

## Análise da Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia por Bateria na Rede Elétrica - Estudo de Caso

Rayssa Silva Leal\* Paulo Davi. A. de Freitas Araujo\*  
Patrick Diego A. da Silva\* Diógenes M. R. de Sousa\*  
Samuel Pereira da Rocha\*\* Jose Vieira Neto\*\*\*  
Lucas Vinicius Hartmann\* Camila Seibel Gehrke\* Fabiano Salvadori\*

\* *Universidade Federal da Paraíba - UFPB*  
*Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR*  
*Smart Grid Group - SG2*

*João Pessoa - PB - Brasil (e-mail: salvadori.fabiano@cear.ufpb.br).*

\*\* *Centrais Elétricas Minas Gerais - CEMIG.*

\*\*\* *ALSOL Energias Renováveis.*

**Abstract:** Currently, the study of distributed energy resources (DER) is fundamental in terms of grid reliability and power quality. This is due, among other factors, to the significant increase in distributed generation (DG), mainly wind, solar and biomass, which add variability not previously considered on power grid control models. A possible solution is the use of energy storage systems (ESS), which can provide network stability in addition to enabling the conservation of fossil energy resources and reducing the environmental impact of energy generation. In this regard, this work presents results of a R&D/ANEEL project, whose objectives were, to develop a solution, through a national product combining hardware and software and to build hybrid plants using photovoltaic plants and biomass generation combined with energy storage using batteries. For evaluation and validation of improvements in the grid an experimental plant with battery-based ESS, and photovoltaic- and biodiesel-based DG was built, allowing for controlled injection or consumption of active and reactive power. A brief review of battery-based storage systems is presented, focusing primarily on lead acid batteries and lithium-ion technologies used in the plant. Data from the real plant were acquired and corroborated with simulations carried out in the MATLAB/SIMULINK<sup>TM</sup> platform from which analyzes of the behavior of DER insertion were performed, on the power grid.

**Resumo:** Atualmente o estudo da aplicabilidade de recursos energéticos distribuídos (*distributed energy resources - DER*) apresenta-se como fundamental no que se refere ao suprimento, confiabilidade e qualidade da energia elétrica. Isso se deve, dentre outros fatores, ao aumento significativo da geração distribuída (GD), em especial a partir de energia eólica, solar e biomassa, as quais apresentam maior variabilidade do que o previsto no modelo clássico de controle do sistema elétrico. Uma possível solução é o uso de sistemas de armazenamento de energia (*ESS - energy storage system*), os quais podem proporcionar estabilidade da rede, além de, possibilitar a conservação de recursos energéticos fósseis e reduzir o impacto ambiental de geração de energia. Nesse sentido, este trabalho é resultado de um projeto de P&D/ANEEL, cujos objetivos foram, desenvolver uma solução, através de um produto nacional combinando hardware e software e construir plantas híbridas utilizando usinas fotovoltaicas e geração com biomassa combinadas com armazenamento de energia utilizando baterias. Para avaliação e validação das melhorias na rede uma planta experimental com ESS a baterias e GD fotovoltaica foi construída, permitindo injeção ou consumo controlados de potência ativa e reativa na rede elétrica. Uma breve revisão sobre sistemas de armazenamento, mas especificamente baterias, e concentrando o estudo nas baterias de chumbo ácido e íons de lítio, tecnologias estas utilizadas na planta em estudo. Foram adquiridos dados da planta real e corroborados com simulações realizadas na plataforma MATLAB/SIMULINK<sup>TM</sup> à partir dos quais foram realizadas análises do comportamento da inserção de *DER*, na rede elétrica.

*Keywords:* Batteries; Analyze; Battery Energy Storage Systems; Distributed Energy Resources.  
*Palavras-chaves:* Análise; Sistemas de Armazenamento de Energia por Bateria; Recursos Energéticos Distribuídos.

## 1. INTRODUÇÃO

Na atualidade é percebido que a demanda energética mundial é crescente. O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas impulsionou o consumo de energia elétrica e a necessidade de desenvolver sistemas para aproveitamento das fontes de geração renováveis não poluentes (p.ex. solar, eólica e biomassa) e tecnologias para que essa energia elétrica possa ser armazenada. Para que se possa atender as necessidades atuais, a energia elétrica deve ser disponível a todos em tempo integral e em quantidade precisa e necessária, sendo assim, pode-se concluir a grande necessidade de que não haja falhas no fornecimento de energia elétrica. Portanto, a energia deve ser estável, de boa qualidade, e essencialmente, não deve sofrer interrupções durante o fornecimento dessa, tendo em vista que estas interrupções podem acarretar em grandes prejuízos, com perdas materiais, econômicas e até mesmo humanas ((Bueno and Brandão, 2015)).

Destaca-se que, a inserção de fontes de energia distribuída (*DER*) e de outras formas de potenciais fontes de geração/armazenamento distribuída está aumentando, em 2019, estas fontes possuíam uma capacidade instalada mundial de 2.536.853 (MW) (IRENA, 2020). Tais tecnologias, de modo geral, dependem de condições naturais para funcionar de forma eficaz. É o caso da energia eólica e da energia solar que caracterizam-se por serem fontes de geração intermitente, dependentes do vento e do sol respectivamente.

