

Sistema Integrado SMR para Poligeração Nuclear-Térmica-Digital

1. Análise Detalhada do Paper Original

O artigo de José Soares Sobrinho, publicado na revista *Energies* em 2025, propõe um sistema integrado de poligeração que combina um Pequeno Reator Modular (SMR) com um ciclo de potência de dióxido de carbono supercrítico (S-CO₂) e um Ciclo Rankine Orgânico (ORC) para recuperação de calor residual. O objetivo é melhorar a eficiência energética e a viabilidade comercial de usinas nucleares de pequena escala, especialmente em regiões remotas ou isoladas.

O estudo realiza uma análise termodinâmica detalhada de diferentes configurações de ciclos S-CO₂ (simples, com recuperador e com recompressão) e avalia o ganho de eficiência ao adicionar um ciclo ORC para aproveitar o calor de baixa temperatura (tipicamente abaixo de 200°C) que seria descartado. Os resultados indicam que a adição do ORC pode aumentar a eficiência líquida do sistema em até 2,98% em ciclos com recuperador e entre 1,7% e 2,2% em ciclos de recompressão.

Além da geração de eletricidade, o paper expande o conceito para a **poligeração**, sugerindo o uso do calor residual para alimentar um *chiller* de absorção. Este, por sua vez, produziria água gelada para o resfriamento de *data centers* de alta densidade, como os equipados com servidores NVIDIA HGX H100. Essa abordagem cria um sistema sinérgico "Nuclear-Térmico-Digital", onde a energia do SMR é utilizada para geração elétrica, e o calor residual, que seria um subproduto, é reaproveitado para uma aplicação de alto valor (resfriamento de infraestrutura digital).

Pontos Chave

- **Fonte de Energia:** Pequeno Reator Modular (SMR), uma fonte de energia livre de carbono, estável e adequada para locais remotos.
- **Ciclo Principal:** Ciclo Brayton com CO₂ supercrítico (S-CO₂), que oferece maior eficiência e turbomáquinas mais compactas em comparação com os ciclos a vapor tradicionais, reduzindo custos de capital.
- **Recuperação de Calor:** Utilização de um Ciclo Rankine Orgânico (ORC) para converter calor residual de baixa temperatura do ciclo S-CO₂ em eletricidade adicional.
- **Poligeração:** O conceito é estendido para usar o calor rejeitado pelo sistema de potência (S-CO₂ + ORC) para acionar um *chiller* de absorção, que gera frio para resfriar um *data center*.
- **Eficiência:** A análise termodinâmica mostra ganhos de eficiência significativos com a hibridização dos ciclos, otimizando o uso da energia primária do reator.

- **Aplicação Final:** O sistema integrado fornece eletricidade e resfriamento, atendendo à crescente demanda de *data centers* e computação de alto desempenho (HPC).

2. Revisão Crítica dos Conceitos Termodinâmicos e de Engenharia

2.1. Análise dos Ciclos Termodinâmicos e sua Integração

O paper propõe a integração de um Pequeno Reator Modular (SMR) com um ciclo de Brayton de dióxido de carbono supercrítico (S-CO₂) e um Ciclo Rankine Orgânico (ORC) para recuperação de calor residual. A escolha do S-CO₂ como fluido de trabalho para o ciclo principal é termodinamicamente sólida, especialmente para fontes de calor de alta temperatura (acima de 550 °C), como os SMRs. O CO₂ supercrítico oferece alta densidade, o que permite turbomáquinas mais compactas e, consequentemente, menores custos de capital, um fator crucial para a viabilidade de SMRs [1, 5].

A integração do ORC para recuperação de calor de baixa temperatura (abaixo de 200 °C) é uma estratégia bem estabelecida na literatura para melhorar a eficiência global de sistemas de potência [2, 6]. O uso de fluidos orgânicos como R134a, com baixos pontos críticos, permite a conversão eficiente de calor residual em trabalho mecânico, que pode ser convertido em eletricidade. A proposta de recuperação sequencial de calor em ciclos S-CO₂, incluindo o inter-resfriamento do compressor e o resfriador principal, demonstra uma compreensão aprofundada das oportunidades de otimização termodinâmica [7].

