

PANORAMA DAS ESTRATÉGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOB FORMA DE AR COMPRIMIDO

Marcos A. Salvador, Telles B. Lazzarin, Roberto F. Coelho

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Instituto de Eletrônica de Potência - INEP, Florianópolis - SC, Brasil
e-mail: marcos.salvador@inep.ufsc.br, telles@inep.ufsc.br, roberto@inep.ufsc.br

Resumo – O armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido (CAES) vem sendo explorado há décadas, principalmente por meio de sistemas de grande porte. A evolução destes sistemas deu-se com base em melhorias no gerenciamento térmico das etapas de compressão e expansão do ar por intermédio de processos adiabáticos e quase isotérmicos. Já os sistemas de pequeno porte (SS-CAES), mais recentes, surgiram como alternativa à substituição de baterias em sistemas autônomos, em fontes de alimentação ininterruptas e em aplicações de geração distribuída com fontes renováveis. Tais sistemas requerem estágios de processamento de energia compactos e eficientes, abrindo possibilidades de aplicação de dispositivos de eletrônica de potência. Neste contexto, o presente artigo oferece uma visão abrangente referente aos sistemas CAES e SS-CAES, apresentando os princípios de funcionamento de diversos tipos de configurações, bem como informações referentes à densidade de energia, eficiência, estimativas econômicas, limitações e desafios a serem vencidos para que se tornem competitivos.

Palavras-Chave – Ar Comprimido, Armazenamento de Energia, Sistemas Híbridos.

OVERVIEW OF COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEMS

Abstract – Compressed air energy storage (CAES) is a way to store electrical energy employed for decades, mainly through large scale systems, whose advances were based on improvements in thermal management of air compression and expansion stages through adiabatic and nearly isothermal processes. Small scale compressed air energy storage systems (SS-CAES) are also recently applied as an alternative to replace batteries in autonomous systems and in distributed generation applications with renewable sources. These systems require compact and efficient power stages, with remarkable presence of power electronics. This paper presents an overview about several CAES and SS-CAES systems and describes their operating principles, as well as their energy density, efficiency, cost, limitations and implementation challenges.

Keywords – Compressed Air, Energy Storage, Hybrid Systems.

Artigo submetido em 21/12/2015. Primeira revisão em 13/04/2016.
Aceito para publicação em 31/05/2016 por recomendação do Editor
Convidado Leandro Michels.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e a preocupação com o meio ambiente têm contribuído para um notável incremento da geração de energia por fontes renováveis. Paralelamente, o armazenamento de energia tem sido alvo de pesquisas que propõem formas de amenizar as intermitências de geração tipicamente atrelados a tais fontes, também relacionadas à degradação da qualidade da energia [1]-[3]. Além disso, os problemas associados aos picos de demanda de energia e à estabilidade elétrica dos sistemas de potência podem ser minimizados por meio da aplicação de sistemas de armazenamento junto às plantas de geração, em suporte ao sistema de transmissão, em vários pontos da rede de distribuição e também no lado dos consumidores [2].

A literatura descreve distintas maneiras de realizar o armazenamento de energia, havendo destaque para o uso de bancos de baterias de diversas tecnologias e/ou de supercapacitores, bem como o emprego de células a combustível, de volantes de inércia, de técnicas de bombeamento e de armazenamento de água, de ar comprimido, entre outros [1].

Sistemas de armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido (CAES, do inglês *Compressed Air Energy Storage*) permitem armazenar energia no processo de compressão do ar, para posterior utilização durante sua expansão, sendo aqui considerados como de pequeno (≤ 100 kWh) e de grande (> 100 kWh) portes.

Sistemas CAES de grande porte vêm sendo utilizados como forma de apoio ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) desde a década de 70, havendo sido instalados com o intuito de armazenar energia em grandes reservatórios durante períodos de baixa demanda, para ser utilizada posteriormente, em horários de pico [4]. Atualmente, sistemas CAES continuam sendo alvo de estudos, mas o foco volta-se a sua aplicação como forma de reduzir as oscilações de potência oriundas da intermitência de geração ocasionada pela disseminação de fontes renováveis no SEP [5], [6].

Ao longo dos anos, diferentes estratégias relacionadas aos sistemas CAES têm sido abordadas visando o aumento de eficiência e a minimização dos impactos ao meio ambiente, sendo propostos sistemas com reaproveitamento do calor gerado durante o processo de compressão do ar para reduzir a queima de combustível durante o processo de expansão [7]. Também vêm sendo propostos sistemas híbridos de armazenamento de energia de pequeno porte baseados em tecnologias pneumáticas combinadas com supercapacitores ou tecnologias hidropneumáticas (hidráulica e pneumática) associadas à supercapacitores. Ambos os sistemas requerem estratégias para rastreamento do ponto de máxima eficiência ou de máxima potência [8].

Os sistemas de pequeno porte de armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido (SS-CAES, do inglês *Small Scale Compressed Air Energy Storage*), são vistos como alternativa à substituição de algumas aplicações que usualmente utilizam bancos de baterias. Os sistemas SS-CAES possuem vantagens do ponto de vista ecológico e de vida útil, quando comparados às baterias comerciais, todavia, também apresentam desafios a serem vencidos, relacionados à menor densidade de energia e ao menor rendimento. Tais fatores estimulam assim, a busca pela elevação da eficiência no processo de expansão do ar [9].

A evolução do SS-CAES pode colocá-lo como uma opção entre os sistemas de armazenamentos de energia de alta densidade. Assim, poderia ser aplicado em áreas da eletrônica de potência já consolidadas, como as fontes de alimentação ininterruptas (UPS, do inglês *Uninterruptible Power Supply*); ou em áreas emergentes, como sistemas híbridos isolados, redes ativas e sistemas de geração distribuída com armazenamento de energia, para solucionar problemas como intermitência de geração, nivelamento de carga, elevado de pico de demanda (*peak shaving*), dentre outros. Atualmente, todas essas aplicações utilizam baterias, todavia, ainda buscam-se soluções em outras formas de armazenamento que sejam ecologicamente menos agressivas e tenham maior vida útil.

Neste contexto, o presente artigo oferece uma revisão referente aos sistemas de armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido, com o objetivo de apontar as diversas abordagens existentes e ressaltar os esforços efetuados em busca de novas estratégias para utilização do ar sob pressão. Além disso, o artigo demonstra o potencial e os desafios ao uso da eletrônica de potência (conversores estáticos e estratégias de controle) aplicada ao processamento de energia neste tipo de sistema de armazenamento.

II. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOB FORMA DE AR COMPRIMIDO

O ar atmosférico consiste de uma mistura incolor, inodora e insípida de gases, na proporção aproximada de 78% de Nitrogênio, 21% de Oxigênio e 1% de outros elementos. Por se tratar de um gás, apresenta a propriedade da compressão, podendo ser armazenado em reservatórios. Nesta condição, há o aumento do número de moléculas de ar por unidade de volume e, conseqüentemente, elevação da pressão interna do reservatório. A compressão do ar requer o uso de uma fonte externa de energia, sendo parte dessa energia armazenada e devolvida ao sistema durante o processo de expansão [10].