Assim, o crescente aproveitamento destas fontes de energias intermitentes, torna o armazenamento da energia gerada necessário para que se mantenha o equilíbrio entre demanda e oferta, sendo que a demanda pode variar diariamente, mensalmente ou anualmente. Assim, para que essas novas fontes se tornem completamente confiáveis como fontes primárias de energia, a inserção de tecnologias para o armazenamento de energia torna-se um fator essencial (Seibel Gehrke et al., 2019).

Neste cenário, surge a tendência da aplicação de sistemas de armazenamento de energia (*ESS* - *energy storage system*). As tecnologias *ESS* referem-se ao processo de conversão de energia, que de modo geral relaciona-se à energia elétrica, para uma forma de energia que possa ser estocada em um meio material, de modo que essa energia possa ser convertida novamente para energia elétrica quando necessário (Luo et al., 2015). Estes sistemas podem ser aplicados para gerenciamento de energia, “*peak shaving*”, fluxo de carga, suporte de tensão, “*black start*”, regulação de frequência, qualidade de energia, confiabilidade de energia e entre outras funcionalidades (Faisal et al., 2018).

Existem várias tecnologias associadas aos *ESS*, e nem toda tecnologia para armazenamento é apropriada para determinado tipo de aplicação. É necessário que haja

um estudo adequado de modo que possam ser melhor atendidos os requisitos necessários para cada situação (EPE, 2019). No que se refere a diferentes aplicações e capacidades, o sistema de armazenamento por meio de baterias (*battery energy storage system* - *BESS*) apresenta grande potencial e destaca-se como uma das principais tecnologias a ser utilizada.

Neste trabalho são apresentados os resultados, de simulação e experimentais, obtidos para a análise da inserção de um sistema de geração fotovoltaica e de um *BESS* na rede elétrica da cidade de Uberlândia/MG. Os dados obtidos, sua análise e conclusões, são resultados alcançados no desenvolvimento do projeto de P&D/ANEEL intitulado, “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia em Combinação com Sistemas de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição Brasileiras”, desenvolvido em parceria entre as Centrais Elétricas Minas Gerais - CEMIG, ALSOL Energias Renováveis e Smart Grid Group - SG2/CEAR/UFPB. Uma breve revisão acerca dos métodos de armazenamento, de modo particular aos baseados em baterias de chumbo ácido e íons de lítio é apresentada assim como conceitos de geração fotovoltaica.

## 2. TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO

Há várias tecnologias de armazenamento disponíveis no mercado, em diversos estágios de maturidade, desde a pesquisa até aplicações comerciais. Tecnologias *ESS* podem ser categorizadas em: (a) mecânicas (armazenamento hidroelétrico bombeado, ar comprimido e volantes de inércia); (b) eletroquímicos (baterias recarregáveis, baterias de fluxo); (c) elétricas (capacitores, supercapacitores e armazenamento de energia magnética supercondutora); (d) termoquímica (combustíveis solares); e, (e) armazenamento através da energia térmica (ver Figura 1) (Luo et al., 2015).



Figura 1. Classificação das tecnologias *ESS*

### 2.1 Sistemas de Armazenamento Eletroquímico - Baterias

Uma bateria é o resultado da junção de várias células eletroquímicas. Desse modo, essas podem ser classificadas

\* Rayssa S. Leal, Paulo Davi. A. de Freitas Araujo e Patrick Diego A. da Silva são alunos PIBIC/CNPq.

como secundárias ou primárias. As baterias secundárias são recarregáveis, sendo um dos *ESS* que apresentam maior penetração na indústria e na vida cotidiana. Os sistemas de armazenamento eletroquímico (*Electrochemical Storage Systems - EcSS*) podem ser compostos por diversas tecnologias (Faisal et al., 2018).

Tecnologias de baterias disponíveis comercialmente atualmente: Baterias de Chumbo-Ácido, Baterias de Íons de Lítio (Li-íon), Baterias de Sódio Enxofre (NaS), Baterias de Níquel Cádmio (NiCd), Baterias de Níquel-Metal Hidreto (NiMH), Vanadium Redox Batteries (VRB) e Baterias de Brometo de Zinco (ZnBr).

Destas, destacamos os conceitos das baterias de Chumbo-Ácido e Íons de Lítio visto terem sido estas tecnologias utilizadas para a implantação do *BESS* no projeto.

### Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido (*Lead-Acid Battery*), são consideradas uma das tecnologias mais antigas, no que se refere a baterias recarregáveis, seu uso nos setores industriais e domésticos ocorre desde de meados do século XIX. As principais vantagens do uso de baterias de chumbo-ácido são a alta eficiência energética, pequenas taxas de auto-descarga, eficiências de ciclo relativamente altas, e o baixo custo de capital inicial. Contudo, sofre algumas desvantagens que incluem tempos de ciclos relativamente baixos (até 2000), baixa vida útil, baixa densidade de energia e baixa taxa de energia específica. Ademais, sistemas compostos por essa tecnologia podem necessitar de um sistema de gerenciamento térmico, pois baterias de chumbo-ácido podem apresentar um desempenho menor do que esperado, quando expostas a temperaturas baixas, fato que pode vir a aumentar o custo total de um *ESS* (Bueno and Brandão, 2015; Luo et al., 2015; Faisal et al., 2018).