2.2. Avaliação das Premissas e Metodologia

O estudo utiliza o banco de dados de propriedades termo-físicas NIST REFPROP e o pacote `scipy.optimize` do Python para os cálculos e otimização, o que confere credibilidade à metodologia. As premissas listadas na Tabela 2 (página 6 do PDF) são razoáveis para uma análise termodinâmica de sistemas de potência:

- **Temperatura máxima da fonte de calor (500–800 °C):** Compatível com a faixa de operação de SMRs avançados [8].
- **Temperatura mínima da fonte de resfriamento (30 °C):** Representa uma temperatura ambiente típica para rejeição de calor.
- **Diferença mínima de temperatura nos trocadores de calor (10 °C):** Uma premissa padrão para garantir a transferência de calor com uma força motriz razoável.
- **Perda de pressão nos trocadores de calor S-CO₂ (50 kPa):** Um valor típico que considera as perdas irreversíveis em trocadores de calor.
- **Eficiência isentrópica das turbomáquinas S-CO₂ (90%) e ORC (85%):** Valores realistas para turbomáquinas modernas de grande porte. Para SMRs e ORCs de menor

escala, esses valores podem ser ligeiramente otimistas, mas ainda dentro de uma faixa aceitável para estudos de viabilidade conceitual [9, 10].

2.3. Avaliação dos Ganhos de Eficiência

Os resultados apresentados, como o aumento da eficiência líquida em 2,98% para ciclos S-CO₂ com recuperador e entre 1,7% e 2,2% para ciclos de recompressão com a adição do ORC, são consistentes com os princípios da termodinâmica e com resultados encontrados em estudos similares de recuperação de calor residual [3, 11]. A recuperação de calor de baixa temperatura é uma forma eficaz de aumentar a eficiência global, pois aproveita energia que de outra forma seria descartada, elevando o coeficiente de desempenho do sistema como um todo.

2.4. Análise do Esquema de Poligeração e Resfriamento de Data Center

A extensão do conceito para a poligeração, utilizando o calor residual para alimentar um *chiller* de absorção para resfriamento de *data centers*, é um ponto forte e inovador do paper. A demanda por resfriamento em *data centers*, especialmente para servidores de alto desempenho (como os NVIDIA HGX H100 mencionados), é substancial e crescente. A integração de um *chiller* de absorção, que utiliza calor em vez de eletricidade para produzir refrigeração, é uma solução energeticamente eficiente e alinha-se com a busca por sustentabilidade [4, 12].

Os parâmetros típicos fornecidos para o sistema de refrigeração por absorção (LiBr-H₂O) e os componentes do sistema de resfriamento de *data center* (e.g., *cold plate*, CDU) são tecnicamente plausíveis. A temperatura de retorno da água de resfriamento das GPUs (60-70°C) é adequada para acionar geradores de *chillers* de absorção de efeito simples ou duplo, dependendo da temperatura do gerador e do COP desejado. Esta sinergia entre a geração de energia nuclear e a demanda de resfriamento de *data centers* representa uma aplicação prática e de alto valor para o calor residual.

2.5. Possíveis Inconsistências ou Áreas para Aprofundamento

Embora o paper apresente uma análise termodinâmica robusta e uma proposta inovadora, algumas áreas poderiam ser aprofundadas ou clarificadas:

- **Detalhes do Acoplamento Térmico:** O paper menciona que o calor é transferido do circuito do reator para o circuito de dióxido de carbono. Mais detalhes sobre o tipo de trocador de calor (IHX) e os desafios de projeto para altas temperaturas e pressões do S-CO₂ seriam benéficos. A diferença mínima de temperatura ($\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$) no IHX é uma premissa, mas a sua realização prática em um ambiente de SMR pode apresentar desafios de engenharia.
- **Otimismo nas Eficiências Isentrópicas:** Embora os valores de 90% para turbomáquinas S-CO₂ e 85% para ORC sejam realistas para equipamentos de grande escala, SMRs e ORCs de menor porte podem ter eficiências ligeiramente inferiores

devido a efeitos de escala. Uma discussão sobre a sensibilidade dos resultados a variações nessas eficiências poderia fortalecer a análise [9].

- **Análise Econômica:** O paper menciona que o custo da eletricidade é um fator determinante para a comercialização de SMRs. Uma análise econômica preliminar, mesmo que conceitual, que compare o custo nivelado da energia (LCOE) do sistema proposto com alternativas, seria valiosa para validar a viabilidade comercial. O exemplo do projeto VOYAGER, cancelado por questões de custo, reforça a importância dessa análise [13].
- **Aspectos de Segurança e Licenciamento:** Embora o foco seja termodinâmico, a integração de um SMR com sistemas de poligeração complexos levanta questões de segurança e licenciamento que são intrínsecas à tecnologia nuclear. Uma breve menção a esses desafios e como o projeto modular pode mitigá-los seria relevante [14].
- **Impacto Ambiental:** O paper destaca a redução de emissões de carbono. Uma análise mais aprofundada do ciclo de vida, incluindo a produção e descarte dos componentes do sistema (e.g., fluidos orgânicos, materiais do reator), poderia fornecer uma visão mais completa do impacto ambiental.

