

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DO CICLO ALLAM

Palavras-Chave: Exergia, Eficiência, CO₂ Supercrítico, oxi-combustão, EES, ciclo Allam.

Autores(as):

Antonio Olinto Tonisi, FEM-Unicamp

Prof. Dr. Rogério Gonçalves dos Santos (orientador), FEM-Unicamp

INTRODUÇÃO:

Hoje existe uma preocupação muito grande com relação à emissão de poluentes na atmosfera por meio da queima de combustíveis fósseis. Nesse sentido, busca-se cada vez mais meios de produção de energia mais eficientes, ou seja, que utilizem menos combustível e produzam mais potência, e que sejam capazes de recuperar e filtrar os poluentes emitidos. O ciclo Allam, um ciclo termodinâmico que utiliza dióxido de carbono em condições supercríticas, aparece nesse contexto justamente para resolver essas questões. Sendo capaz de atingir eficiências de até 59% [1] e permitir a recaptura de CO₂ em altíssima pureza, o ciclo Allam se propõe como uma tecnologia inovadora. O presente trabalho busca simular termodinamicamente este ciclo utilizando o software EES, validar os resultados comparando com estudos da literatura, e realizar uma análise exergética a fim de identificar as principais ineficiências.

METODOLOGIA:

O trabalho irá se basear principalmente em artigos da literatura acadêmica, utilizando principalmente as referências [1], [2], [3]. Será desenvolvido um programa no software de termodinâmica EES a fim de se atingir os parâmetros termodinâmicos obtidos nestas referências. A abordagem será quantitativa, baseada em dados obtidos da simulação computacional.

Com os dados obtidos computacionalmente, pode-se calcular parâmetros do sistema como a eficiência térmica, que é avaliada como [1]:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{liquido}}}{\dot{m}_{\text{gás}} \cdot PCI} \quad (1)$$

Onde PCI é o poder calorífico inferior (kJ/kg).

Para a análise das principais fontes de ineficiência, a exergia mostra-se muito útil. Exergia é definida como o maior trabalho teórico possível de ser realizado quando um sistema sai de um determinado estado termodinâmico até entrar em equilíbrio com o ambiente [7]. Por conta de irreversibilidade dentro de um sistema, pode-se calcular a exergia destruída no processo, o que fornece informações valiosas sobre as ineficiências do processo. Pode-se ainda definir uma eficiência de segunda lei, considerando-a como a razão entre a exergia útil, que foi utilizada no processo, dividido pela exergia total que entrou no sistema. Esta eficiência leva em conta as irreversibilidades que

aconteceram no ciclo, sendo, portanto, mais completa que uma simples eficiência de primeira lei (Eq. 1).

O EES (pronuncia-se 'ease') é um programa geral de resolução de equações que pode resolver numericamente milhares de equações algébricas e diferenciais não lineares acopladas. O programa também pode ser usado para resolver equações diferenciais e integrais, fazer otimização, fornecer análises de incerteza, realizar regressão linear e não linear, converter unidades, verificar a consistência da unidade e gerar gráficos com qualidade de publicação. Uma característica importante do EES é o banco de dados de propriedades termodinâmicas e de transporte de alta precisão que é fornecido para centenas de substâncias de uma maneira que permite que ele seja usado com a capacidade de resolução de equações. No caso deste trabalho, será utilizada extensivamente as propriedades do CO_2 , inclusive em condições supercríticas onde o modelo do gás ideal não é mais válido. Para tal caso, o EES disponibiliza tanto o fluido CARBONDIOXIDE quanto o R744. Ambos fornecem propriedades termodinâmicas de alta precisão de fluido real para o dióxido de carbono da temperatura do ponto crítico (aproximadamente 304 K) até 1100 K, e pressões até 110 MPA, usando a equação de estado fundamental desenvolvida por [5].

Baseando-se principalmente na referência [9], foi possível criar um modelamento detalhado do ciclo, indicando os principais processos e parâmetros. Veja Figura 1.