### Baterias de Íons de Lítio (Li-íon)

Configura-se como uma tecnologia de bateria recarregável avançada, desenvolvida comercialmente pela empresa Sony®, durante o início dos anos 90. Em uma bateria desse tipo, o cátodo é feito de óxido metálico de lítio, e o ânodo é feito de carbono grafítico. O eletrólito é normalmente um líquido orgânico não aquoso contendo sais de lítio dissolvidos. Baterias de íons de lítio apresentam alta eficiência, alta densidade de energia, bom tempo de resposta (em milissegundos) e baixa taxa de auto descarga (Faisal et al., 2018). Entretanto, as desvantagens da bateria de íons de lítio são a profundidade do ciclo de descarga (*DoD - Depth of Discharge*), sensibilidade a altas temperaturas e elevado custo. Contudo, o custo das células de íons de lítio tende a diminuir com grandes produções em larga escala (Luo et al., 2015; Mahlia et al., 2014; Faisal et al., 2018; Bueno and Brandão, 2015).

## 3. COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS *ESS*

### 3.1 Densidade de Energia e de Potência

A densidade de potência de qualquer das tecnologias de armazenamento expostas nesse trabalho é definida como

$$D_P = \frac{P_{Nom}}{Vol} \quad (1)$$

onde:  $D_P$  é a densidade de potência;  $P_{Nom}$  é a potência nominal; e,  $Vol$  é o volume do dispositivo de armazenamento.

Já a densidade de energia é definida como:

$$D_E = \frac{E_{Real}}{Vol} \quad (2)$$

onde:  $D_E$  é a densidade de energia;  $E_{Real}$  é a energia real armazenada; e,  $Vol$  é o volume do dispositivo de armazenamento.

O volume do dispositivo é considerado como o volume do *ESS* de energia completo, incluindo o elemento de armazenamento de energia, entre outros equipamentos necessário a um *ESS* (Aneke and Wang, 2016). De acordo com dados extraídos de Luo et al. (2015), é apresentada a Figura 2, em que é comparada a densidade de potência, a densidade de energia e o volume de algumas das tecnologias para dispositivos de armazenamento mencionadas anteriormente.

Analisando a Figura 2, observa-se que para determinado valor de potência quanto maior a densidade de potência por unidade de volume menor será espaço ocupado pelo sistema de armazenamento para realizar o armazenamento a potência requisitada pelo *ESS*.

Baterias de íons de lítio possuem alta densidade de energia, bem como alta densidade de potência, fato que impulsiona essa tecnologia a ser utilizada em dispositivos portáteis. Em aplicações de larga escala a densidade de energia e/ou potência pode ser um fator que pode ser desprezado, dado que nessa situação priorizam-se elevados níveis de potência e energia, não sendo o volume ocupado uma grande restrição (Luo et al., 2015; Dehghani-Sanjaj et al., 2019).

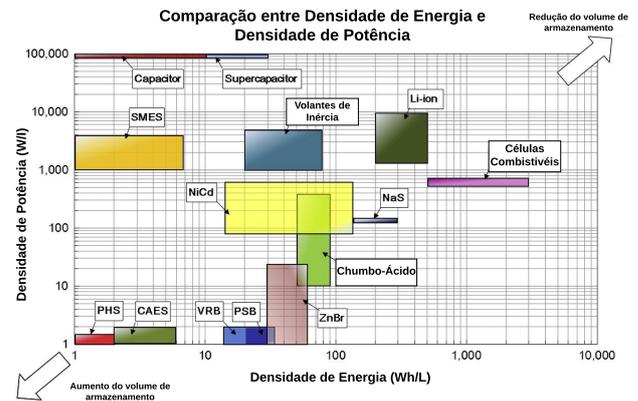


Figura 2. Comparação da densidade de potência com a densidade de energia. Figura adaptada de (Luo et al., 2015).

### 3.2 Energia Específica e Potência Específica

Energia específica e potência específicas são fatores de grande influência, na análise de *ESS*, pois dependendo da funcionalidade aplicada a esse sistema, os valores requisitados para tal irão mudar. Nesse sentido, na Figura 3 é mostrada a comparação entre energia específica e potência específicas de diversos dispositivos de armazenamento

mostrados ao longo desse trabalho. Desta figura tem-se a percepção que para obter uma certa quantidade de energia, quanto maior a potência específica e a energia específica, menor será o peso do sistema *ESS*. Capacitores e supercapacitores possuem alta potência, entretanto o valor de potência específica é baixo, essas características devem-se ao seu rápido tempo de resposta em sistemas, assim essas tecnologias são mais direcionadas ao uso em qualidade de energia, no que se refere ao fornecimento de energia elétrica. Volantes de inércia, baterias de fluxo e maioria das baterias secundárias localizam-se com valores médios das especificações mencionadas nessa seção, fato que justifica as diversas vertentes de aplicações de baterias. Dentre as baterias, destacam-se baterias de íon de lítio que apresentam alta energia específica e também alta potência específica, somado ao fato de que podem ser conectadas com capacitores (Aneke and Wang, 2016; Dehghani-Sanij et al., 2019).

