

ANÁLISE ENERGÉTICA DO PROCESSO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA POR LIQUEFAÇÃO DE AR E DE CO₂

Thiago C.F. Rodrigues, thiago.cesarrodrigues@ufpe.br¹

Daniel Rodríguez, daniel.rodriguezlopez@ufpe.br¹

José R.R. Silva Júnior, jose.ribamar@ufpe.br¹

Jorge R. Henríquez, jorge.guerrero@ufpe.br¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil

Resumo: A elevada participação de fontes renováveis é uma característica marcante na matriz elétrica brasileira. Na última década verifica-se um aumento expressivo na geração de energia elétrica utilizando fontes eólica e solar, sendo esperado que essa tendência de crescimento seja mantida nos próximos anos. Estas fontes de energia são estocásticas e sazonais, o que representa um desafio ao gerenciamento e despacho dessa energia na rede. A melhor forma de tratar este problema é a integração de sistemas de armazenamento de energia elétrica que oferecem segurança e flexibilidade de operação no sistema elétrico. No Brasil notadamente as tecnologias adotadas para estes fins tem-se concentrado em baterias, principalmente as de íon-lítio, embora existam diversas outras para a mesma finalidade. Uma tecnologia alternativa que está em desenvolvimento e que se torna promissora se utilizada acoplada a sistemas energéticos que envolva processos criogênicos é o armazenamento por ar liquefeito (Liquefied Air Energy Storage – LAES). No presente trabalho esta tecnologia é explorada através de uma análise energética considerando o ar como fluido de trabalho num sistema aberto e CO₂ como fluido de trabalho num sistema fechado. As análises foram realizadas utilizando modelos termodinâmicos para ambas configurações construídos com base em balanços de energia nos componentes do sistema. As equações foram resolvidas utilizando a plataforma EES (Engineering Equation Solver) e os modelos utilizados para realização de estudos paramétricos. Os resultados demonstraram um aumento na eficiência do sistema após a mudança do fluido de trabalho de dióxido de carbono para o Ar, na faixa de temperatura entre 823,5 e 1000K. Foram observados também valores de eficiência superiores com o uso de pré-aquecimento nos ciclos estudados e consequentemente uma possibilidade de economizar combustível. Em condições normais de temperatura e pressão, o sistema com ar e pré-aquecimento apresentou eficiência de ida e volta próxima a 70%, demonstrando resultados positivos com a utilização do ar como fluido de trabalho para o sistema LAES proposto.

Palavras-chave: Armazenamento de energia, Liquefação de ar, Análise energética, Sistemas LAES.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica pode ser armazenada através da sua conversão em outras formas de energia, tais como química, mecânica ou térmica, durante o processo de carga. No processo de descarga, a energia é novamente transformada em energia elétrica. As tecnologias que realizam esses processos são chamadas de sistemas de armazenamento de energia. E sua integração com recursos de geração de energia renovável, tais como solar fotovoltaica e eólica é útil, dentre outros fatores, devido a taxas de variação de geração causadas por condições climáticas variáveis. Essas variações podem gerar efeitos como flutuações de tensão e potência, que podem ser atenuados pelo uso de sistemas de armazenamento de energia.

Um sistema de geração de energia oriundo de fontes renováveis tais como biomassa e geotérmica, pode operar de maneira semelhante ao de usinas de geração elétrica tradicionais (de origem fóssil), devido a sua maior previsibilidade e constância. Já sistemas eólicos e solares são menos previsíveis, sendo geralmente chamadas como fontes de energia renováveis variáveis (IEA, 2011). Isso significa que os efeitos gerados pela maiores taxas de variação na geração dos sistemas eólico e solar, podem impactar de forma mais imprevisível os sistemas de geração de energia elétrica, e por isso assim são chamadas.

Neste contexto, o uso de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) pode auxiliar na estabilidade da matriz energética com recursos renováveis. Os sistemas de armazenamento de energia são uma solução potencial para aumentar a penetração de fontes de energia renováveis na matriz elétrica (Barton e Infield, 2004).

