

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SISTEMA CAES EM MICROESCALA

Vitor Torres Alvarenga, vatorres01@gmail.com¹

Bruno Phillip Alves da Silva, bruno.phill@gmail.com¹

Bruno Ude Todde Fonseca Valadares, bruno_todde@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte/MG – Escola de Engenharia, Galpão da Engenharia Mecânica, Sala 2933.

Resumo: A tecnologia de armazenamento de energia por ar comprimido (CAES) se mostra uma alternativa viável para armazenamento de energia e viabilização de uma matriz renovável mais ampla. Entretanto, a literatura existente carece de informações sobre sistemas em pequena e microescala. Este trabalho busca avaliar o desempenho de um sistema CAES teórico para aplicação em comunidades rurais ou isoladas, assim como a sua viabilidade econômica quando comparado a outros sistemas de armazenamento. Sendo assim, duas simulações foram realizadas, uma considerando compressão adiabática e outra compressão isotérmica. Os resultados mostram que as eficiências de compressão isotérmica e adiabática equivaleram à 81% e 26%, respectivamente. Uma comparação entre os custos do sistema proposto e os de um sistema de armazenamento por bateria também é apresentada, verificando assim que o sistema CAES trabalhando em regime isotérmico é apenas 4% mais caro ao longo de um período de 30 anos de uso. Com isso, o sistema se apresenta como uma alternativa economicamente viável para uso em pequena e micro-escala em locais de difícil acesso com geração isolada.

Palavras-chave: Armazenamento de energia, CAES, TES, Energia renovável

1. INTRODUÇÃO

A recente crise hídrica brasileira teve como consequência o aumento significativo dos custos de geração de energia, uma vez que 65,2 % da matriz elétrica interna do país têm como fonte energética as usinas hidrelétricas (EPE, 2015). O alto preço dos combustíveis fósseis e a crescente preocupação com emissões de gases estufa geram resistência significativa na utilização de usinas termelétricas para suprir o déficit de geração das hidrelétricas. Neste cenário, pode ser observada uma preocupação crescente em complementar a matriz com fontes renováveis, objetivando criar uma alternativa benéfica ao meio ambiente e capaz de suprir a demanda energética do país.

Este trabalho tem como objetivo simular o desempenho entre dois processos de compressão, um adiabático e um isotérmico. As simulações possibilitam um estudo de viabilidade econômica do sistema CAES em microescala para armazenamento não integrado à rede. Em seguida, para verificar a viabilidade dos sistemas estudados deve-se compará-los a outros disponíveis na literatura para sistemas comerciais e a um armazenamento eletroquímico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As fontes de energia solar e eólica têm a variabilidade como principal obstáculo à sua penetração na matriz energética (Beaudin et al., 2010). A incapacidade de adequar a geração à demanda resulta na necessidade de criar soluções, sendo a mais óbvia o uso de sistemas de armazenamento de energia (Lund e Salgi, 2009). O sistema de armazenamento de energia por ar comprimido (CAES) surge como uma possibilidade viável para o gerenciamento da geração de energia. A capacidade de armazenar energia durante várias horas do CAES, sua relativa facilidade para instalação, o mínimo impacto ambiental visual, a alta eficiência energética e o rápido arranque das centrais são fatores que tornam a aplicação do CAES uma alternativa interessante (Cavaco, 2013; Suzano, 2015).

Um sistema CAES padrão consiste no uso de um compressor alimentado pelo excesso de energia gerada durante períodos de baixa demanda. Esse compressor envia ar à alta pressão para um reservatório, que eventualmente pode ser natural – e.g. cavernas subterrâneas – ou fabricado. Quando a demanda ultrapassa a capacidade de geração da rede, o ar comprimido é liberado e expandido em uma turbina, gerando assim energia para suprir o excesso de demanda. Gás

natural pode ser queimado na turbina a fim de aumentar a potência de geração, assim como outras fontes de aquecimento. Também é possível o uso de um sistema de armazenamento térmico (TES) a fim de retirar calor do ar comprimido e recuperar o calor dos gases de exaustão, devolvendo esse calor para o gás logo antes da exaustão. Esse sistema também é conhecido como A-CAES, devido a sua natureza adiabática (Wolf e Budt, 2014). A Figura 1 apresenta um modelo da planta de Huntorf, com seus devidos valores nominais de operação.

