

Sistema Integrado SMR para Poligeração Nuclear-Térmica-Digital

Autores: José Soares Sobrinho ¹

¹ Departamento de Tecnologias Inovadoras para Indústrias de Alta Tecnologia, MEX Energia, São Paulo, Brasil

Correspondência: zeh.sobrinho@mex.eco.br

Publicado em: 2025

Resumo

Pequenas centrais nucleares são uma direção promissora de pesquisa para o desenvolvimento de energia livre de carbono em sistemas de energia isolados e em regiões remotas com infraestrutura subdesenvolvida. Melhorar a eficiência das unidades de potência integradas com pequenos reatores modulares melhora as perspectivas de comercialização de tais projetos. Ciclos de potência baseados em dióxido de carbono supercrítico são uma solução eficaz para usinas nucleares que usam instalações de reatores com uma temperatura inicial do refrigerante acima de 550 °C. No entanto, a presença de fontes de calor rejeitado de baixa temperatura em ciclos fechados de Brayton indica um potencial para economia de energia. Este artigo apresenta uma análise termodinâmica abrangente da integração de um ciclo Rankine orgânico de baixa temperatura adicional para recuperação de calor em ciclos de dióxido de carbono supercrítico. Um esquema para recuperação sequencial de calor de várias fontes em ciclos S-CO₂ é proposto. Verificou-se que o uso de R134a melhorou a potência do circuito

de baixa temperatura. Revelou-se que no ciclo Brayton S-CO₂ com um recuperador, o acréscimo do ORC aumentou a eficiência líquida em uma média de 2,98%, e no ciclo de recompressão em 1,7-2,2%. Com a recuperação sequencial de calor no ciclo recuperativo do inter-resfriamento do compressor e do resfriador principal, o aumento da eficiência da superestrutura ORC será de 1,8%.

Palavras-chave: pequeno reator modular; SMR; S-CO₂; ORC; análise termodinâmica; eficiência energética

1. Introdução

1.1. Status Atual dos Projetos de Pequenos Reatores Modulares

Hoje, a indústria global de energia enfrenta um grande desafio na redução de emissões de gases tóxicos e de efeito estufa na atmosfera. Atenção especial é dada ao problema da crescente concentração atmosférica de dióxido de carbono, que contribui para acelerar as mudanças climáticas globais. Muitos países estão tomando iniciativas em nível legislativo para reduzir sua pegada de carbono, inclusive através do desenvolvimento de geração de eletricidade livre de carbono. Em regiões isoladas de sistemas energéticos integrados, incluindo regiões africanas e árticas, a demanda por usinas de energia ecologicamente corretas está aumentando.

Um componente chave dos sistemas de energia isolados são as fontes de energia de baixa potência com emissões nocivas mínimas. O alto custo dos combustíveis fósseis em regiões remotas, combinado com regulamentações ambientais mais rigorosas, contribui para a crescente relevância da introdução de tecnologias de geração de energia livre de carbono. As usinas nucleares com pequenos reatores modulares (SMR) são usinas promissoras cujo desempenho não depende em grande parte das condições climáticas e cuja operação não está associada à emissão de substâncias tóxicas e gases de efeito estufa.

Pequenas usinas nucleares (SNPPs) são uma forma promissora de fornecer energia para regiões remotas. Devido à produção estável de energia em áreas onde não há acesso a combustíveis fósseis, torna-se possível implementar novos projetos industriais. Ao mesmo tempo, a operação das SNPPs não é acompanhada por emissões de dióxido de carbono na atmosfera e, ao contrário das fontes renováveis, a potência liberada da unidade de potência é estável e não depende das condições climáticas. Além da geração de energia, tais unidades de potência podem ser usadas como fornecimento centralizado de calor para cidades, empresas, dessalinização da água do mar e produção de hidrogênio, o que possibilita atender a uma ampla gama de requisitos industriais de locais remotos.

A operação da SNPP é baseada no uso de um pequeno reator modular (SMR) caracterizado por uma capacidade relativamente pequena (até 300 MWe) e cujo projeto é baseado em soluções modulares com possibilidade de expansão da capacidade e implantação em uma região remota com infraestrutura subdesenvolvida. Pequenos reatores modulares podem ser fabricados e montados diretamente na fábrica e entregues no local em estado montado, o que reduzirá os

investimentos de capital na construção de novas usinas de energia em regiões remotas.

Muitos países membros da AIEA estão atualmente conduzindo pesquisas sobre instalações de reatores com capacidade inferior a 300 MW, e existem mais de 80 projetos diferentes de pequenos reatores modulares. Vários deles já foram implementados. A usina nuclear Akademik Lomonosov tem capacidade elétrica de até 70 MW e é a única usina nuclear flutuante do mundo. Está localizada na cidade de Pevek, na Sibéria. Esta usina inclui dois pequenos reatores KLT-40S. A construção de uma SNPP terrestre com instalações de reatores RITM-200N começou na Yakutia (Rússia). Uma unidade de potência com um pequeno reator modular ACR 100 está em construção na China desde 2021. Uma unidade de potência com um pequeno reator modular CAREM está em construção na Argentina. O projeto VAYGR SMR passou pela fase de licenciamento nos EUA, mas o projeto foi cancelado no final de 2023. Desenvolvimentos também estão em andamento no Reino Unido (Rolls-Royce, Londres), Minato, Japão (MHI, Tóquio) e em vários outros países.

No entanto, várias questões precisam ser abordadas antes que essa tecnologia possa ser disseminada ativamente. Em primeiro lugar, as perspectivas de comercialização de projetos de usinas nucleares com pequenos reatores modulares permanecem incertas: a transição para uma escala não tradicional exigirá o uso de soluções técnicas não tradicionais, e o custo da eletricidade deve ser mantido em um nível competitivo. O exemplo do projeto VOYAGER mostra que hoje é o custo final da eletricidade para o consumidor que determinará em grande parte as perspectivas da pequena indústria de energia nuclear.

1.2. Ciclos de Potência de Dióxido de Carbono Supercrítico

Uma maneira de melhorar as perspectivas de comercialização para projetos de usinas nucleares pode ser melhorar a eficiência energética da geração: um uso mais racional do calor liberado no núcleo do reator pode aumentar a capacidade da unidade de potência sem complicar o projeto do próprio reator. A geração de energia elétrica em unidades de potência com pequenos reatores modulares exigirá o uso de novas soluções de circuito não tradicionais para usinas nucleares de alta potência. Um grande número de estudos concluídos nos últimos 30 anos foi dedicado ao uso de transportadores de calor não convencionais em usinas nucleares. Hoje, a solução de geração mais frequentemente

usada é um ciclo de vapor-água. No entanto, como mostrado por muitos autores, um ciclo fechado de Brayton com dióxido de carbono na faixa de parâmetros supercríticos (S-CO_2) pode ser uma alternativa a tal ciclo de potência.

As unidades de potência a vapor convencionais em usinas nucleares operam no ciclo Rankine, onde o calor gerado na planta do reator é usado para gerar vapor, que gera trabalho ao se expandir em uma turbina. Nesse caso, as turbomáquinas têm peso e dimensões significativos, uma vez que o grau de expansão do meio de trabalho no ciclo é relativamente alto. Em ciclos de dióxido de carbono supercrítico, ao contrário do ciclo de turbina a vapor Rankine, o grau de expansão geralmente não excede dois a três e a magnitude da densidade do fluido de trabalho é maior que a do vapor de água. Portanto, as turbomáquinas têm dimensões significativamente menores, e a composição do equipamento principal é geralmente limitada a um pequeno número. Reduzir o consumo de metal e a quantidade de equipamentos principais no ciclo de potência torna-se essencial para pequenas usinas nucleares: isso reduzirá o custo de capital da construção da unidade de potência e, como resultado, reduzirá o custo da eletricidade fornecida aos consumidores.

1.3. Uso de Ciclos Rankine Orgânicos em Projetos de Pequenos Reatores Modulares

Apesar de um nível de eficiência energética relativamente alto, os ciclos de potência com refrigerante de dióxido de carbono têm fontes de calor dissipadas de baixo potencial. A temperatura de tais fontes geralmente não excede 150–200 °C, o que complica o processo de recuperação, mas seu uso benéfico poderia fornecer um aumento adicional na potência fornecida. Isso poderia ser alcançado usando unidades de potência adicionais operando com refrigerantes com baixos parâmetros críticos (por exemplo, hidrocarbonetos, fluorocarbonos e hidroclorofluorcarbonos). A combinação de ciclos Rankine orgânicos (ORC) com um ciclo S-CO₂ pode se tornar relevante na resolução da questão de maximizar a eficiência da geração de energia de usinas nucleares com pequenos reatores modulares.

2. Objeto de Pesquisa

Este estudo diz respeito a ciclos de potência binários que consistem em um ciclo de dióxido de carbono supercrítico de alta temperatura e um ciclo Rankine orgânico de baixa temperatura para usinas nucleares com pequenos reatores modulares. As unidades do reator são consideradas no estudo como uma fonte de calor, e o calor é transferido do circuito do reator para o circuito de dióxido de carbono.