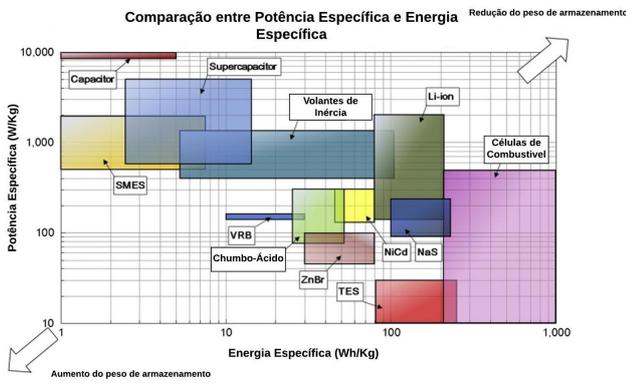


Figura 3. Comparação entre energia específica e potência específica. Figura adaptada de (Lue et al., 2015).

### 3.3 Capacidade e Duração de Armazenamento

Capacidade de armazenamento refere-se à quantidade de energia disponível no dispositivo que pode ser utilizada. Assim, a capacidade de armazenamento é a energia total que pode ser armazenada no dispositivo. Essa capacidade de armazenamento é diferente da energia recuperada do dispositivo de armazenamento, tendo em vista que a descarga geralmente é incompleta. Os dispositivos de armazenamento de energia em escala comercial geralmente têm grandes capacidades de armazenamento. Devido a problemas de descargas automáticas, a duração do armazenamento também é considerado um dos elementos essenciais a serem considerados na análise de uma determinada tecnologia de armazenamento de energia (Aneke and Wang, 2016). A Figura 4 apresenta dados retirados de Luo et al. (2015), e mostra uma comparação das classificações de potência e das capacidades de energia nominal das tecnologias *ESS*. A duração nominal também é mostrada na faixa de segundos a meses (Seibel Gehrke et al., 2019; Luo et al., 2015).

### 3.4 Análise Financeira

O custo de uma tecnologia de armazenamento de energia é um dos fatores mais importantes para a implantação de um sistema de armazenamento. Uma análise detalhada acerca

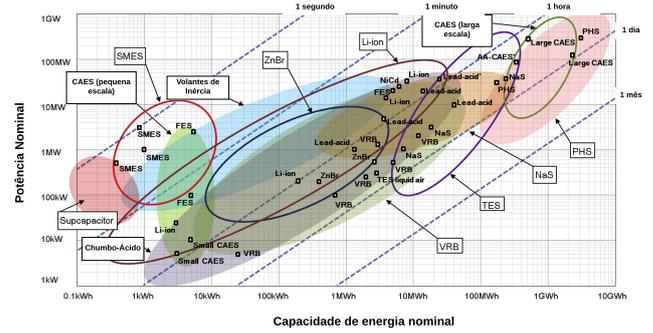


Figura 4. Comparação da potencia e capacidade nominal com a duração do tempo de descarga de tecnologias *ESS*. Figura adaptada de (Lue et al., 2015).

do custo de qualquer tecnologia de armazenamento deve incluir o gasto relacionado a custos operacionais. O custo operacional engloba o custo da operação, manutenção, descarte e substituição. A Tabela 1 mostra os custos relacionados ao valor em dólares da energia em kWh e kW, esses dados foram retirados de Luo et al. (2015); Aneke and Wang (2016); Dehghani-Sanij et al. (2019).

A Figura 5 utiliza dados retirados de Luo et al. (2015), e demonstra graficamente a comparação entre custo de energia e o custo relacionado a operação e manutenção de tecnologias *ESS*. Conforme mostrado na Tabela 1 o *SMES* e o volante de inércia são adequados para aplicações de alta potência e em pequena escala, pois são baratos em termos de custo de potência, mas caros em termos de custo de energia.

Deve-se atentar ainda, que o custo de capital de um sistema *ESS* específico varia em termos de escala de tempo da construção do sistema, da localização da planta, bem como a instalação e do tamanho do sistema. O custo de *ESS* tende a diminuir com o esforço contínuo de pesquisa e desenvolvimento, e alguns avanços tecnológicos importantes podem levar a mudanças drásticas no custo (Luo et al., 2015; Aneke and Wang, 2016; Dehghani-Sanij et al., 2019).

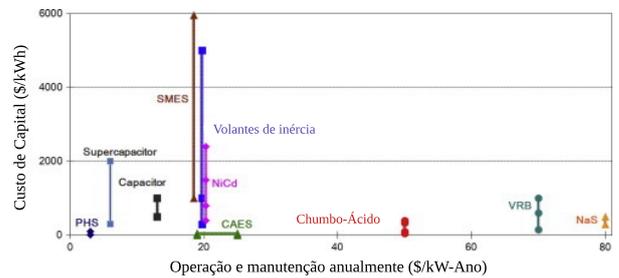


Figura 5. Comparação entre custo de energia e potência com o custo de manutenção e operação. Figura adaptada de (Luo et al., 2015).

## 4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos são sistemas construídos a partir de painéis fotovoltaicos acrescidos de conversores eletrônicos e/ou outros elementos necessários para o aproveitamento da energia fotovoltaica. O painel fotovoltaico

Tabela 1. Comparação de tecnologias ESS - custo.