Os sistemas de armazenamento de energia sob forma de ar comprimido de grande porte aplicados aos sistemas elétricos possuem basicamente duas etapas: compressão e expansão. Em ambos os casos as perdas são inevitáveis, tornando impossível uma transformação unitária. No entanto, o sistema convencional abordado na década de 70, D-CAES (do inglês, *Diabatic Compressed Air Energy Storage*), ganhou novas abordagens do ponto de vista termodinâmico, com etapas intermediárias para gerenciamento das trocas de calor, possibilitando considerável aumento de rendimento. Uma primeira solução, conhecida por AA-CAES (do inglês, *Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage*),

consiste em um processo avançado de conservação e reaproveitamento do calor que é gerado durante o processo de compressão. Em adição, na solução I-CAES (do inglês, *Isothermal Compressed Air Energy Storage*) a temperatura do fluido é mantida aproximadamente constante durante todo o processo [5], [7].

A eletrônica de potência é frequentemente utilizada como elo entre o sistema de armazenamento e a rede elétrica, viabilizando diversas possibilidades de aplicação do armazenamento de energia junto ao conceito de geração distribuída [2]. Tais possibilidades têm estimulado o desenvolvimento de sistemas de pequena escala SS-CAES com estratégias para rastreamento do ponto de máxima eficiência (MEPT) [8] ou para rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) [9], haja vista que tanto a potência quanto a eficiência de saída de um SS-CAES variam em função de fatores como pressão, temperatura e vazão. Além disso, as possibilidades de aplicação levaram ao surgimento de soluções híbridas com suas respectivas estratégias de controle. Dentre as topologias híbridas, que serão demonstradas posteriormente nesta revisão, podem ser citadas: CASCES (do inglês, *Compressed Air and Supercapacitors Energy Storage*) e BOP (do inglês, *Battery with Oil-Hydraulics and Pneumatics*) do tipo A e do tipo B. Sistemas BOP tipo A possuem ciclos de compressão/expansão com gás lacrado, enquanto sistemas BOP tipo B se estabelecem com ciclos de compressão e expansão do ar atmosférico de forma aproximadamente isotérmica [8]. As soluções SS-CAES e SS-CAES-híbridas são estruturas baseadas em conversores estáticos, mas, como será demonstrado, estudos que abordam estruturas de conversores, modelagem, estratégias de controle e integração destes sistemas ainda são restritos. Assim, tomando-se como referência os sistemas de armazenamento baseados no emprego de baterias, percebe-se a necessidade de detalhar as características da carga (CAES) para avançar o desenvolvimento desta área.

A. Sistema D-CAES

Sistemas de armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido de grande porte são tipicamente concebidos para utilizar a energia excedente em horários de baixa demanda para comprimir o ar. O ar comprimido gerado é armazenado em grandes reservatórios subterrâneos ou em cavernas seladas, para ser posteriormente utilizado na geração de energia a partir de sua expansão [4], [5], [7]. O processo de expansão e geração ocorre similarmente ao de uma turbina a gás convencional [11].

Os sistemas CAES são classificados com base no método que gerenciam o calor nos processos de compressão e expansão do ar. No sistema CAES Diabático (D-CAES) de primeira geração, o calor resultante do processo de compressão é transferido para a atmosfera e o ar é reaquecido durante a expansão, pela queima de algum combustível, tal como gás natural ou óleo. O sistema D-CAES de segunda geração, por sua vez, funciona de maneira semelhante, porém os processos de compressão e expansão são divididos em etapas, e parte da energia térmica contida no ar que sai da turbina é aproveitado para pré-aquecer o ar que deixa o reservatório [5]. O sistema D-CAES com a inclusão de um

recuperador de calor, ilustrado na Figura 1, proporcionou na planta McIntosh, instalada nos Estados Unidos, uma redução de aproximadamente 22% no consumo de combustível, se comparado ao da planta Huntorf, de primeira geração, instalado na Alemanha em 1978 [7].

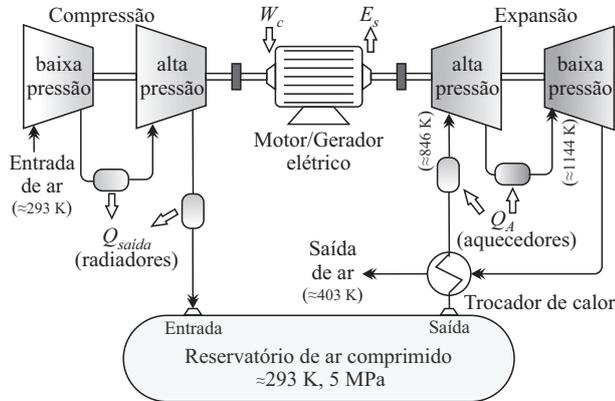


Fig. 1. Visão geral do sistema D-CAES 2ª geração [7].

Mesmo com a inclusão do recuperador de calor, este sistema requer queima de grande quantidade de combustível que, além de penalizar a eficiência, introduz aspectos negativos do ponto de vista da emissão de CO₂. De forma geral, o rendimento desse sistema pode atingir 54%, sendo calculado a partir de uma relação entre a energia de saída (E_s) e a soma da energia elétrica (W_c) utilizada para compressão do ar com a energia (Q_a) adicionada ao processo na forma de calor [7], [12].

B. Sistema AA-CAES

O sistema CAES Adiábatico Avançado (AA-CAES) possui um arranjo que armazena o calor gerado durante o processo de compressão do ar, disponibilizando-o durante o processo de expansão para reduzir ou até mesmo eliminar o consumo de combustível utilizado no aquecimento do ar na entrada da turbina. Os principais benefícios deste sistema são a elevação da eficiência e a redução da emissão de carbono, em virtude da minimização do uso de combustível [5], [7]. A Figura 2 mostra o fluxo do processo AA-CAES com seus trocadores de calor e seu reservatório térmico, possibilitando uma eficiência aproximada de até 70%.

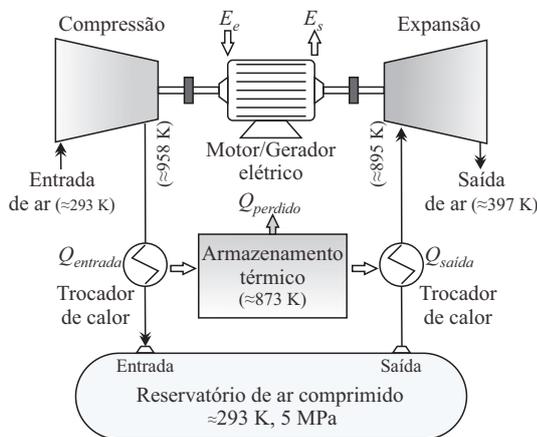


Fig. 2. Visão geral do sistema AA-CAES [7].