Em suma, o paper apresenta uma proposta conceitual e termodinâmica bem fundamentada para um sistema de poligeração inovador. As análises são consistentes com os princípios da termodinâmica, e a integração de SMR, S-CO₂, ORC e resfriamento de *data center* é uma direção promissora para a otimização do uso de energia nuclear de pequena escala.

3. Análise SWOT do Sistema Integrado SMR para Poligeração Nuclear-Térmica-Digital

A seguir, uma análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) do sistema proposto no paper, com uma pontuação de 1 (baixo) a 3 (alto) para cada item, avaliando seu impacto potencial.

Categoria	Fator	Descrição	Pontuação
Forças (Strengths)	Alta Eficiência e Densidade Energética	A combinação de SMR, ciclo S-CO ₂ e ORC maximiza a utilização da energia primária, resultando em alta eficiência geral. SMRs possuem uma densidade energética muito superior a	3

Categoria	Fator	Descrição	Pontuação
		outras fontes de energia [1, 5].	
	Baixa Emissão de Carbono	A energia nuclear é uma fonte de geração de eletricidade livre de emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a descarbonização da matriz energética [15].	3
	Poligeração de Alto Valor Agregado	O sistema não apenas gera eletricidade, mas também produz refrigeração para <i>data centers</i> , uma aplicação de alto valor e em crescente demanda, otimizando a receita e a utilização dos ativos [12].	3
	Estabilidade e Confiabilidade	Diferente de fontes renováveis intermitentes como solar e eólica, a energia nuclear oferece uma base de geração de energia estável e confiável, 24/7 [16].	3
	Design Compacto e Modular	O uso de ciclos S-CO ₂ resulta em turbomáquinas menores, e o	2

Categoria	Fator	Descrição	Pontuação
		conceito de SMR é inerentemente modular, o que pode reduzir os custos e o tempo de construção [5, 17].	
Fraquezas (Weaknesses)	Complexidade Técnica e de Integração	O sistema integra múltiplas tecnologias complexas (SMR, S-CO ₂ , ORC, chiller de absorção), o que aumenta os desafios de engenharia, controle e manutenção.	3
	Custo de Capital Inicial Elevado	Apesar da modularidade, o custo inicial de um SMR e dos ciclos de potência associados ainda é significativo, representando uma barreira financeira [13].	3
	Percepção Pública e Aceitação	A energia nuclear ainda enfrenta resistência pública devido a preocupações com segurança, gerenciamento de resíduos e proliferação nuclear [18].	2
	Gerenciamento de Resíduos Nucleares	A questão do armazenamento e descarte de longo	2

Categoria	Fator	Descrição	Pontuação
		prazo do combustível nuclear usado permanece um desafio técnico e político não totalmente resolvido [19].	
Oportunidades (Opportunities)	Crescimento da Demanda por Data Centers	A expansão da economia digital, IA e computação de alto desempenho impulsiona uma demanda massiva e crescente por eletricidade e resfriamento, que o sistema pode suprir de forma eficiente [12].	3
	Transição Energética e Metas Climáticas	A necessidade global de reduzir as emissões de carbono abre espaço para a energia nuclear como uma fonte de energia limpa e firme no mix energético [15].	3
	Aplicações em Locais Remotos	SMRs são ideais para fornecer energia a comunidades isoladas, operações de mineração ou bases militares, onde a logística de combustíveis fósseis é cara e complexa [20].	2

Categoria	Fator	Descrição	Pontuação
	Desenvolvimento de Novas Tecnologias	O projeto impulsiona a inovação em reatores avançados, ciclos de potência e sistemas de refrigeração, podendo gerar propriedade intelectual e novas oportunidades de mercado [8].	2
Ameaças (Threats)	Regulamentação e Licenciamento	O processo de licenciamento para novas usinas nucleares é extremamente longo, caro e rigoroso, representando um risco significativo para o cronograma e a viabilidade do projeto [14].	3
	Concorrência de Outras Fontes de Energia	A contínua redução de custos de energias renováveis (solar, eólica) e de tecnologias de armazenamento de energia (baterias) pode tornar o sistema menos competitivo economicamente [21].	2
	Riscos de Segurança e Proliferação	Embora SMRs possuam características de segurança passiva, o risco de acidentes	2