Sistema	Custo (\$/kWh)	Custo (\$/kW)
<i>PHS</i>	5-100 10-12	2500-4300 2000-4000
<i>CAES</i>	2-50	400-800
Volantes <i>FES</i>	1000-14000	250-350
Capacitor	500-1000	200-400
Supercapacitor	300-2000	100-300 250-450
<i>SMES</i>	1000-10000	200-300 380-489
Células de Hidrogênio	15 15	500 1500-3000
Íons de Lítio	240-2500	1200-4000 900-1300 1590
NaS	300-500 350 450	1000-3000 350-3000
NiCd	800-15000 400-2400	500-1500 500-1500
<i>VRB</i>	150-1000 600	600-1500 600-1500
ZnBr	150-1000 1500	700-2500 400 200

(*PhotoVoltaic Panel (PV)*) é o conjunto formado pela união de vários módulos unidos em série ou em paralelo, conforme a necessidade de potência desejada. Módulos esses formados da união de várias células fotovoltaicas, que são responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica através do efeito conhecido como Efeito Fotovoltaico (Schlickmann et al. (2019)).

Dependendo das condições climáticas (irradiação solar e temperatura), os dispositivos fotovoltaicos apresentam comportamentos variados do ponto de vista elétrico. Contudo, para uma dada condição de operação, as curvas de corrente X tensão ( $IxV$ ) e potência X tensão ( $PxV$ ) exibem um comportamento típico, como pode ser observado na Figura 6.

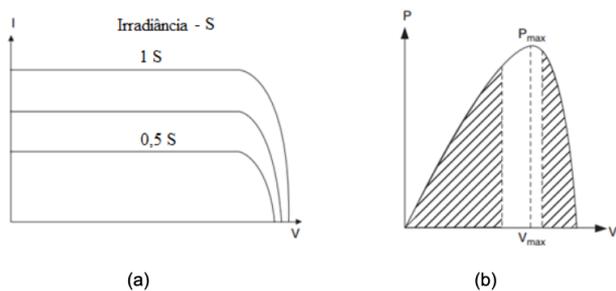


Figura 6. Curvas  $IxV$  (a) e  $PxV$  (b) de uma célula fotovoltaica para uma condição climática, evidenciando a existência de um ponto de potência máxima.

Conforme ilustrado na Figura 6 (b), há um único ponto no qual a potência de saída do painel é máxima, (*maximum power point - MPP*, e associado a este ponto define-se a tensão e corrente de máxima potência (*voltage MPP - VMPP*) e (*current MPP - CMPP*). O rastreamento do ponto de máxima potência (*maximum power point*

*tracking - MPPT*) é uma função necessária em conversores eletrônicos para sistemas fotovoltaicos.

## 5. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema em análise (“estudo de caso”), está implantado na cidade de Uberlândia, MG, área de concessão da CEMIG consistindo de um conjunto de 2400 painéis fotovoltaicos, totalizando 750 kWp, e dois sistemas de armazenamento de energia por baterias (*battery energy storage system - BESS*), um deles utilizando baterias com tecnologia íons de lítio, totalizando de 1,3 MWh, e o outro tecnologia chumbo-ácido, totalizando 300 kWh, e, uma unidade de geração utilizando biodiesel, com capacidade de geração de 400 kWh. Estas fontes de energia distribuída (*DER*) estão conectadas à rede elétrica através de um transformador trifásico de 1,0 MVA, 380-13,8 kV. O monitoramento das grandezas elétricas (tensão e corrente) é realizado utilizando um medidor de baixa tensão (BT) e um medidor de faturamento (ver Figura 8).

### 5.1 Cenário de testes

Foi definido que o cenário adotado no experimento seria com um fator de potência de 0,92, indutivo ou capacitivo, conforme definido pela Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL, utilizando o *BESS* para injetar apenas potência reativa capacitiva ( $Q_{\text{BESS}^+}$ ) e reativa indutiva ( $Q_{\text{BESS}^-}$ ) e o sistema fotovoltaico injetando apenas potência ativa  $P_{\text{PV}}$ , verificando-se assim, os impactos nos níveis de tensão na rede elétrica. Com o conhecimento do limite de potência do transformador de 1,0 MVA, foi utilizado apenas o *BESS* de íons de lítio para garantir que tal limite não fosse ultrapassado.

### 5.2 Condições de contorno

Objetivando garantir a integridade do sistema elétrico e dos equipamentos, foram definidas alguns critérios em conjunto pela CEMIG, ALSOL e SG2.

A potência fornecida pelo sistema fotovoltaico implementado é dada de acordo com as condições de geração (presença de radiação solar, nuvens, sombreamento, entre outros), logo, há uma variação de potência ao longo do tempo. Nominalmente, a potência de pico do sistema ( $P_{\text{PICO(PV)}}$ ) é de 750 kWp. Desta forma o valor de segurança foi definido em 90% (900 kVA) da potência aparente do transformador ( $S_{\text{TRAFO}} = 1,0 \text{ MVA}$ ). Os limites estipulados para potência ativa e de energia fornecidas pelo *BESS* foram, respectivamente, 1,3 MW e 1,3 MWh. O fator de potência do *BESS* ( $\text{FP}_{\text{BESS}}$ ) nesta etapa do trabalho foi definido em 0,92 indutivo e capacitivo. A tensão nominal, de base,  $V_{\text{BASE}}$  é de 13,8 kV, e limitada internamente aos valores  $0,95 \text{ pu} < V_{\text{BASE}} < 1,05 \text{ pu}$ .