Nesta topologia, o aproveitamento do calor é realizado por meio de trocadores instalados próximos aos processos de compressão e de expansão do ar. O armazenamento do calor, por sua vez, pode ser feito em um meio líquido com materiais que não apresentam mudança de estado para a faixa de temperatura determinada [7].

Atualmente, encontra-se em desenvolvimento na Alemanha um projeto baseado no sistema AA-CAES, denominado como ADELE. Estima-se que o projeto, com capacidade de 360 MWh e potência de 90 MW, poderá operar com uma eficiência da ordem de 70% [13].

O aumento da eficiência da troca de calor entre ar e líquido para elevados níveis de fluxo e a melhora do desempenho de seus separadores são os principais desafios para implantação de sistemas I-CAES.

C. Sistema I-CAES

O sistema CAES isotérmico (I-CAES) é uma opção alternativa que elimina a necessidade de armazenamento térmico em elevadas temperaturas e também a necessidade de queima de combustível no processo. O sistema I-CAES tenta se aproximar do processo isotérmico de compressão/expansão ideal, procurando manter a temperatura do processo constante por meio de métodos eficazes de troca de calor, resultando em eficiências da ordem de 75% [12].

O funcionamento do sistema I-CAES envolve as seguintes etapas: a injeção de líquido (água/óleo) num cilindro de êmbolo alternativo durante a compressão do ar, a separação do ar comprimido e do líquido e, por fim, a injeção de líquido quente dentro do cilindro durante a expansão [7]. A Figura 3 ilustra o fluxo do processo I-CAES com as respectivas etapas descritas.

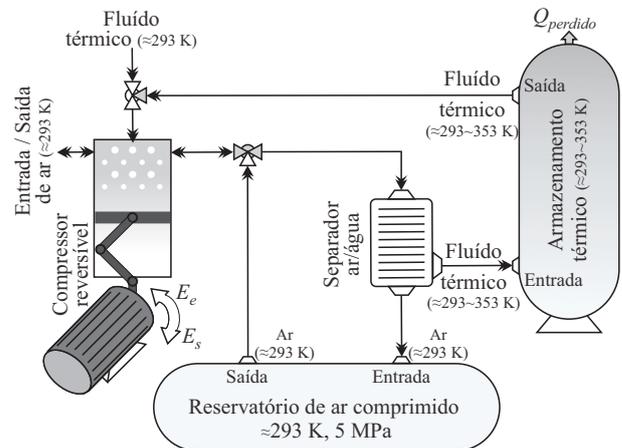


Fig. 3. Visão geral do sistema I-CAES [7].

A Tabela I apresenta um resumo comparativo dos três sistemas termodinâmicos primários CAES.

Os fatores relacionados na Tabela I mostram a superioridade dos sistemas AA-CAES e I-CAES quando comparados ao sistema D-CAES do ponto de vista de eficiência e impactos ao meio ambiente, associados à emissão de carbono. Outra vantagem a ser destacada é a obtenção de maiores densidades de energia devido ao maior nível de pressão utilizado, decorrente do desenvolvimento tecnológico das técnicas de compressão. Os custos de capital

estimados para os sistemas I-CAES são mais elevados, conforme demonstrado na Tabela I [7]. A diferença apresentada está relacionada principalmente a sua aplicação em escala piloto, considerando o uso de reservatórios instalados ao ar livre ao invés de reservatórios geológicos.

TABELA I

Comparativo entre os Sistemas D-, AA- e I-CAES [7]

	D-CAES	AA-CAES	I-CAES
Eficiência do sistema	42~54%	65~70%	70~80%
Pressão do sistema	4 ~ 8 MPa	7 ~ 20 MPa	5 ~ 40 MPa
Densidade de energia	5 kWh/m ³ à 8 MPa	20 kWh/m ³ à 20 MPa	53 kWh/m ³ à 40 MPa
Temperatura	Até 1023 K	773 ~ 873 K	< 353 K
Queima de combustível	Gás natural	Reduzida	Nula
Custo conforme capacidade US\$/kW	\$760~\$1200 Ano 2012	\$850~\$1870 Ano 2012	\$1500~\$6000 Ano 2012
Maturidade técnica	Aplicado (comercial)	ADELE (elaboração)	Projetos pilotos

No sistema D-CAES o armazenamento ocorre principalmente em bancos subterrâneos de minerais extraídos ou em cavernas. Já os outros sistemas passaram a considerar a utilização de vasos de pressão de aço carbono ou fibra, instalados ao ar livre. Os elevados níveis de pressão representam sérios riscos de acidentes, por isso sua aplicação deve estar de acordo com as normas vigentes. No Brasil, a norma regulamentadora de número treze (NR-13) trata dos requisitos envolvendo caldeiras e vasos de pressão. Já a Europa utiliza a norma EN 13445, que engloba uma série de requerimentos para vasos de pressão não inflamáveis.

Os cuidados que envolvem a construção de reservatórios de alta pressão, para que se tornem robustos e seguros, implicam elevação do custo dos reservatórios ao ar livre, tornando-os cerca de cinco vezes mais caros quando comparados aos reservatórios enterrados e aos reservatórios naturais, como cavernas [7]. Segundo [14], a relação de três vezes entre comprimento e diâmetro do reservatório aparece como a solução mais econômica, porém, o fator mais importante para o custo dos reservatórios de ar comprimido ao ar livre é sua máxima pressão de trabalho.

D. Sistema SS-CAES

Os sistemas de pequeno porte de armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido (SS-CAES) tem sido alvo de estudo como alternativa para substituição de baterias em sistemas autônomos, UPS, e em aplicações de geração distribuída, podendo ser utilizados de forma conjunta com fontes renováveis [7], [9].

A Figura 4 apresenta um desses sistemas de pequena escala, onde o ar é tipicamente comprimido por uma unidade de compressão volumétrica (compressor) e armazenado sob pressão em reservatórios ao ar livre. Quando liberado para a atmosfera, o ar armazenado é utilizado para mover um motor pneumático ou uma microturbina a ar que, por sua vez, movimentam um gerador cc (corrente contínua). A energia gerada é injetada na rede elétrica ou aplicada a uma carga remota por meio de conversores estáticos, responsáveis pelo processamento da energia elétrica gerada.

Os sistemas SS-CAES não efetuam queima de combustível, causando menos impactos negativos ao meio ambiente se comparados às baterias eletroquímicas, que

geram resíduos tóxicos e possuem menor longevidade. Porém, a densidade de energia e a eficiência dos sistemas SS-CAES são baixas, implicando maior volume para suprir a mesma quantidade de energia das baterias [7]-[9].

