



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE PLANTAS DE ENERGIA RENOVÁVEL: UMA REVISÃO

Vitor Torres Alvarenga, vatorres01@gmail.com¹

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

Bruno Ude Todde Fonseca Valadares, bruno_todde@hotmail.com¹

Matheus Pereira Porto, matheusporto@ufmg.br¹

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

Resumo: O presente trabalho visa discutir conceitos básicos referentes à geração e armazenamento de energias renováveis, tal como as atuais estratégias de gerenciamento de plantas energéticas, levando em consideração sua escala de geração, dispersão espacial, fonte primária de energia e tipo de armazenamento – quando presente. Inicialmente é apresentado um resumo de conceitos básicos de energia, tal como algumas características das principais fontes renováveis.

Palavras-chave: energia solar, energia eólica, armazenamento de energia

1. INTRODUÇÃO

A implementação de fontes renováveis de energia na matriz elétrica existente é um tema bastante relevante. O aumento dos preços de combustíveis fósseis, a preocupação com emissões de gases estufa e o aumento da demanda global de energia tem sido grandes motivadores para a busca de soluções renováveis.

As energias eólica e solar tem visto grandes avanços tecnológicos nas últimas décadas, levando a uma redução dos preços e consequente aumento de competitividade (U.S. Energy Information Administration, 2015). Várias agências governamentais tem feito esforços a fim de aumentar a participação dessas fontes em suas matrizes energéticas, algumas com relevante sucesso – e.g. geração eólica na Dinamarca e Irlanda e geração solar na Califórnia (Conolly *et al.*, 2012; Foley *et al.*, 2015; California Energy Commission, 2015)

Entretanto, o crescimento da participação destas fontes no mercado energético mundial enfrenta um grande obstáculo – variabilidade. Tanto a energia solar quanto a eólica são formas voláteis de energia, uma vez que a disponibilidade de vento e irradiação solar variam de forma significativa no tempo, e em escalas diferentes – intra-minuto, intra-hora, diária, sazonal e interanual. A existência de variabilidade significa que a geração pode não se adequar à curva de demanda, criando um grande desafio durante a fase conceitual de uma nova planta de energia renovável.

A fim de mitigar esse problema, algumas estratégias podem ser adotadas, dentre elas:

- O uso combinado de mais de uma fonte – e.g. solar fotovoltaica e eólica;
- O uso de uma fonte de base estável – um gerador a diesel;
- O uso de um ou mais sistemas de armazenamento de energia (ESS – *Energy Storage System*).

Embora muito tenha sido feito a fim de melhorar as tecnologias de geração e armazenamento de energia isoladamente, pouco enfoque foi dado à análise de estratégias de integração entre diferentes fontes e diferentes sistemas de armazenamento. A singularidade de cada cenário – características geográficas, disponibilidade de recursos, tamanho e perfil da demanda, integração à rede de distribuição – torna esse um problema ainda mais complexo.

O objetivo principal deste trabalho é disponibilizar ao leitor informações básicas a respeito de cada sistema de geração e armazenamento, além de características relevantes à sua integração eficiente, de forma a minimizar as desvantagens em diferentes cenários – micro, média e grande escala.

2. CONCEITOS BÁSICOS DE ENERGIA

2.1. Energia Renovável

Segundo o IEA (2015), energia renovável é toda aquela energia produzida a partir de uma fonte que pode ser recuperada num curto espaço de tempo e que vem diretamente do sol (térmica, fotoelétrica ou fotoquímica), indiretamente do sol (hidráulica, eólica e fotossintética) ou de outros processos naturais do planeta (geotérmica, energia das marés).

2.2. Disponibilidade

A disponibilidade de uma fonte de energia específica é definida pela existência de sua fonte básica – e.g. irradiação solar ou vento – numa certa região ao longo do ano. É o principal fator na definição da viabilidade de uma planta de energia renovável.

2.3. Variabilidade

A variabilidade representa a variação temporal da disponibilidade do recurso numa certa escala de tempo. Uma estimativa precisa é fundamental durante a fase conceitual do projeto, a fim de dimensionar de forma apropriada tanto o sistema de geração quanto o de armazenamento.

De acordo com Manwell *et al.* (2009), a variabilidade pode ser classificada em diferentes categorias:

- Intra-minute;
- Intra-hora;
- Diária
- Sazonal
- Anual

A variabilidade sazonal e a diária são mais fáceis de prever baseadas no histórico de dados meteorológicos. A variabilidade intra-minuto posa um grande desafio no que diz respeito ao gerenciamento da planta, devido à dificuldade de prevê-la corretamente e também devido à rápida resposta necessária a fim de manter a qualidade do sinal gerado.

2.4. Escala de geração

Neste texto, será usada a seguinte nomenclatura para denominar as diferentes escalas de geração:

- Micro: inferior a 100kW;
- Pequena: Entre 100kW e 10MW;
- Média: Entre 10MW e 100MW;
- Grande: Acima de 100MW;

A definição precisa de cada categoria varia entre autores. Os limites aqui usados estão baseados no trabalho de Manwell *et al.* (2009).

3. FONTES DE ENERGIA

3.1 Energia eólica

A geração de energia eólica consiste na conversão de energia cinética –velocidade e pressão– do vento em energia cinética de rotação das pás de uma turbina, que por sua vez pode ser acoplada a um gerador elétrico a fim de converter a energia cinética em energia elétrica.