O ponto de acoplamento comum (*point of common coupling - PCC*) é o ponto onde há a conexão de todos os elementos da planta (painéis fotovoltaicos, sistema de armazenamento de energia por baterias, gerador biodiesel, etc) com o transformador e posteriormente com a rede da CEMIG. A potência aparente no ponto de acoplamento comum é calculada utilizando a Equação (3),

$$S_{PCC} = \frac{P_{PV}}{FP_{BESS}} \quad (3)$$

a partir do valor de  $S_{PCC}$  pode-se calcular o valor da potência reativa do *BESS* ( $Q_{BESS}$ ) utilizando Equação (4),

$$Q_{BESS} = \sqrt{(S_{PCC})^2 - (P_{PV})^2} \quad (4)$$

O erro percentual  $Erro\%$  dos valores das tensões obtidas experimentalmente pode ser calculado com a Equação (5),

$$Erro(\%) = \left(1 - \frac{V_{exp}}{V_{sim}}\right) \times 100 \quad (5)$$

onde  $V_{exp}$  é a tensão obtida no momento do experimento, e  $V_{sim}$  a tensão obtida na simulação.

### 5.3 Metodologia de análise

Para análise dos cenários, foram avaliados tanto os valores obtidos no sistema implementado, quanto valores simulados através de um modelo da rede usando o software MATLAB® & Simulink®. Para todos os cenários avaliados, levou-se em consideração a faixa de horário das 10h às 11h da manhã.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Testes reais

Na Tabela 2 são apresentados os dados calculados e lidos durante os testes realizados no sistema implantado.

Tabela 2. Dados do experimento.

	Cenário 1 ( $Q^+$ )	Cenário 2 ( $Q^-$ )
Horário	10h10	10h15
FP	0,92	0,92
$P_{PV}$ (kW)	144	145
$S_{PCC}$ (kVA)	156	157
$Q_{BESS}$ (kVAr)	61	61
Baixa Tensão (V)	391	388
Alta Tensão (kV)	13,98	13,95

Valores de tensão foram obtidos a partir do medidor na entrada e saída do transformador (ver Figura 8). Nos cenários 1 e 2 o fator de potência foi definido como 0,92, a potência aparente no *PCC* ( $S_{PCC}$ ) foi calculada utilizando a Equação (3) e as potências reativa capacitiva ( $Q^+$ ) e a reativa indutiva ( $Q^-$ ) do *BESS*, a ser injetada na rede utilizando a Equação (4), para então verificar o nível de tensão na saída do transformador. Tais valores de tensão foram 13,98 kV e 13,95 kV respectivamente.

Um minuto, às 10h09, antes de iniciar os testes e injetar potência reativa capacitiva ( $Q^+$ ) na rede, verificou-se que o valor de alta tensão do transformador era de 13,96 kV, ou 1,011 pu. O mesmo procedimento foi repetido um minuto, às 10h14, antes de efetuar a injeção de potência reativa indutiva ( $Q^-$ ) na rede, registrou-se que o valor de tensão na saída do transformador era de 14,01 kV, ou 1,015 pu.

Observa-se, que o FP influencia diretamente na tensão de saída do transformador onde obteve-se a tensão de 13,98 kV quando o FP estava em 0,92. Injetando potência reativa capacitiva há uma maior influência na tensão do

que quando injetado potência reativa indutiva, para deixar em evidência tal fato, calculou-se os valores de tensão em pu em cada cenário para que então seja possível comparar o efeito capacitivo e indutivo, como é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação dos valores de tensão em pu nos dois cenários.

FP	Tensão (pu) $Q^+$	Tensão(pu) $Q^-$
0,92	1,013	1,011

### 6.2 Simulação

Para modelar a rede elétrica na qual a planta é conectada utilizou-se parâmetros reais das linhas e cargas, fornecidos pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

A simulação analisa os impactos causados pela injeção de potência fornecida pelo sistema de armazenamento de energia elétrica por baterias e pela planta fotovoltaica, de acordo com os valores definidos em cada cenário.

Por se tratar de uma rede de distribuição, as linhas foram modeladas utilizando os parâmetros de resistência e reatância série, uma vez que a capacitância das linhas curtas podem ser desprezadas. Para as cargas foram utilizados os valores de demanda em um determinado instante de operação da rede.

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos. Observa-se que com o sistema de armazenamento efetuando injeção de potência reativa na rede, é possível elevar a tensão do ponto de conexão. Analogamente, ao consumir potência reativa da rede, a tensão no ponto de conexão sofre uma queda proporcional à potência absorvida.

Nesta mesma tabela também é apresentado o fator de potência correspondente ao conjunto planta fotovoltaica e ao *BESS* e a potência aparente injetada na rede (respeitando a potência nominal do transformador de conexão, de 1,0 MVA).

Tabela 4. Dados da simulação.