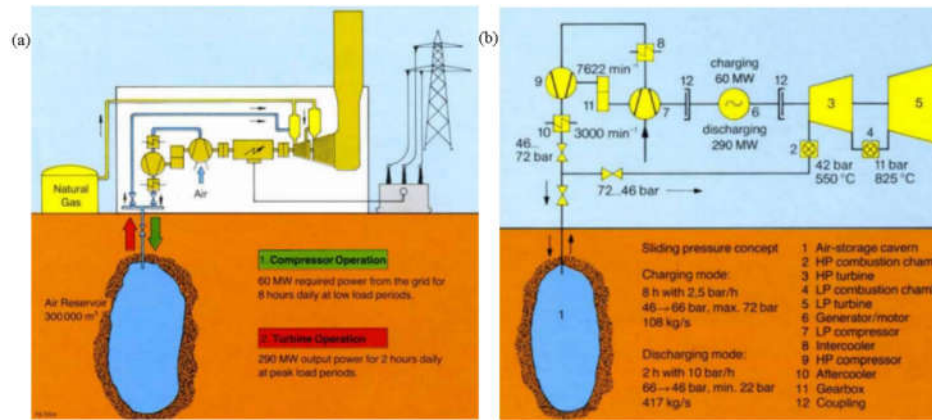


Figura 1. (a) Representação da estrutura da planta (b) Valores nominais de operação. Fonte: BBC (1981)

Existem plantas em operação desde a década de 70 e a tecnologia já é consolidada para armazenamento em grande escala. Entretanto, carecem estudos a respeito da utilização do CAES para armazenamento em pequena escala. Por ser um sistema mecanicamente simples, o CAES pode ser vantajoso para o armazenamento em locais remotos ou de difícil acesso, onde a geração se dá de forma modular – e.g. estações meteorológicas isoladas, antenas de rádio (Jannelli et al., 2014).

3. METODOLOGIA

3.1. Planejamento e dimensionamento do sistema

Será estudado um modelo de sistema de armazenamento em microescala não integrado à rede, alimentado por um sistema de geração modular – e.g. solar PV ou eólico. A compressão se dá em apenas um estágio, não havendo assim resfriamento intermediário. Além disso, a expansão do ar comprimido na turbina acontece sem a adição de nenhum combustível. O sistema é aberto – i.e. a exaustão da turbina é aberta ao ambiente – e pode ser utilizado um sistema TES para recuperação de calor rejeitado na exaustão e durante a compressão e armazenamento. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática do sistema.

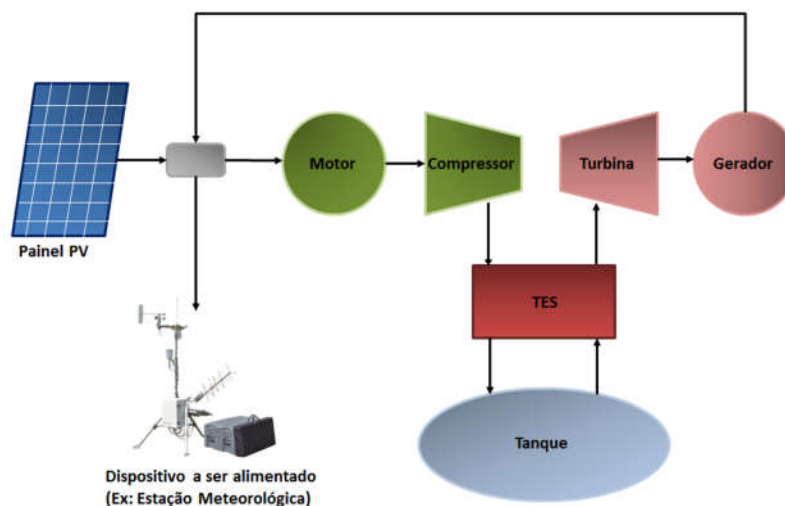


Figura 2. Representação esquemática do sistema.

