo (IV, MV e FV), fornecidos pela fabricante do simulador. O ponto de partida desejado dos experimentos foi sempre o mesmo: reator crítico, nível de potência de 100% e concentração de boro igual a zero, permitindo a análise do comportamento do MSCP em um reator livre de boro. Nessa configuração, espera-se um aumento significativo da influência do CTM, em função da ausência desse absorvedor de nêutrons.

Para cada cenário inicial (IV, MV e FV), procedeu-se à preparação do ponto de partida: redução da concentração de boro manualmente até 0 ppm; espera de 30 minutos para estabilização; e configuração do controle das barras absorvedoras e da válvula de desvio de vapor para o modo manual.

Foram testadas reduções na demanda de energia elétrica de até 60%, ou seja, a potência elétrica foi reduzida do seu valor nominal máximo (45 MWe) até 18 MWe nas simulações mais severas. Outras variações menos intensas também foram testadas: 55,56% (45 para 20 MWe) e 44,45% (45 para 25 MWe). Em todas as situações, foram utilizadas três rampas distintas: 10 MWe/min, 5 MWe/min e 1 MWe/min. A rampa de 10 MWe/min está associada a reatores de propulsão, que precisam responder a mudanças rápidas na direção e na velocidade de embarcações; a taxa de 1 MWe/min é típica de reatores destinados à geração de energia elétrica; enquanto a rampa intermediária de 5 MWe/min pode ser aplicada em ambos os casos. Foram testados no IV e FV alguns cenários em que as potências, inicialmente reduzidas, foram reconduzidas ao seu valor inicial na simulação.

Sem a preparação inicial, durante a redução de potência no iPWR livre de boro, seria esperado que automaticamente as barras de controle fossem inseridas e, em alguns casos, com maiores taxas de redução, que o desvio de vapor fosse aberto para acomodar os transientes gerados. Como o objetivo do trabalho foi verificar a aplicabilidade do MSCP, em que elementos ativos são pouco utilizados, as barras de controle e o desvio foram colocados em modo manual, e o operador não foi acionado durante as rampas de descida de potência. A expectativa era que, num primeiro momento, a redução ficasse a cargo do CTM, inserindo reatividade negativa no primário conforme sua temperatura aumentasse. Em virtude de essa instalação não ter sido projetada especificamente para o MSCP, grandes variações de potência com taxas mais agressivas podem gerar mudanças de temperatura inaceitáveis, levando à atuação do sistema de proteção da planta.

Para cada cenário inicial preparado (IV, MV e FV já livres de boro), também foram calculados os respectivos CTM, utilizando a Equação 1, com os valores dos defeitos de potência e das temperaturas do moderador quando o reator estava a 100% de sua potência nominal e a 0% de potência (após desligamento do reator) (Equação 1).

$$CTM = \frac{\rho_f - \rho_i}{T_f - T_i} \quad (1)$$

Onde:

$\rho_f$ : reatividade final (desligado) em pcm;

$\rho_i$ : reatividade inicial (100%) em pcm;

$T_f$ : temperatura final (desligado) do moderador (°C);

$T_i$ : temperatura inicial (100%) do moderador (°C).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 REDUÇÕES DE POTÊNCIA NO FIM DE VIDA DO NÚCLEO

O FV foi escolhido como primeiro experimento em virtude da menor complexidade na preparação de seu cenário inicial. O balanço de reatividade do reator iPWR livre de boro no FV é mostrado na Tabela 1 e, de acordo com o esperado, o defeito de potência do moderador representa uma parcela significativa no balanço de reatividade.

Seguindo a metodologia estabelecida no item 2, foram realizadas diversas simulações de redução de potência sob diferentes gradientes. Os resultados compilados na Tabela 2 mostram que, para uma determinada redução de potência, um maior gradiente causa uma maior elevação na temperatura média do moderador. De maneira similar, nota-se que,

**Tabela 1.** Balanço de reatividade no final de vida livre de boro.

Parâmetro	Reatividade (pcm)
Barras de Controle	0
Defeito de Potência Combustível	88,51
Defeito de Potência Moderador	-624,41
Boro	0
Xenônio	-2.813,26

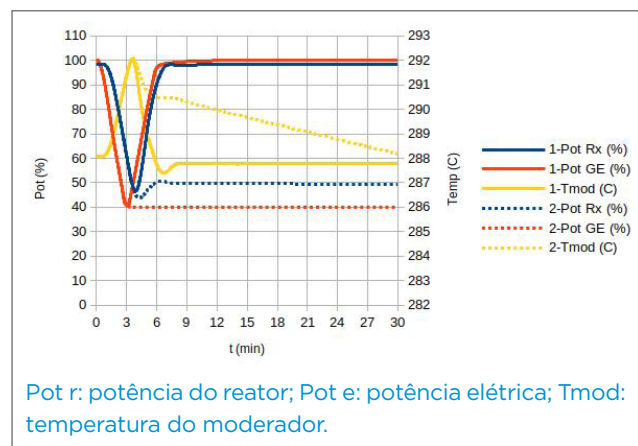
para uma determinada taxa, conforme há maior variação de potência, ocorre maior alteração na temperatura do moderador.