	Cenário 1 ( $Q^+$ )	Cenário 2 ( $Q^-$ )
Horário	10h10	10h15
$FP_{PV}$	0,92	0,92
$P_{PV}$ (kW)	144	145
$S_{PCC}$ (kVA)	156	157
$Q_{BESS}$ (kVAr)	61	61
Alta Tensão (kV)	13,99	13,98

A seguir, ver figura 7, é apresentado um gráfico obtido a partir da simulação: a linha em cor preta representa o sistema *BESS* e planta fotovoltaica operando com fator de potência capacitivo e a linha em cor vermelha, representa o sistema operando com fator de potência indutivo. O eixo das abscissas representa os oito pontos, de 1 a 8, analisados na simulação e são descritos a seguir:

- Ponto 1: é o mais próximo da subestação do alimentador;
- Pontos 2, 3 e 4: pontos entre a subestação e o ponto de conexão;

- Ponto 5: representa o ponto de conexão entre o sistema de geração e armazenamento com a rede da concessionária;
- Pontos 6 e 7: pontos entre a conexão e o fim do trecho do alimentador;
- Ponto 8: ponto mais distante da subestação.

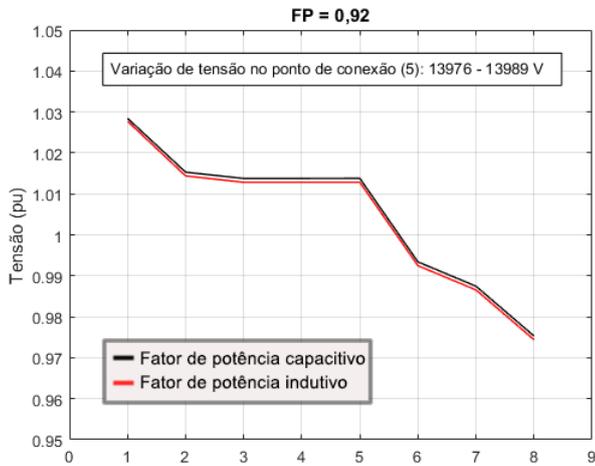


Figura 7. Níveis de tensão com FP = 0,92.

Na figura são destacados os valores de tensão obtidos no ponto de conexão (mostrados na tabela 4).

Os resultados mostram que o sistema de armazenamento junto dos painéis fotovoltaicos, permitem altas variações nas tensões observadas. Além disso, observa-se que os cenários propostos não violam os limites de tensão definidos por norma (entre 0,95 e 1,05 pu).

### 6.3 Comparação dos resultados

Os resultados obtidos a partir da simulação se comportam de acordo com os resultados observados nos testes reais o que corrobora o fato de que o modelo está correto. A comparação dos resultados permitiu validar o modelo utilizado na simulação, agregando confiabilidade nos resultados e análises futuras que utilizem a rede simulada.

Apesar do modelo utilizar parâmetros reais, a diferença de horários, da demanda das cargas e da dinâmica do sistema elétrico, ocasionam algumas pequenas diferenças entre os resultados simulado e real.

Abaixo segue a Tabela 5 de comparação dos níveis de tensão obtidos nos testes reais e na simulação.

O erro foi calculado utilizando a equação 5.

Tabela 5. Tensões reais e simuladas.

Cenários	Média Tensão (kV) Experimento	Média Tensão (kV) Simulação	Erro(%)
1	13,98	13,99	0,06
2	13,95	13,98	0,17

O sistema é monitorado utilizando um sistema supervisorio (*Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA*) desenvolvido com a ferramenta ELIPSE E3™. Através da interface homem-máquina - IHM (*human-machine interface - HMI*) do SCADA são apresentados os dados monitorados do sistema e realizado o controle dos mesmos.

Na tela inicial da IHM, o usuário tem acesso às opções: Dashboard, Unifilar, Despacho, Gráficos, Relatórios e Alarmes. Além disso, terá acesso à informações de irradiação, irradiação, temperatura ambiente, temperatura do módulo, e, geração no dia, mês e ano.

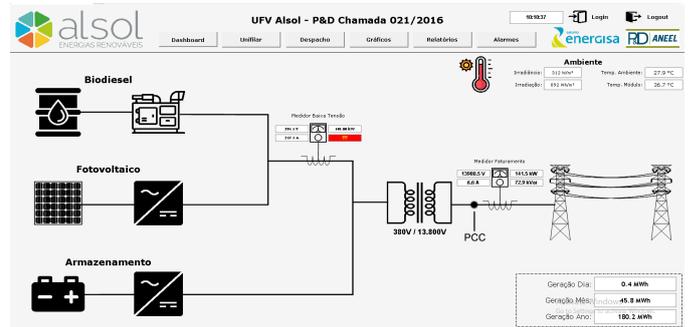


Figura 8. Sistema supervisorio - tela inicial

Na opção “Dashboard”, Figura 9

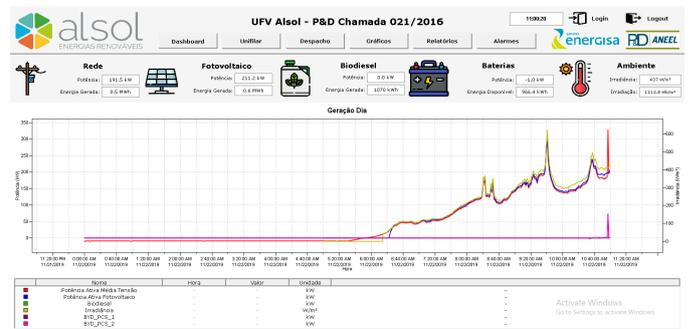


Figura 9. IHM - “Dashboard”

Nos ensaios preliminares, apenas o sistema fotovoltaico e as baterias de íons de lítio foram utilizados para avaliar os impactos na rede elétrica.