As tecnologias de armazenamento de energia elétrica têm recebido atenção considerável na última década devido à necessidade de reduzir a emissão de gases de efeito estufa por meio da integração de fontes de energia renováveis. (Damak et al., 2020). As tecnologias de armazenamento de energia também são frequentemente classificadas de acordo com o tipo de energia armazenada: mecânica, química, elétrica ou térmica (Grazzini e Milazzo, 2008).

Dentre os sistemas de armazenamento, podemos citar uma tecnologia alternativa que está em desenvolvimento e que se torna promissora se utilizada acoplada a sistemas energéticos que envolvam processos criogênicos é o armazenamento por ar liquefeito (Liquefied Air Energy Storage – LAES). Em termos de equipamentos e de princípio de funcionamento, os sistemas LAES apresentam muitas semelhanças com os sistemas de geração de potência por turbinas a gás, podendo até ser considerados como derivados desses. A principal diferença está no desacoplamento físico e temporal dos estágios de compressão e de expansão e na liquefação do ar após o processo de compressão. Durante o carregamento energético do sistema, o compressor é acionado por energia elétrica disponível na rede ou em plantas fotovoltaicas ou eólicas. Ar é comprimido e logo em seguida resfriado e liquefeito por um processo de refrigeração criogênica. O ar no estado líquido é armazenado a pressão atmosférica num reservatório. No processo de descarregamento o ar líquido é retirado do reservatório, é aquecido e posteriormente injetado em uma turbina acoplada a um gerador elétrico para devolução de energia elétrica para a rede.

No LAES, o desempenho do sistema é limitado tanto pelas ineficiências da carga (ciclo de liquefação) e quanto da descarga (regaseificação e expansão), levando a um baixo valor da eficiência em comparação com outras soluções de armazenamento de energia. Porém, uma das características mais interessantes do LAES é que, além de produzir energia elétrica, também fornece calor e resfriamento como subproduto nas fases de carga e descarga, respectivamente. Além disto, o LAES também pode ser integrado a um sistema de poligeração ou a um sistema de ar condicionado com o objetivo de fornecer uma carga de resfriamento bem definida com uma rede de trocadores de calor. Pode assim, com esta integração, aumentar sua eficiência e ser um sistema energeticamente competitivo. O LAES também pode fornecer aquecimento ao ambiente e até produzir água quente sanitária, demonstrando assim a importância do estudo deste sistema (Tafone et al. 2018).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise energética de um sistema de armazenamento de energia por ar liquefeito (LAES) considerando o ar como fluido de trabalho num sistema aberto e o CO₂ como fluido de trabalho num sistema fechado, ambos com pré-aquecimento. As análises devem ser realizadas utilizando-se modelos termodinâmicos para as duas configurações, cujas equações serão resolvidas através da plataforma EES (Engineering Equation Solver) e os resultados serão utilizados para a realização dos estudos paramétricos de eficiência do sistema.

2. METODOLOGIA

Este trabalho trata da modelagem e simulação de um sistema de armazenamento de energia por ar liquefeito (LAES), envolvendo nas análises o uso individual do dióxido de carbono e do ar como fluidos de trabalho. O modelo do sistema consiste em aplicar as equações termodinâmicas de balanço de energia para cada componente do sistema, com base na literatura. O estudo também envolve, concomitantemente, o uso de um sistema de armazenamento de energia térmica recuperada durante o processo de carregamento e que será utilizada na descarga para aquecer o fluido de trabalho antes do estágio de expansão nas turbinas.

Para resolução dos sistemas de equações das configurações com Ar e com CO₂, o software Engineering Equation Solver (EES) foi utilizado. Sendo o método de solução do sistema de equações do EES baseado no método iterativo de Newton-Raphson.