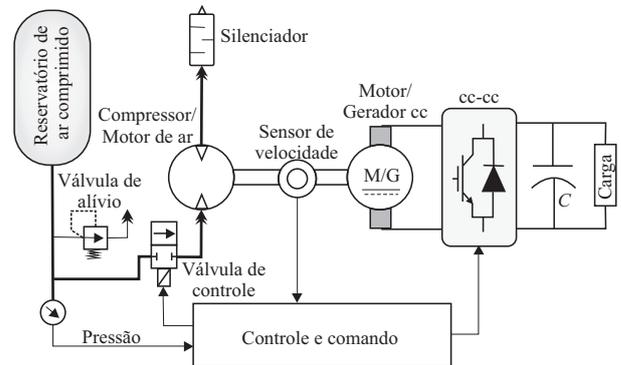


Fig. 4. Sistema SS-CAES alimentando carga remota [8].

Como pode ser observado na Figura 4, um sistema de controle comanda a válvula de descarga do reservatório de ar e fornece parâmetros ao conversor estático, com base na medição de grandezas como a pressão do sistema e velocidade do eixo do gerador.

De modo geral, os sistemas de processamento e armazenamento de energia procuram métodos para diminuir perdas e elevar rendimento, buscando obter a máxima eficiência possível. Neste aspecto, os estudos direcionados aos sistemas SS-CAES têm abordado estratégias para os processos de carga e descarga do reservatório de ar comprimido, bem como sua aplicação associada a arranjos fotovoltaicos e geradores eólicos. Em [15], é proposto uma bomba de ar baseada em um pistão de ar/líquido. Este compressor de pequena escala apresenta baixa taxa de compressão e baixa potência, por isso sua vantagem consiste na possibilidade de ser implantado junto a arranjos fotovoltaicos em aplicações residenciais, cuja potência de saída é tipicamente da ordem de 160 W.

Em [9] foi desenvolvida, simulada e implementada uma estratégia de controle para a descarga do ar comprimido de um sistema SS-CAES via rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) de um pequeno motor pneumático de palhetas. Como pode ser visto na Figura 5, o sistema movimenta um gerador cc de ímãs permanentes que alimenta uma carga resistiva por meio de um conversor Buck.

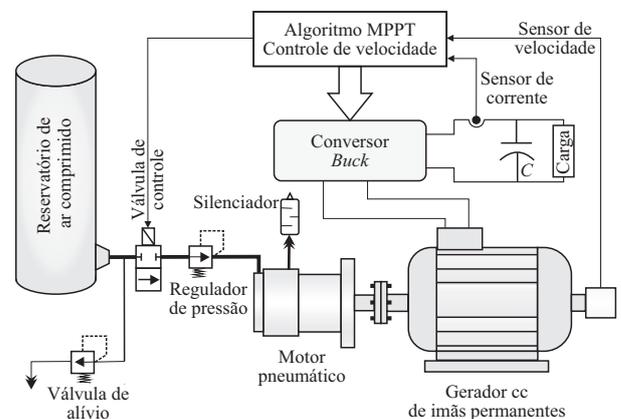


Fig. 5. Processo de descarga de ar com MPPT em SS-CAES [9].

Este sistema foi analisado usando um modelo de pequenos sinais e empregando o método perturba e observa com pequenos passos de velocidade para buscar a convergência. O sistema de controle proposto não necessita monitorar a pressão e a vazão do ar comprimido, apenas analisa a velocidade do eixo do gerador e a corrente de saída do conversor *Buck*, para rastrear a linha de máxima potência apresentada na Figura 6 [9].

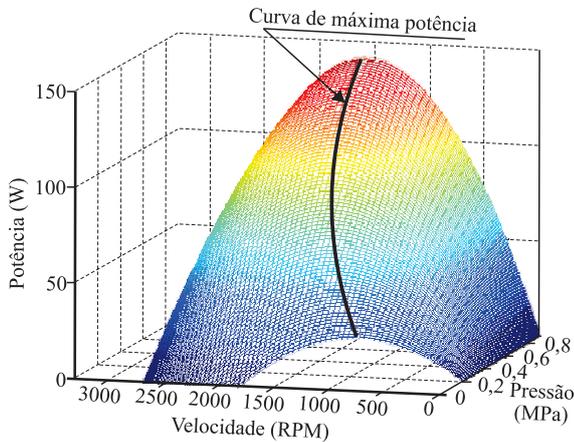


Fig. 6. Linha de máxima potência do motor pneumático [9].

A partir das equações de torque, fluxo de ar e velocidade do motor, é possível traçar a superfície correlacionada às grandezas de potência, pressão e velocidade do motor pneumático, e estabelecer a linha de máxima potência. Conforme a Figura 6, a linha de máxima potência depende da pressão de alimentação e da velocidade motor [9].

Em [8], foi investigada a aplicação de um motor pneumático de palhetas de 100 W para a conversão pneumática/mecânica, e desenvolvida uma estratégia de rastreamento de seu ponto de máxima eficiência (MEPT) conforme Figura 7.

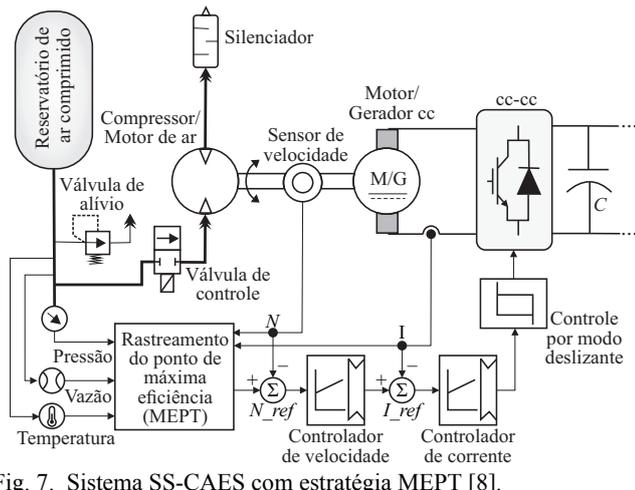


Fig. 7. Sistema SS-CAES com estratégia MEPT [8].

As variações de pressão e de carga estão respectivamente relacionadas à vazão de ar e à velocidade do motor pneumático, e afetam diretamente seu desempenho. O princípio da estratégia MEPT da Figura 7 consiste em otimizar a conversão de energia com base na medição de várias grandezas (pressão, vazão, velocidade, corrente, etc.)

no âmbito de determinar a velocidade ideal segundo a linha de máxima eficiência apresentada na Figura 8 e, assim, utilizá-la no módulo de controle de velocidade [8].

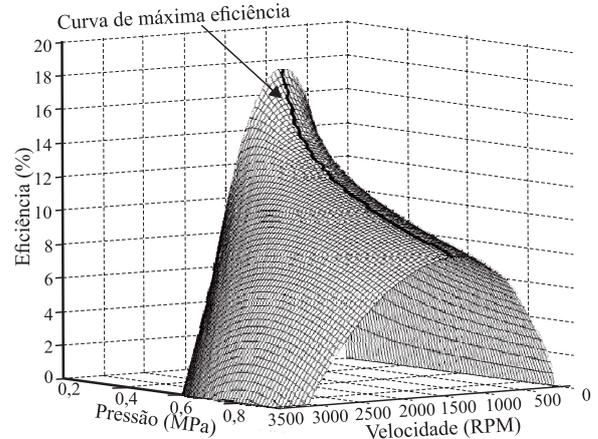


Fig. 8. Máxima eficiência do motor pneumático 100 W [8].