A geração é intermitente e possui variabilidade considerável em função da disponibilidade de vento na região, sendo mais expressivas as variações diária (inter-hora) e sazonal (intra-anual).

Quanto à escala de geração, é possível encontrar desde pequenas turbinas com potência nominal em torno de 500W até grandes turbinas com potência superior a 8MW (VESTAS, 2015). A planta de Gansu, na China, é a maior do mundo, com capacidade instalada de 5160 MW até o ano de 2010, e capacidade prevista de 12710 MW até o final de 2015 (YUNNA; RUHANG, 2013)

A tecnologia para a geração de energia elétrica por conversão de energia eólica já é bastante consolidada – atualmente, mais de 3% da geração mundial, sendo prevista uma participação de até 19% até 2030 de acordo com o GWEC (2014) – *Global Wind Energy Council* – e competitiva, com LCOE (*levelized cost of energy*) inferior ao de fontes fósseis em mercados com alta penetração de fontes renováveis (EIA, 2015).

Este trabalho não tratará da natureza da conversão de energia, dos diferentes tipos de turbinas ou de aspectos tecnológicos relativos às mesmas. Uma abordagem extensa e aprofundada por ser encontrada nos trabalhos de Manwell (2009) e Ackermann e Söder (2000).

3.2 Solar fotovoltaica (PV)

A geração de energia solar fotovoltaica (PV) é feita por meio da conversão de energia radiativa – i.e, luz – em energia elétrica, por meio do efeito fotoelétrico. Este fenômeno consiste na excitação de elétrons em certos materiais semicondutores quando atingidos por fótons, resultando na liberação destes elétrons e, conseqüentemente, na geração de uma corrente elétrica.

Um painel fotovoltaico consiste em várias células fotovoltaicas agrupadas, a fim de aumentar a tensão total de saída. Normalmente é acoplado ao painel um módulo inversor, responsável por adequar a energia gerada à característica da rede – corrente contínua ou alternada, tensão e corrente adequadas, etc. Mais informações a respeito dos diferentes tipos de coletores, células e suas características podem ser encontradas nos trabalhos de Duffie e Beckman (2013) e Götzberger e Hoffmann (2005).

A variabilidade de recursos energéticos é um grande problema para a geração de energia solar PV – especialmente intra-minuto. Devido à baixa inércia do sistema e a alta sensibilidade a variações na irradiação, os sistemas PV não devem ser usados de maneira isolada sem a presença de um sistema de armazenamento de baixa inércia ou um baseline – a fim de compensar a rápida queda na geração.

Uma maneira de atenuar o efeito da variabilidade é aumentar a distribuição espacial da planta de geração, especialmente para plantas em grandes escalas, ajudando assim a estabilizar a produção, especialmente em dias com maior presença de nuvens.

O custo da geração solar PV ainda é alto quando comparado a outras tecnologias e sua viabilidade econômica bastante limitada. A dificuldade em ajustar a geração à demanda, a baixa eficiência do processo – em torno de 15% para coletores comerciais – e a necessidade de sistemas complementares são alguns dos principais fatores que limitam a aplicabilidade da geração PV. Com o avanço tecnológico dos sistemas de geração, forecasting e armazenamento de energia, será cada vez mais viável a penetração desta fonte de energia no mercado. Uma análise compreensiva dos entraves e perspectivas é apresentada por Singh (2013).

3.3 Solar térmica

A geração de energia solar térmica consiste na conversão de energia radiativa emitida pelo sol em energia térmica. A colisão dos fótons vindos do sol com os átomos do material absorvedor resulta na agitação das moléculas, o que, em escala macroscópica, significa um aumento na temperatura da estrutura. Essa alta temperatura pode ser usada tanto na forma de potencial térmico para sistemas de aquecimento – e.g. aquecimento residencial de água – quanto como fonte de calor para um ciclo termodinâmico a fim de gerar trabalho (ou eletricidade) – e.g. um gerador elétrico funcionando a partir do ciclo de Rankine.

Aspectos básicos da tecnologia solar, princípio de funcionamento e projetos está disponível no trabalho de Duffie e Beckman (2013), e uma extensa revisão dos diferentes tipos de coletores pode ser encontrada no trabalho de Kalogirou (2004). As principais limitações da geração de eletricidade por meio da energia solar térmica são discutidas mais a fundo no trabalho de Trainer (2014).

4. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO

4.1 Térmico – *Thermal Energy Storage (TES)*

Os sistemas do tipo TES visam o armazenamento de energia térmica – calor latente ou sensível – em reservatórios. Esse calor (ou “frio”) armazenado pode então ser recuperado posteriormente, tanto para suprir uma demanda de aquecimento/refrigeração quanto para atuar como fonte quente num ciclo termodinâmico a fim de gerar eletricidade.