Os componentes modelados para o ciclo do sistema LAES em questão são: Compressores, turbinas a gás, trocadores de calor e bomba criogênica. Além destes, o ciclo possui uma válvula de expansão para redução da pressão do fluido de trabalho e um separador após a mesma, para separar o líquido do gás. Além do armazenamento de energia elétrica, o sistema incorpora também uma unidade de termoacumulação, representada pelos reservatórios de óleo quente e frio, que armazena o calor dissipado nos resfriadores intermediários no processo de compressão e disponibiliza essa energia térmica para pré-aquecimento na etapa de descarregamento do sistema de armazenamento de energia elétrica. A Figura 1 representa o esquema de funcionamento do sistema LAES.

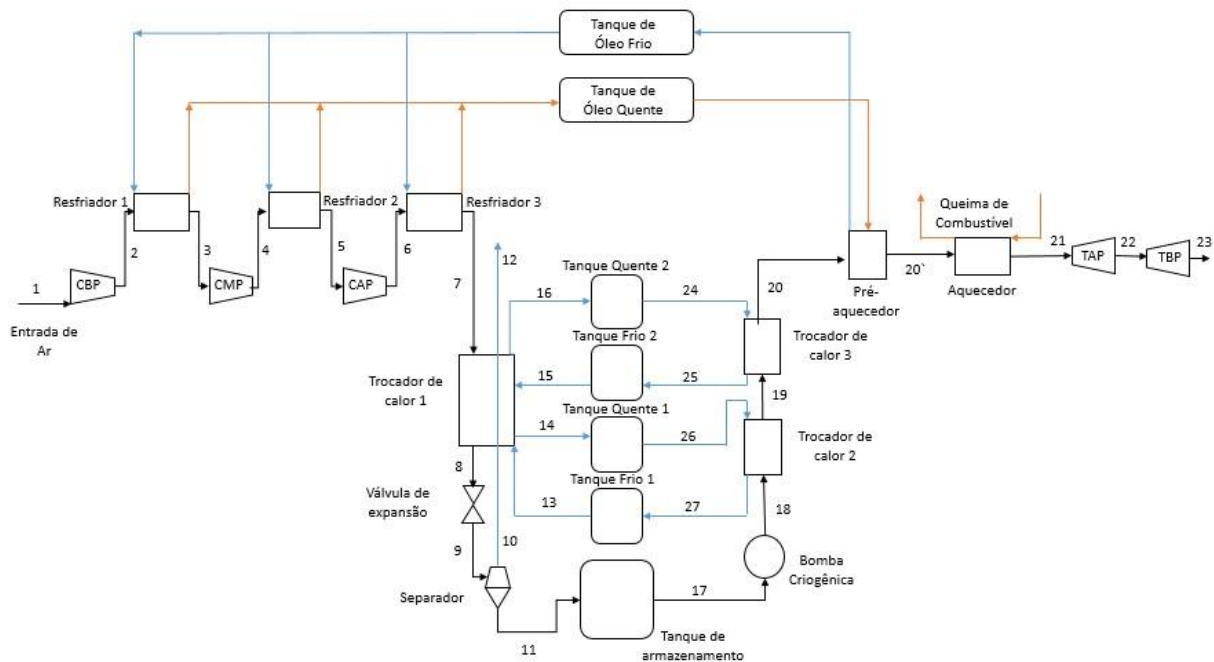


Figura 1. Sistema proposto para o estudo. Adaptado de Xu et al. [2020]

Para o processo de carga, são utilizados o trem de compressores, os resfriadores, o primeiro trocador de calor, a válvula de expansão, o separador e encerra-se no tanque de armazenamento como mostrado na Fig. 1. Os compressores recebem o fluido e o comprimem para que a pressão do mesmo aumente, porém isto gera um aumento na temperatura do mesmo. Os resfriadores resfriam o fluido fazendo com que o mesmo retorne a temperatura ambiente. Após o último resfriamento, o fluido segue seu caminho através do trocador de calor, onde é resfriado ainda mais. Uma observação importante é que o fluido que entra no sistema, sofre uma mudança de fase após a válvula de expansão. Terminado o processo de carga, inicia-se a descarga.

