

# PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

J.P.L. GONZÁLEZ<sup>1</sup>, S.A. FLÁVIO<sup>2</sup>, A.M. LEITE DA SILVA<sup>1</sup>, L.A.F. MANSO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea - 22451-900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

<sup>2</sup>*DEPEL Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, Praça Frei Orlando, 170, Centro – CEP 36307-352, São João del-Rei, MG, Brasil*

*E-mails: ingjuanleal1989@gmail.com, silvanflavio@ufsj.edu.br, am.leitedasilva@gmail.com, lmanso@ufsj.edu.br*

**Abstract**— This paper presents a new methodology to evaluate the use of batteries as an alternative to the transmission expansion of power systems with high penetration of renewable sources. The methodology is based on the adaptation of historical series of renewable energy availability to represent the joint operation of the plant with the storage system. The charging and discharging operation of batteries is adjusted to minimize the index of renewable energy spilled, taking into account the chronological demand behavior. The proposed method is evaluated through case studies using a variation of the IEEE Reliability Test System - 1996, which has a high participation of wind power sources, and the results are widely discussed.

**Keywords**— Transmission expansion planning, chronological power flow, renewable sources, energy storage systems, batteries.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma nova metodologia para avaliar a utilização de baterias como alternativa à expansão da transmissão de sistemas com elevada participação de fontes renováveis. Tal metodologia é baseada na adaptação de séries históricas de disponibilidade de energia renovável para representar a operação conjunta da usina com o sistema de armazenamento. A operação de carga e descarga das baterias é ajustada para minimizar o índice de desperdício de energia renovável, levando-se em consideração o comportamento cronológico da demanda. O método proposto é avaliado por meio de estudos de casos utilizando uma variação do sistema IEEE *Reliability Test System* - 1996, a qual apresenta elevada participação de fontes eólicas, e os resultados são amplamente discutidos.

**Palavras-chave**— Planejamento da expansão da transmissão, fluxo de potência cronológico, fontes renováveis, sistema de armazenamento de energia, baterias.

## 1 Introdução

Atualmente, o rápido crescimento e a robusta participação de fontes renováveis na matriz energética contribuem para um maior congestionamento das linhas de transmissão. Isso aumenta a complexidade da operação do sistema e, conseqüentemente, do planejamento da expansão da transmissão (PET), devido à sua natureza imprevisível e volátil. Desta forma, alguns trabalhos têm desenvolvido metodologias que tentam flexibilizar a rede de transmissão na solução do problema PET para minimizar os custos totais do sistema (Rouhani et al., 2014).

O adequado dimensionamento das linhas de transmissão responsáveis por interligar áreas com elevada oferta de fontes renováveis é uma decisão de grande importância no processo do planejamento, já que não considerar a intermitência dessas fontes pode ter grandes implicações financeiras e operacionais. Definir a capacidade das linhas de transmissão com relação à potência nominal instalada da usina pode levar a custos elevados. Assim como fazê-lo, respeitando a média de produção, pode ocasionar o descumprimento das metas de geração renovável e desperdício de energia, aumentando os custos de produção.

Neste contexto, diferentes metodologias, como as apresentadas em (Du et al., 2015), (Moeini-Aghtaie et al., 2012) e (Qiu et al., 2017), têm surgido para considerar a intermitência das fontes renováveis

no PET. Tais metodologias são baseadas em ferramentas probabilísticas (geralmente simulação Monte Carlo ou funções densidade de probabilidade) e algoritmos de otimização capazes de encontrar planos de expansão que proporcionam maior flexibilidade ao sistema de transmissão. Embora relevantes, tais trabalhos se limitam ao atendimento da demanda, não avaliando o desperdício de energia renovável em períodos de elevada oferta.

Nesse sentido, uma nova metodologia de avaliação é apresentada em (Leite da Silva et al., 2012), em que o reforço do sistema de transmissão é feito baseado em indicadores de desempenho que consideram a quantidade de energia renovável desperdiçada. Esse procedimento é feito por meio da combinação de um fluxo de potência cronológico – FPC (Manso et al., 2012) e um algoritmo heurístico construtivo. Contudo, essa metodologia considera unicamente a adição de reforços no sistema de transmissão para conseguir aumentar o aproveitamento de energia renovável e minimizar os índices de desperdício.

Alguns pesquisadores já consideram os sistemas de armazenamento de energia (*Energy Storage System* - ESS) como uma potencial alternativa de solução ao problema PET com elevada participação de fontes renováveis. Trabalhos como os apresentados em (Zhang et al., 2013), (Dehghan e Amjady, 2016) e (Aguado et al., 2017) demonstram sua grande capacidade em contribuir para o aumento da flexibilidade da rede.

Este artigo tem como foco o emprego de sistemas de armazenamento para reduzir o desperdício de energia renovável e, conseqüentemente, minimizar os investimentos na rede de transmissão. Para tal, é proposta uma nova metodologia de solução do problema PET, a qual considera sistemas de armazenamento de energia por baterias, *Battery Energy Storage System(s)* – BESS. A influência do BESS no sistema é representada por meio de adaptações nas séries históricas de capacidade de geração das usinas renováveis. Para a realização dos estudos apresentados é utilizado o sistema teste, com alta participação de renováveis, obtido em (Flávio et al., 2011) a partir de modificações impostas ao IEEE *Reliability Test System – 1996* (Subcommittee on the Application of Probability Methods, 1999).