O material usado como meio de armazenamento varia em função da temperatura de operação do sistema. A utilização de concreto para armazenamento de calor sensível é muito comum devido a sua simplicidade, baixo custo e alto calor específico (LAING et al., 2006). Também é comum a utilização de materiais em sua temperatura de mudança de fase (PCM – *Phase Change Material*) com duas finalidades: aumentar a densidade energética de armazenamento e evitar grandes gradientes de temperatura e assim minimizar as perdas térmicas para o ambiente, aumento assim a eficiência do sistema (SHARMA et al., 2009). Também muito usados são materiais líquidos como sais fundidos, devido à sua alta temperatura de operação, alto calor específico e possibilidade de trabalho com tanques estratificados, em função do gradiente de peso específico conseqüente do gradiente de temperatura (GABBRIELLI; ZAMPARELLI, 2009).

Esse tipo de armazenamento envolve o uso de tanques ou reservatórios isolados termicamente, inviabilizando projetos muito pequenos devido ao custo inicial para construção destes.

A eficiência do armazenamento gira em torno de 50% (REZAIE et al., 2015). Entretanto, vale lembrar que a energia armazenada é térmica, e sua conversão para energia elétrica tem eficiência muito menor.

É evidente a sinergia entre sistemas TES e sistemas de geração solar térmica, uma vez que estes trabalham com fluidos aquecidos a fim de gerar eletricidade por meio de um ciclo termodinâmico. A alta capacidade de armazenamento do TES permite manter a planta em operação em períodos de menor insolação. Da mesma forma, em períodos de alta insolação e baixa demanda de energia, o excesso de calor gerado pode ser armazenado. Também há

espaço para uso de TES combinado com outros sistemas de armazenamento que envolvem rejeição de calor ou manutenção de temperatura específicas, como CAES e CES.

4.2 Ar comprimido – *Compressed Air Energy Storage (CAES)*

O CAES consiste na alimentação de um compressor de ar pelo excesso de energia gerado na planta, que armazena ar a alta pressão em reservatórios – normalmente cavernas subterrâneas – que pode ser usado posteriormente para gerar energia elétrica numa turbina convencional quando necessário.

O ar comprimido pode ser utilizado tanto em turbinas a ar utilizando combustíveis tradicionais – e.g gás natural, conforme visto em Raju e Khaitan (2012) – quanto isoladamente, sendo necessário neste segundo caso o aquecimento do ar a temperatura mais altas – com o uso de energia solar térmica, por exemplo. As principais plantas em operação são de grande escala (RAJU; KHAITAN, 2012), mas a tecnologia também é viável em pequena escala para sistemas isolados (JANNELLI et al. 2014)

Possui como principais vantagens a grande capacidade de armazenamento, o baixo custo de capital e de manutenção e o tempo de vida útil elevado (CHEN et al., 2007).

Uma vez que o ar sofre um aumento de temperatura ao ser comprimido e a presença de um gradiente térmico elevado no armazenamento pode levar a grandes perdas térmicas, é comum retirar calor do ar e armazenar esse calor num sistema TES acoplado, para ser recuperado posteriormente quando da expansão do ar. Esse processo é também conhecido como A-CAES – CAES adiabático, conforme descrito por Grazzinni e Milazzo (2008).

4.3 Ar líquido – *Cryogenic Energy Storage (CES)*

O CES consiste no armazenamento de ar liquefeito a baixas temperaturas. Alternativamente, podem ser usados outros gases liquefeitos – e.g nitrogênio, hidrogênio, propano, gás natural. A liquefação é feita quando a geração é superior a demanda. Quando a demanda ultrapassa a geração, o ar dos reservatórios é liberado, aquecido num trocador de calor e expandido em uma turbina – ciclo Brayton, Rankine ou aberto – gerando assim eletricidade.

A eficiência do processo de liquefação é normalmente baixa – entre 10% e 50% dependendo do tamanho da planta – e as perdas térmicas durante o processo de expansão também são consideráveis (LI et al., 2010).

Possui considerável densidade energética a baixa pressão, e a utilização de tanques de armazenamento é viável devido à diminuição drástica do volume específico do fluido criogênico. O tempo de resposta é inferior ao de outros sistemas, sendo mais adequado para geração

Possíveis aplicações do CES e sua integração com sistemas solares térmicos e outros tipos de armazenamento são discutidas no trabalho de PORTO et al. (2013)

4.4 Bombeamento de água – *Pumped Hydro Energy Storage (PHES)*

O PHES consiste no bombeamento de água de um reservatório inferior para um reservatório mais elevado. A energia é recuperada fazendo com que a água bombeada passe por turbinas hidráulicas ao voltar para o reservatório inferior, gerando assim eletricidade. Alternativamente, existem modelos de PHES subterrâneos, ainda em fase conceitual de desenvolvimento (OLSEN et al., 2015). Tal como nos outros sistemas já discutidos, o armazenamento se dá no período em que a geração ultrapassa a demanda e a recuperação se dá no período de maior demanda – ou seja, maior custo de energia.

A eficiência de armazenamento de sistemas PHES é tipicamente entre 70% e 80% (SCHÖNUNG; HASSENZAH, 2003). Possuem resposta rápida e pequeno tempo de inicialização, sendo adequados para compensar mudanças drásticas na geração e estabilizar a qualidade do sinal na rede (HINO; LEJEUNE, 2012).

É a solução mais eficiente financeiramente e também a mais utilizada para armazenamento em larga escala, mas sua aplicação depende da disponibilidade de relevo próprio para construção dos reservatórios, além da presença de água. A baixa densidade de energia torna necessário o uso de grandes volumes de água e/ou grandes quedas a fim de aumentar a capacidade de armazenamento.