Do tanque de armazenamento o fluxo segue até a última turbina do trem de turbinas, passando pela bomba criogênica, trocadores de calor 2 e 3, pré-aquecedor e aquecedor. Saindo do tanque de armazenamento, a bomba criogênica eleva consideravelmente a pressão do fluido mantendo o estado do mesmo. Para que o ciclo possa ter sua eficiência maximizada, o ponto antes do aquecedor deve ter sua temperatura elevada, pois desta maneira, a energia utilizada para consumo do combustível é minimizada. Para elevar a temperatura do fluido antes do aquecedor, o sistema de pré-aquecimento é utilizado. Nele, a energia térmica acumulada é utilizada para aquecer o fluido. Após a passagem do fluido pelo pré-aquecedor, ele segue seu caminho para o aquecedor e por fim chega as turbinas, onde é expandido, fazendo com que os eixos das turbinas girem e a energia mecânica seja convertida em energia elétrica. Para este estudo, o tempo de carga e tempo de descarga são de uma hora.

Em adição, o sistema de pré-aquecimento funciona com o calor extraído dos processos de resfriamento intermediário e após a compressão, com o objetivo de diminuir a quantidade de calor consumida no processo de aquecimento. Além da modelagem dos componentes com base em equações termodinâmicas da literatura, foi realizada também a modelagem do balanço de energia para possibilitar a análise os resultados de eficiência do sistema. Para isso, foi utilizado como parâmetro o Sistema de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido.

Os sistemas LAES são similares a sistemas CAES (Sistemas de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido) no seguinte aspecto: em ambos a energia de entrada alimenta um compressor e a de saída é feita através de uma turbina. Dito isto, é importante saber que a literatura tem apresentado uma discussão a respeito das diferentes formas de quantificar a eficiência para sistemas CAES. No CAES existe a presença de dois insumos energéticos diferentes: por um lado a eletricidade é usada para acionar os compressores e por outro, combustível é queimado para aquecer o ar antes da expansão.

Neste sentido, vários índices de desempenho “único” têm sido propostos para os sistemas CAES. O mais simples é um índice de eficiência definido como a razão entre a energia gerada pela turbina (ET) e a soma da energia elétrica fornecida ao motor do compressor (EM) e a energia térmica no combustível (EF).

Entretanto, devido à diferença substancial entre as qualidades de energia térmica no combustível e a energia elétrica fornecida ao compressor, sua soma pode não ser um número representativo. Para estimar a entrada total de energia para o CAES, é necessário expressar tanto o combustível quanto a eletricidade do compressor em uma base de energia equivalente.

Quando o CAES é usado para converter a energia térmica da carga de base em horário de ponta (no lugar de turbinas a gás ou outras unidades de pico) pode-se introduzir uma eficiência de energia primária (PE) definida em termos da

eficiência térmica da planta de base (η_T), valor este assumido como sendo igual a 0,4 ou 40% (como pode caracterizar uma moderna usina elétrica a vapor supercrítica). Esta eficiência é chamada de eficiência energética primária e é dada pela Eq. (1) abaixo:

$$\eta_{PE} = \frac{(ET)}{(EM / \eta_T) + EF} \quad (1)$$

Onde: ET é a Energia descarregada pelas turbinas, EM é a Energia carregada pelos compressores, EF é a Energia utilizada pelo combustível, η_T é a Eficiência térmica da planta de base e η_{PE} é a Eficiência energética primária.

Outra maneira de calcular a eficiência é a chamada eficiência de ida e volta. Por exemplo, uma unidade CAES alimentada por energia eólica pode ser comparada a outras opções de armazenamento elétrico, que podem ser consideradas para o backup de vento, como por exemplo, armazenamento eletroquímico (baterias) e bombeamento hidráulico. Esses sistemas alternativos de armazenamento são tipicamente caracterizados por uma eficiência de armazenamento elétrico de ida e volta (RT). Para facilitar as comparações do CAES com outros dispositivos de armazenamento elétrico, uma eficiência de ida e volta que emprega uma entrada de eletricidade “efetiva” $\equiv EM + (\eta_{NG} * EF)$ pode ser introduzida.