## 2 Metodologia Proposta

### 2.1 Fluxo de Potência Cronológico

Para avaliar o montante médio de energia renovável não aproveitada durante o ano, é utilizada uma ferramenta denominada fluxo de potência cronológico (FPC) (Manso et al., 2012) que estima o nível de desperdício de energia renovável por meio do índice EWES (*Expected Wind Energy Spilled*). Além do índice de desperdício EWES, a ferramenta FPC também estima o valor esperado das violações nos circuitos que ocorreriam (hipoteticamente) para permitir o total aproveitamento da geração proveniente das fontes renováveis.

A ferramenta FPC utilizada neste trabalho é baseada em um eficiente algoritmo de simulação Monte Carlo não sequencial (SMC-NS) (Flávio, 2015). Cabe destacar que apenas a geração eólica será considerada. Porém, qualquer outra fonte renovável intermitente (e.g., solar fotovoltaica) pode ser incluída. Deste modo, o desperdício de energia renovável provocado por limitações da transmissão ( $EWES_T$ ) é calculado por meio de (1).

$$EWES_T = \frac{8760}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} WES_T^x \quad (1)$$

em que  $WES_T^x$  é a energia eólica desperdiçada em função das limitações impostas pela rede de transmissão no estado amostrado  $x$ .

### 2.2 Modelagem do BESS

Para evitar modificações estruturais nos programas de fluxo de potência, neste trabalho o elemento BESS é modelado de forma acoplada à usina renovável. O comportamento do conjunto S-BESS (*Station-BESS*) é representado por meio de séries históricas de capacidade,  $P_{S-BESS}$ , expressas em por unidade (pu) da capacidade da usina e obtidas a partir dos parâmetros do BESS e das séries de capacidade da usina eólica ( $P_S$ ). Na composição de  $P_{S-BESS}$ , a operação de carga e descarga da bateria visa minimizar o desperdício de energia renovável. Adicionalmente, as séries  $P_{S-BESS}$  e  $P_S$  podem ser subtraídas do perfil cronológico da demanda ( $P_L$ ) para fornecerem séries de potência

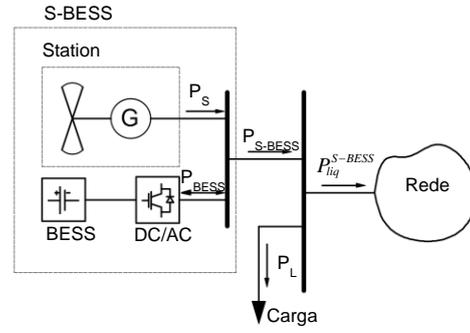


Figura 1. Modelagem do conjunto S-BESS.

líquida disponível na barra de geração, sem ( $P_{liq}^S$ ) e com o BESS ( $P_{liq}^{S-BESS}$ ).

Os parâmetros do sistema armazenador considerados para a obtenção das novas séries históricas de cada S-BESS são:

- $E_{BESS}^{nom}$  – Capacidade de armazenamento nominal: define a máxima energia acumulada pelo BESS;
- $P_{BESS}^{nom}$  – Potência nominal: define o limite de carregamento ou descarregamento;
- $SOC$  – Estado de carga (*State of Charge*), limitado por:

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (2)$$

em que  $SOC_{min}$  é o limite mínimo de armazenamento, definido como um valor em pu da  $E_{BESS}^{nom}$  e  $SOC_{max}$  é o limite de máximo armazenamento, em geral, adotado igual a 1,0 pu;

- $CT_{BESS}$  – Limiar de carregamento (*Charge Threshold*): define a potência líquida disponível na barra, a partir da qual o BESS inicia o processo de carregamento, dado em pu da capacidade da usina renovável;
- $DT_{BESS}$  – Limiar de descarregamento (*Discharge Threshold*): define a potência líquida disponível a partir da qual o BESS inicia o processo de descarregamento, dado em pu da capacidade da usina renovável;
- $ST_{S-BESS}$  – Limiar de fornecimento (*Supply Threshold*) do conjunto S-BESS: define a máxima potência que pode ser fornecida pelo conjunto S-BESS, durante o descarregamento do BESS;
- $N_y$  – Vida útil média, dada em anos.

### 2.3 Operação do S-BESS

De acordo com o FPC apresentado em (Manso et al., 2012) e (Flávio, 2015), o desperdício de energia renovável é contabilizado quando a potência disponível na usina é maior que o montante despachado pela mesma, considerando um fluxo de potência ótimo. Isto ocorre quando a potência líquida disponível,  $P_{liq}^S$  (i.e., a potência na usina menos o consumo na barra de conexão), ultrapassa os limites de transmissão dos circuitos conectados a esta barra. Porém, em momentos de elevada oferta renovável e de baixa demanda, pode haver desperdício, mesmo em situa-

ções de potência líquida disponível abaixo dos limites de transmissão. Nesse sentido, é importante monitorar para quais valores de potência líquida disponível, em pu da capacidade instalada da usina renovável, ocorre desperdício,  $P_{liq}^{EWES}$ . Tais valores de potência podem ser obtidos pela ferramenta FPC, por meio da SMC-NS.

Para garantir que o excedente de potência disponível na usina seja absorvido pelo armazenador de energia, são ajustados limiares operativos de carregamento e descarregamento, conforme Figura 2. Note que a área hachurada representa a energia armazenada ou despachada pelo BESS. Desta forma, a série  $P_{liq}^S$  é convertida na série de potência líquida disponível do conjunto S-BESS,  $P_{liq}^{S-BESS}$ .