A solução mais simples em termos do escopo do equipamento do ciclo S-CO₂ é o ciclo fechado de Brayton. Neste caso, o dióxido de carbono é aquecido em um trocador de calor do reator sem transformação de fase, expandido em uma turbina de uma

pressão inicial P_0 para uma pressão final P_c , e então resfriado em um resfriador para perto da temperatura crítica. Em seguida, o meio é comprimido no compressor e fornecido ao trocador de calor do reator, e o ciclo se fecha.

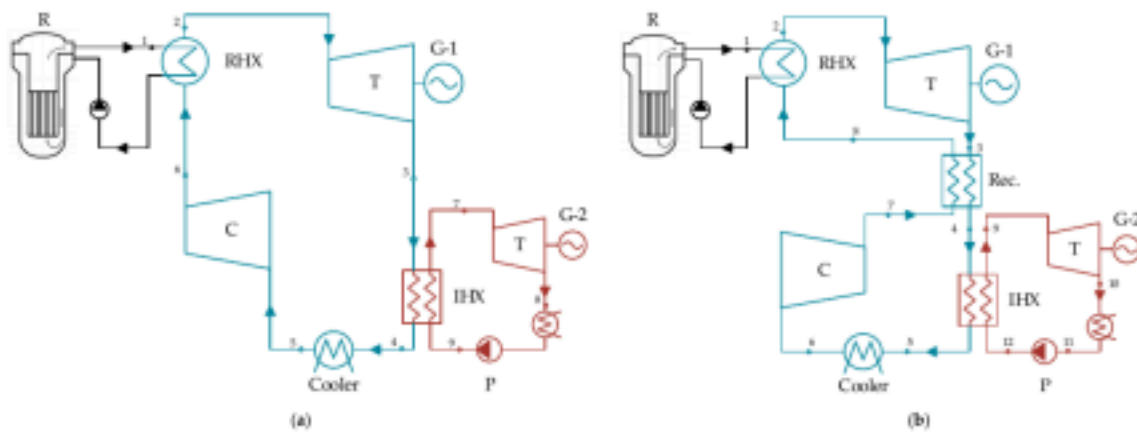


Figure 1. Binary S-CO₂/ORC power cycles for small modular reactors. (a) Simple S-CO₂ cycle. (b) S-CO₂ cycle with recuperator.

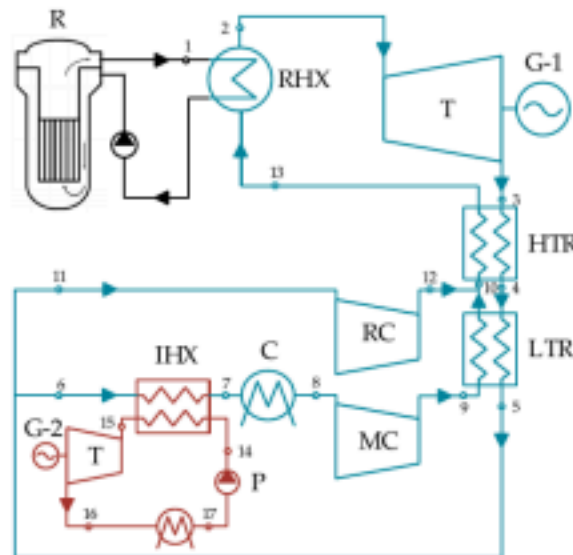


Figure 2. Recompression Brayton cycle with ORC.

Figura 1. Ciclos de potência binários S-CO₂/ORC para pequenos reatores modulares. **(a)** Ciclo S-CO₂ simples. **(b)** Ciclo S-CO₂ com recuperador.

Uma das soluções mais promissoras é o ciclo Brayton com recompressão: sua eficiência pode exceder os valores do ciclo regenerativo e até mesmo os valores dos ciclos com resfriamento intermediário no compressor e aquecimento intermediário na turbina.

Figura 2. Ciclo Brayton de recompressão com ORC.

Além do resfriador, a recuperação de calor é possível em ciclos S-CO₂ se um resfriamento intermediário do compressor for usado. Um intercooler é instalado para reduzir o trabalho gasto na compressão do meio, mas o calor retirado neste processo, embora de baixa temperatura, pode ser útilmente utilizado em um ciclo de baixa temperatura.

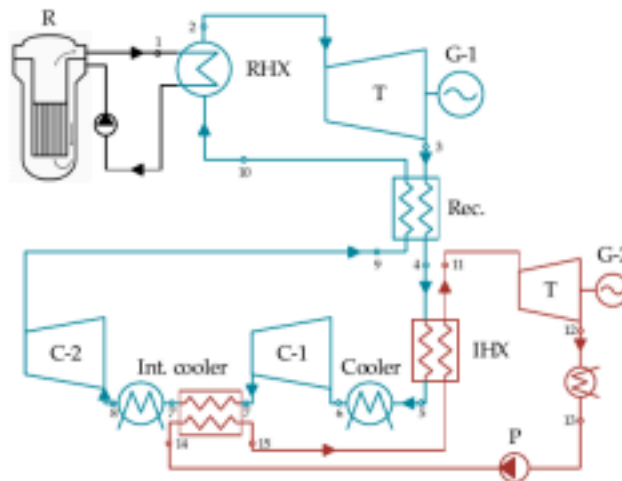


Figure 3. S-CO₂/ORC cycle with recuperator and intercooling.

Figura 3. Ciclo S-CO₂/ORC com recuperador e intercooling.

3. Métodos

Para os ciclos descritos anteriormente, este estudo fornece uma análise termodinâmica da eficácia da combinação dos ciclos S-CO₂ e ORC. Os parâmetros (temperatura, pressão e entalpia) nos nós do ciclo de potência foram calculados com base nas equações de balanços térmicos e de materiais para cada elemento do ciclo, utilizando o banco de dados de propriedades termodinâmicas NIST REFPROP. As tarefas de cálculo e otimização foram resolvidas usando Python 3.9 e o pacote scipy.optimize 1.13.

Tabela 2. Premissas utilizadas nos cálculos.

Parâmetro	Valor
Temperatura máxima da fonte de calor	500–800 °C
Temperatura mínima da fonte de resfriamento	30 °C
Diferença mínima de temperatura nos trocadores de calor	10 °C
Perda de pressão nos trocadores de calor S-CO ₂	50 kPa
Eficiência isentrópica das turbomáquinas S-CO ₂	90%
Eficiência isentrópica das turbomáquinas ORC	85%

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise Termodinâmica da Eficiência dos Ciclos S-CO₂

Em um ciclo Brayton fechado S-CO₂, a eficiência térmica é amplamente

determinada pela temperatura de entrada e também depende das pressões de entrada e saída no ciclo.

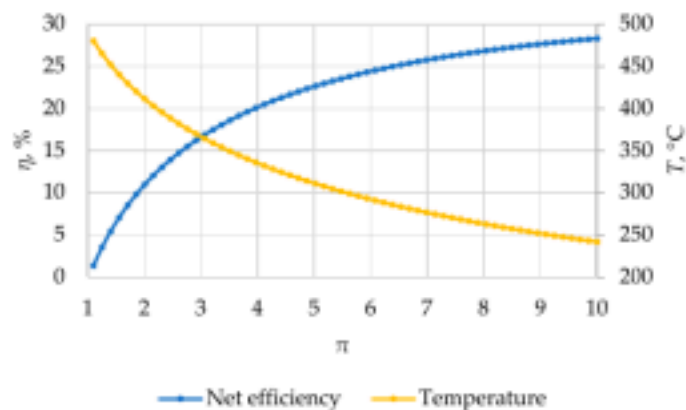


Figure 4. Dependence of the net efficiency of a simple S-CO₂ Brayton cycle and the temperature after expansion in the turbine on the pressure ratio at $T_0 = 500$ °C.

Figura 4. Dependência da eficiência líquida de um ciclo Brayton S-CO₂ simples e da temperatura após a expansão na turbina na razão de pressão em $T_0 = 500$ °C. A recuperação de calor permite um aumento na eficiência térmica do ciclo. A figura a seguir mostra os gráficos de dependência da eficiência nas razões de pressão e pressões finais.