A Figura 8 mostra que o motor pneumático possui baixa eficiência, menor que 20%. A reduzida eficiência de um sistema de pequena escala com um motor pneumático deve-se às perdas de calor devido à elevada razão área/volume de tais máquinas, em razão das irreversibilidades de um processo não adiabático. Por motivo similar e por apresentarem tolerâncias internas críticas para reduzir perdas por vazamento, turbinas não são empregadas para a geração de energia em pequena escala. Entre as desvantagens dos sistemas abertos mencionados anteriormente está o tratamento do ar que circula no sistema.

A existência de umidade no ar atmosférico requer um mecanismo de eliminação para evitar condensação nos reservatórios, bem como oxidação de componentes da instalação. Apesar dos esforços concentrados nas estratégias de MPPT e MEPT, a aplicação desse tipo de motor não é a mais adequada para o processo de conversão da energia armazenada [8], [9]. Tal fato deu origem aos sistemas híbridos, abordados a seguir.

E. Sistema CASCES

O sistema CASCES (do inglês, *Compressed Air and Supercapacitors Energy Storage*) é representado na Figura 9.

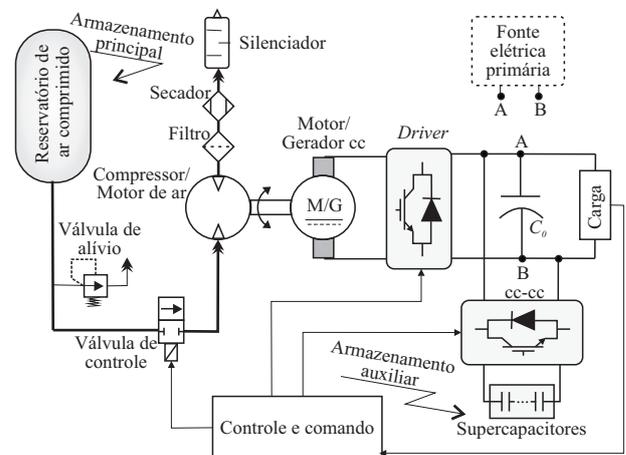


Fig. 9. Sistema híbrido de armazenamento CASCES [8].

Tal sistema consiste na combinação de um meio de armazenamento de alta capacidade de energia (ar comprimido), com dispositivos auxiliares de reserva de energia de elevada densidade de potência (supercapacitores) [8]. Os componentes do conjunto pneumático/elétrico são reversíveis, assim, a energia armazenada neste sistema é proveniente de uma fonte primária externa, que pode ser a rede elétrica ou um conjunto fotovoltaico, por exemplo.

A associação de supercapacitores ao sistema de ar comprimido permite obter melhor qualidade da energia entregue à carga, suavizando as iminentes flutuações da tensão de saída oriundas das possíveis variações de carga.

Como pode ser verificado na Figura 10, o supercapacitor é utilizado para suprir a carga nos momentos em que o motor pneumático fica em repouso e também é aproveitado como assistente na manutenção da potência entregue em momentos de pico de carga [8].

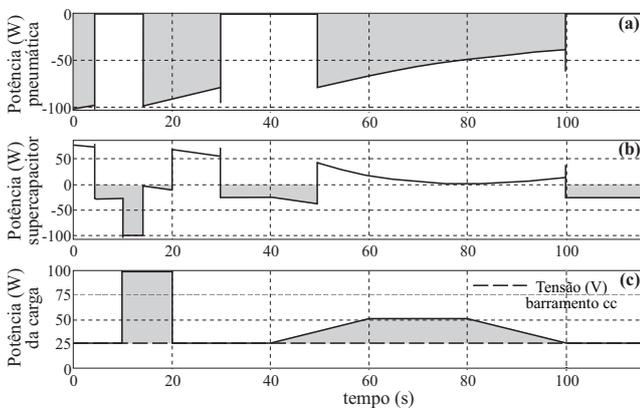


Fig. 10. Curvas de potência do sistema CASCES [8].

A Figura 10(a) mostra a curva de potência proveniente do ar comprimido, convertida e entregue ao sistema. As regiões sombreadas desta figura correspondem aos momentos em que o conjunto de conversão pneumático/elétrico está suprindo a carga e carregando os supercapacitores. Neste modo de trabalho, a tensão do banco de supercapacitores é monitorada e o grupo pneumático/elétrico de conversão de energia é acionado quando tal tensão atinge o valor mínimo estabelecido, permanecendo ligado até que o valor máximo de tensão seja alcançado ou até que o recurso de ar comprimido se esgote. Na Figura 10(b) as partes sombreadas correspondem aos momentos em que os supercapacitores fornecem energia à carga. Na Figura 10(c) há duas regiões de variação da potência, sendo que no início destas variações o capacitor transfere toda a energia armazenada à carga e, posteriormente, o conjunto pneumático/elétrico é ativado para garantir que ocorra o processo de recarga dos supercapacitores.

Tal como sugere a Figura 10, o apoio dos supercapacitores ao sistema de armazenamento pneumático pode ser bastante interessante, principalmente tratando-se das variações da potência da carga. No entanto, o sistema de conversão pneumático/elétrico de pequeno porte continua com as mesmas restrições de eficiência do motor pneumático. Para elevar a eficiência geral do sistema SS-CAES são sugeridos a seguir, combinações hidropneumáticas para substituir a parte puramente pneumática [8].

F. Sistema BOP-A

O sistema BOP-A (do inglês, *Battery with Oil-Hydraulics and Pneumatics type A*) é uma forma de armazenamento de energia que combina o uso de dispositivos hidráulicos a óleo e pneumáticos, sendo que os processos de compressão e expansão do gás ocorrem em ciclo fechado, ou seja, com gás lacrado sem haver admissão e exaustão de ar do ambiente [8], [16].

A concepção deste sistema se deve principalmente à elevada eficiência dos motores e bombas de óleo. Essas máquinas hidráulicas funcionam com níveis de pressão elevados, da ordem de 10 a 35 Mpa, e podem apresentar eficiência acima de 90% nesses níveis de pressão [8], [16].

O armazenamento de energia do sistema BOP-A utiliza reservatórios de pressão industrialmente conhecidos como acumuladores hidráulicos. Estes acumuladores possuem dois compartimentos, um para o gás e outro para o líquido, separados por uma membrana ou por um êmbolo livre. Ao bombear óleo para dentro do acumulador, inicia-se a elevação da pressão do compartimento do óleo e, assim, o deslocamento da membrana/êmbolo no sentido de reduzir o volume do compartimento do gás, comprimindo-o. Neste tipo de aplicação costuma-se utilizar um gás inerte como o nitrogênio, pois a combinação de oxigênio e óleo sob pressão pode originar uma mistura explosiva. A Figura 11 apresenta os acumuladores e demais componentes básicos do sistema de armazenamento BOP-A, inclusive um banco de supercapacitores utilizado como reservatório auxiliar com o mesmo objetivo descrito nos sistemas CASCES.