A ultima tela utilizada nos experimentos, foi a de Despacho, Figura 10, onde é possível controlar de forma manual os dois BESS presentes na ALSOL. Nos testes realizados foi utilizado o “Controle Reativo” de um dos BESS alterando entre capacitivo e indutivo.

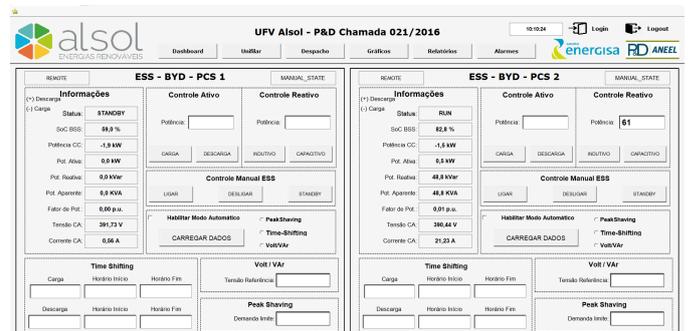


Figura 10. Despacho - SCADA

## 7. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma revisão sobre diversos sistemas para armazenamento de energia com ênfase nos

baseados em baterias e uma sobre geração fotovoltaica. Obteve-se a caracterização de diversos *ESS*, de modo que fosse possível realizar uma análise comparativa, e como estas tecnologias se encontram em termos de maturidade e aplicação, levando em conta fatores operacionais e também o custo associado a essas. Foram apresentados dados que facilitam estudos posteriores, bem como a tomada de decisão sobre a aplicação de tecnologias *ESS* para uma dada operação. Ao analisar *BESS* fica clara a importância da tecnologia de baterias de íons de lítio em sistemas de armazenamento, isso se deve principalmente as suas características quanto a relativa alta densidade de energia e potência, bem como altos valores no que se refere a energia e potência específicas. A capacidade energética e a auto-descarga de sistemas de armazenamento são os principais fatores para decidir a duração adequada do armazenamento associado. Desse modo, é possível observar que as tecnologias atuais apresentam características tecnológicas variadas, como foi mostrado na Tabela 1. De acordo com os resultados obtidos nos testes realizados na planta real e na simulação é verificada a variação de tensão em função da injeção de potência reativa pelo *BESS*. Observa-se, que o FP influencia diretamente na tensão de saída do transformador onde obteve-se a tensão de 13,98 kV quando o FP estava em 0,92. Injetando potência reativa capacitiva há uma maior influência na tensão do que quando injetado potência reativa indutiva. Tal variação também é perceptível em outros pontos da rede (simulação), porém nos dados da simulação só foram adicionados à tabela a tensão após o transformador, pois no sistema SCADA só se tem acesso a dois medidores como pode-se ser visto na Figura 8. Outros medidores serão instalados e configurados futuramente no sistema. A variação de tensão obtida em outros pontos da rede é importante pois com os testes realizados pode-se afirmar que através do *BESS* pode-se melhorar os níveis de tensão na rede. A comparação dos resultados obtidos por simulação e experimentalmente permitiram validar o modelo. A próxima etapa é embarcar e simular o modelo do sistema em tempo real no simulador OPAL-RT™ - OP5700 RCP/HIL/FPGA e corroborando os resultados obtidos com a planta real e complementar os testes.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Centrais Elétricas Minas Gerais (CEMIG) e ALSOL Energias Renováveis pelo suporte financeiro ao projeto e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e incentivo à iniciação científica.

#### REFERÊNCIAS

- Aneke, M. and Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – a state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350 – 377. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916308728>.
- Bueno, A.F.M. and Brandão, C.A.L. (2015). Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil. <http://www.abaque.com.br>.
- Dehghani-Sani, A., Tharumalingam, E., Dusseault, M., and Fraser, R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 192 – 208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300334>.
- EPE (2019). Sistemas de armazenamento em baterias. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- Faisal, M., Hannan, M.A., Ker, P.J., Hussain, A., Mansor, M.B., and Blaabjerg, F. (2018). Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *IEEE Access*, 6, 35143–35164.
- IRENA (2020). Renewable capacity statistics. Technical report, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511 – 536.
- Mahlia, T., Saktisahdan, T., Jannifar, A., Hasan, M., and Matseelar, H. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 532 – 545. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.068>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000902>.
- Schlickmann, H.R., Pederneiras Moraes Rocha, J., Caldeira, C.A., Salvadori, F., and Gehrke, C.S. (2019). A hardware-in-the-loop (hil) testbed to evaluate the impact of the insertion and control of distributed generating sources. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1663–1667.
- Seibel Gehrke, C., Salvadori, F., and Rocha, N. (2019). Tecnologias de armazenamento aplicadas à rede elétrica. Technical report, CEMIG (Centrais Elétricas Minas Gerais), ALSOL Energias Renováveis and Smart Grid Group (SG2)/UFPB.