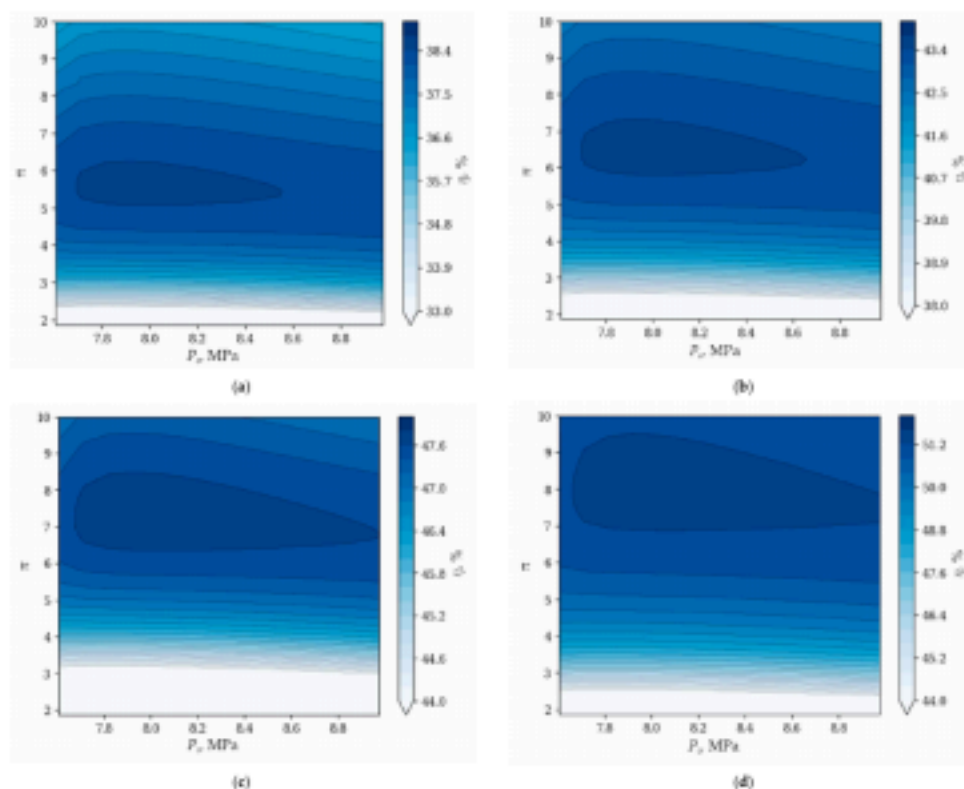


Figure 5. Dependence of the efficiency of the S-CO₂ Brayton cycle with a recuperator on the pressure ratio and pressure in the cooler. (a) $T_0 = 500$ °C. (b) $T_0 = 600$ °C. (c) $T_0 = 700$ °C. (d) $T_0 = 800$ °C.

Figura 5. Dependência da eficiência do ciclo Brayton S-CO₂ com recuperador na razão de pressão e pressão no resfriador. **(a)** $T_0 = 500$ °C. **(b)** $T_0 = 600$ °C. **(c)** $T_0 = 700$ °C. **(d)** $T_0 = 800$ °C.

Um dos ciclos S-CO₂ mais eficientes é o ciclo Brayton de recompressão. Em tal ciclo, a eficiência será determinada não apenas pela razão de pressão, mas também pela fração do fluxo que entra no segundo compressor.

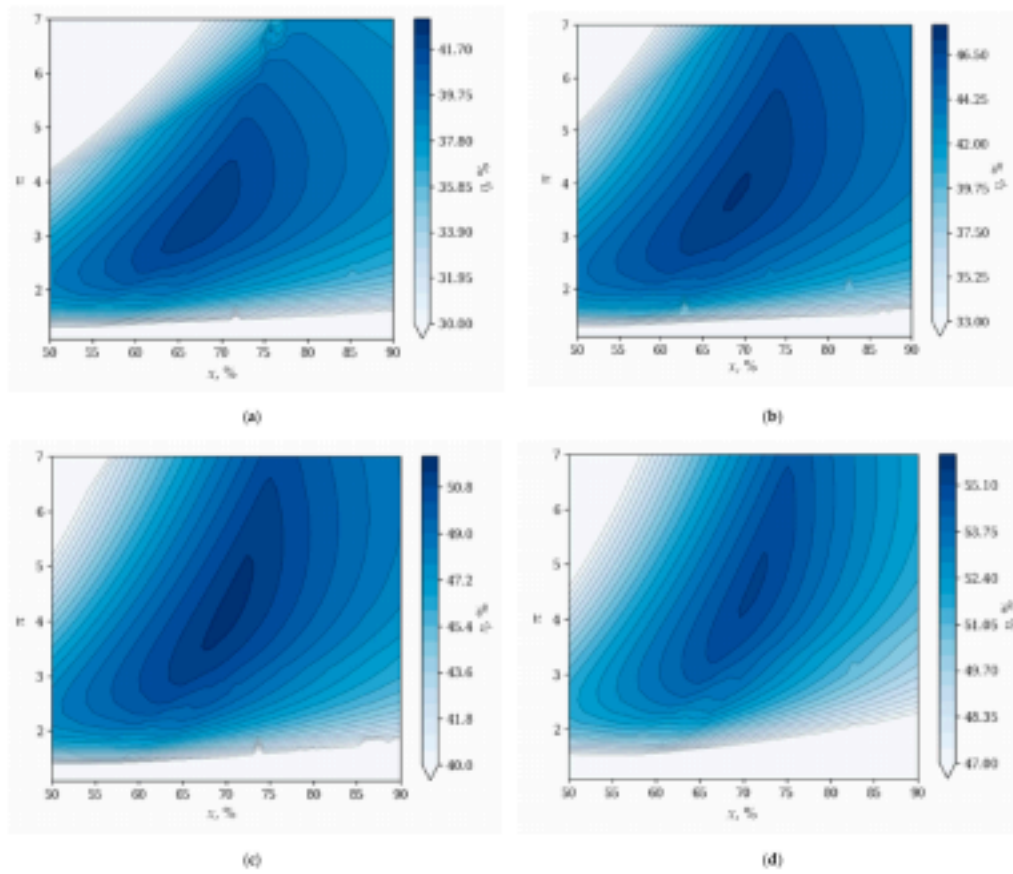


Figure 6. Dependence of the net efficiency of the S-CO₂ recompression cycle on the pressure ratio and the proportion of flow entering the main compressor. (a) $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. (b) $T_0 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. (c) $T_0 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. (d) $T_0 = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

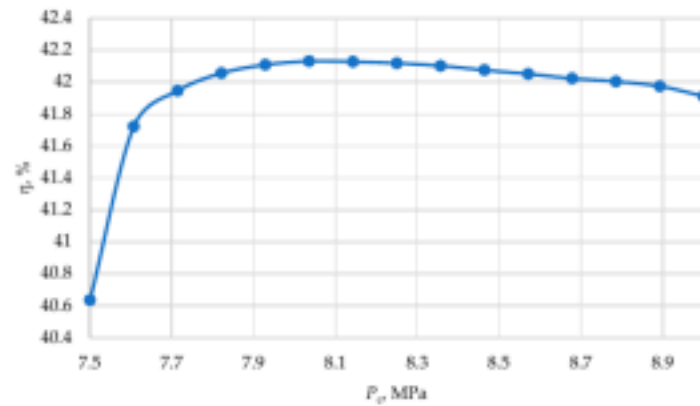


Figure 7. Dependence of the efficiency of the recompression cycle on the pressure in the cooler at optimal x and π .

Figura 6. Dependência da eficiência líquida do ciclo de recompressão S-CO₂ na razão de pressão e na proporção de fluxo que entra no compressor principal. **(a)** $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. **(b)** $T_0 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. **(c)** $T_0 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. **(d)** $T_0 = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

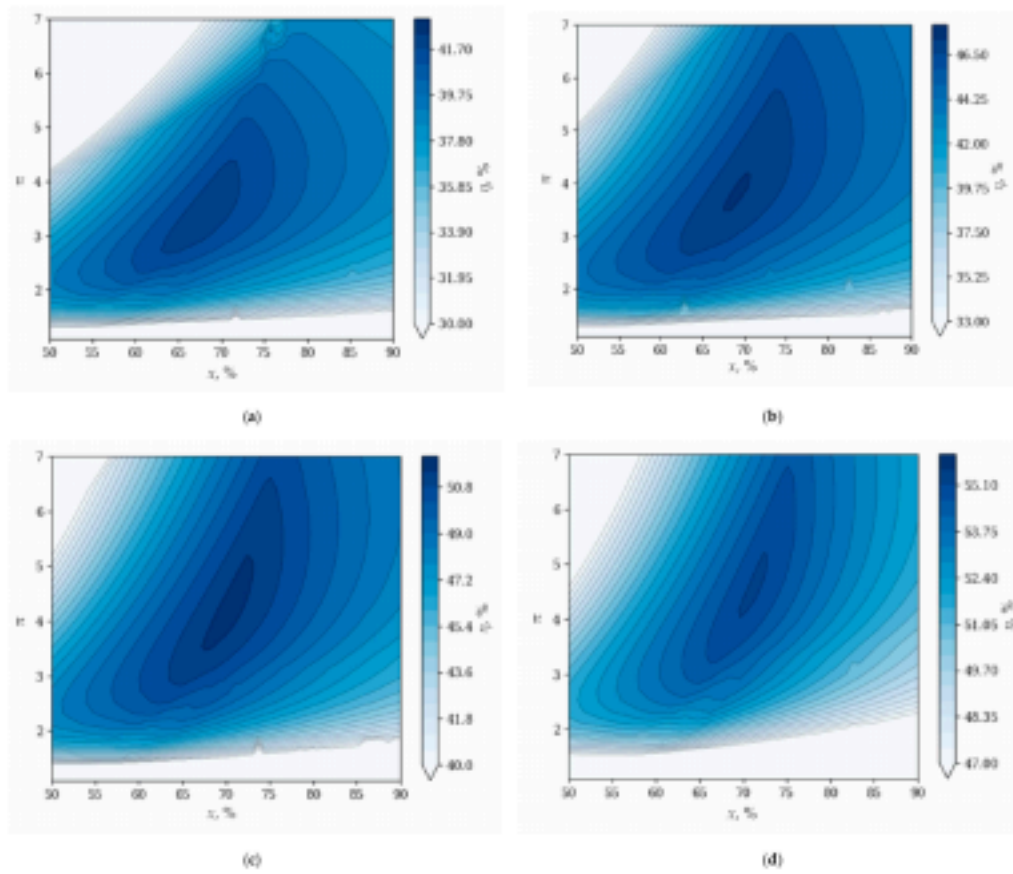


Figure 6. Dependence of the net efficiency of the S-CO₂ recompression cycle on the pressure ratio and the proportion of flow entering the main compressor: (a) $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. (b) $T_0 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. (c) $T_0 = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. (d) $T_0 = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