Sendo η_{NG} , um valor percentual utilizado para corresponder a quanto de energia do combustível equivale a energia do motor do compressor. É uma maneira de transformar a energia do combustível, pois a mesma é medida em unidades diferentes da energia do motor do compressor. A Eficiência de ida e volta é dada pela Eq. (2).

$$\eta_{RT} = \frac{(ET)}{(EM + (\eta_{NG} * EF))} \quad (2)$$

Onde: ET é a Energia descarregada pelas turbinas, EM é a Energia carregada pelos compressores, EF é a Energia utilizada pelo combustível, η_{NG} é o Valor percentual utilizado para corresponder em quanto a energia do combustível equivale a energia do motor do compressor e η_{RT} é a Eficiência de ida e volta.

3. RESULTADOS

Os resultados foram divididos em duas partes, de acordo com os respectivos fluidos de trabalho utilizados. Primeiramente serão apresentados os resultados do sistema que utiliza como fluido de trabalho o dióxido de carbono e posteriormente o sistema de Ar como fluido de trabalho.

3.1 Sistema Utilizando Dióxido de Carbono

A Figura 2 apresenta resultados de como o sistema se comporta sem a recuperação de energia e utilização dessa energia para o pré-aquecimento do fluido. Ela apresenta as eficiências de ida e volta e as eficiências primárias para as temperaturas com variações entre 823,5 K a 1000 K imediatamente antes da entrada da primeira turbina (ponto 21 do sistema).



Figura 2. Eficiências do sistema LAES com dióxido de carbono em função da temperatura - com pré-aquecimento.

De acordo com a figura acima, observa-se que há um incremento percentual de aproximadamente 12,7% na eficiência de ida e volta e de 13,5% na eficiência energética primária com o aumento da temperatura de entrada da turbina de alta pressão, para a faixa de temperaturas escolhida.

Ainda com a utilização do dióxido de carbono como fluido de trabalho, foi acrescentado o pré-aquecimento no ciclo e as eficiências foram comparadas para a mesma variação de temperatura anterior (entre 823,5 K a 1000 K), sendo estas novas eficiências denominadas: Eficiência energética primária 2 e Eficiência de ida e volta 2. As quatro curvas que se referem às eficiências podem ser observadas simultaneamente na Fig 2.

É possível também obter uma eficiência energética primária de 13,40% no sistema sem pré aquecimento (a 823,5 K), enquanto no sistema com pré aquecimento, esse valor sobe para 20,81%. Uma significativa diferença também pode ser notada na temperatura de 1000 K, na qual a eficiência de ida e volta do sistema sem pré aquecimento se apresenta em 34,70%, enquanto no sistema com pré aquecimento o valor é de 53,96%.

Ao comparar-se os valores percentuais da eficiência energética primária e eficiência de ida e volta entre os sistemas sem e com pré aquecimento, observa-se já na temperatura de 823,5 K, um aumento percentual elevado nos valores de η . A eficiência energética primária aumenta cerca de 55%, enquanto a eficiência de ida e volta aumenta 64%, quando comparadas com as eficiências obtidas sem o pré aquecimento.

Na temperatura de 1000 K, há um aumento de 55% na eficiência de ida e volta e de 49% na eficiência primária. Nitidamente, o acréscimo do sistema de pré-aquecimento cumpre com o esperado aumentando da temperatura antes do aquecimento, fazendo com que menos energia de combustível seja necessária para que a temperatura ideal na entrada da turbina seja alcançada.

Dos valores obtidos e na comparação gráfica, é possível observar que para os sistemas simulados, ocorreu um aumento na eficiência energética com o uso de pré aquecimento no ciclo.

3.2 Sistema com Ar

Utilizando-se o ar como fluido de trabalho, os valores de eficiência entre as temperaturas 823,5 K a 1000 K são apresentados na Fig. 3.