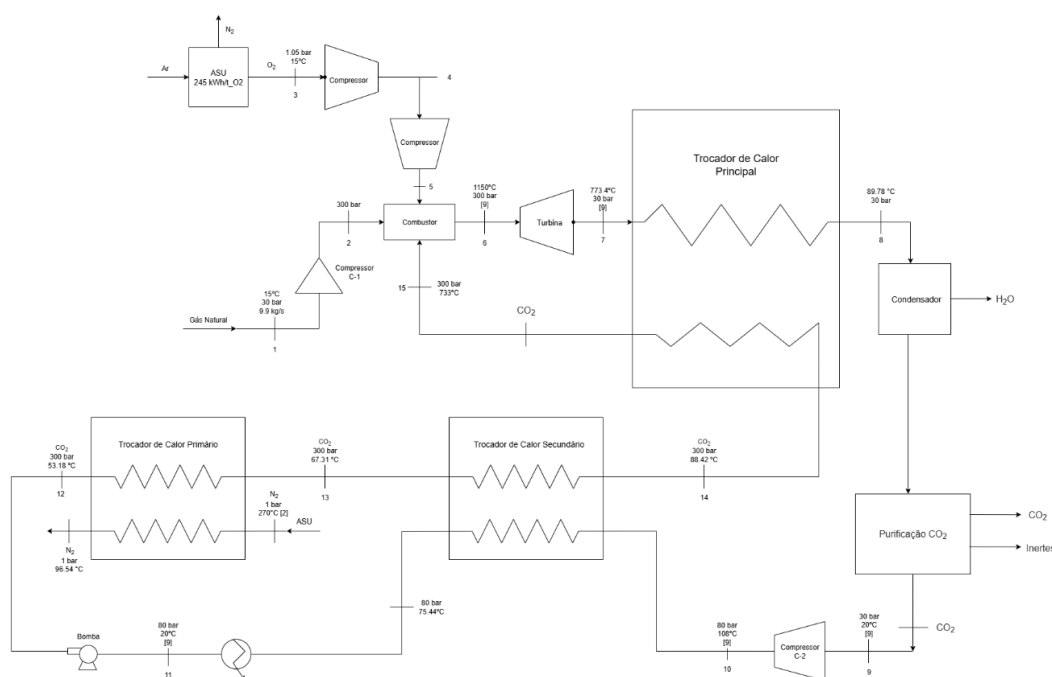
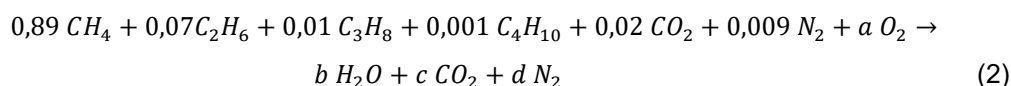


Figura 1 – Modelo detalhado do Ciclo Allam.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para simular este ciclo computacionalmente, utilizou-se o software *Engineering Equation Solver* (EES). Como este é apenas um resumo limitado a 5 páginas do trabalho, não há espaço para descrever detalhadamente toda a teoria termodinâmica do processo. Entretanto, no trabalho original isso está bem descrito.

No programa, modelou-se a combustão como sendo completa, com quantidade estequiométrica de ar, segundo a equação:



Então, pode-se fazer um balanço de energia, igualando a entalpia dos reagentes com a entalpia dos produtos. As entalpias neste caso devem ser calculadas a partir da equação 13.9 da referência 7:

$$\bar{h}(T, p) = \bar{h}_f^o + [\bar{h}(T, p) - \bar{h}(T_{ref}, p_{ref})] \quad (3)$$

Em que a temperatura e pressão de referência são de 25°C e 1 atm.

Como a temperatura final de combustão é conhecida (1150°C), pode-se resolver para a vazão mássica de CO_2 reciclado. Considerando vazão de combustível de 9,2 kg/s e os dados mostrado na Figura 1, esta vazão mássica de CO_2 é encontrada como sendo de 806,6 kg/s, que é um valor bem elevado.

Supõe-se que os compressores e a turbina têm eficiências isentrópica de 80% e 90%, respectivamente. Pode-se então fazer balanços de energia simples nestes dispositivos, tomados como volumes de controle, desprezando perdas por transferência de calor e variações na energia cinética e potencial do gás (como de costume na maioria dos cálculos de termodinâmica). Mais tarde neste trabalho também variar-se-á estas eficiências para estudar seu impacto na eficiência global e produção de energia do ciclo.