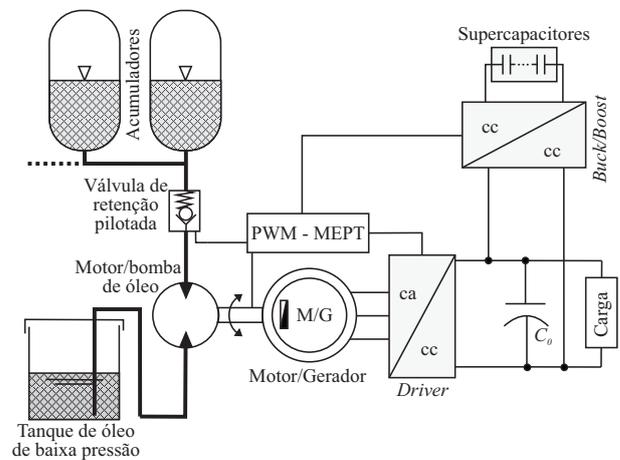


Fig. 11. Sistema híbrido BOP-A com supercapacitores [8].

Os componentes do sistema BOP-A são bidirecionais, desta forma, quando a máquina girante (motor/gerador) opera como motor, aciona a máquina hidráulica, que atua como uma bomba. A bomba hidráulica é responsável por transferir o óleo de um tanque de baixa pressão para dentro dos acumuladores, comprimindo o gás pré-carregado no acumulador. Ao final desta etapa, ocorre o fechamento da válvula de controle e o gás fica comprimido, como se fosse uma mola, armazenando energia. Quando a energia armazenada é solicitada, a válvula de controle é aberta e o gás comprimido empurra o óleo para fora dos acumuladores. Esse óleo escoar para o tanque de baixa pressão movendo a máquina hidráulica e fazendo-a funcionar como um motor

que, por sua vez, move o gerador, convertendo a energia mecânica em elétrica.

Apesar da elevada eficiência apontada para os motores hidráulicos, a eficiência global do sistema é afetada por uma fração de energia que é perdida pela dissipação e troca de calor, devido ao escoamento turbulento do fluido e pelas diversas etapas de transformação do ciclo completo de armazenamento e fornecimento da energia elétrica.

Neste sistema, a eletrônica de potência está presente nos conversores utilizados para condicionar a energia às necessidades da carga e para acionar o motor durante a etapa de armazenamento, bem como nos processos de carga e descarga do supercapacitor. Portanto, o sistema utilizará soluções com conversores bidirecionais no motor/gerador (conversores cc-ca) e no supercapacitor (conversor cc-cc).

O desenvolvimento de topologias adequadas para os níveis de potência processados, tendo em vista as estratégias de controle de cada conversor, do sistema completo e de extração da máxima potência são desafios nesta área. Soluções iniciais podem ser baseadas nas já empregadas em sistemas que utilizam baterias, contudo, a dinâmica, a modelagem e a existência de um ponto de máxima potência na operação do sistema, exigirão soluções específicas para o caso.

G. Sistema BOP-B

O sistema BOP-B (do inglês, *Battery with Oil-Hydraulics and Pneumatics type B*) também é uma forma de armazenamento de energia que combina o uso de dispositivos hidráulicos a óleo e pneumáticos, sendo que os processos de compressão e expansão do gás ocorrem em ciclo aberto, ou seja, o ar comprimido é admitido do ambiente durante a etapa de compressão e liberado à atmosfera na expansão [8], [16].

Os processos de compressão e expansão do ar atmosférico realizados neste sistema estão baseados em uma tecnologia conhecida como pistão de êmbolo líquido [17]. Trata-se de um arranjo de transformação hidráulica/pneumática direta, que utiliza no processo de compressão uma coluna de líquido para comprimir o gás presente em uma determinada câmara de volume fixo. O fluido líquido, tipicamente água ou óleo, é impulsionado por meio de uma bomba hidráulica, sendo que a entrada e a saída de ar da câmara são controladas por válvulas pneumáticas [17], [18].

A Figura 12 representa o esquema de um sistema de armazenamento hidropneumático de ciclo aberto quase isotérmico com apoio de supercapacitores. Durante o processo de expansão, um volume de ar comprimido específico flui para o compartimento (1D) da câmara da direita dosado pelo comando de abertura da válvula (D). A válvula (4) é manobrada para a posição (a) e então o fluido do êmbolo líquido (2D) escoam pelo trocador de calor (3D) passando pelo motor hidráulico e pela válvula hidráulica (4) na posição (a). Com isso, o êmbolo líquido (2E) preenche a câmara da esquerda descarregando o ar do compartimento (1E) para atmosfera pelo silenciador (7) por meio da abertura da válvula (B). Após a conclusão do curso do pistão líquido (2E), a válvula (4) inverte a direção do fluxo comutando para posição (b), sem alterar o sentido de rotação do motor hidráulico (5). Para isso, as válvulas (B e D) devem estar

fechadas e as válvulas (A e C) devem ser abertas. Os efeitos das alterações de torque durante os ciclos de trabalho podem ser suavizados por meio do armazenamento auxiliar com supercapacitores já descrito [8], [16].

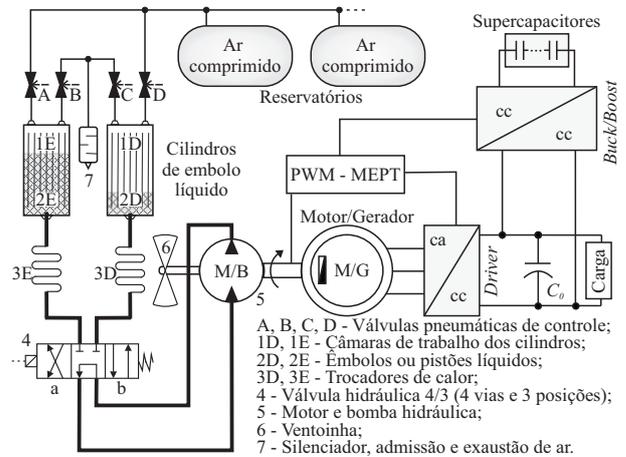


Fig. 12. Sistema híbrido BOP-B com supercapacitores [8].

O sistema BOP-B também funciona como compressor quando o fluido é movido através da máquina hidráulica trabalhando como bomba, sendo acionada pela máquina elétrica, que opera na função de motor quando alimentada com a energia proveniente da rede. Desta forma, e com a sequência correta de comutação das válvulas, o ar dos compartimentos 1D e 1E pode ser comprimido e enviado aos reservatórios.

Em termos da eletrônica de potência, esta solução diferencia-se da anterior pela resposta dinâmica do sistema de armazenamento e de rastreamento do ponto de máxima potência. Assim, a escolha dos conversores e do sistema de controle precisa considerar essas novas características.