É possível a utilização do mesmo equipamento para o bombeamento e a recuperação da energia (REHMAN et al., 2015). Outra possibilidade é a utilização de uma bomba separada para o recalque, ideal em situações onde já existe um sistema de geração hidrelétrico.

4.5 Eletroquímico – *Electrochemical Energy Storage (ECES)*

O armazenamento eletroquímico (ECES) é uma das formas mais comuns de armazenamento de energia, devido à sua versatilidade, facilidade movimentação e conversão e alta densidade de potência (VAN DEN BOSSCHE et al., 2006). Sua utilização é ampla em sistemas de micro, pequena e média escala com a finalidade de satisfazer a demanda quando esta ultrapassa a geração, ou quando a geração é instável (KOLLER et al., 2015).

O alto custo e curto tempo de vida das baterias continua sendo o maior entrave à aplicação da tecnologia. Esforços tem sido feitos para diminuir o custo das baterias e tornar seu descarte menos prejudicial ao meio ambiente, reduzindo o uso de metais pesados (SOLOVEICHNIK, 2014).

Sistemas ECES possuem clara sinergia com geração PV, especialmente em micro e pequena escala. Ambos trabalham com corrente contínua, não sendo necessária a utilização de inversores entre os equipamentos. Além disso, a qualidade de fornecimento, velocidade de resposta e capacidade energética do ECES são capazes de mitigar os problemas inerentes à geração PV.

Uma extensa revisão dos diferentes tipos de bateria existentes e suas características e aplicações pode ser encontrada nos trabalhos de Divya e Ostergaard (2009) e Chen et al. (2009).

4.6 Volante de inércia – *Flywheel Energy Storage (FES)*

Sistemas FES têm como princípio de funcionamento a inércia de uma massa rotativa, que pode ser desacelerada para acionar um gerador elétrico. Seu uso tem como função mais comum compensar pequenas variações na geração, melhorando a qualidade da energia gerada (CHEN et al., 2009). Outra possibilidade é a utilização em sistemas automotivos, a fim de auxiliar o funcionamento da bateria (DHAND; PULLEN, 2015).

Suas principais vantagens são o baixo custo, alta eficiência de conversão e tempo de vida elevado (CIMUCA et al., 2004), além da elevada densidade de potência e baixo tempo de recarga (TER-GAZARIAN, 1994).

4.7 Hidrogênio líquido – *Liquid Hydrogen Energy Storage (LHES)*

O LHES é uma das formas de armazenamento com maior densidade energética. A síntese do hidrogênio pode ser feita por meio da eletrólise da água, com energia gerada por qualquer fonte renovável. O hidrogênio é então liquefeito e estocado em tanques, para ser queimado posteriormente em motores de combustão interna ou em turbinas. A facilidade de armazenamento e transporte torna o LHES interessante para situações onde a mobilidade e pequeno *footprint* são necessários – e.g. veículos automotores e pequenos geradores domésticos (EHTESHAMI; CHAN, 2014; PUDUKUDY et al., 2014).

Outra forma de utilização do hidrogênio gerado é com o uso de células de combustível, onde é gerada eletricidade em corrente contínua, apropriada para uso em veículos elétricos e de possível uso para geração residencial ou industrial. Becherif et al. (2015) propõe um modelo de utilização de células de combustível interligadas à rede e ao sistema de eletrólise, acoplando o LHES a um sistema de geração renovável – e.g. eólico ou solar. Um modelo semelhante, mas adaptado para sistemas isolados, é proposto por Abdin et al. (2015).

4.8 Supercondutor magnético – *Supermagnetic Conductor Energy Storage (SMES)*

O SMES armazena energia elétrica em um supercondutor resfriado a temperaturas criogênicas – menores que 40K para sistemas convencionais e até 77K para sistemas de alta temperatura. A energia pode ser recuperada acionando um pequeno circuito trifásico ligado ao sistema de geração.

Tem como características principais a alta eficiência de armazenamento (acima de 95%), a alta densidade de potência, a baixa densidade de energia e a boa qualidade do sinal gerado (KIM et al., 2011). Devido a esses aspectos, a tecnologia é promissora em sistemas de armazenamento onde há outro armazenamento de energia, sendo a função do SMES apenas responder rapidamente para melhorar a qualidade do sinal durante o período de start-up do outro sistema (ZHU et al., 2015).

Além disso, a necessidade da manutenção de temperaturas muito baixas pode ser um fator relevante no acoplamento do SMES a sistemas do tipo CES ou LHES, a fim de melhor aproveitar o investimento no sistema criogênico. O acoplamento de sistemas SMES e LHES foi analisado nos trabalhos de Hamajima et al. (2012), Sander et al. (2014) e Zhu et al. (2015).

5. ANÁLISE PARA INTEGRAÇÃO

Cada planta de energia renovável é única, pois as características geográficas e climáticas do lugar definem a disponibilidade e variabilidade dos recursos para geração de energia. Além disso, a demanda a ser suprida pela planta – tanto a potência quanto a distribuição temporal da carga – a integração no sistema de distribuição existente e a logística de transporte de materiais necessários são fatores que devem ser levados em conta quando se avalia a viabilidade de um projeto desse tipo.