Os trocadores de calor são modelados utilizando o Método da Efetividade, bem conhecido dos livros-texto de Transferência de Calor (ref. [11]). Calcula-se a capacidade calorífica dos dois fluidos que estão entrando no trocador de calor, e o valor mínimo determinará o calor máximo que pode ser atingido neste trocador de calor. Adotando-se uma efetividade conservadora de 80%, pode-se determinar o calor real que acontece no trocador de calor, e por um balanço de energia a temperatura de saída dos fluidos quente.

Por fim, a eficiência de Primeira Lei do ciclo pode ser calculada usando a Eq. 1.

Abaixo está uma tabela com os principais parâmetros do ciclo calculados no EES.

Parâmetro	Simulação		
	Este Trabalho	Referência [1]	Erro relativo
Trabalho Líquido*	252,7 MW	250,0 MW	1%
Eficiência Primeira Lei	59,10%	57,20%	3,30%

Tabela 1 – Resultados da simulação.

*Calculado para uma vazão mássica de combustível de 9,2 kg/s.

Desta forma, os resultados concordam bem com valores da literatura.

Também foi realizada uma análise exérgica, mostrada na tabela 2. Os resultados concordam bem com valores da literatura, a saber ref. [1]. A eficiência exérgica foi de 51,2%. Em sua distribuição, os resultados são típicos de um ciclo Brayton: a combustão consome em média 30% da exergia; o trabalho líquido de 40 a 50%; e o pouco restante ou é destruído ou é perdido. De qualquer forma, o ciclo tem resultados excepcionais se comparado com um ciclo Brayton básico (sem regeneração, reaquecimento ou inter-resfriamento), que atinge eficiências de até 40% [12].

Também está plotado na Figura 2 um gráfico de pizza com as destruições de exergias de cada componente do ciclo relativo à destruição de exergia total. Nota-se que a combustão é de longe a maior fonte de destruição de exergia do sistema, seguido pelo trocador de calor principal e a turbina. Como todos os dispositivos dos ciclos já estão operando em condições de alta eficiência isentrópica, e os trocadores de calor operando com baixos pinch-points, é complexo sugerir melhorias sem antes ponderar grandes custos econômicos adicionais que viriam. Neste ponto, pequenas melhorias nos dispositivos geram grande aumentos de custos, e, portanto, uma devida análise econômica seguindo os princípios de Engenharia Econômica deveria ser realizada.

Nota-se também que existe uma quantidade razoável de exergia saindo do ciclo. Entretanto, consiste em grande parte de fluidos a baixa temperatura, o que diminui sua potencialidade para geração de energia.

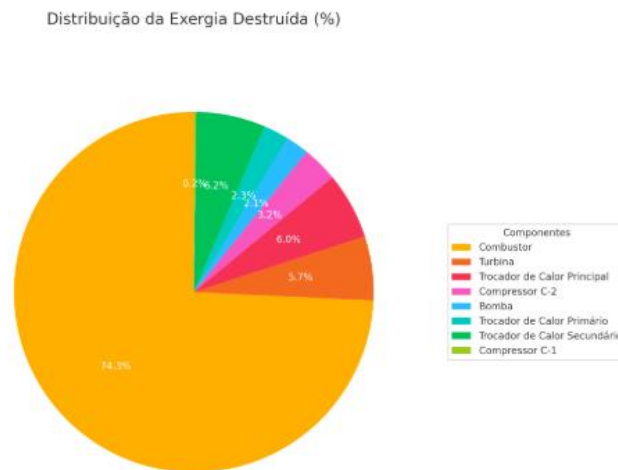


Figura 2 – Importância relativa de cada fonte de destruição de exergia.

	Valor (MW)	%
Exergia entrando	494.007	100
Trabalho Líquido	252.688	51.2
Exergia destruída		
Combustor	159.755	32.3
Turbina	12.359	2.5
Trocador de Calor Principal	12.891	2.6
Compressor C-2	7.100	1.4
Bomba	4.406	0.9
Trocador de Calor Primário	5.132	1.0
Trocador de Calor Secundário	13.354	2.7
Compressor C-1	0.528	0.1
Exergia saindo		
Total	26.008	5.3

Tabela 2 – Análise exergética do ciclo.