Em [18], [19] pode-se observar a dimensão do campo de aplicação destas tecnologias junto às fontes renováveis, onde um sistema de armazenamento de energia hidropneumático de ciclo aberto, semelhante aos sistemas BOP descritos, é proposto para aplicação em turbinas eólicas, utilizando a arquitetura das câmaras de compressão e de expansão de pistão de êmbolo líquido, conforme Figura 13.

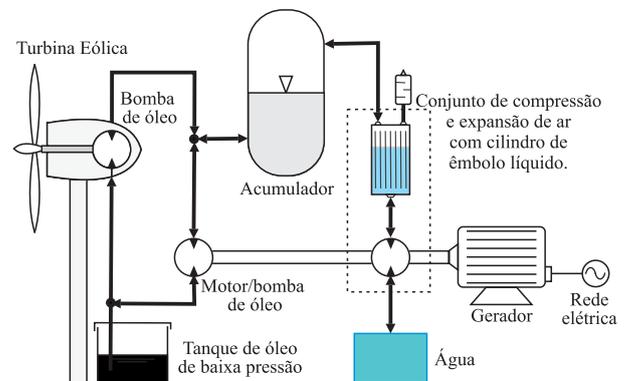


Fig. 13. Sistema de armazenamento para turbina eólica [18].

A Tabela II [16] apresenta uma comparação de custo estimado entre os sistemas de armazenamento do tipo BOP e baterias em uma aplicação com módulos fotovoltaicos que

alimentam uma residência. O estudo de caso considerou uma potência média de 4 kW em um período de 7 h no decorrer do dia, ou seja, 28 kWh. Para a descarga do sistema foi considerado, no período noturno, um intervalo de 5 h (entre 18 h e 23 h), com potência média de 4 kW, ou seja, fornecimento de 20 kWh. O quadro econômico considerou ainda uma necessidade de autonomia de 3 dias, portanto, os sistemas de armazenamento comparados são dimensionados para fornecimento de 60 kWh.

A Tabela II mostra que o custo de armazenamento mais elevado é o do sistema BOP-A. Isso ocorre principalmente devido sua baixa densidade de energia, da ordem de 2,5 Wh/kg. De modo geral, os custos estimados das aplicações do tipo BOP são superiores aos das baterias de chumbo-ácido, porém, como foi estimada uma vida útil muito maior para os sistemas BOP, o custo da energia (kWh) acaba sendo inferior ao do uso de baterias [16].

TABELA II
Comparativo de Custo Estimado para 60 kWh [16]

60 kWh		Bateria PbO ₂	BOP-A	BOP-B
Tecnologia	Armazenamento	€ 18.000	€ 60.000	€ 4.500
	Conversão	/	€ 15.000	€ 18.000
	Total	€ 18.000	€ 75.000	€ 22.500
Operação e manutenção		(30%) € 5.500	(20%) € 15.000	(20%) € 4.500
Custo total		€ 23.500	€ 90.000	€ 27.000
Ciclo de vida		3.500 ou 210.000kWh	15.000 ou 900.000kWh	15.000 ou 900.000kWh
Custo da energia/kWh		€ 0.11 / kWh	€ 0.1 / kWh	€ 0.03 / kWh

Os estudos apresentados em [20] também sugerem um parecer favorável aos sistemas de armazenamento de ar em pequena escala combinados ao uso de módulos fotovoltaicos, com um retorno do valor investido num prazo de 5 a 7 anos para aplicações residenciais e em hotéis, apontando ainda que cerca de 40% do custo do sistema está relacionado ao valor dos reservatórios.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na bibliografia abordada e no conteúdo apresentado, é possível perceber a aplicabilidade dos sistemas de armazenamento a ar comprimido, principalmente em conjunto com fontes de energia renováveis. Desta forma, devem ser estimuladas mais pesquisas neste campo, tal como o estudo do conjunto híbrido da Figura 14 [8], baseado no sistema BOP-B, com arquitetura hidropneumática de ciclo aberto e supercapacitores, sendo este conectado à rede elétrica e alimentado por módulos fotovoltaicos.

Uma das principais vantagens previstas para o sistema da Figura 14 consiste em usufruir do bom rendimento do motor hidráulico dispondo de maior densidade de energia, quando comparado ao protótipo do sistema BOP-A, desenvolvido na Escola Politécnica Federal de Lausanne (EPFL da Suíça) [8]. Ressalta-se que o sistema BOP-A necessita de um tanque para armazenar óleo em baixa pressão, e seu volume está diretamente relacionado aos tanques acumuladores de

energia, pois cerca de 50% do volume dos acumuladores hidráulicos são ocupados por óleo na etapa de compressão.

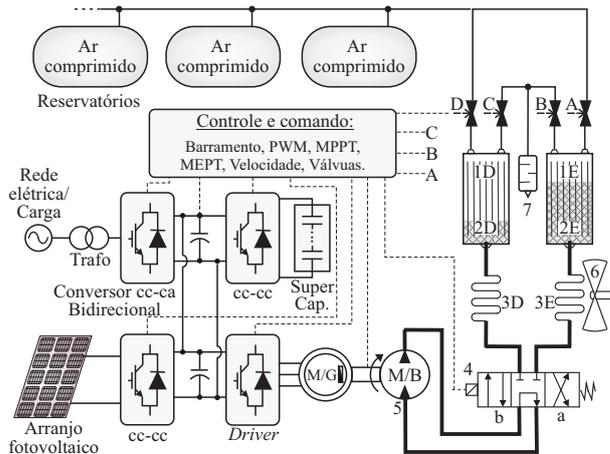


Fig. 14. Sistema de armazenamento de ar de ciclo aberto com interface hidráulica e supercapacitores, adaptado de [8].

O arranjo da Figura 14 necessita de uma interface mecânica para encadeamento dos fluidos óleo e ar, cujo ciclo de operação é idêntico ao sistema BOP-B, anteriormente descrito. As transformações eletromecânicas são bidirecionais, ou seja, realizadas por uma máquina girante que possa operar como motor e gerador. Essa bidirecionalidade também é exigida do conversor aplicado ao motor/gerador, do conversor cc-cc dedicado ao banco de supercapacitores e do conversor cc-ca bidirecional disposto entre o barramento cc e a rede elétrica. No modo inversor, o conversor possibilita o fornecimento de energia elétrica proveniente do arranjo fotovoltaico e recuperada do sistema armazenamento (supercapacitores e pneumático de interface hidráulica) à rede. No modo retificador, o conversor pode ser utilizado para recarregar o sistema de armazenamento, em horários de baixa demanda ou de falta de geração fotovoltaica (períodos noturnos).

A definição das estruturas dos conversores dependerá da potência a ser processada. A estratégia de controle deve otimizar o uso da potência armazenada (MPPT), considerar a dinâmica do sistema e controlar todos os modos de operação (sentido do fluxo de potência), tais como: geração fotovoltaica, carga e descarga do supercapacitor, carga e descarga do sistema de ar comprimido e injeção de potência na rede elétrica. Além disto, são necessários estudos da eficiência global do sistema, tendo em vista restrições como custo de operação, eficiência, operação ininterrupta, etc.