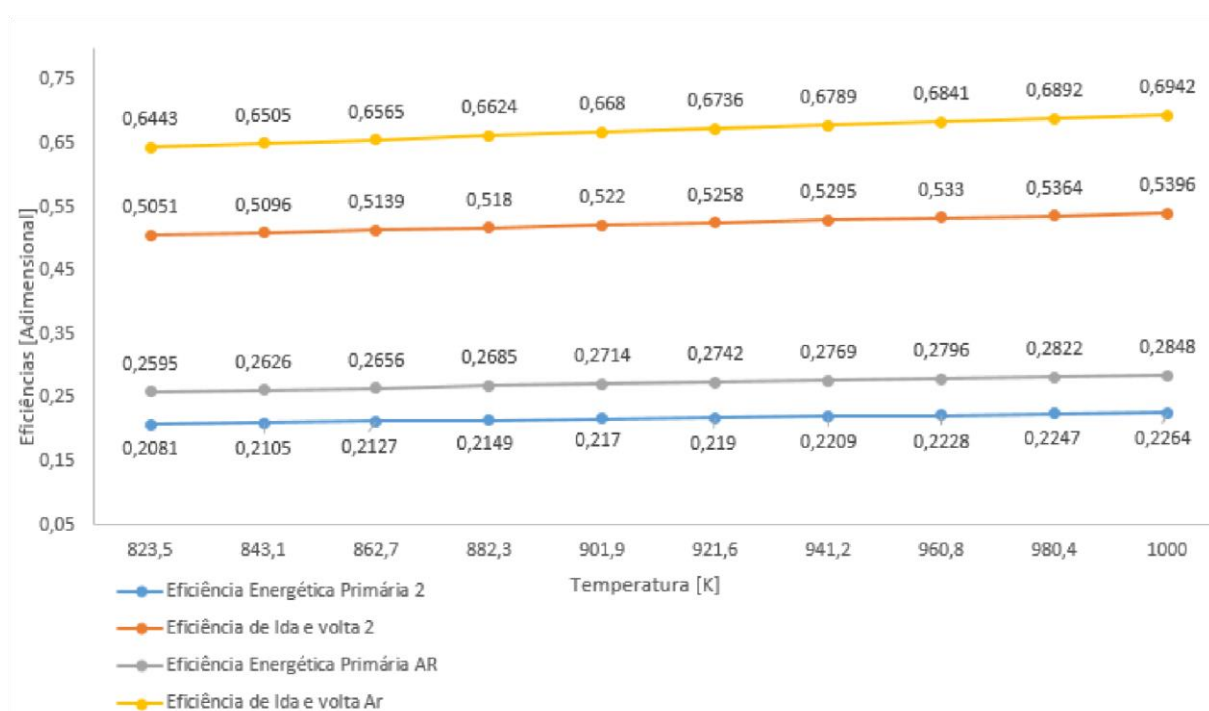


Figura 3. Comparação entre eficiências do sistema LAES com dióxido de carbono e ar em função da temperatura - com pré-aquecimento.

Da Figura 3, observa-se os valores superiores aos encontrados no sistema que utiliza o CO₂ com pré aquecimento. Todos os valores de eficiência obtidos através do sistema com o fluido ar, são superiores aos valores de eficiência do sistema com CO₂.

A Figura 3 demonstra a perceptível diferença entre as eficiências do sistema que utiliza o ar quando comparado ao sistema fechado que utiliza o dióxido de carbono como fluido de trabalho e também funciona com pré-aquecimento.

Enquanto o primeiro sistema (que utiliza CO₂) possui, na temperatura de 823,5 K, eficiência energética primária e de ida e volta, com valores de: 0,2081 (20,81%) e 0,5051 (50,51%) respectivamente, o sistema com ar e pré-aquecido, para as mesmas condições de temperatura, possui eficiências de 0,2595 (25,95%) e 0,6443 (64,43%) respectivamente. Para a temperatura de 1000K, o sistema que utiliza CO₂ tem os valores de eficiência primária e de ida e volta em valores de 0,2264 (22,64%) e 0,5396 (53,96%) e o segundo possui valores de eficiência, respectivamente, 0,2848 (28,48%) e 0,6942 (69,42%).