Dessa forma, não existe uma fórmula exata para avaliar qual tecnologia usar e como incorporá-la: deve-se sempre avaliar o potencial das alternativas mais promissoras, tendo em vista suas características, suas vantagens e desvantagens, só então podendo dar início aos cálculos pertinentes.

Uma interessante análise dos diferentes sistemas de armazenamento aqui citados é apresentada no trabalho de Chen et al. (2009), separando-os em dois grandes grupos, conforme ilustra a Fig. 1:

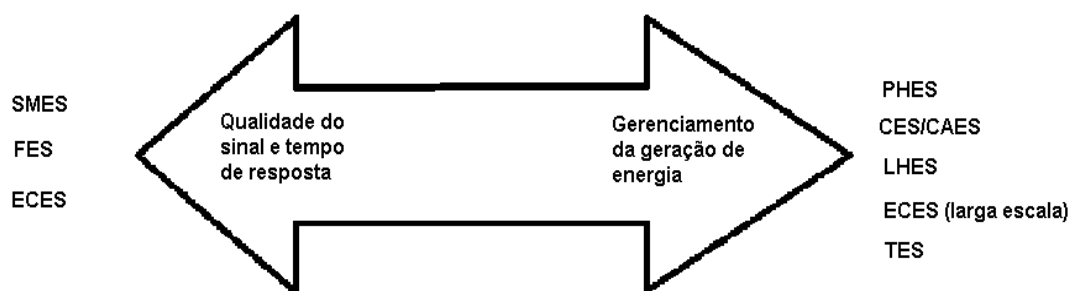


Figura 1. Classificação dos sistemas de armazenamento de acordo com sua função. Fonte: Autor.

Essa separação auxilia na escolha dos sistemas de acordo com a função que eles devem desempenhar.

As tabelas apresentadas abaixo foram baseadas nos dados encontrados na literatura pesquisada a respeito de cada uma das fontes e sistemas de armazenamento utilizados. Seu objetivo é facilitar a primeira análise de viabilidade de um projeto de uma planta de energia renovável, comparando qualitativamente cada sistema no que diz respeito a aspectos relevantes do projeto. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as fontes de energia renovável discutidas neste trabalho, enquanto a Tabela 2 apresenta uma comparação semelhante, mas agora entre os diferentes sistemas de armazenamento aqui analisados.

Tabela 1. Avaliação das fontes de energia renovável

	Influência da variabilidade*	Escala	Custo de capital	Custo de geração
Eólica	++	PP to G	+++	++++
Solar PV	+	PP to G	++	++
Solar térmica	++	M, G	+	++

*A influência da variabilidade depende também de aspectos descritos anteriormente, como distribuição espacial e existência de armazenamento ou *baseline*. A análise apresentada aqui tem como base apenas a inércia de resposta do sistema às variações da fonte – i.e. quão rápida é a queda na geração quando a disponibilidade do recurso primário cai.

Tabela 2. Avaliação dos sistemas de armazenamento de energia

	Densidade de potência	Densidade de energia	Eficiência	Velocidade de resposta	Custo (potência)	Custo (energia)
TES	++	++	++	+	++	++++
CAES	+++	++	++	++	+++	++++
CES	+++	+++	++	++	+++	+++
PHES	++	+	+++	+++	++	++++
ECES	+++	+++	+++	+++	++	++
FES	+++	+	++++	+++	++++	+
LHES	++	++++	++	++	++	+++
SMES	++++	+	++++	++++	+++	+

Legenda:

+: Ruim; ++: Razoável; +++: Bom; ++++: Excelente; PP: Microescalar ou modular; P: Pequena escala; M: Média escala; G: Grande escala

6. ANÁLISE DE PLANTAS REAIS

6.1 Huntorf - CAES (Alemanha)

Inaugurada em 1978, a planta de Huntorf foi a primeira planta de CAES no mundo, com capacidade instalada de 290MW – atualmente ampliada para 321 MW e 640MWh.

Quando a geração é superior à demanda, ar comprimido é armazenado em cavernas subterrâneas com profundidade de até 850m e capacidade total de 300 00m³. O compressor é alimentado com eletricidade proveniente de uma usina nuclear na proximidade, que opera em potência constante independentemente da demanda a fim de reduzir o custo da energia. Quando a demanda ultrapassa a geração – que é suprida pela usina nuclear citada e usinas eólicas na

região – o ar comprimido é então liberado, misturado com gás natural e queimado para expansão em dois estágios, em turbinas especiais adaptadas às altas pressões obtidas no processo. Dessa forma, é possível adaptar a geração à uma demanda transiente mesmo em períodos de poucos ventos ou de picos de consumo. A Fig. 2 abaixo mostra um esquema da estrutura, assim como valores nominais de operação.