Também no FV, foi realizada uma simulação com redução de potência seguida de seu imediato restabelecimento na mais alta taxa testada. Nesse cenário, após reduzir a potência elétrica de 45 para 18 MWe, foi possível retornar ao patamar de 45 MWe logo na sequência, utilizando o gradiente de 10 MWe/min, conforme é mostrado na Figura 2. Esta situação, baseada no trabalho de Ishida *et al.* (1993), simula a propulsão de um navio que estivesse em alta velocidade e que, para evitar uma colisão, necessitasse reduzir rapidamente a rotação de sua hélice e passasse a girá-la no sentido oposto. Para efeito de

**Tabela 2.** Temperaturas máximas do moderador nas diversas reduções de potência, no final de vida.

Pot i (MWe)	Pot f (MWe)	Taxa (MWe/min)	T mod (°C)
45	25	1	289,7
45	20	1	289,8
45	18	1	290,0
45	25	5	290,5
45	20	5	291,1
45	18	5	291,5
45	25	10	291,1
45	20	10	291,7
45	18	10	292,1

Pot: potência; i: inicial; f: final; Tmod: temperatura máxima do moderador.



Pot r: potência do reator; Pot e: potência elétrica; Tmod: temperatura do moderador.

**Figura 2.** Variação da potência 45-18-45 instantânea versus 45-18, ambos utilizando 10 MW/min, no final de vida.

comparação, foi plotada na mesma Figura 2, em pontilhado, a variação da potência de 45 para 18 MWe com taxa de 10 MWe/min, mas sem o restabelecimento da potência inicial.

Por fim, o coeficiente de reatividade no FV, calculado utilizando a Equação 1, apresentou o seguinte resultado: -40,9 pcm/°C.

### 3.2 REDUÇÕES DE POTÊNCIA NO MEIO DE VIDA

A exemplo das simulações realizadas no FV, os resultados para os experimentos no MV mostraram o protagonismo do CTM na inserção de reatividade negativa, com esse coeficiente atuando logo após ocorrer uma redução de demanda elétrica. A Tabela 3 apresenta os resultados das diferentes reduções de potência elétrica, com diferentes taxas. No MV, contudo, não foi possível reduzir a potência elétrica de 45 para 18 MWe utilizando as taxas de 5 e 10 MWe/min no MSCP. Nesses casos, durante as simulações, a proteção do reator acionou o “*Reactor Setback*” (RSB) quando o nível do pressurizador, influenciado fortemente pela temperatura do moderador, elevou-se acima do admissível para esse projeto (lembrando que o iPWR opera idealmente no MSCA). Nesses casos, por se tratar de ação do sistema de proteção, a inserção automática das barras de controle não pôde ser evitada.

Seguindo os mesmos moldes do FV, foi calculado o coeficiente de reatividade no MV, utilizando a Equação 1, sendo encontrado o seguinte resultado: -39,29 pcm/°C.

**Tabela 3.** Temperaturas máximas do moderador nas diversas variações de potência no meio de vida.

Pot i (MWe)	Pot f (MWe)	Taxa (MWe/min)	T mod (°C)
45	25	1	292,0
45	20	1	294,4
45	18	1	294,9
45	25	5	292,5
45	20	5	295,5
45	18	5	RSB
45	25	10	292,9
45	20	10	295,9
45	18	10	RSB

Pot i: potência inicial; Pot f: potência final; T mod: temperatura máxima do moderador; RSB: *reactor setback*.

### 3.3 REDUÇÕES DE POTÊNCIA NO INÍCIO DE VIDA

A maioria das simulações realizadas no IV também ocorreu de forma exitosa. Na Tabela 4, observa-se a comparação entre as simulações com diferentes reduções de potência elétrica e taxas de rampa, com tendências semelhantes àquelas vistas no FV e MV. No caso do IV, não foi possível realizar reduções da potência elétrica de 45 para 18 MWe e de 45 para 20 MWe quando as taxas de descida foram de 10 e 5 MWe/min.