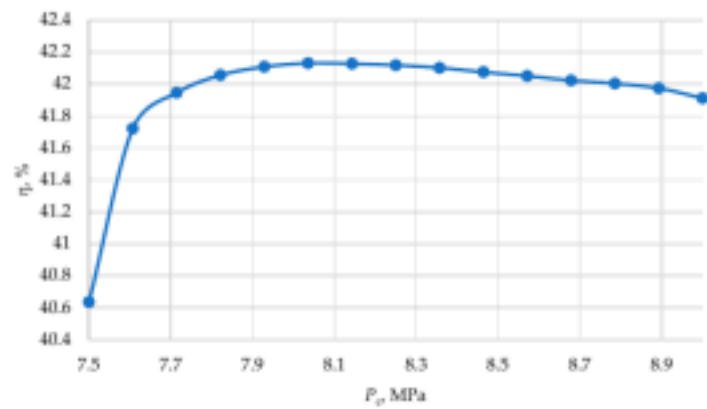


Figure 7. Dependence of the efficiency of the recompression cycle on the pressure in the cooler at optimal x and π .

Figura 7. Dependência da eficiência do ciclo de recompressão na pressão no resfriador com x e π ótimos.

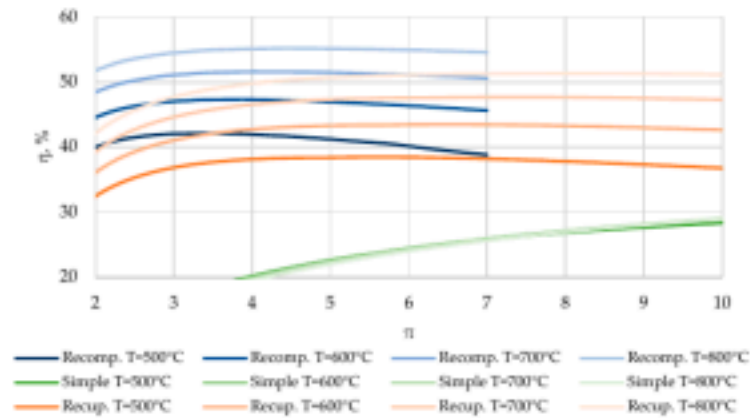


Figure 8. Dependence of the efficiency of S-CO₂ power cycles on π at different initial temperatures.

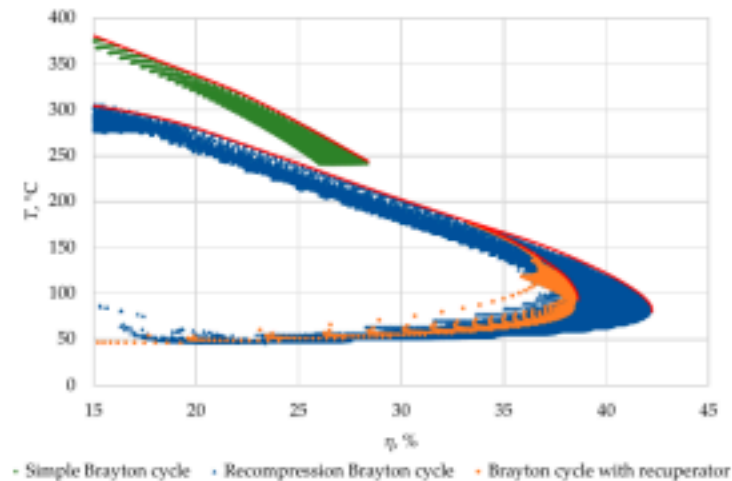


Figure 9. η -T diagram for S-CO₂ cycles (red lines—best cases for binary cycles) at $T_0 = 500$ °C.

Figura 8. Dependência da eficiência dos ciclos de potência S-CO₂ em π em diferentes temperaturas iniciais.

4.2. Análise de Recuperação de Calor Residual

Em ciclos binários, a eficiência geral da produção de eletricidade é determinada tanto pela eficiência de alta temperatura quanto pela de baixa temperatura, que são muitas vezes fatores conflitantes.

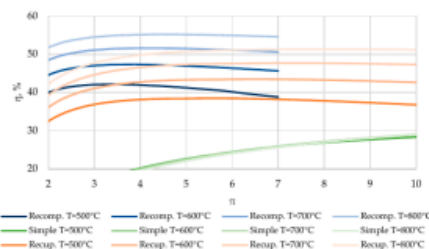


Figure 8. Dependence of the efficiency of S-CO₂ power cycles on π at different initial temperatures.

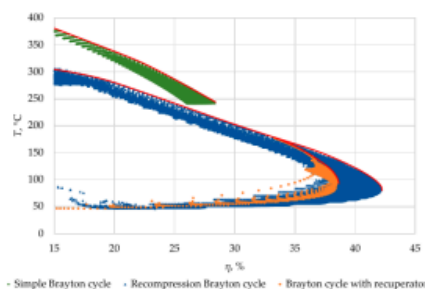


Figure 9. η -T diagram for S-CO₂ cycles (red lines—best cases for binary cycles) at $T_0 = 500$ °C.

Figura 9. Diagrama η -T para ciclos S-CO₂ (linhas vermelhas—melhores casos para ciclos

binários) em $T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

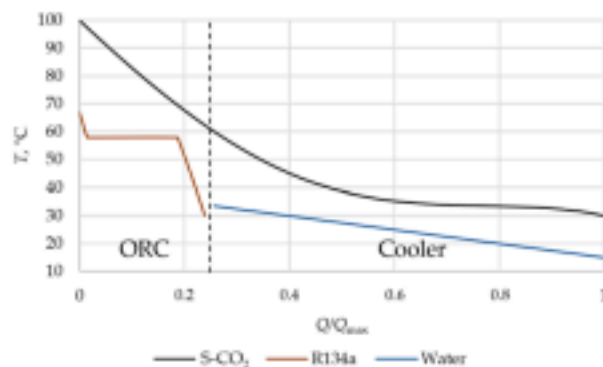


Figure 10. T-Q diagram of S-CO₂ cooling in a cycle with ORC before the cooler.

Figura 10. Diagrama T-Q de resfriamento de S-CO₂ em um ciclo com ORC antes do resfriador.

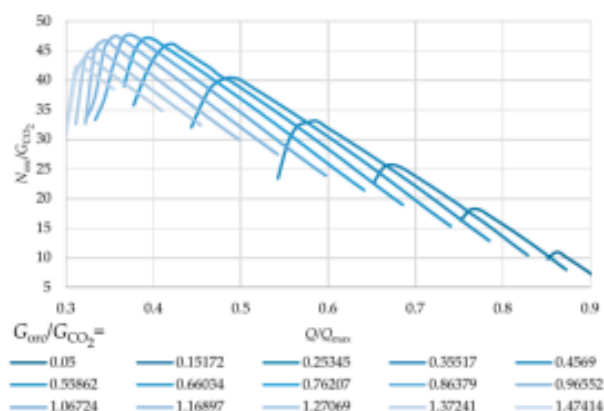


Figure 11. Influence of the share of heat transferred to the cooler and mass flow in the ORC on the specific power of the low-temperature circuit (freon R134a).

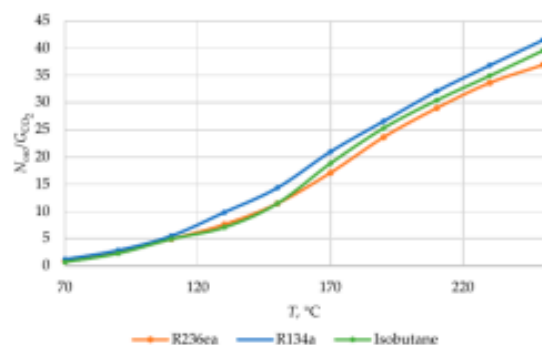


Figure 12. Dependence of the specific power of the ORC on the type of fluid at different temperatures of S-CO₂ entering the intermediate heat exchanger.