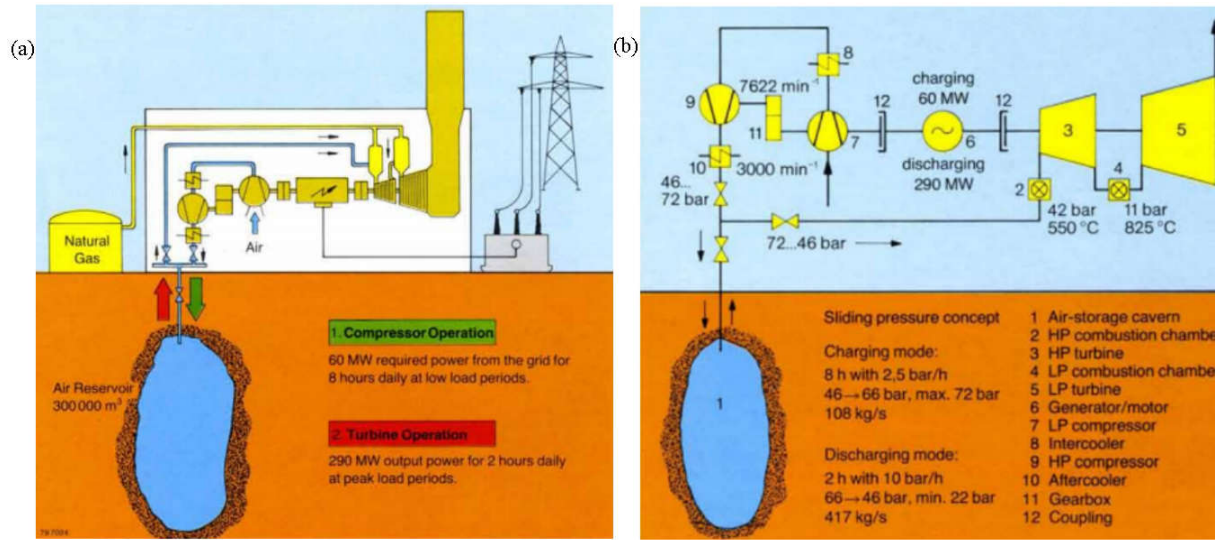


Figura 2. (a) Representação da estrutura da planta (b) Valores nominais de operação. Fonte: BBC, 1981

O sistema leva um total de 6 minutos para ser inicializado e tem eficiência termodinâmica de 42% em condições ideais de operação. Não é necessária alimentação externa de energia para o início da operação, tornando a planta autossuficiente. Um sistema TES está atualmente sendo desenvolvido para recuperar o calor desperdiçado tanto no compressor quanto na exaustão da turbina, aumentando assim a eficiência total e a economia de combustível. Mais informações podem ser encontradas na literatura revisada, particularmente nos trabalhos de Raju e Khaitan (2012) e da BBC (1981)

6.2 Zurique – ECES (Suíça)

Comissionada em 2012, planta de Zurique de ECES tem potência nominal de 1MW e capacidade de 580kWh, sendo apenas 250kWh com potência máxima de 1MW. Para maior flexibilidade, a estação tem uma conexão de 400V com o prédio adjacente assim como uma conexão de 16kV com a rede da cidade. Ela se situa ao lado de uma subestação de 110kV/16kV e as diferentes configurações de rede são controladas por um sistema dedicado de aquisição de dados e controle (SCADA). A Fig. 3 abaixo mostra o layout da planta:

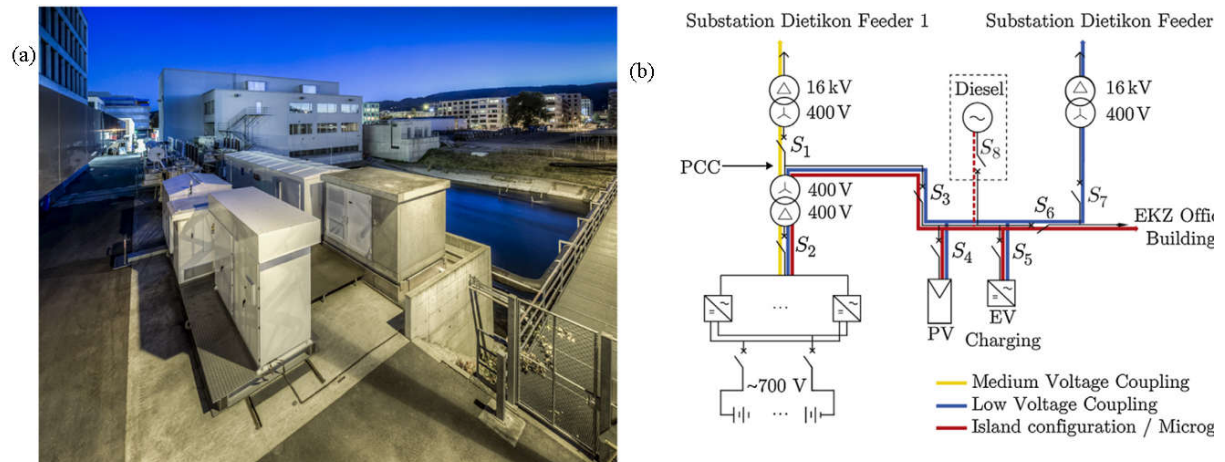


Figura 3.(a) Visão externa da planta (b) Diagrama de possíveis conexões. Fonte: Koller *et al*, 2015.

As rampas de variação de potência são bem altas: degraus entre -1MW e 1MW – i.e. de carga máxima a descarga máxima – acontecem em intervalos menores que um segundo, viabilizando assim um ótimo controle da qualidade do sinal. A vida útil das baterias é estimada em 3500 ciclos, considerando 2 ciclos completos por dia.