É importante também determinar as dimensões e padrões de operação do sistema em questão. Os valores de taxa de compressão e tamanho do reservatório foram escolhidos de acordo com a disponibilidade comercial dos itens e com objetivo de gerar um *footprint* pequeno, de forma que a instalação de todo o sistema possa ser feita num pequeno cômodo. Na Tabela 1 estão especificados os valores iniciais assumidos para o dimensionamento do sistema CAES.

Tabela 1. Valores assumidos para o dimensionamento do sistema CAES

Potência de demanda prevista (W)	100
Pressão máxima de operação (kPa)	1200
Volume do reservatório (m³)	2
Temperatura ambiente (K)	300,15
Pressão ambiente (kPa)	101
Relação dos calores específicos para o ar (γ)	1,4
Eficiência isentrópica do compressor	0,9
Eficiência isentrópica da turbina	0,9

Uma vez definidos os valores iniciais, é necessário definir um modelo para o funcionamento do sistema. Neste trabalho serão desenvolvidos dois modelos de acordo com os trabalhos encontrados na literatura: compressão adiabática e compressão isotérmica.

3.2. Modelos em estudo

2.2.1 Compressão adiabática

No modelo de compressão adiabática, as perdas térmicas no processo de compressão, armazenamento e expansão na turbina são consideradas insignificantes. Isso pode ser alcançado utilizando um bom isolamento térmico na tubulação e no reservatório, além de um sistema TES, que retira calor do ar durante a compressão e o devolve ao gás antes da expansão na turbina.

A compressão adiabática de um gás pode ser satisfatoriamente modelada por meio da Eq.(1):

$$Pv^\gamma = \text{constante} \quad (1)$$

Para definir o processo de compressão, utiliza-se da Eq.(2) e (3):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

2.2.2 Compressão isotérmica

No modelo de compressão isotérmica, assume-se que o compressor é aletado a fim de aumentar a taxa de transferência de calor com o ambiente. Não há sistema de armazenamento de calor e as perdas térmicas do sistema se dão exclusivamente durante a compressão, sendo a temperatura de saída do ar comprimido igual à temperatura ambiente.

O trabalho necessário para a compressão isotérmica é dado pela Eq.(4):

$$W = RT \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (4)$$

Já a disponibilidade para os dois modelos pode ser expressa por meio da Eq.(5):

$$E = m[(h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)] \quad (5)$$

3.3. Simulação e processo de análise

Foram simulados os processos de carregamento da mesma planta CAES, considerando os dois modelos descritos, utilizando o software comercial EES®. Os resultados apresentaram as variações de temperatura, entalpia, entropia e volume específico do gás dentro do reservatório, assim como a energia necessária para o processo de compressão. Em seguida, considerando as eficiências estimadas para o sistema, calculou-se um valor de disponibilidade e a eficiência de armazenamento do sistema.

4. RESULTADOS

4.1 Simulação de carga

Para o modelo de compressão isentrópica, foram necessários 485 segundos para que o sistema atingisse o valor máximo de pressão estipulado (12 bar). A disponibilidade total de energia situou-se em torno de 0,965kWh, capaz de alimentar o sistema proposto por aproximadamente 10 horas sem nenhuma geração complementar.

A temperatura total atingiu níveis muito altos (604K), justificando o uso de um sistema TES para garantir o bom funcionamento do compressor e inibir quaisquer perdas térmicas nele e no reservatório. A eficiência total do sistema é dada pelo produto das eficiências arbitradas para o compressor e a turbina (81%), uma vez que no modelo isentrópico não há perdas térmicas para o ambiente. Além disso, a quantidade total de massa armazenada foi de 13,74 kg, valor que poderia ser maior caso as temperaturas de operação fossem menores, indicando outra vantagem do uso do TES para retirada de calor. O rápido crescimento da temperatura resulta em valores muito altos de pressão por massa de ar comprimido. A pressão é o fator limitante do sistema em função das características construtivas do compressor e do reservatório, o valor total de energia armazenada acaba sendo inferior apesar da maior eficiência.