Quando  $P_{liq}^S$  encontra-se acima do  $CT_{BESS}$  e dentro dos limites do estado de carga, o BESS carrega a energia equivalente à diferença entre  $P_{liq}^S$  e o  $CT_{BESS}$ . Isto geralmente ocorre em cenários de muito vento e demanda baixa. Dessa forma tenta-se manter a potência líquida disponível abaixo do valor que pode provocar desperdício de energia. Quando  $P_{liq}^S$  encontra-se dentro do intervalo compreendido entre  $CT_{BESS}$  e  $DT_{BESS}$ , o BESS não deve atuar. Isso permite minimizar os ciclos de descarga do armazenador de energia, aumentando sua vida útil. Quando  $P_{liq}^S$  encontra-se abaixo do  $DT_{BESS}$  e dentro dos limites do estado de carga, o BESS descarrega a energia equivalente à diferença entre  $P_{liq}^S$  e o  $ST_{S-BESS}$ . Um adequado ajuste do processo de descarga do BESS deve priorizar sua disponibilidade para o processo de carregamento.

Note que a atuação do BESS está sujeita à sua capacidade de armazenamento. Caso o  $SOC$  atinja o  $SOC_{max}$ , poderá ocorrer desperdício de energia renovável. Por outro lado, caso o BESS atinja o  $SOC_{min}$ , ele não poderá contribuir para o atendimento da demanda.

## 2.4 Dimensionamento do BESS

Os parâmetros a serem dimensionados são: a potência nominal,  $P_{BESS}^{nom}$ ; os limiares de carregamento e descarregamento,  $CT_{BESS}$  e  $DT_{BESS}$ , respectivamente; a capacidade de armazenamento nominal,  $E_{BESS}^{nom}$ ; e o limiar de fornecimento do conjunto,  $ST_{S-BESS}$ .

### 2.4.1 Potência nominal e limiar de carregamento

Os parâmetros  $P_{BESS}^{nom}$  e  $CT_{BESS}$  são definidos em função do conjunto de valores de potência líquida disponível que provocam desperdício de energia renovável,  $P_{liq}^{EWES}$ , obtidos por meio do FPC. Para evitar o superdimensionamento,  $P_{BESS}$  é definida considerando certa probabilidade de cobertura (*Coverage Probability*) das potências líquidas que provocam desperdício,  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$ . Uma vez escolhida a

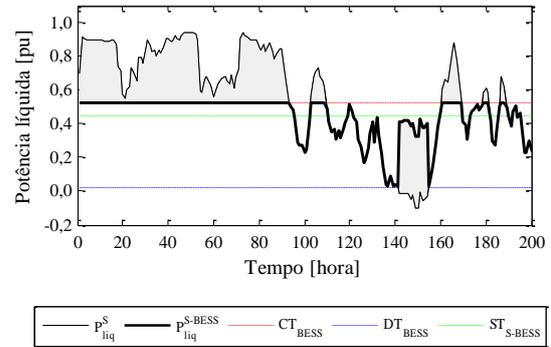


Figura 2. Operação do conjunto S-BESS.

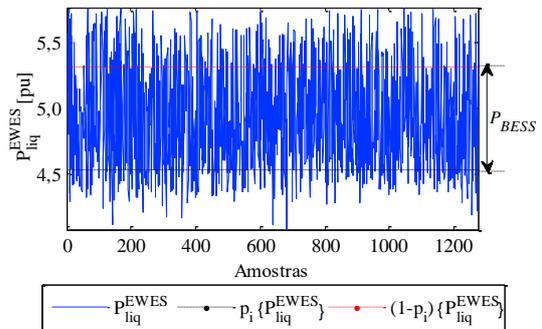


Figura 3. Dimensionamento da potência do BESS.

$CP_{P_{liq}^{EWES}}$ , obtém-se o percentil,  $p_i$ , que define o limite unilateral inferior de  $P_{liq}^{EWES}$ , conforme a Eq. (3).

$$p_i = \frac{1 - CP_{P_{liq}^{EWES}}}{2} \times 100 \quad (3)$$

A potência requerida para carregamento do BESS é então obtida conforme Equação (4), em que  $(1 - p_i) \{P_{liq}^{EWES}\}$  representa o limite unilateral superior para potência líquida disponível na barra, para o qual o carregamento será possível. Ou seja, para valores de potência líquida superiores não será armazenada energia e ocorrerá desperdício. Porém, trata-se de valores pouco prováveis.

$$P_{BESS} = (1 - p_i) \{P_{liq}^{EWES}\} - p_i \{P_{liq}^{EWES}\} \quad (4)$$

Em seguida, a potência calculada é ajustada para um valor comercial do BESS, conforme Equação (5).

$$P_{BESS}^{nom} = f(P_{BESS}) \quad (5)$$

em que  $f$  é uma função de arredondamento que ajusta os valores calculados de  $P_{BESS}$  a valores típicos do BESS comercial.

O limiar de carregamento é obtido conforme a Equação (6). A Figura 3 apresenta um exemplo do dimensionamento da potência e do limiar de carregamento do BESS.

$$CT_{BESS} = p_i \{P_{liq}^{EWES}\} \quad (6)$$

## 2.4.2 Capacidade de armazenamento e limiar de descarregamento

O limiar de descarregamento deve ser definido para um valor abaixo do limiar de carregamento, a fim de evitar oscilações nos ciclos de carga/descarga das baterias, prolongando a vida útil do BESS.