Na temperatura de 823,5K, a diferença percentual é 25% para a eficiência energética primária e de 27,6% para a eficiência de ida e volta. Na temperatura de 1000K é 25,8% para a eficiência energética primária e de 28,7% para a de ida e volta.

A diferença obtida nas eficiências se deve principalmente pelas propriedades do ar. Dentre outros fatores, o ar pode ser inserido no sistema com uma vazão mássica consideravelmente maior que a do dióxido de carbono uma vez que, o dióxido é um fluido caro e que necessita de um cuidado específico para não ser desperdiçado. Porém, o ar precisa ser bastante resfriado para que se transforme em líquido saturado, ou seja, necessita de uma maior vazão do propano e do metanol.

Em todos os casos apresentados, observa-se que mesmo aumentando a temperatura de entrada na turbina e mantendo a temperatura após o pré-aquecimento constante, há um aumento considerável na eficiência do sistema, ou seja, mesmo que a energia do combustível aumente, a potência da turbina compensa esse aumento, aumentando a eficiência do sistema. Isso demonstra que quanto mais eficiente a turbina a gás, maior a temperatura que a mesma pode trabalhar na sua entrada e consequentemente melhor o desempenho do sistema para determinadas faixas de temperatura.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, através das simulações e resultados, foram obtidos valores de eficiência para diferentes configurações de sistemas. Para o sistema com dióxido de carbono, foram realizadas as simulações com e sem pré-aquecimento, com o intuito de analisar se haveria alguma influência nos valores finais de eficiência. Verificou-se valores de eficiência superiores com o uso de pré-aquecimento nos ciclos estudados. Ou seja, o pré-aquecimento, em determinadas faixas de temperatura, serve também como uma possibilidade de economizar combustível, aproveitando a energia dissipada na compressão de Sistemas LAES específicos. Armazenando essa energia e disponibilizando-a na etapa de descarregamento para pré aquecer o dióxido de carbono (ou o ar) antes da expansão na turbina, elevou a eficiência energética dos sistemas estudados.

Para o caso do sistema com dióxido de carbono e pré-aquecimento, na temperatura de 823,5 K, a eficiência energética primária aumentou cerca de 55% enquanto que a eficiência de ida e volta aumentou 64% quando compara-se com os valores sem pré-aquecimento. Com a variação positiva da temperatura, a 1000K, ocorreu um aumento de 55% na eficiência de ida e volta e de 49% na eficiência primária.

O ponto principal que se pôde verificar foi um aumento na eficiência do sistema após a mudança do fluido de trabalho de dióxido de carbono para o Ar. Para a faixa de temperatura entre 823,5 e 1000K, os valores de eficiência de ida e volta e de eficiência primária se comportaram sempre superiores no sistema com Ar e pré-aquecimento.

Com a troca do fluido dióxido de carbono para ar, e mantido o sistema de pré-aquecimento, percebeu-se que, devido as propriedades do ar e a seu fluxo de massa maior na entrada do sistema, as eficiências do sistema sofrem um aumento considerável. Na temperatura de 823,5K, a diferença encontrada foi de 25% para a eficiência energética primária e de 27,6% para a eficiência de ida e volta. E na temperatura de 1000K, a diferença percentual foi de 25,8% para a eficiência energética primária e de 28,7% para a de ida e volta.

Foi observada uma elevada eficiência para condições normais de temperatura e pressão no sistema com ar e pré-aquecimento, com a eficiência de ida e volta chegando a valores próximos a 70% (com a turbina atuando em 1000 K).