O processo de carga do reservatório é ilustrado pela Fig. 3.

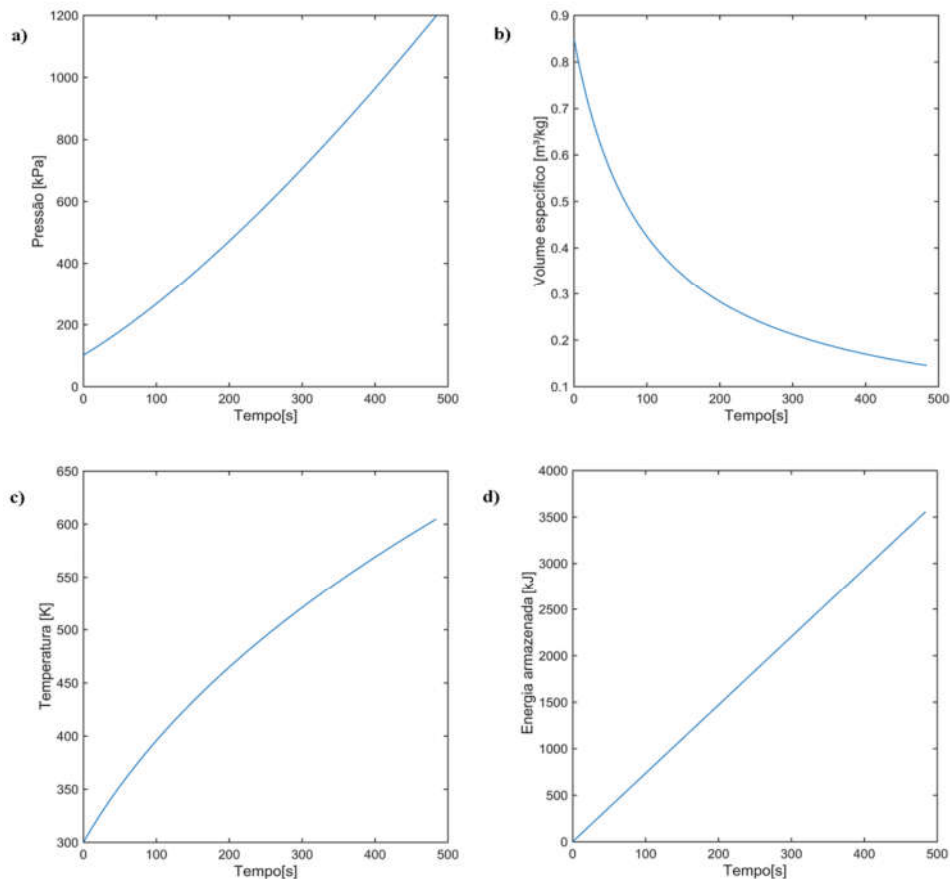


Figura 3. Evolução dos parâmetros avaliados durante a carga do tanque para a compressão isentrópica: (a) Pressão; (b) Volume específico; (c) Temperatura; (d) Energia armazenada.

Já para o processo isotérmico, foram necessários 1089 segundos para que o sistema fosse completamente carregado. A disponibilidade total de energia foi de 1,338 kWh, capaz de alimentar o sistema durante um período superior a 13

horas sem qualquer geração complementar. A eficiência total do sistema foi de 40%, tal valor é justificado pelas grandes perdas térmicas durante o processo de compressão isotérmica. Apesar dos valores de energia armazenada atingidos, é importante lembrar que a massa total de ar comprimido armazenada foi de 27,96 kg, significando que o valor total de trabalho por unidade de massa é inferior ao obtido no modelo isentrópico. Isso se deve ao fato da temperatura de operação ser bem inferior, viabilizando a compressão de maiores quantidades de ar antes de alcançar o valor limite de pressão estipulado.