CONCLUSÕES:

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise termodinâmica detalhada do ciclo Allam, uma tecnologia promissora que alia alta eficiência energética com emissão zero de carbono. Por meio da modelagem do ciclo no software EES, foi possível reproduzir com boa precisão os resultados encontrados na literatura, tanto em termos de eficiência de Primeira Lei quanto em termos de desempenho exergético. O modelo desenvolvido mostrou uma eficiência térmica de 59,1% e uma eficiência exergética de 51,2%, valores que confirmam o potencial elevado do ciclo Allam quando comparado a ciclos convencionais, como o ciclo Brayton simples.

Além disso, a análise exergética permitiu identificar os principais pontos de destruição de exergia no sistema. A combustão, como esperado, foi a maior fonte de irreversibilidade, seguida pelos trocadores de calor e pela turbina. Esses dados são fundamentais para direcionar futuras melhorias no sistema e embasar estudos de otimização que levem em conta não apenas a eficiência, mas também os custos econômicos e ambientais associados a essas modificações.

O estudo demonstrou ainda que a correta implementação de trocadores de calor e a escolha cuidadosa das condições operacionais — como pressão, temperatura e vazão — são cruciais para maximizar o desempenho do ciclo. A abordagem adotada também ressaltou a importância de considerar propriedades termodinâmicas reais, especialmente em condições supercríticas, para que os resultados obtidos em simulação sejam condizentes com a realidade prática.

Diante dos resultados, conclui-se que o ciclo Allam representa uma alternativa viável e eficiente para geração de energia com captura total de carbono. No entanto, ainda existem desafios técnicos e econômicos a serem enfrentados para sua ampla adoção comercial. Futuras pesquisas devem se concentrar na integração com outras fontes energéticas, análise de custos de implantação, e avaliação da viabilidade técnica de cada componente, com destaque para o sistema de separação de ar (ASU) e os materiais resistentes a altas temperaturas na turbina.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PENKUHN, Mathias; TSATSARONIS, George. Exergy analysis of the Allam cycle. In: **The 5th international symposium—supercritical CO₂ power cycles**. 2016. p. 6-7.
- [2] CHAN, Wen et al. Thermodynamic analysis and optimization of Allam cycle with a reheating configuration. **Energy Conversion and Management**, v. 224, p. 113382, 2020.
- [3] CHAN, Wen et al. Allam cycle: Review of research and development. **Energy Conversion and Management**, v. 294, p. 117607, 2023.
- [4] MARTIN, Scott et al. Progress update on the Allam cycle: Commercialization of Net Power and the Net Power demonstration facility. In: **14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne**. 2018. p. 21-26.
- [5] R. Span and W. Wagner. "A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa", J. Phys. Chem, Ref. Data, Vol. 25, No. 6, 1996.
- [6] ALLAM, Rodney et al. Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture. **Energy Procedia**, v. 114, p. 5948-5966, 2017.
- [7] MORAN, Michael J. et al. Princípios de Termodinâmica para Engenharia, 8ª edição. **Rio de Janeiro–RJ, Editora LTC**.
- [8] FREIRE, Ronaldo Lucas Alkmin et al. Análise termodinâmica de ciclos de potência com CO₂ supercrítico em um FPSO.
- [9] ALLAM, R. J. et al. The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions. In: **Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**. American Society of Mechanical Engineers, 2014. p. V03BT36A016.
- [10] Mantovani, H.B., de Souza-Santos, M.L. Theoretical analysis of power generation applying supercritical steam and high-pressure combustion chamber consuming biomass slurry. *Int J Energy Environ Eng* **13**, 275–293 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00432-x.7>
- [11] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer: fundamentals and applications**, 6th ed. **McGraw-Hill Higher Education**, 2020.
- [12] ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Thermodynamics: an engineering approach**, 8th ed. **McGraw-Hill Higher Education**, 2014.