Ainda no IV, foi conduzida uma simulação em que, sempre utilizando o gradiente de 1 MWe/min, a potência elétrica da planta foi reduzida de 45 para 18 MWe e, após decorridas dez horas, houve a recondução da potência ao seu patamar inicial, permanecendo até completar um ciclo de 24 horas. Este ciclo simula um comportamento genérico de consumo de energia elétrica em que, diariamente, o consumo permanece várias horas em alta demanda e várias horas em baixa demanda. Na primeira parte da simulação, enquanto a potência elétrica era reduzida, a temperatura do moderador se elevava, causando a redução da potência do reator. Assim que as potências estabilizam, ao longo das horas seguintes, verificou-se que a temperatura reduz e volta a aumentar, em tempos condizentes com a evolução do xenônio para esse reator. Decorridas dez horas de simulação, a retomada da potência elétrica apresentou o mesmo comportamento, no sentido oposto. Essas variações de temperatura e potência são mostradas na Figura 3.

**Tabela 4.** Temperaturas máximas do moderador nas diversas variações de potência no início de vida.

Pot i (MWe)	Pot f (MWe)	Taxa (MWe/min)	T mod (°C)
45	25	1	296,2
45	20	1	299,0
45	18	1	299,8
45	25	5	296,7
45	20	5	RSB
45	18	5	RSB
45	25	10	297,1
45	20	10	RSB
45	18	10	RSB

Pot i: potência inicial; Pot f: potência final; T mod: temperatura máxima do moderador; RSB: reactor setback.

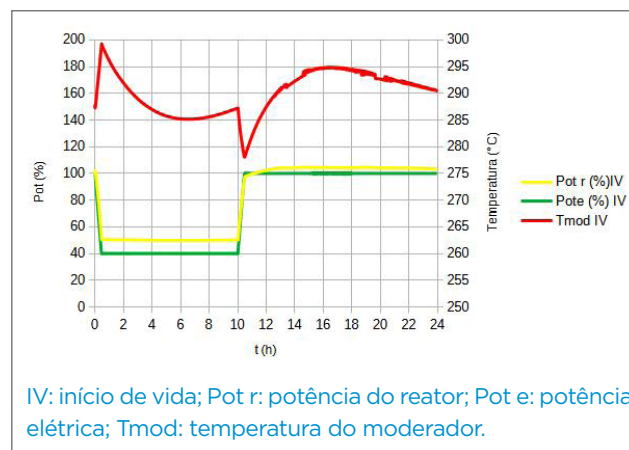
A exemplo do FV e MV, foi calculado o coeficiente de reatividade no IV utilizando a Equação 1, sendo encontrado o seguinte resultado:  $-33,84 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ .

### 3.4 EVOLUÇÃO DOS RESULTADOS AO LONGO DA VIDA DO NÚCLEO

Analisando os dados das simulações de IV, MV e FV, percebeu-se que foi possível reduzir a potência utilizando MSCP ao longo de toda a vida do núcleo para determinadas variações de potência e gradientes. No FV, foi viável realizar a maior redução de potência elétrica prevista, de 45 para 18 MWe, mesmo para a taxa de descida de potência mais agressiva (10 MWe/min). No MV foi possível reduzir a potência até 20 MWe para todas as taxas, mas a redução até 18 MWe só foi alcançada com a rampa de 1 MWe/min. Para as taxas de 5 e 10 MWe/min, a redução de potência no MSCP foi interrompida pelo RSB. Já no IV, só foi possível realizar as reduções de potência de 45 para 20 MWe e 18 MWe utilizando o gradiente de 1 MWe/min. Para a redução de potência até 25 MWe no IV, foi possível utilizar as três rampas de descida: 1, 5 e 10 MWe/min.

Nota-se que a redução de 45 para 25 MWe no MSCP foi possível em todas as taxas e idades do núcleo. Com o intuito de comparar resumidamente o comportamento ao longo da vida do núcleo, foi elaborada a Tabela 5 com valores das variações de temperatura (a partir do ponto inicial,  $288^{\circ}\text{C}$ ) na redução de potência de 45 para 25 MWe, com as taxas de 1, 5 e 10 MWe/min para FV, MV e IV.

Ainda sobre as variações de parâmetros do reator em relação à idade do núcleo, foi observado que o CTM ficou mais



**Figura 3.** Variação da potência de 45 para 18 MWe e de volta a 45 MWe a uma taxa de 1 MWe/min no início de vida.

negativo conforme o núcleo envelhece, sendo os valores do CTM no IV, MV e FV, respectivamente: -33,84, -39,29 e -40,9 pcm/°C. Essa constatação explica por que as variações de temperatura são maiores no IV do núcleo, quando o CTM apresenta valores menos negativos.