A definição dos limiares operativos (especialmente o  $DT_{BESS}$ ) influencia na definição da capacidade de armazenamento do BESS. Portanto, é apresentado a seguir um algoritmo para obtenção conjunta do limiar do descarregamento e da energia acumulada ao longo do tempo ( $E_a$ ):

i) Iniciar o contador de iterações em  $k=1$  e igualar o limiar de descarregamento ao limiar de fornecimento do S-BESS,  $DT_{BESS} = ST_{S-BESS}$ .

ii) Simular cronologicamente, ao longo de  $N_s$  séries (anos) de  $P_{liq}^S$  a operação de carregamento e descarregamento do BESS e estimar a energia acumulada,  $E_a^k(h)$ , respeitando  $P_{BESS}^{nom}$ .

iii) Encontrar o máximo montante de energia acumulada e o intervalo  $[h_i, h_f]$  imediatamente posterior, em que a  $E_a^k(h_i) = 0$ . Calcular a região de possibilidade de descarga, posterior ao acumulado máximo,  $R_d^k(h)$ , respeitando a potência nominal do BESS,  $P_{BESS}^{nom}$ .

A Figura 4 apresenta um exemplo do cálculo de  $R_d^k(h)$  na primeira iteração para uma série histórica de potência líquida de período,  $T$ .

iv) Se a região de descarga da iteração  $k$  é menor ou igual à região de descarga da iteração  $k-1$ , faça  $k=k+1$ , calcule um novo limiar de descarregamento, conforme Equação (7), e volte ao passo ii; caso contrário pare.

$$DT_{BESS} = CT_{BESS} - (k \times \xi) \quad (7)$$

onde  $k$  é o número da iteração e  $\xi$  é uma constante de decréscimo do limiar de descarregamento.

Terminado o algoritmo, deve-se calcular a capacidade de energia requerida pelo BESS,  $E_{BESS}$ , considerando seus limites de estado de carga e certa probabilidade de cobertura da energia acumulada,  $CP_{E_a}$ , definida pelo planejador. Uma vez escolhida a  $CP_{E_a}$ , obtém-se o percentil,  $p_j$ , que define o limite unilateral superior de  $E_a$ , conforme Equação (8). Desta forma, obtém-se  $E_{BESS}$ , conforme Equação (9), em que  $p_j\{E_a\}$  define a capacidade de armazenamento útil do BESS.

$$p_j = CP_{E_a} \times 100 \quad (8)$$

$$E_{BESS} = \frac{p_j\{E_a\}}{SOC_{max} - SOC_{min}} \quad (9)$$

A Figura 5 apresenta um exemplo da obtenção de  $E_{BESS}$ . Em seguida, o valor de capacidade de armazenamento é ajustado para um valor comercial, conforme Equação (10).

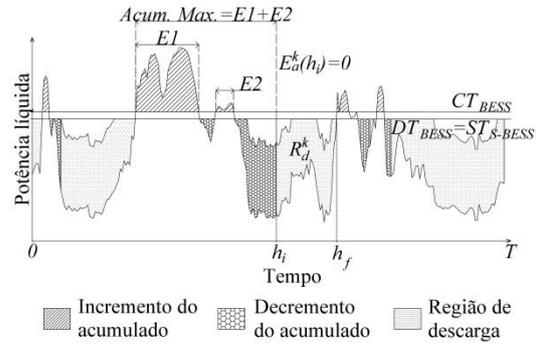


Figura 4. Cálculo da região de descarga,  $R_d^k$ .

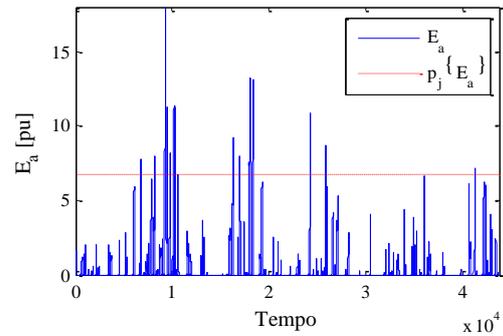


Figura 5. Energia armazenada ao longo do tempo.

$$E_{BESS}^{nom} = g(E_{BESS}) \quad (10)$$

sendo  $g$  uma função que ajusta os valores calculados de  $E_{BESS}$  a valores comerciais de BESS.

## 2.4.3 Limiar de fornecimento do S-BESS

Para evitar o desperdício de energia no processo de descarregamento dos armazenadores, o fornecimento de potência do conjunto S-BESS associado a cada barra de geração eólica deve ser delimitado. Para isso, o limiar de fornecimento do conjunto S-BESS é definido como sendo o valor mínimo de potência líquida que provoca desperdício de energia renovável, obtido pela ferramenta FPC, dado em pu da capacidade instalada da usina renovável da barra em questão, conforme Equação (11).

$$ST_{S-BESS} = \text{Min}[P_{liq}^{EWES}] \quad (11)$$

## 2.5 Inserção do S-BESS no PET

Levando em consideração as seções anteriores, são descritos, a seguir, os passos utilizados para inserir o armazenamento de energia no planejamento da transmissão a partir do modelo S-BESS:

i) Ler as séries históricas de geração,  $P_S$ , e de perfil de demanda,  $P_L$ ;

ii) Obter  $P_{liq}^{EWES}$  e as respectivas séries de potência líquida nas barras de geração renovável,  $P_{liq}^S$ , por meio da ferramenta FPC, conforme (Leite da Silva et al., 2012);

iii) Ler os parâmetros do BESS comercial (limites do estado de carga, capacidades de potência e de energia);

iv) Definir os limiares operativos (carregamento e descarregamento) e dimensionar a capacidade do BESS associado a cada barra de geração renovável;