Figura 11. Influência da parcela de calor transferida para o resfriador e vazão mássica no ORC na potência específica do circuito de baixa temperatura (freon R134a).

Figura 12. Dependência da potência específica do ORC no tipo de fluido em diferentes temperaturas de S-CO₂ entrando no trocador de calor intermediário.

4.3. Comparação de Parâmetros Energéticos de Ciclos de Potência Binários para SMR

7.5 MPa, which does not correspond to the optimal value of an S-CO₂ cycle. At these parameters, the temperature of the rejected heat is high, leading to a high-power output of the low-temperature cycle.

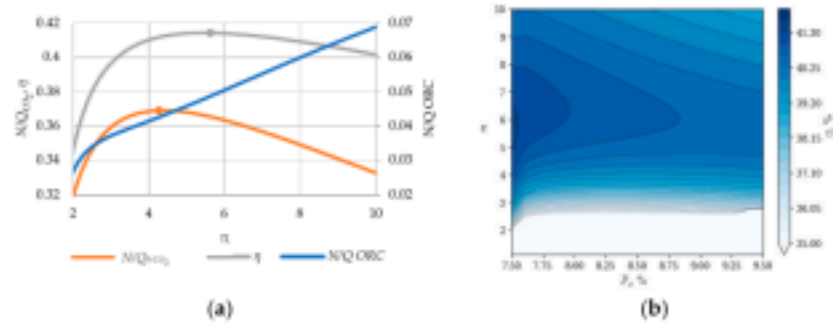


Figure 13. Specific power S-CO₂ and ORC and net efficiency of binary cycle. (a) Specific power S-CO₂ and ORC. (b) Net efficiency.

A similar effect is observed in the compression cycle. The presence of an optimal efficiency value of a binary cycle exceeding the efficiency value of a single compression cycle indicates the prospects of using organic Rankine cycles in such cycles. Table 4 shows the parameters at the main points of the power cycle at $T_0 = 500$ °C.

Table 4. Parameters at the main points of optimized S-CO₂/ORC cycles at $T_0 = 500$ °C.

Point	Fluid	T	P	H	S	G/G_0
Recompression						
1	Na	500.000	0.100	-	-	-
2	S-CO ₂	490.000	28.312	954.193	2.571	1.000
3	S-CO ₂	343.978	7.750	803.322	2.598	1.000
4	S-CO ₂	212.823	7.700	655.236	2.330	1.000
5	S-CO ₂	87.225	7.650	506.222	1.977	0.683
6	S-CO ₂	87.225	7.650	506.222	1.977	0.683
7	S-CO ₂	50.400	7.625	444.319	1.793	0.683
8	S-CO ₂	32.000	7.600	315.085	1.376	0.683
9	S-CO ₂	78.162	28.275	349.289	1.386	1.000
10	S-CO ₂	202.823	28.412	578.216	1.948	0.317
11	S-CO ₂	87.225	7.650	506.222	1.977	0.317
12	S-CO ₂	218.569	28.412	601.418	1.996	1.000
13	S-CO ₂	310.369	28.362	726.302	2.230	0.215
14	R134a	30.271	1.155	242.104	1.144	0.215
15	R134a	58.896	1.098	438.556	1.765	0.215
16	R134a	46.436	0.770	431.794	1.769	0.215
17	R134a	30.000	0.770	241.722	1.144	0.215
With recuperator						
1	Na	500.000	0.100	-	-	-
2	CO ₂	490.000	40.959	946.294	2.486	1.000
3	CO ₂	303.239	7.650	757.225	2.523	1.000
4	CO ₂	137.604	7.600	569.354	2.140	1.000
5	CO ₂	67.211	7.550	476.576	1.892	1.000
6	CO ₂	32.000	7.500	362.206	1.531	1.000
7	CO ₂	127.604	41.059	428.143	1.548	1.000
8	CO ₂	243.488	41.009	616.014	1.961	1.000
9	R134a	96.818	2.944	449.348	1.736	0.451
10	R134a	39.038	0.770	424.255	1.745	0.451
11	R134a	30.000	0.770	241.722	1.144	0.451
12	R134a	31.417	2.944	243.748	1.144	0.451

Figura 13. Potência específica S-CO₂ e ORC e eficiência líquida do ciclo binário. (a) Potência específica S-CO₂ e ORC. (b) Eficiência líquida.

5. Sistema Integrado SMR para Poligeração Nuclear-Térmica-Digital

"Integração SMR-S-CO₂/ORC com Resfriamento de Data Center via Chiller de Absorção Térmica"

GLOSSÁRIO EXPANDIDO - COMPONENTES DO SISTEMA INTEGRADO

Componentes Primários do Ciclo de Potência

Componente	Símbolo	Função	Parâmetros Típicos
SMR (Small Modular Reactor)	-	Fonte térmica primária nuclear	100 MWh, 550-650°C
Turbina S-CO ₂	T	Expansão do CO ₂ supercrítico	Eficiência ~90-92%
Compressor Principal	C1	Compressão CO ₂ (baixa pressão)	$\eta = 90\%$, $\pi = 2.3-2.5$
Compressor de Recompressão	C2	Compressão fluxo secundário (IRC)	$\eta = 90\%$, $\pi = 1.6-1.7$
Recuperador HTR	HTR	Recuperação de calor alta temperatura	T = 200-350°C
Recuperador LTR	LTR	Recuperação de calor baixa temperatura	T = 80-200°C
Recuperador Principal	Rec	Recuperação interna do ciclo	$\epsilon = 0.85-0.95$
IHX (Intermediate Heat Exchanger)	IHX	Interface SMR-Ciclo ORC	$\Delta T_{min} = 10^{\circ}C$
Intercooler	IC	Resfriamento entre compressores	T = 80-100°C
Precooler	PC	Resfriamento final pré-compressor	T = 32-40°C

Componentes do Sistema ORC

Componente	Função	Fluido	Temperatura
Evaporador ORC	Vaporização fluido orgânico	R134a/R245fa	80-150°C
Turbina ORC	Expansão e geração elétrica	R134a	$\eta = 85\%$
Condensador ORC	Condensação pós-turbina	R134a	30-50°C
Bomba ORC	Pressurização fluido	R134a	$\eta = 85\%$

Sistema de Refrigeração por Absorção

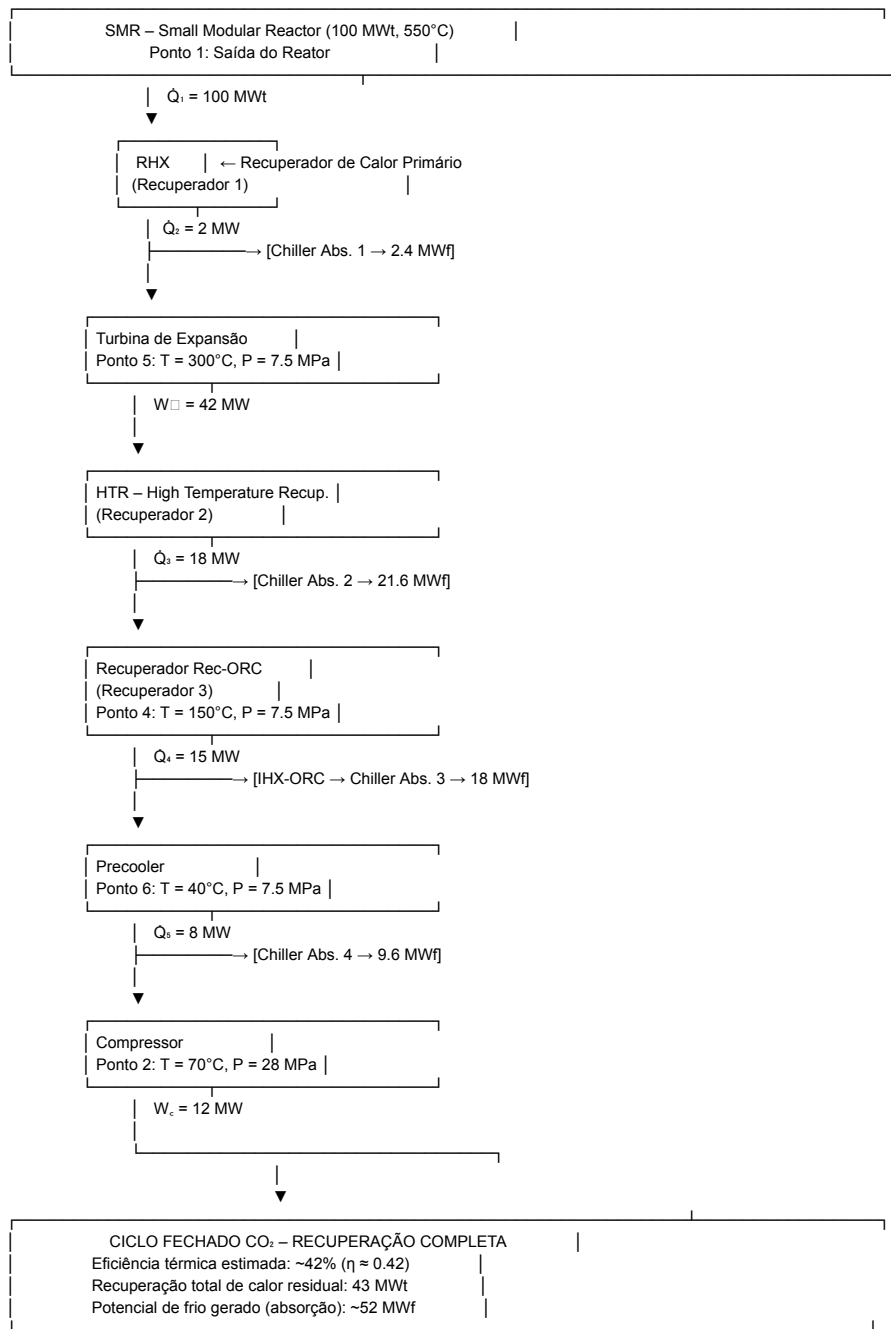
Componente	Tipo	Par de Trabalho	Temperatura/COP
Gerador (Alto)	Simples/Duplo Efeito	LiBr-H ₂ O	70-95°C / COP 0.7
Gerador (Baixo)	Duplo Efeito	LiBr-H ₂ O	140-180°C / COP 1.2-1.4
Absorvedor	Solução concentrada	LiBr-H ₂ O	30-40°C
Condensador	Rejeição de calor	H ₂ O vapor	35-45°C
Evaporador	Produção de frio	H ₂ O líquida	5-15°C
Trocador de Solução	Recuperação interna	LiBr-H ₂ O	$\epsilon = 0.7-0.8$