A Figura 4 ilustra o processo de carga do reservatório para o modelo de compressão isotérmica:

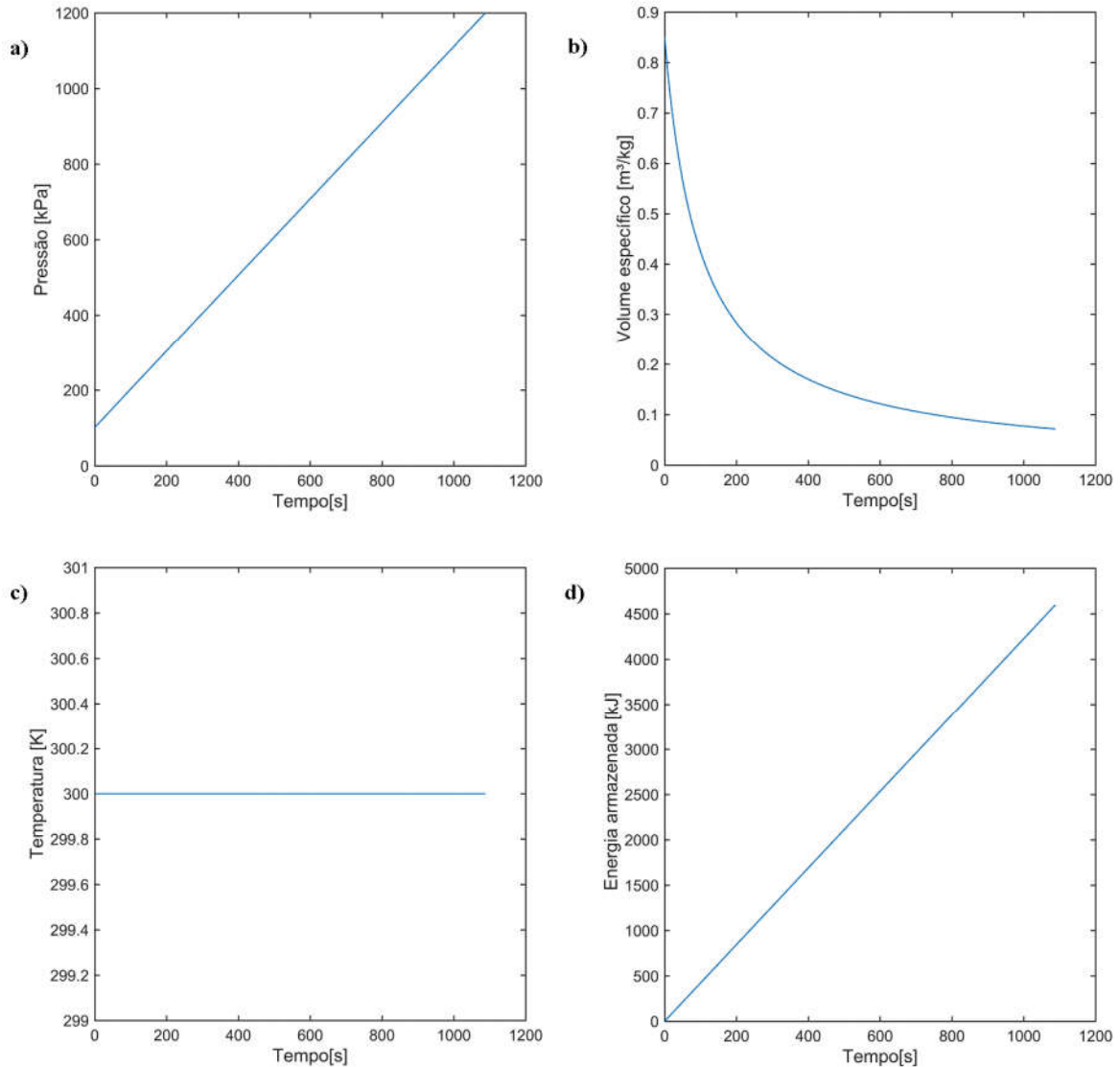


Figura 4. Evolução dos parâmetros avaliados durante a carga do tanque para a compressão isotérmica: (a) Pressão; (b) Volume específico; (c) Temperatura; (d) Energia armazenada.