v) Obter as novas séries de capacidade de geração, associadas à operação conjunta S-BESS;

vi) Calcular os índices de desperdício de energia renovável,  $EWES_T$ , com as séries obtidas em (v);

vii) Fazer um estudo de custo benefício, para cada BESS dimensionado em (iv), em relação à receita recuperada pelo não desperdício de energia renovável, conforme Equação (12):

$$RCB_{BESS} = \frac{(EWES_T - EWES_T^{BESS}) \times \Delta C_{Prod}}{C_{Inv\_Anual_{BESS}}} \quad (12)$$

em que “ $\Delta C_{Prod}$ ” é a diferença média unitária entre o custo de produção de uma unidade térmica e o custo de uma unidade renovável, dado em US\$/MWh;  $EWES_T$  e  $EWES_T^{BESS}$  correspondem ao desperdício renovável sem e com armazenamento de energia, respectivamente; e “ $C_{Inv\_Anual_{BESS}}$ ” é o custo anual de investimento do BESS, considerando sua vida útil, dado conforme Equação (13).

$$C_{Inv\_Anual_{BESS}} = UC \times E_{BESS}^{nom} \frac{i(1+i)^{Ny}}{(1+i)^{Ny} - 1} \quad (13)$$

sendo  $UC$  o custo de investimento unitário do BESS, dado em US\$/kWh.

### 3 Aplicação

A metodologia é aplicada no sistema RTS96-REN, que é uma versão modificada do sistema teste RTS96 (Subcommittee on the Application of Probability Methods, 1999). Neste sistema, algumas unidades de geração térmica são substituídas por renováveis, de tal forma que é obtido um sistema com elevada participação de fontes renováveis preservando a confiabilidade do sistema original. Para representar a variabilidade das fontes renováveis são utilizados 5 anos de séries históricas reais, com dados horários para as eólicas e mensais para as hidroelétricas, conforme apresentado em (Manso et al., 2012).

Para avaliar a viabilidade econômica da adição de BESS no sistema, é considerada uma taxa de desconto,  $i$ , de 10%; uma diferença no custo de produção de térmica por eólica de 50US\$/MWh; um ciclo de vida útil média do BESS equivalente a 15 anos e custo de investimento unitário de 267 US\$/kWh, correspondente ao menor custo encontrado para baterias de lítio (International Renewable Energy Agency - IRENA, 2012).

A metodologia é exemplificada com um sistema de armazenamento comercializado pela companhia estadunidense Tesla Inc. (Tesla Inc., n.d.), cujas especificações são apresentadas na Tabela 1. Vale salientar que como a profundidade de descarga é de 80%, os limites do SOC devem ser de 20% e 100% da capacidade nominal do BESS.

Tabela 1. Especificações do BESS comercial.

Tensão (CA)	380 a 480 V
Potência (CA)	50 kW
Capacidade energética (CA)	210 kWh
Eficiência do sistema (CA)	89%
Profundidade de descarga	80%

Tabela 2. Limiar de fornecimento do S-BESS – Caso 1.

Barra	101	115	201	215	301	315
$ST_{S-BESS}$ [pu]	0,52	1,00	0,90	1,00	0,57	1,00

Tabela 3. BESS para  $CP_{Ea} = 1,0$  e variando  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  – Caso 1.

$CP_{P_{liq}^{EWES}}$	$P_{BESS}^{nom}$ [MW]			$E_{BESS}^{nom}$ [GWh]	$EWES_T^{BESS}$ [GWh/ano]	RCB
	101	201	301			
1,0	338	4	266	50,39	0,85	0,0036
0,9	246	4	175	32,31	15,55	0,0050
0,8	218	4	149	29,68	28,61	0,0048
0,7	185	3	128	27,30	43,09	0,0045
0,6	157	3	112	25,78	53,04	0,0042

Serão considerados 2 estudos de caso para inserção de armazenadores de energia no sistema RTS96REN, apresentados a seguir.

#### 3.1 Caso 1 – Configuração base

Este caso trata do sistema RTS96REN (Manso et al., 2012) sem adição de reforços na rede de transmissão. Primeiramente é executada a ferramenta FPC, da qual se obtêm os índices de desperdício e os valores de potências líquidas disponíveis que provocam desperdício, conjunto  $\{P_{liq}^{EWES}\}$ . Esta configuração apresenta índice  $EWES_T=129,10$  GWh/ano.

Por meio de  $\{P_{liq}^{EWES}\}$  são obtidos os limiares de fornecimento do S-BESS de cada barra, apresentados na Tabela 2. Ressalta-se que  $ST_{S-BESS}=1$  pu indica usinas que não provocam desperdício de energia. Assim, de acordo com a Tabela 2, apenas três barras provocam desperdício de energia renovável no sistema e, portanto, requerem sistema de armazenamento de energia. As barras 101 e 301 apresentam limiares mais baixos em relação à barra 201, pois provocam maior desperdício.

Considerando os resultados obtidos na Tabela 2, são dimensionados BESS apenas para as barras 101, 201 e 301. Inicialmente, o dimensionamento do BESS é realizado considerando a máxima energia acumulada,  $CP_{Ea}=1$ , obtida por meio de simulação da operação do BESS para diferentes probabilidades de cobertura das potências líquidas que provocam desperdício,  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$ . Os resultados são apresenta-

dos na Tabela 3, sendo a variação da RCB ilustrada pela Figura 6. Verifica-se que a capacidade de armazenamento do BESS da barra 201 é significativamente menor, demonstrando que a usina desta barra pouco contribui para o índice de desperdício.