Foram plotadas também as curvas da variação da temperatura do moderador e das variações de potência elétrica e do primário ao longo da vida do reator para o caso de redução de potência de 45 para 18 MWe, com taxa de redução de 1 MWe/min. A Figura 4 mais uma vez mostra como há uma maior variação da temperatura para o IV.

## 4 CONCLUSÃO

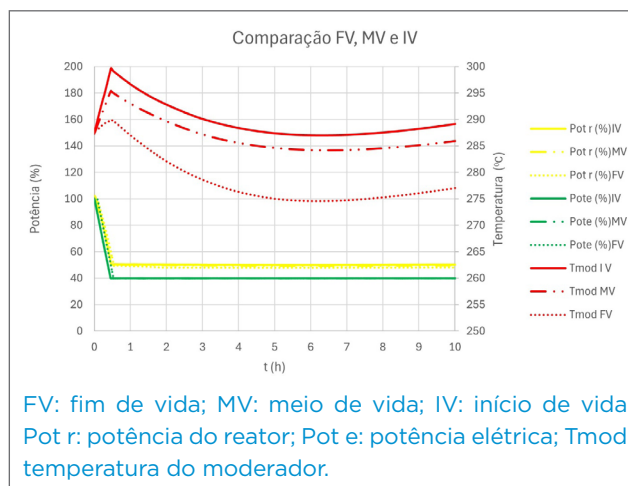
Analisando os resultados obtidos, foi possível notar que o MSCP é plenamente aplicável ao iPWR quando o objetivo é a geração de energia elétrica. Observou-se que, sob uma taxa suave de 1 MW/min, foi viável reduzir em até 60% a potência elétrica da planta sem a necessidade do uso das barras absorvedoras ou do desvio de vapor, independentemente da idade do núcleo (FV, MV ou IV). Além disso, aproximadamente dez horas após essa redução, a potência foi elevada de 40 para 100%, sendo mantida com sucesso nesse patamar. Dessa forma, constatou-se a viabilidade de utilização do MSCP em um ciclo diário, compatível com as demandas de carga nos horários de pico e fora de pico.

**Tabela 5.** Variações de temperatura máxima na redução de 45 para 25 MWe nas diversas taxas e idades do núcleo.

Idade do Núcleo	Taxa		
	1MWe/min	5 MWe/min	10 MWe/min
IV	8,2 °C	8,7 °C	9,1 °C
MV	4,0 °C	4,5 °C	4,9 °C
FV	1,7 °C	2,5 °C	3,1 °C

A utilização do MSCP também se mostrou viável em diversas condições aplicáveis à propulsão naval, nas quais taxas mais agressivas de redução de potência são necessárias. No FV, por exemplo, foi possível reduzir a potência em torno de 60% com rampas de até 10 MWe/min, simulando variações de demandas características de mudanças na direção e no sentido em meios navais. Foi testada com sucesso, também no FV, uma sequência de variação de potência com redução seguida de imediata elevação de potência, utilizando uma taxa de 10 MWe/min. Para o MV, foi possível alcançar reduções de potência de até 55,56% com as taxas mais acen-tuadas e sem utilizar as barras de controle. Já no IV, o MSCP mostrou-se viável para reduções de potência de até 44,44% com os gradientes de 5 e 10 MWe/min.

Embora a variação da potência elétrica por meio do MSCP no iPWR livre de boro apresente certas limitações sob gra-dientes mais severos, esse modo de operação já demonstra potencial promissor não apenas para a geração de energia, mas também para aplicações na indústria naval.



**Figura 4.** Redução da potência de 45 para 18 MWe com taxa de 1 MWe/min ao longo da vida do núcleo.

## REFERÊNCIAS

ABDELHAMEED, A. A. E.; NGUYEN, X. H.; LEE, J.; KIM, Y. Feasibility of passive autonomous frequency control operation in a Soluble-Boron-Free small PWR. *Annals of Nuclear Energy*, v. 116, p. 319-333, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.036>

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *Small Modular Reactors*. IAEA. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>. Acesso em: 27 jul. 2025.

ISHIDA, T.; KUSUNOKI, T.; OCHIAI, M.; TANAKA, Y.; YAO, T.; INOUE, K. Response to severe changes of load on the reactor system of Nuclear Ship Mutsu. *Journal of Nuclear Science and Technology*, v. 30, n. 2, p. 116-130, 1993. <https://doi.org/10.1080/18811248.1993.9734460>

ZHANG, Z.; JIANG, J. On load-following operations of small modular reactors. *Progress in Nuclear Energy*, v. 173, 105274, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105274>