A utilização de um sistema isentrópico só se mostra vantajosa quando acoplada a um sistema de armazenamento térmico, uma vez que a não utilização do mesmo resulta na limitação da quantidade de energia armazenada no sistema. Já a utilização de um sistema isotérmico, onde todo o calor é rejeitado no processo de compressão, pode ser interessante em situações onde a fonte de energia utilizada é barata e abundante, justificando assim o uso apesar da baixa eficiência de armazenamento do sistema.

4.2 Análise econômica

A fim de analisar a viabilidade do sistema, foi feito um orçamento de um sistema CAES dentro dos valores especificados na Tab. 1 e, considerando os custos de capital inicial e os custos de manutenção anual do sistema, foi proposta uma comparação com um sistema de baterias de porte equivalente, para um tempo de vida de 30 anos, a fim de verificar se há ou não vantagens no uso desta tecnologia. A estimativa dos custos de manutenção do sistema envolve a

troca periódica do óleo do compressor, verificação do estado do reservatório, manutenção dos componentes elétricos e mecânicos, limpeza dos componentes e custos de mão-de-obra.

Para o sistema de armazenamento eletroquímico, foi considerado um sistema de baterias de chumbo-ácido devido ao seu menor custo. Foram considerados também os valores dos periféricos necessários e de troca periódica das baterias de acordo com sua vida útil. Foram estimados valores de operação próximos àqueles propostos para o sistema CAES (1kWh, 100W). Os valores aqui utilizados foram baseados nos estudos de Imhoff (2007), Ferioli et al. (2014) e Camargo et al. (2014).

A Tabela 2 apresenta os custos de capital para implantação do sistema e os custos ao longo de uma vida útil de 30 anos:

Tabela 2: Comparação dos custos do sistema CAES proposto e de um sistema de armazenamento eletroquímico

	Baterias	CAES – isentrópico	CAES – isotérmico
Custo de capital [R\$/kWh]	5.800,00	26.217,62	18.908,82
Custo de manutenção anual médio [R\$]	700,00	300,00	300,00
Custo total em 30 anos [R\$]	26.800,00	35.217,62	27.908,82

O custo de manutenção do sistema de baterias é superior em função da vida útil relativamente pequena das mesmas quando submetidas a ciclos constantes de carga e descarga. Foram assumidos custos iguais de capital e manutenção para os dois modelos de CAES, tendo o sistema isotérmico melhor custo por kWh instalado, em função da maior densidade de energia obtida. Os custos acima foram calculados desconsiderando o custo da energia produzida, assumindo ser esta abundante e barata. Caso o sistema fosse instalado na rede, o custo da energia produzida seria significativamente maior para o sistema isotérmico em função de sua baixa eficiência.

O sistema CAES mostra-se uma alternativa viável em custo, sendo comparável a sistemas comercialmente disponíveis, mesmo sem o uso de um TES complementar. A baixa necessidade de manutenção torna o sistema rentável a longo prazo. Ressalta-se que não foram considerados valores de taxa de retorno do capital investido.

5. CONCLUSÃO

Foram apresentados dois modelos de compressão: um modelo isentrópico sem sistema de armazenamento térmico complementar e um sistema isotérmico. O sistema isentrópico apresentou eficiência na ordem de 80% e tempo de carga 55,3% mais rápido do que o isotérmico. Em contra-partida, o sistema isotérmico apresentou uma maior densidade de energia, armazenando mais que o dobro da massa de ar comprimido e 38,7% a mais de energia, porém com uma eficiência de apenas 26% devido às perdas térmicas durante o processo de compressão.

Em seguida, foi apresentada uma estimativa de custo do sistema CAES proposto considerando ambos os modelos de compressão. Essa estimativa foi então comparada com valores encontrados na literatura para sistemas comerciais e armazenamento eletroquímico utilizando baterias de chumbo-ácido. Ambos os sistemas CAES apresentaram valores próximos àqueles do sistema de baterias, sendo o sistema isotérmico apenas 4,1% mais caro ao longo de uma vida útil de 30 anos. O uso de um sistema TES acoplado a um sistema CAES a fim de obter baixas temperaturas de operação num regime isentrópico viabilizariam custos ainda mais baixos.