Tabela 4. Limiares operativos do BESS – Caso 1.

Barra	$CT_{BESS}$ [pu]	$DT_{BESS}$ [pu]
101	0,60	0,47
201	0,90	0,20
301	0,67	0,46

Tabela 5. BESS para  $CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,9$  e variando  $CP_{E_a}$  – Caso 1.

$CP_{E_a}$	$E_{BESS}^{nom}$ [GWh]	$EWES_T^{BESS}$ [GWh/ano]	RCB	Custo viável [US\$/kWh]
1,0	32,31	15,54	0,0050	1,34
0,9	13,49	25,43	0,0109	2,92
0,8	9,42	36,31	0,0140	3,75
0,6	5,07	54,60	0,0209	5,59
0,4	3,38	65,52	0,0268	7,15

Conforme Figura 6, o dimensionamento do BESS considerando  $CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,9$  foi a alternativa mais atrativa para esta configuração do sistema. A Tabela 4 apresenta os limiares operativos (carregamento e descarregamento) para esta alternativa.

Conforme Tabela 3, verifica-se que para esta configuração o índice  $EWES_T$  reduziu de 129,10 para 15,55 GWh/ano. No entanto, a capacidade do BESS,  $E_{BESS}^{nom}$ , encontra-se sobre dimensionada em função da consideração inicial de atender ao máximo montante acumulado de energia. Nota-se que todas as alternativas apresentam RCBs muito abaixo de 1.

Em seguida, são realizadas novas simulações, fixando a  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  em 0,9 e considerando diferentes

$CP_{E_a}$ . Os resultados são apresentados na Tabela 5, sendo a variação da RCB ilustrada graficamente na Figura 7. Verifica-se que a instalação de BESS com objetivo de minimizar completamente o desperdício é a alternativa que apresenta menor RCB, pois tanto a  $P_{liq}^{EWES}$ , como a  $E_a$ , apresentam alguns valores pouco prováveis, em função da variabilidade das fontes eólicas, que não justificam ser considerados. Por outro lado, à medida que são considerados estados mais prováveis, a RCB vai aumentando e o BESS pode se tornar competitivo.

De acordo com os resultados da Tabela 5, os custos viáveis para utilização dos BESS são bem inferiores a 267 US\$/kWh, correspondente ao menor custo encontrado para baterias de lítio. Por outro lado, a identificação de nichos de mercado para comercialização de baterias em larga escala, associado a novas tecnologias, pode reduzir consideravelmente o custo no futuro.

Caso os armazenadores atinjam custos dentro daqueles encontrados na Tabela 5, seu uso começa a ficar atrativo. Por exemplo, se o custo do BESS cair para 5 US\$/kWh, a alternativa considerando  $CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,9$  e  $CP_{E_a} = 0,6$  seria viável, com RCB de 1,12.

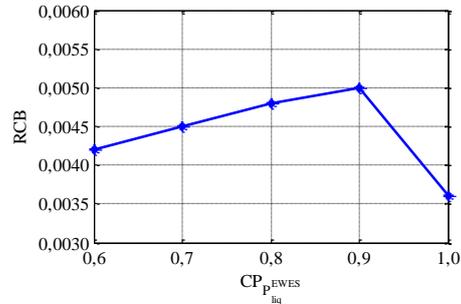


Figura 6. RCB para  $CP_{E_a} = 1$  e variando  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  – Caso 1.

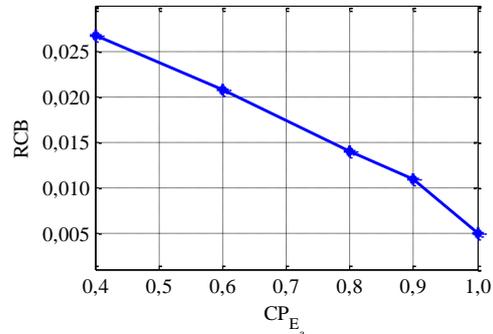


Figura 7. RCB para  $CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,9$  e variando  $CP_{E_a}$  – Caso 1.

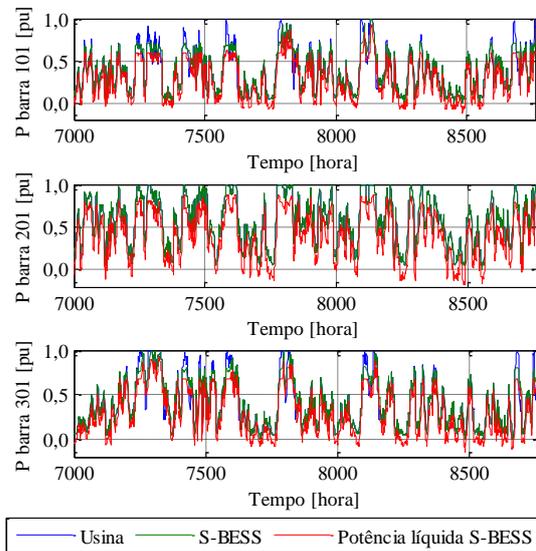


Figura 8. Séries de geração com e sem BESS - Caso 1.

Considerando essa alternativa, a Figura 8 ilustra as séries de disponibilidade de potência nas barras de geração eólica antes (linha azul) e depois (linha verde) da inserção do BESS, durante um intervalo de tempo. Nota-se que os picos azuis, resultantes após sobrepôr as duas séries, representam os montantes de potência que provocam desperdício de energia renovável. Na série com armazenamento de energia, esses montantes de potência são armazenados pelos BESS e aproveitados nos períodos de menor disponibilidade de vento. Em vermelho, tem-se a série  $P_{liq}^{S-BESS}$  que, conforme sua definição, fornece potência líquida (geração menos carga) na barra após a inserção do BESS.