Componentes do Sistema de Resfriamento de Data Center

Componente	Especificação	Aplicação	Parâmetros
NVIDIA HGX H100	8x GPU	Servidor AI/HPC	10.2 kW/servidor
Cold Plate Líquido	Contato direto chip	GPU/CPU cooling	60-70°C água retorno
Manifold de Distribuição	CDU (Coolant Distribution Unit)	Distribuição água gelada	7-12°C
Heat Exchanger Líquido-Líquido	Interface primário-secundário	Isolamento circuitos	$\Delta T = 3-5^{\circ}\text{C}$

NOVOS DIAGRAMAS DE FLUXO E BALANÇO ENERGÉTICO

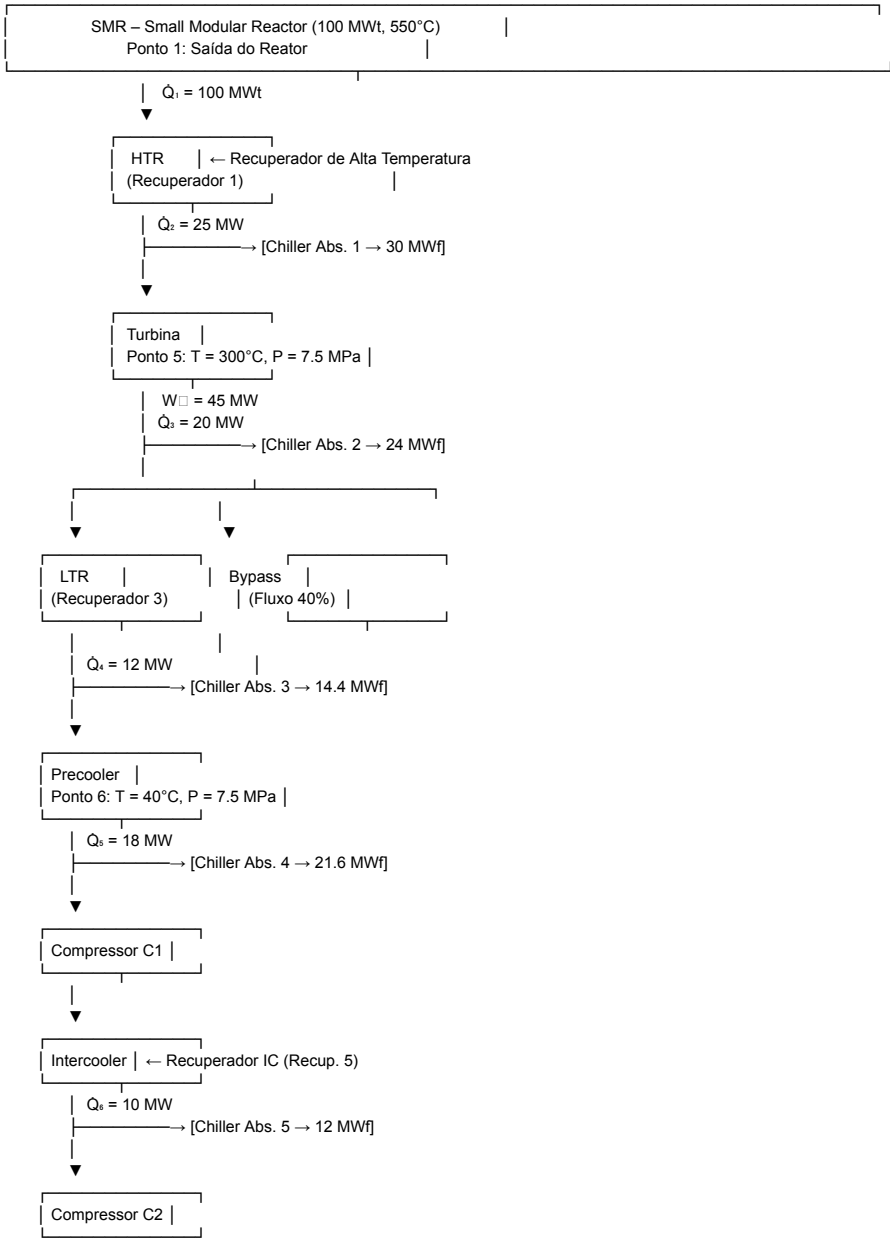
Diagrama 1: Ciclo Simples Recuperado (SRC) - Recuperação Completa



TOTAL SISTEMA SRC:

- **Potência Térmica SMR:** 100 MWth
- **Potência Elétrica Líquida:** 39.2 MWe ($\eta = 39.2\%$)
- **Calor Recuperado Total:** 43 MWth
- **Capacidade de Refrigeração Total:** 51.6 MW (14,673 TR)

Diagrama 2: Ciclo com Resfriamento Intermediário (IRC)



TOTAL SISTEMA IRC:

- **Potência Térmica SMR:** 100 MWth
- **Potência Elétrica Líquida:** 42.8 MWe ($\eta = 42.8\%$)
- **Calor Recuperado Total:** 85 MWth
- **Capacidade de Refrigeração Total:** 102 MW (29,010 TR)

ANÁLISE DETALHADA DOS PONTOS COM CÍRCULO AZUL

Tabela de Recuperação de Calor - SRC

Ponto	Localização	T (°C)	P (MPa)	Vazão CO ₂ (kg/s)	Q Disponível (MW)	Q Recuperado (MW)	Aplicação Chiller	
①	Saída RHX	550	28	85.5	2.0	2.0	Chiller efeito	duplo
②	Saída Turbina	300	7.5	85.5	18.0	18.0	Chiller efeito	duplo
③	Saída Recuperador	150	7.5	85.5	15.0	15.0	Chiller efeito	simples
④	Saída Precooler	40	7.5	85.5	8.0	8.0	Chiller efeito	simples

Tabela de Recuperação de Calor - IRC

Ponto	Localização	T (°C)	P (MPa)	Vazão CO ₂ (kg/s)	Q Disponível (MW)	Q Recuperado (MW)	Aplicação Chiller	
①	Saída HTR	320	28	92.3	25.0	25.0	Chiller efeito	duplo
②	Entrada LTR	300	7.5	92.3	20.0	20.0	Chiller efeito	duplo
③	Saída LTR	120	7.5	55.4	12.0	12.0	Chiller efeito	simples
④	Saída Precooler	40	7.5	55.4	18.0	18.0	Chiller efeito	simples
⑤	Saída Intercooler	95	15	92.3	10.0	10.0	Chiller efeito	simples

SISTEMA DE CHILLERS DE ABSORÇÃO - CONFIGURAÇÃO COMPLETA

Configuração SRC - 4 Chillers em Cascata

Chiller 1 (Duplo Efeito) - Alta Temperatura

- Entrada: 18 MW @ 300°C (Ponto ②)
- COP: 1.35
- Saída Frio: 24.3 MW (6,914 TR)
- Água Gelada: 7°C → 12°C
- Vazão: 1,050 kg/s