A utilização de sistemas CAES em micro e pequena escala mostra-se, portanto, viável em locais isolados, de difícil acesso, com geração isolada da rede e sem a necessidade de um footprint muito pequeno, sendo vantajoso o uso de um TES para aumentar a eficiência do sistema, até mesmo quando operado a baixas temperaturas.

NOMENCLATURA

A-CAES *Adiabatic Compressed Air Energy Storage*

CAES *Compressed Air Energy Storage*

TES *Thermal Energy Storage*

P pressão, kPa

m massa, kg

v volume específico da água, m³/kg

E exergia, kJ

W trabalho, kJ

T temperatura, K

R constante dos gases para o ar, kJ/kg.K

Letras gregas

γ relação entre os calores específicos para o ar

Subscritos

0 ambiente

1 entrada do compressor

2 saída do compressor

REFERENCIAS

- BBC, Brown Boveri, 1981. Huntorf air storage gas turbine power plant. Pub. No. D GK 90 202 E, Mannheim.
- Beuadin, M; Zareipour, H; Schellenbergglabe, A; Rosehart, W. 2010. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 14, pp. 302-314.

- Camargo, C; Impinnisi, P.R; de Andrade, J. 2014. Sistema de armazenamento de energia a base de baterias para aplicações na rede de distribuição. Espaço Energia, Vol. 21.
- Cavaco, L. E. 2013. Definição de reservatórios geológicos para armazenamento de energia em ar comprimido e sinergias com produção de energia. Dissertação de Mestrado (Universidade de Évora). Évora, Portugal.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2015. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Rio de Janeiro. pp. 16. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>.
- Ferioli, K. C. O; Vilhena, A. L; Aguiar, M. A. S; Arrifano, R. C. D; Côrrea, F. 2014. Projeto de Sistema Fotovoltaico Isolado (OFF-GRID) para Residência. Revista Engenharia Elétrica, Vol. 2.
- Imhoff, J. 2007. Desenvolvimento de conversos estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal de Santa Maria). Santa Maria, RS, Brasil.
- Jannelli, E; Minutillo, M; Lubrano Lavadera, A; Falcucci, G. 2014. A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology. Energy, Vol. 78, pp. 313-322.
- Lund, H; Salgi, G. 2009. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 1172-1179.
- Susano, F. V. 2015. Características hidrogeológicas de meios porosos para armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido. Dissertação de Mestrado (Universidade de Évora). Évora, Portugal.
- Wolf, D; Budt, M. 2014. LTA-CAES – A low temperature approach to Adiabatic Compressed Air Energy Storage. Applied Energy, Vol. 125, pp. 158-164.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PERFORMANCE SIMULATION AND ECONOMIC FEASIBILITY OF A MICROSCALE CAES PLANT

Vitor Torres Alvarenga, vatorres01@gmail.com¹

Bruno Phillip Alves da Silva, bruno.phill@gmail.com¹

Bruno Ude Todde Fonseca Valadares, bruno_todde@hotmail.com¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte/MG – Escola de Engenharia, Galpão da Engenharia Mecânica, Sala 2933.

Abstract. *Compressed air energy storage (CAES) systems have become a viable alternative for energy storage in order to enable a more renewable energy portfolio. However, the current literature lacks studies regarding micro and small scale CAES applications. This paper aims to assess the performance of a theoretical CAES system for off-grid applications, as well as its economic feasibility compared to other available system. Firstly, a review of the CAES technology is presented, including the distinction between regular CAES systems and A-CAES systems, which feature waste-heat recovery systems, usually in the form of Thermal Energy Storage (TES) systems. Two performance simulation have been done considering both isentropic and isothermal compression, for efficiencies of 81% and 26%, respectively. An economic comparison between the proposed system and a battery storage system is also presented, showing that the isothermal CAES system is only 4% more expensive during a 30-year life-cycle, therefore being a feasible alternative for micro and small-scale energy storage in remote, off-grid scenarios.*

Keywords: Energy storage, CAES, TES, Renewable energy.