Tabela 6. Limiar de fornecimento do S-BESS – Caso 2.

Barra	101	115	201	2015	301	315
$ST_{S-BESS}$ [pu]	1,00	1,00	0,81	1,00	0,83	1,00

Tabela 7. BESS para  $CP_{E_a} = 1$  e variando  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  – Caso 2.

$CP_{P_{liq}^{EWES}}$	$P_{BESS}^{nom}$ [MW]		$E_{BESS}^{nom}$ [GWh]	$EWES_T^{BESS}$ [GWh/ano]	RCB
	201	301			
1,0	41	71	4,20	0,00	0,0009
0,9	37	46	3,10	0,58	0,0010
0,8	23	38	2,29	0,96	0,0012
0,7	19	32	1,84	1,21	0,0013
0,6	12	27	1,51	1,49	0,0013
0,5	9	21	1,42	1,74	0,0011

Tabela 8. BESS para  $CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,6$  e variando  $CP_{E_a}$  - Caso 2.

$CP_{E_a}$	$E_{BESS}^{nom}$ [GWh]	$EWES_T^{BESS}$ [GWh/ano]	RCB	Custo viável [US\$/kWh]
1,0	1,51	1,49	0,0013	0,34
0,9	1,04	1,50	0,0018	0,48
0,8	0,62	1,66	0,0026	0,71
0,6	0,42	1,81	0,0034	0,92
0,4	0,16	2,33	0,0045	1,19

### 3.2 Caso 2 – Configuração reforçada

Trata-se de uma modificação do Caso 1, em que o sistema de transmissão é reforçado com o plano de expansão proposto pela metodologia apresentada em (Leite da Silva et al., 2012). Esse plano de expansão consiste na adição de 4 reforços individuais nos ramos que ligam as barras: 101-102, 301-302, 101-105 e 105-110. Com essa configuração, os índices de desperdício de energia são avaliados por meio da ferramenta FPC, obtendo um valor de 2,82 GWh/ano para o índice  $EWES_T$ . Esse valor corresponde a um desperdício residual de energia que é mantido no sistema de transmissão mesmo após inserir os reforços que apresentam viabilidade econômica.

Os limiares de fornecimento do S-BESS de cada barra são apresentados na Tabela 6. Nota-se que apenas as barras 201 e 301 apresentam desperdício.

Na Tabela 7 são apresentadas as alternativas de dimensionamento do BESS para as barras que apresentam desperdício, considerando  $CP_{E_a} = 1$  e diferentes  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$ . Observa-se que a capacidade de armazenamento requerida pelo sistema é baixa em relação ao Caso 1. Por outro lado, a energia que se pode recuperar também. Portanto, essa configuração apresenta RCBs ainda menores que no caso anterior.

Conforme Figura 9, as alternativas mais atrativas para esta configuração foram para  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  de 0,6 e 0,7. Em seguida, são realizadas novas simulações,

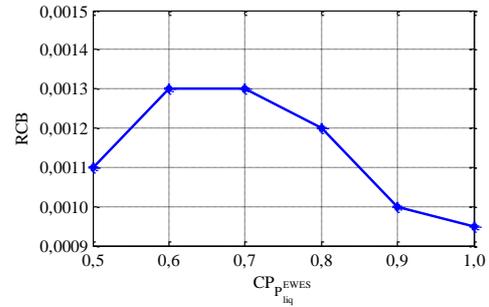


Figura 9. RCB para  $CP_{E_a} = 1$  e variando  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  – Caso 2.

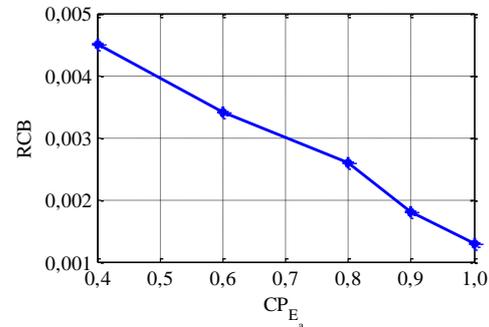


Figura 10. RCB para  $CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,6$  e variando  $CP_{E_a}$  – Caso 2.

Tabela 9. Análise de sensibilidade às incertezas.

$\sigma$ [%]	$EWES_T$ [GWh/ano]	$EWES_T^{BESS}$ [GWh/ano]
0	129,10	54,60
2	129,75	54,14
4	131,91	53,74
6	134,26	53,45
8	140,73	53,14
10	146,81	52,68

fixando a  $CP_{P_{liq}^{EWES}}$  em 0,6 e considerando diferentes

$CP_{E_a}$ . Os resultados são apresentados na Tabela 8, sendo a variação da RCB ilustrada na Figura 10.

Nesta configuração, os custos viáveis para investimento em baterias são ainda menores. Nenhuma alternativa é viável, nem para o custo hipotético de 5 US\$/kWh, utilizado no caso anterior. Portanto, em função de seu alto custo, os sistemas de armazenamento de energia por baterias não se mostram economicamente competitivos para minimizar o desperdício residual, frente à inserção de reforços na transmissão.