Os valores de eficiência obtidos indicam melhor desempenho de sistemas com Ar, em relação ao ciclo estudado, indicando que o sistema pode atuar com uma fonte infinita de abastecimento e com custos do fluido de trabalho inferiores ao CO₂, porém devem ser observados os custos com o metano e propano, já que sistemas com Ar requerem mais uso dessas substâncias. Verifica-se também que é necessária uma turbina de bom desempenho e dimensionada adequadamente para o objetivo do sistema, para que se possa gerar o máximo de energia com o mínimo de energia do combustível.

4. REFERÊNCIAS

- Barton, J.P., D.G. Infield. "Energy storage and its use with intermittent renewable energy." IEEE Trans Energy Convers 2004, 19:441–8 <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.822305>
- Damak, C., Leducq, D., Hoang, H.M., Negro, D., Delahaye, A.. "Liquid Air Energy Storage (LAES) as a large-scale storage technology for renewable energy integration –A review of investigation studies and near perspectives of LAES." International Journal of Refrigeration 2008, 110:208–218 <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.009>

- Gao, Z., Guo, L., Ji, W., Xu, H., An, B., Wang, J.. "Thermodynamic and economic analysis of a trigeneration system based on liquid air energy storage under different operating modes" *Energy conversion and management* 2020, 221: 113184. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113184>
- Grazzini, G. E Milazzo, A.. "Thermodynamic Analysis of CAES/TES Systems for Renewable Energy Plants." *Renewable Energy* 2008, 33(9): 1998– 2006.
- International Energy Agency (IEA). *Harnessing variable renewables – a guide to the balancing change*. Paris, France: OECD/IEA; 2011
- Tafone, A., Borri, E., Comodi, G., Van Den Broek, M., Romagnoli, A.. "Liquid Air Energy Storage performance enhancement by means of Organic Rankine Cycle and Absorption Chiller". *Appl Energy* 2018, 228: 1810-1821. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.133>
- Xu, M., Zhao, P., Huo, Y., Han, J., Wang, J., Dai, Y.. "Thermodynamic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system and comparison to a liquid air energy storage system" *Journal of Cleaner Production* 2020, 242: 118437. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118437>

5. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ENERGY ANALYSIS OF A ELECTRICAL ENERGY STORAGE PROCESS BY AIR AND CO₂ LIQUEFACTION

Thiago C.F. Rodrigues, thiago.cesarrodrigues@ufpe.br¹

Daniel Rodríguez, daniel.rodriguezlopez@ufpe.br¹

José R.R. Silva Júnior, jose.ribamar@ufpe.br¹

Jorge R. Henríquez, jorge.guerrero@ufpe.br¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil

Abstract: *The high participation of renewable sources is a striking feature in the Brazilian electric matrix. In the last decade there is a significant increase in the generation of electrical energy using wind and solar fountains, being expected that this growth trend is maintained in the coming years. These sources of energy are stochastic and seasonal, which represents a challenge to management and dispatch of this energy on the network. The best way to treat this problem is the integration of electrical energy storage systems that offer safety and flexibility of operation in the electrical system. In Brazil notably the technologies adopted for these purpose is concentrated in batteries, especially those of ion-litio, although there are several others for the same purpose. An alternative technology that is under development and that it becomes promising if used to energy systems involving cryogenic processes is liquefied air storage (Liquefied Air Energy Storage - LAES). In the present work this technology is exploited through an energy analysis considering the air as labor fluid in an open system and CO₂ as work fluid in a closed system. The analyzes were performed using thermodynamic models for both configurations built on power balances in the system components. The equations were resolved using the EES (Engineering Equation Solver) platform and the models used to perform parametric studies. The results demonstrated an increase in system efficiency after changing the carbon dioxide workflow into the temperature range between 823.5 and 1000K. Higher efficiency values were also observed with the use of preheating in the cycles studied and consequently a possibility of saving fuel. Under normal temperature and pressure conditions, the air and preheating system showed close and return efficiency by 70%, demonstrating positive results with the use of air as workflow for the proposed LA system.*

Keywords: *Energy storage, Air liquefaction, Energy analysis, LAES systems.*