Chiller 2 (Simples Efeito) - Média Temperatura

- Entrada: 15 MW @ 150°C (Ponto ③)
- COP: 0.75
- Saída Frio: 11.25 MW (3,200 TR)
- Água Gelada: 7°C → 12°C
- Vazão: 540 kg/s

Chiller 3 (Simples Efeito) - Baixa Temperatura

- Entrada: 8 MW @ 95°C (Ponto ④)
- COP: 0.65
- Saída Frio: 5.2 MW (1,479 TR)
- Água Gelada: 9°C → 14°C
- Vazão: 250 kg/s

Chiller 4 (Simples Efeito) - Fonte Complementar

- Entrada: 2 MW @ 80°C (RHX)
- COP: 0.60
- Saída Frio: 1.2 MW (341 TR)
- Água Gelada: 10°C → 15°C
- Vazão: 57 kg/s

TOTAL CAPACIDADE FRIO: 41.95 MW (11,934 TR)
TOTAL VAZÃO ÁGUA GELADA: 1,897 kg/s (6,829 m³/h)

INTEGRAÇÃO COM DATA CENTER NVIDIA

Dimensionamento de Servidores por Configuração

Configuração SRC - 41.95 MW de Refrigeração

Servidores NVIDIA HGX H100

- └─ Potência por servidor: 10.2 kW
- └─ Fração refrigeração líquida: 90% (9.18 kW/servidor)
- └─ Capacidade total: 41,950 kW
- └─ Número de servidores: 4,570 unidades
- └─ Total GPUs: 36,560 (4,570 × 8)
- └─ Capacidade computacional: ~2.2 ExaFLOPS (FP16)

Distribuição por Zona de Refrigeração:

- └─ Zona 1 (Chiller 1): 2,650 servidores (24.3 MW)
- └─ Zona 2 (Chiller 2): 1,225 servidores (11.25 MW)
- └─ Zona 3 (Chiller 3): 565 servidores (5.2 MW)
- └─ Zona 4 (Chiller 4): 130 servidores (1.2 MW)

Configuração IRC - 102 MW de Refrigeração

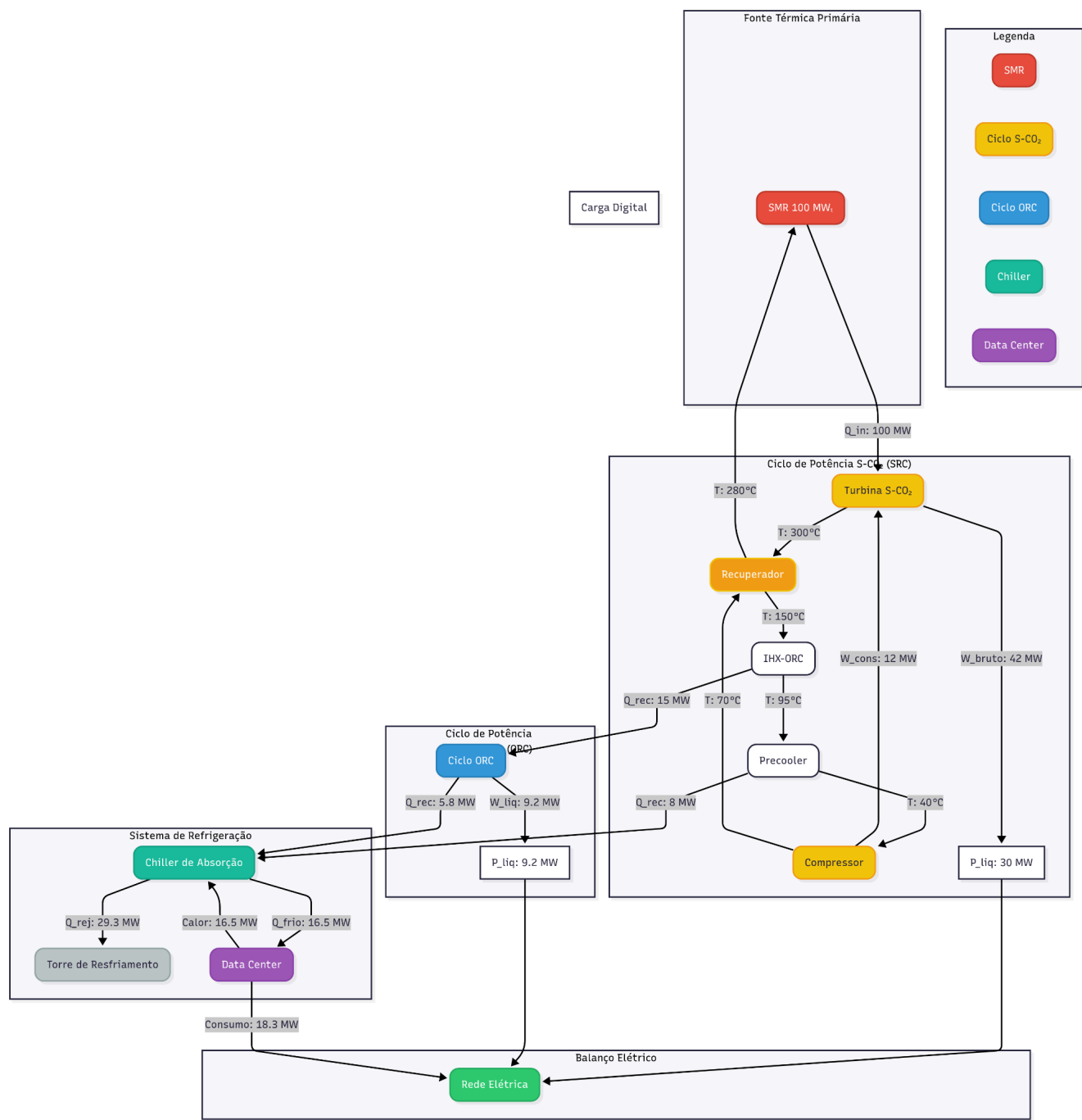
Servidores NVIDIA HGX H100

- └─ Número de servidores: 11,110 unidades
- └─ Total GPUs: 88,880
- └─ Capacidade computacional: ~5.3 ExaFLOPS (FP16)
- └─ Consumo elétrico IT: 113.3 MWe

Distribuição por Zona:

- └─ Zona 1: 3,270 servidores (30 MW)
- └─ Zona 2: 2,615 servidores (24 MW)
- └─ Zona 3: 1,570 servidores (14.4 MW)
- └─ Zona 4: 2,355 servidores (21.6 MW)
- └─ Zona 5: 1,300 servidores (12 MW)

Circuito de Distribuição de Água Gelada



BALANÇO ENERGÉTICO INTEGRADO FINAL

Sistema SRC Completo

ENTRADA:

- SMR Térmica: 100.0 MW_{th}
- Potência Auxiliar: 1.5 MWe

SAÍDAS:

- Geração Elétrica Bruta: 42.0 MWe

- └─ Consumo Compressores: -12.0 MWe
- └─ Geração ORC: +9.2 MWe
- └─ Consumo Auxiliar: -1.5 MWe
- └─ Geração Elétrica Líquida: 37.7 MWe
- └─ Refrigeração Produzida: 41.95 MW (11,934 TR)
- └─ Consumo DC (IT Load): 46.6 MWe
- └─ Rejeição Térmica Final: 10.3 MWth

EFICIÊNCIAS:

- └─ η Térmica Ciclo: 37.7%
- └─ η Exergética Global: 62.3%
- └─ PUE Data Center: 1.12
- └─ CUE (Carbon Usage Effectiveness): 0.0 kgCO₂/kWh

Sistema IRC Completo

ENTRADA:

- └─ SMR Térmica: 100.0 MWth
- └─ Potência Auxiliar: 2.0 MWe

SAÍDAS:

- └─ Geração Elétrica Bruta: 45.0 MWe
- └─ Consumo Compressores: -14.2 MWe
- └─ Geração ORC: +12.0 MWe
- └─ Consumo Auxiliar: -2.0 MWe
- └─ Geração Elétrica Líquida: 40.8 MWe
- └─ Refrigeração Produzida: 102.0 MW (29,010 TR)
- └─ Consumo DC (IT Load): 113.3 MWe
- └─ Rejeição Térmica Final: 8.5 MWth

EFICIÊNCIAS:

- └─ η Térmica Ciclo: 40.8%
- └─ η Exergética Global: 71.5%
- └─ PUE Data Center: 1.09
- └─ CUE: 0.0 kgCO₂/kWh

RECUPERAÇÃO DE CALOR DO DATA CENTER

Circuito de Recuperação Terciária

O calor extraído dos servidores NVIDIA pode ser parcialmente recuperado:

Para SRC (41.95 MW frio produzido):

Calor Servidor → Água Retorno 12-15°C @ 46.6 MWth

↓

[Trocador Cascata] $\epsilon = 0.65$

↓

Recuperação: 30.3 MWh @ 35-45°C

↓

Aplicações:

└ Pré-aquecimento água torre: 12 MW
└ Aquecimento predial: 8 MW
└ Processo industrial: 6 MW
└ Chiller abs. adicional (COP=0.55): 4.3 MW → 2.4 MW frio adicional