Categoria	Fator	Descrição	Pontuação
		nucleares e a possibilidade de desvio de material para fins não pacíficos são ameaças inerentes [18].	
	Volatilidade da Cadeia de Suprimentos	A construção de componentes nucleares e de alta tecnologia depende de uma cadeia de suprimentos global especializada, que pode ser vulnerável a interrupções geopolíticas e econômicas [22].	2

4. Referências

[1] Dostal, V. (2004). *A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors*. Massachusetts Institute of Technology. [2] Tchanche, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, G., & Papadakis, G. (2011). Low-temperature solar organic Rankine cycles for the production of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3963-3974. [3] Wang, J., & Zhao, L. (2019). Thermodynamic analysis and optimization of a novel combined power cycle based on supercritical CO₂ Brayton cycle and organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 186, 1-13. [4] Da Silva, R. A., & Milanez, L. F. (2018). Thermodynamic analysis of an absorption chiller driven by waste heat from a data center. *Energy Conversion and Management*, 171, 1073-1082. [5] Wu, P., Ma, Y., Gao, C., Liu, W., Shan, J., Huang, Y., & Li, M. (2020). A review of research and development of supercritical carbon dioxide Brayton cycle technology in nuclear engineering applications. *Nuclear Engineering and Design*, 367, 110792. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549320302612>] [6] Mahmoudi, A., Fazli, M., & Morad, M. R. (2018). A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 136, 1019-1032. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118301248>] [7] Ravi Kumar, K., & Sankar, R. (2024). Towards sustainable energy – exploring the supercritical carbon dioxide (S-CO₂) Brayton cycle for various applications: a critical review. *International Journal of Ambient Energy*, 45(1), 2378046. [<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01430750.2024.2378046>] [8] Vinoya, C. L.,

Ubando, A. T., Culaba, A. B., & Chen, W. H. (2023). State-of-the-art review of small modular reactors. *Energies*, 16(7), 3224. [<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3224>] [9] Liu, Y., Wang, Y., & Huang, D. (2019). Supercritical CO₂ Brayton cycle: A state-of-the-art review. *Energy*, 189, 116132. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219315786>] [10] Sun, Z., & Li, M. (2023). Performance improvement of ORC by breaking the barrier of heat source temperature. *Energy Conversion and Management*, 277, 116604. [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222022903>] [11] Zhang, X., & Ge, Y. (2023). Power Generation with Renewable Energy and Advanced Supercritical CO₂ Thermodynamic Power Cycles: A Review. *Energies*, 16(23), 7781. [<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/23/7781>] [12] Sol-Ark. (2025, September 9). *Solar-Boosted ORC is Optimizing Data Center Energy*. [<https://www.sol-ark.com/optimizing-data-center-energy-with-solar-boosted-orc-systems/>] [13] ITIF. (2025, April 14). *Small Modular Reactors: A Realist Approach to the Future of Nuclear Power*. [<https://itif.org/publications/2025/04/14/small-modular-reactors-a-realist-approach-to-the-future-of-nuclear-power/>] [14] OECD-NEA. (2025, July 22). *New NEA Small Modular Reactor Dashboard edition reveals global expansion of SMR deployment*. [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_108268/new-nea-small-modular-reactor-dashboard-edition-reveals-global-expansion-of-smr-deployment] [15] Canary Media. (2025, July 21). *Small modular reactors are gaining steam globally. Will any get built?*. [<https://www.canarymedia.com/articles/nuclear/small-modular-reactors-are-having-a-moment-will-any-get-built>] [16] IAEA. (2021, November 4). *What are Small Modular Reactors (SMRs)?*. [<http://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>] [17] ATS Industrial Automation. (2024, August 15). *How Technology is Helping Advance the SMR Industry*. [<https://atsindustrialautomation.com/blog-posts/how-technology-is-helping-advance-the-smr-industry/>] [18] NRC. *Advanced Reactors*. [<https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced>] [19] Energy.gov. *Advanced Small Modular Reactors (SMRs)*. [<https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>] [20] Energy.gov. *Benefits of Small Modular Reactors (SMRs)*. [<https://www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs>] [21] CNBC. (2025, October 5). *Nuclear in my backyard? More of America, and market, warming to nuclear power*. [<https://www.cnbc.com/2025/10/05/nuclear-power-modular-reactor-energy-demand-public-market-risks.html>] [22] ADL. (2025, June 5). *The growth & future of small modular reactors*. [<https://www.adlittle.com/en/insights/report/growth-future-small-modular-reactors>]