IV. CONCLUSÕES

As estratégias de armazenamento de energia sob a forma de ar comprimido têm avançado tanto para os sistemas de grande porte quanto para os sistemas de pequena e média escala. Nos sistemas CAES de grande porte são apresentados avanços nos níveis de densidade de energia e ganhos de eficiência de até 30%, graças aos mecanismos e etapas intermediárias de troca e reaproveitamento de calor dos sistemas AA-CAES e I-CAES. A evolução destes sistemas também é bem vista nos aspectos ambientais devido à minimização da queima de combustível durante o processo.

Os estudos dos sistemas CAES de pequena escala revelam que as microturbinas pneumáticas operam tipicamente a baixos níveis de pressão e possuem baixa eficiência, fato que afeta diretamente a eficiência das estruturas puramente pneumáticas. Como alternativa para corrigir essa deficiência, são abordados sistemas mistos (óleo/ar) que utilizam motores/bombas hidráulicas com melhor eficiência e níveis de pressão mais elevados. Esta combinação exige uma interface entre os fluidos, óleo e ar, que torna o sistema menos simplificado que o puramente pneumático.

A eletrônica de potência está presente nas diversas possibilidades de aplicação dos sistemas de pequena escala, funcionando como um elo entre o sistema de armazenamento e a rede elétrica, na presença de cargas isoladas e de fontes renováveis. Conversores bidirecionais, modelagem e estratégias de controle com vários níveis serão necessários no uso de CAES em pequena escala. O aprimoramento desses sistemas requer e estimula o desenvolvimento dos diversos elementos que o compõem, como forma de otimizar a eficiência de cada um deles e elevar a eficiência global.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq pelas bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, J. M. Carrasco, "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, nº 12, pp. 3881-3895, Dezembro 2010.
- [2] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, D. Morton, "Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid", in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1627-1632, 2008.
- [3] C. Xiaoguang, Z. Chenghui, K. Li, J. Yefei, "Dynamic modeling and efficiency analysis of the scroll expander generator system for compressed air energy storage", in *Proc. of ICEMS - International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1-5, 2011.
- [4] D. E. Perkins, "Compressed Air Energy Storage (CAES)", *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, vol. 3, pp. 214-218, Londres, 2007.
- [5] B. Cleary, A. Duffy, A. O'Connor, M. Conlon, V. Fthenakis, "Assessing the Economic Benefits of Compressed Air Energy Storage for Mitigating Wind Curtailment", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, nº 3, pp. 1021-1028, Julho 2015.
- [6] A. Khamis, Z. M. Badarudin, A. Ahmad, A. A. Rahman, M. H. Hairi, "Overview of mini scale compressed air energy storage system", in *Proc. of PEOCO - Power Engineering and Optimization Conference*, pp. 458-462, 2010.
- [7] A. Rogers, A. Henderson, X. Wang, M. Negnevitsky, "Compressed air energy storage: Thermodynamic and economic review", in *Proc. of IEEE PES - Power and Energy Society General Meeting Conference & Exposition*, pp. 1-5, 2014.
- [8] S. Lemofouet, A. Rufer, "A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking (MEPT)", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, nº 4, pp.1105-1115, Junho 2006.
- [9] V. Kokaew, S. M. Sharkh, M. Torbati, "Maximum Power Point Tracking of a Small Scale Compressed Air Energy Storage System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, nº 2, pp. 985-994, Setembro 2015.
- [10] F. Fahy, *Air: The Excellent Canopy*, Woodhead Publishing, 1ª Edição, Cambridge, 2010.
- [11] H. Cohen, G. Rogers, H. Saravanamuttoo, *Gas Turbine Theory*, Longman Scientific & Technical, 3ª Edição, Harlow, 1987.
- [12] Y.-M. Kim, J.-H. Lee, S.-J. Kim, D. Favrat, "Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses," *Entropy*, vol. 14, pp. 1501-1521, Agosto 2012.
- [13] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, C. Krupke, "Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 603-611, Dezembro 2014.
- [14] J. J. Proczka, K. Muralidharan, D. Villela, J. H. Simmons, G. Frantziskonis, "Guidelines for the pressure and efficient sizing of pressure vessels for compressed air energy storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 597-605, Janeiro 2013.
- [15] D. Villela, V. V. Kasinathan, S. De Valle, M. Alvarez, G. Frantziskonis, P. Deymier, K. Muralidharan, "Compressed-air energy storage systems for stand-alone off-grid photovoltaic modules", in *Proc. of PVSC - Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 962-967, 2010.
- [16] S. Lemofouet, A. Rufer, "Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Super Capacitors with Maximum Efficiency Point Tracking", in *Proc. of IEEE International Power Electronics and Applications Conference*, pp.10, 2005.
- [17] J. D. Van de Ven, P. Y. Li, "Liquid Piston Gas Compression," *Applied Energy*, vol. 86, nº 10, pp. 2183-2191, Outubro 2009.
- [18] M. Saadat, P. Y. Li, T. W. Simon, "Optimal Trajectories for a Liquid Piston Compressor/Expander in a Compressed Air Energy Storage System with Consideration of Heat Transfer and Friction", in *Proc. of ACC - American Control Conference*, pp. 1800-1805, 2012.
- [19] M. Saadat, P. Y. Li, "Modeling and Control of an Open Accumulator Compressed Air Energy Storage (CAES) System for Wind Turbines", *Applied Energy*, vol. 137, pp. 603-616, Janeiro 2015.
- [20] A. Tallini, A. Vallati, L. Cedola, "Applications of micro-CAES systems: energy and economic analysis" *Energy Procedia*, vol. 82, pp.797-804, Dezembro 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcos Antônio Salvador, nascido em Blumenau, em junho de 1985 é Engenheiro Eletricista (2012), e Mestre (2014) pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB). Atualmente cursa doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina (USFC) no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Atuou na indústria eletroeletrônica de 1999 a 2012 e como professor no ensino superior de 2014 a 2015. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, processamento de energia elétrica, armazenamento de energia, energias renováveis, processamento digital de sinais. Marcos Antônio Salvador é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP).

Telles Brunelli Lazzarin, nascido em Criciúma, Santa Catarina, Brasil, em 1979. Recebeu o grau de Engenheiro eletricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, em 2004, 2006 e 2010, respectivamente. Atualmente é professor no Departamento

de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC e pesquisador no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). A área de concentração do prof. Telles é em eletrônica de potência, com ênfase em energias renováveis (principalmente eólica de pequeno porte), inversores de tensão e conversores estáticos a capacitor chaveado. Prof. Telles é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e da IEEE *Society*.

Roberto Francisco Coelho nasceu em Florianópolis, em agosto de 1982. Recebeu o título de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, em 2006, 2008 e 2013, respectivamente. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da mesma instituição, onde desenvolve trabalhos relacionados ao processamento de energia proveniente de fontes renováveis e ao controle e estabilidade de microrredes. Prof. Roberto é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e da IEEE *Society*.