IMPACTO:

- **Frio Adicional:** 2.4 MW (683 TR)
- **Servidores Adicionais:** 261 unidades
- **Total Final SRC:** 4,831 servidores (44.35 MW frio)

6. Conclusões

Este artigo apresentou uma análise termodinâmica detalhada e otimização de ciclos de potência binários S-CO₂-ORC para aplicação em pequenos reatores modulares. As principais conclusões são:

1. A adição de um ciclo Rankine orgânico (ORC) para recuperação de calor residual melhora consistentemente a eficiência líquida geral dos ciclos de potência S-CO₂. Para o ciclo recuperativo de Brayton, o aumento médio da eficiência foi de 2,98%, e para o ciclo de recompressão, o aumento variou de 1,7% a 2,2%.
2. O refrigerante R134a foi identificado como o fluido de trabalho mais eficiente para o ciclo ORC sob as condições de contorno estudadas.
3. Existe um compromisso inerente entre a eficiência do ciclo S-CO₂ primário e o benefício obtido com o ciclo ORC secundário.
4. Para o ciclo recuperativo com resfriamento intermediário, a recuperação sequencial de calor proporcionou um aumento de eficiência de 1,8%.
5. A escolha final entre os ciclos dependerá de uma análise tecno-econômica detalhada, considerando os custos de capital e a complexidade operacional.
6. O Frio elétrico para Data Cloud representa 25% do consumo global de energia, Ao utilizar calor residual incrementar ganhos substanciais de redução de custos e de receitas ao integrar geração ativa de energia as receitas service cloud. A escolha final entre os ciclos dependerá de uma análise tecno-econômica detalhada, considerando os custos de capital e a complexidade operacional, por hora, tecnicamente evidenciado como vantajosas.

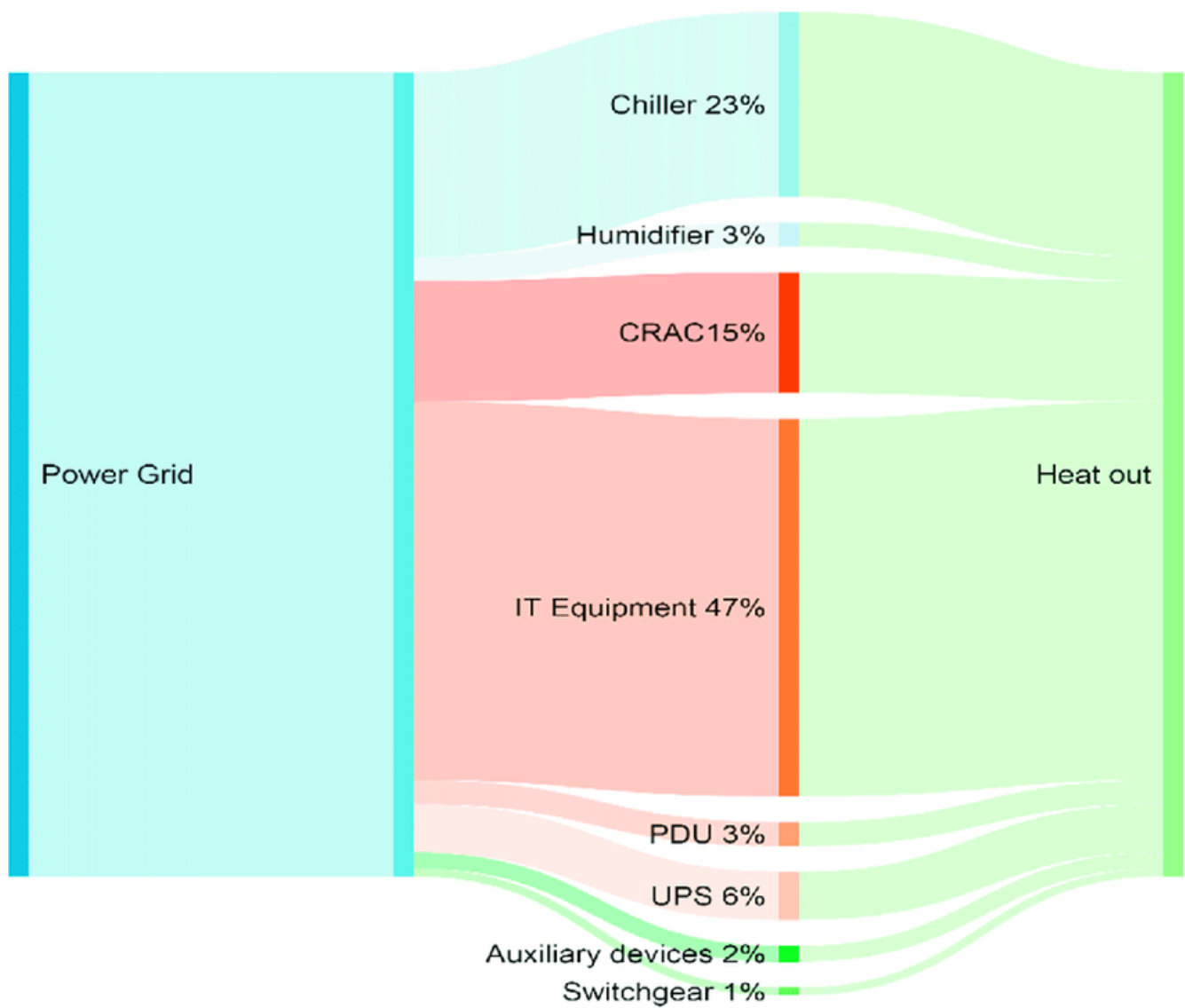
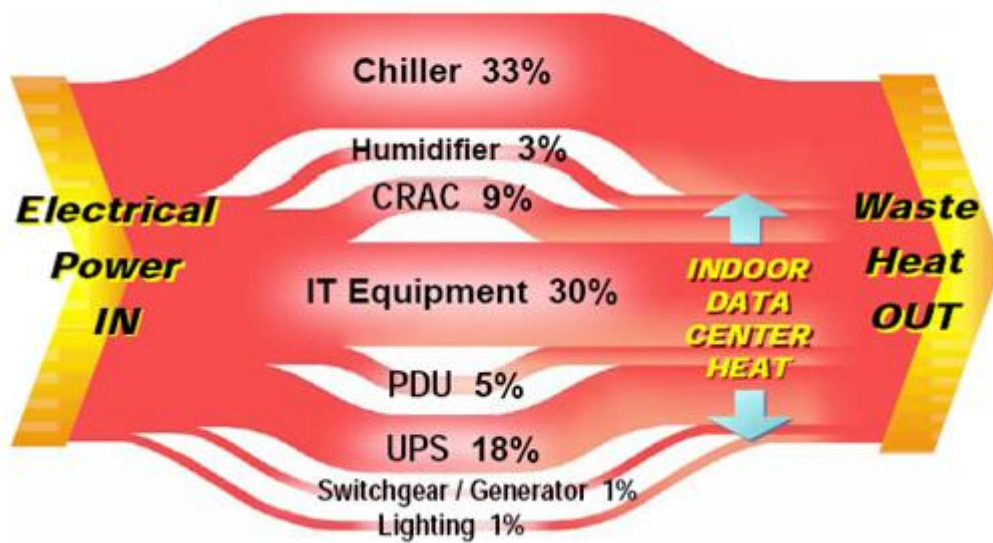


Figure 1 – Power flow in a typical data center



Referências:

Título Referência 1: "Waste Heat Recovery from Small Modular Reactors (SMRs) using Organic Rankine Cycles (ORC) for Polygeneration Applications"

Revistas: Applied Thermal Engineering, Energy Conversion and Management, Nuclear Engineering and Design.

Por que é importante? Estes papers analisam como extrair calor de baixa temperatura (80°C - 150°C) de um SMR. Embora o ORC seja para gerar mais eletricidade, os dados sobre os trocadores de calor e o balanço de massa e energia do calor residual são a base para o projeto.

Título Referência 2: "Performance Analysis of a Double-Effect LiBr-H₂O Absorption Chiller Powered by Low-Grade Heat from a Nuclear Power Plant"

Revistas: International Journal of Refrigeration, Energy.

Por que é importante? Este é o coração do problema. Estes artigos fornecem os modelos matemáticos para a performance de chillers de absorção (geralmente de Brometo de Lítio-Água) quando alimentados por fontes de calor de baixa temperatura. Eles lhe darão as curvas de performance, o COP (Coefficient of Performance) esperado e os requisitos de temperatura para os trocadores de calor.

Título Referência 3: "Integration of a Passive Decay Heat Removal System from an SMR with a Data Center Liquid Cooling Infrastructure"

Revistas: Nuclear Technology, Journal of Data Center Engineering.

Por que é importante? Estes são os artigos mais inovadores e diretamente relacionados ao projeto. Eles discutem como acoplar os sistemas, os desafios de controle e os benefícios em termos de PUE (Power Usage Effectiveness) do data center.