### 3.4 Análise de sensibilidade às incertezas

Para avaliar a robustez do conjunto S-BESS foram consideradas incertezas nas séries de produção eólica por meio de uma distribuição normal (com média zero e desvio padrão  $\sigma$ ), visando simular os erros na previsão das condições de vento. A capacidade de armazenamento do BESS é mantida constante. Essa avaliação é realizada para a configuração base do sistema e para a alternativa do Caso 1,

$CP_{P_{liq}^{EWES}} = 0,9$  e  $CP_{Ea} = 0,6$ , considerada viável para o custo de BESS sugerido. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Verifica-se que com a inserção do BESS, o desperdício de energia renovável se mantém dentro do coeficiente de incerteza da SMC-NS (3%), mesmo inserindo incertezas nas séries de potência eólica. Diferentemente dos resultados obtidos para a configuração base, os erros de previsão não interferem nos índices de desperdício. Tais resultados demonstram que o sistema de armazenamento é eficaz para filtrar os eventuais erros cometidos na previsão de vento, mesmo quando não atendem ao objetivo de mínimo desperdício. Neste caso, os sistemas de armazenamento podem ser úteis para o planejamento dos sistemas elétricos no nível da operação, considerando, por exemplo, garantir viabilidade técnica às implantações de usinas renováveis.

#### 4 Conclusão

A principal contribuição da metodologia proposta é a incorporação do armazenamento de energia no planejamento da expansão da transmissão, tratando o problema do desperdício de energia renovável. A modelagem adotada para o sistema armazenador permite avaliações rápidas a respeito da contribuição do armazenamento de energia, para melhor aproveitamento de fontes renováveis sem requerer modificações na ferramenta computacional utilizada, desde que essa já trabalhe com séries históricas.

O uso de baterias em conjunto com as usinas permite aumentar a flexibilidade no despacho de energia renovável, minimizando o desperdício de energia e diminuindo a sensibilidade do despacho frente às incertezas. Os resultados obtidos demonstram que os sistemas de armazenamento podem se tornar uma alternativa de solução para o gerenciamento da energia renovável, principalmente nos períodos de elevada oferta, frente à adição de reforços no sistema de transmissão.

Embora, atualmente os altos custos dos armazenadores de energia limitem potenciais aplicações nos sistemas de potência, espera-se que o contínuo desenvolvimento desta tecnologia gere uma futura diminuição nos seus custos de investimento. O emprego do BESS não apenas permitirá reduzir o desperdício de energia renovável, mas também propiciará uma mínima regulação para a produção proveniente de fontes renováveis intermitentes, tornando mais viável/estável a ampliação de sua participação na matriz energética.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem às agências CAPES, CNPq, FAPEMIG e ao DEE da PUC-Rio pelo apoio.

#### Referências Bibliográficas

Aguado, J.A., de la Torre, S. e Triviño, A. (2017). Battery energy storage systems in transmission network expansion planning. *Electric Power Systems Research*, 145(1), pp. 63-72.

- Dehghan, S. e Amjady, N. (2016). Robust transmission and energy storage expansion planning in wind farm - integrated power systems considering transmission switching. *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, 7(2), pp. 765-774.
- Du, P. et al. (2015). Probabilistic - based available transfer capability assessment considering existing and future wind generation resources. *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, 6(4), pp. 1263-1271.
- Fathima, A.H. e Palanisamy, K. (2014). Battery energy storage applications in wind integrated systems – a review. *International Conf. on Smart Electric Grid - ISEG*, Guntur, India.
- Flávio, S.A. (2015). *Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão com Elevada Participação de Fontes Renováveis*. Tese de Doutorado, Itajubá, MG: Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.
- Flávio, S.A. et al. (2011). Reliability of generation and transmission systems with large penetration of renewable sources. *Cigré Int. Symp. - Assessing and Improving Power System Security, Reliability and Performance in Light of Changing Energy Sources*, Recife, Brasil.
- International renewable energy agency (IRENA), 2012. *Electricity Storage and Renewables for Island Power*, Bonn, Alemanha.
- Leite da Silva, A.M. et al. (2012). Chronological Power Flow for Planning Transmission Systems Considering Intermittent Sources. *IEEE Trans. on Power Systems*, 27(4), pp. 2314-2322.
- Manso, A.F. et al. (2012). Avaliação do Desperdício de Energia Eólica Utilizando Fluxo de Potência Cronológico. *XIX CBA - Congresso Brasileiro de Automática*. Campina Grande.
- Moeini-Aghtaie, M., Abbaspour, A. e Fotuhi-Firuzabad, M. (2012). Incorporating large scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning — part I: theory and algorithm. *IEEE Trans. on Power Systems*, 27(3), pp. 1585-1593.
- Qiu, J., Zhao, J. e Dong, Z.Y. (2017). Probabilistic transmission expansion planning for increasing wind power penetration. *IET Renewable Power Generation*, 11(6), pp. 837-845.
- Rouhani, A., Hosseini, S.H. e Raoofat, M. (2014). Composite generation and transmission expansion planning considering distributed generation. *Elect. Power and Energy Syst.*, 62, pp. 792-805.
- Subcommittee on the Application of Probability Methods IEEE (1999). The IEEE Reliability Test System - 1996. *IEEE Trans. on Power Systems*, 14(3), pp. 1010-1020.
- Tesla, Inc., n.d. *TESLA*. [Online] Available at: <https://www.tesla.com> [Accessed Oct. 2017].
- Zhang, F., Hu, Z. e Song, Y. (2013). Mixed-integer linear model for transmission expansion planning with line losses and energy storage systems. *IET Gen., Trans. & Distribution*, 7(8), pp. 919-928.