As múltiplas conexões possíveis permitem várias configurações diferentes para teste – e.g. conectado à rede ou ao prédio; isolado ou integrado; com alimentação diesel ou eólica – o que torna essa planta piloto muito importante no desenvolvimento de tecnologias para viabilizar uma maior penetração de fontes renováveis no cenário energético suíço. Mais informações sobre as condições de testes, resposta e infraestrutura da planta podem ser encontradas no trabalho de Koeller *et al.* (2015).

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram discutidos mecanismos para aumentar a participação de energias renováveis no portfólio global, tal como conceitos básicos de energia, sua geração e seu armazenamento. Uma discussão específica das tecnologias solar e eólica foram apresentadas, tal como uma revisão das tecnologias de armazenamento mais relevantes.

Uma breve análise de cada um desses sistemas de armazenamento foi apresentada, separando-os em dois grandes grupos de acordo com sua função num cenário de geração de eletricidade. Também foram apresentadas duas tabelas, avaliando qualitativamente as fontes de energia e os sistemas de armazenamento apresentados no que diz respeito a características técnicas e econômicas relevantes. As tabelas foram baseadas em valores médios encontrados na literatura revisada. É importante notar que o custo econômico e a o potencial de viabilidade variam enormemente em função da disponibilidade de recursos naturais, tecnologia disponível e legislação local.

Duas plantas em operação foram apresentadas: a planta de Huntorf de CAES e planta de Zúrique de ECES. Características específicas de cada planta como capacidade de geração, funcionalidade e integração no cenário local foram brevemente discutidos.

Os tópicos apresentados auxiliam na busca de sinergia entre diferentes sistemas de geração e armazenamento. É notável, por exemplo, a vantagem de se utilizar um sistema do tipo TES acoplado a uma planta de geração solar térmica. Sistemas de armazenamento bruto – e.g. PHES ou CAES – frequentemente tem tempos de resposta lentos e podem ser acoplados a sistemas de baixa densidade de energia e respostas rápidas, como FES ou SMES a fim de regular a qualidade do sinal gerado.

Mais importante, é discutida a importância fundamental do desenvolvimento de sistemas de armazenamento a fim de viabilizar uma maior penetração das fontes renováveis – em especial solar e eólica – na matriz energética existente. O uso eficiente de armazenamento de energia torna possível adaptar a geração à demanda a todo momento, mantendo também a qualidade do sinal. Seu estudo e o desenvolvimento de novas tecnologias é um passo importante a ser dado a fim de alcançar uma matriz renovável.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG pelo apoio dado na elaboração deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

- Abdin, Z; Webb, C.J; Mac, E; Gray, A., 2015. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.52, p.1791-1808
- Ackermann, T; Söder, L., 2000. Wind energy technology and current status: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 4, p. 315-374,
- BBC, Brown Boveri, 1981. Huntorf air storage gas turbine power plant. Pub. No. D GK 90 202 E, Mannheim
- Becherif, M; Ramadan, H.S; Cabaret, K; Picard, F; Simoncini, N; Bethoux, O., 2015. Hydrogen Energy Storage: New Techno-Economic Emergence Solution Analysis. *Energy Procedia*, v.74, p.371-380
- California Energy Commission, 2015. Tracking progress – Renewable energy – September 2015
- Chen, H; Cong, T.N; Yang, W; Tan, C; Li, Y; Ding, Y., 2009 Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, v.19, p. 291-312
- Chen, H; Ding, Y; Peters, T; Berger, F., 2007. A method of storing energy and a cryogenic energy storage system. Patente americana, EP 1989400 A1
- Cimuca, G; Radulescu, M.M; Saudemont, C; Robyns, B., 2004. Performance analysis of an induction machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator. *Proceedings of the 9th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments*, v. 2, p. 319-326. Brasov
- Connolly, D; Lund, H; Mathiesen, B.V; Pican, E; Leahy, M., 2012. The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage. *Renewable Energy*, v. 43, p.47-60
- Dhand, A; Pullen, K., 2015. Review of battery electric vehicle propulsion systems incorporating flywheel energy storage. *International Journal of Automotive Technology*, v. 16, p. 487-500
- Divya, K.C; Ostergaard, J., 2009. Battery energy storage technology for power systems – An overview. *Electric Power Systems Research*, v.79, p. 511-520
- Duffie, J.A; Beckman, W.A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons

- Ehteshami, S.M.M; Chan, S.H., 2014. The role of hydrogen and fuel cells to store renewable energy in the future energy networks – potentials and challenges. *Energy Policy*, v.73, p. 103-109
- Foley, A.M; Leahy, P.G, Mckeogh, E.J; Morrison, A.P., 2015. A long-term analysis of pumped hydro storage to firm wind power. *Applied Energy*, v.137, p.638-648
- Gabbrielli, D.R; Zamparelli, C., 2009. Optimal design of a molten salt thermal storage tank for parabolic trough solar power plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, v.131(4)
- Grazzini, G; Milazzo, A., 2008. Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants. *Renewable Energy*, v. 33, p. 1998-2006
- GWEC – Global Wind Energy Council, 2014. Global Wind Energy Outlook 2014. Global Wind Energy Council, Bruxelas
- Hamajima, T; Amata, H; Iwasaki, T; Atomura, N; Tsura, M; Miyagi, D; Shintomi, T; Makida, Y; Takao, T; Munakata, K; Kajiwara, M., 2012. Application of SMES and fuel cell system combined with liquid hydrogen vehicle station to renewable energy control. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.22
- Hino, T; Lejeune, A., 2012. Pumped storage hydro power developments. *Renewable Energy*, v. 6, p. 405-434
- International Energy Agency – EIA, 2015. Energy and Climate Change: World Energy Outlook Special Report. International Energy Agency, Paris
- IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change, 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, New York
- Janelli, E; Minutillo, M; Lavadera, A.L; Falcucci, G., 2014. A small-scale CAES (Compressed Air Energy Storage) system for a stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology. *Energy*, v. 78, p. 313-322
- Kalogirou, S.A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, v.30, p. 231-295
- Kim, Y.M; Shin, D.G; Favrat, D., 2011. Operating characteristics of constant pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis. *Energy*, v.36, p.6220-6233
- Koller, M; Borsche, T; Ulbig, A; Andersson, G., 2015. Review of grid applications with the Zurich 1MW battery energy storage system. *Electric Power Systems Research*, v.120, p.128-135
- Laing, D; Steinmann, W.D; Tamme, R; Richter, C., 2006. Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. *Solar Energy*, v.80, p. 1283-1289
- Li, Y; Chen, H; Zhang, X; Tan, C; Ding, Y., 2010. Renewable energy carriers: Hydrogen or liquid air/nitrogen. *Applied Thermal Engineering*, v. 30, p. 1985-1990
- Manwell, J.F; McGowan, J.G; Rogers, A.L., 2009. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Wiley and Sons
- Olsen, J; Paasch, K; Lassen, B; Veje, C.T., 2015. A new principle for underground pumped hydroelectric storage. *Journal of Energy Storage*, v. 2, p. 54-63
- Porto, M.P; Machado, L; Koury, R., 2013. Compressed and Liquefied Air Storage Systems for reducing power output variability from PV solar farms. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto
- Pudukudy, M; Yaakob, Z; Mohammad, M; Narayanan, B; Sopian, K., 2014. Renewable hydrogen economy in Asia – opportunities and challenges: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.30, p. 743-757
- Raju, M; Khaitan, S.K., 2012. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant. *Applied Energy*, v.89, p. 474-48
- Rezaie, B; Reddy, B.V; Rosen, M.A., 2015. Exergy analysis of thermal energy storage in a district application. *Renewable Energy*, v.74, p. 848-854
- Sander, M; Brighenti, F; Gehring, R; Jordan, T; Klaeser, M; Kraft, D; Mueller, R; Neumann, H; Schneider, T; Stern, G., 2014. LIQHYSMES – Liquid H₂ and SMES for renewable energy applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.39, p. 12007-12017
- Schönung, S; Hassenzahl, W., 2003. Long- vs. Short-term energy storage technology analysis – a life-cycle cost study. Sandia Report, SAND2003, p.2783
- Sharma, A; Tyagi, V.V; Chen, C.R; Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.13, p. 318-345
- Soloveichik, G.L., 2014. Metal free energy storage. *Nature*, v.505, p. 163-165
- Ter-Gazarian, A., 1994. Energy Storage for Power Systems. The Institution of Energy and Technology, Moscow
- Trainer, T., 2014. The limits to solar thermal electricity. *Energy Policy*, v.73, p.57-64
- U.S. Energy Information Administration, 2015. Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook: June 2015.
- Van Den Bossche, P; Vergels, F; Mierlo, J.V; Matheys, J; Autenboer, W.V., 2006. Subat: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of Power Sources*, v.162, p. 913-919
- Vestas, 2015. Offshore Wind Turbines: V164-8.0MW; V112-3.3MW
- Yunna, W; Ruhang, X., 2013. Current status, future potentials and challenges of renewable energy development in Gansu province (Northwest China). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.18, p.73-86

Zhu, J; Qju, M; Wei, B; Zhang, H; Lai, X; Yuan, W., 2013. Design, dynamic simulation and construction of a hybrid HTS SMES (high-temperature superconducting magnetic energy storage system) for Chinese power grid. Energy, v.51, p.184-192

10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A REVIEW ON RENEWABLE ENERGY PLANTS MANAGEMENT STRATEGIES: INTEGRATION OF SOURCES AND STORAGE SYSTEMS

Vitor Torres Alvarenga, vatorres01@gmail.com¹

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

Bruno Ude Todde Fonseca Valadares, bruno_todde@hotmail.com¹

Matheus Pereira Porto, matheusporto@ufmg.br¹

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

Abstract: *The present work aims to discuss basic concepts regarding the generation and storage of renewable energy, as well as the current management strategies for renewable energy plants, taking into consideration their generation scale, spatial dispersion, primary energy source and storage type – when existent. Presented first is a review of basic concepts regarding both the generation and management of energy, as well as the main characteristics of each energy source – namely wind and solar power. Following that is a review of the most common storage types used. The storage systems are then divided in two groups according to their main function in a power plant. Two tables are presented, qualitatively comparing both sources and storage systems regarding their relevant technical aspects. Following is the analysis of two real storage plants: the Huntorf CAES plant and the Zurich ECES plant. Both projects are briefly discussed regarding their main technical aspects.*

Keywords: *Solar Energy, Wind Energy, Energy Storage*