



Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

Avaliação do Comportamento Dinâmico do Sistema Elétrico Isolado de Roraima com Penetração de Fontes Renováveis Considerando Dispositivos de Armazenamento de Energia

**IGOR DE OLIVEIRA BARRETO (1); ARMANDO MARTINS LEITE DA SILVA (2);
JORGE LUIZ DE ARAUJO JARDIM (3);
ONS (1); PUC-Rio (2); HPPA (3);**

RESUMO

Este trabalho avalia o comportamento dinâmico do sistema elétrico do estado de Roraima, através de uma metodologia desenvolvida para quantificar a penetração de energia renovável intermitente em sistemas isolados. É considerada a utilização de dispositivos de armazenamento de energia (Energy Storage Devices – ESD), observando as vantagens que tais dispositivos podem acarretar nesse sistema. Nas análises, foi possível constatar que a utilização de armazenamento pode promover um aumento significativo na penetração de usinas renováveis intermitentes, como eólica e fotovoltaica.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de potência isolado, armazenamento de energia, controle de frequência, fontes renováveis intermitentes.

1.0 - INTRODUÇÃO

A integração de fontes renováveis intermitentes, como geração eólica e fotovoltaica, é uma realidade dentro da matriz energética brasileira. A expectativa de crescimento dessas fontes se mantém na política energética do país, dada a pressão socioambiental para substituição de fontes baseadas em combustíveis fósseis e usinas hidrelétricas que necessitam de grandes reservatórios. Em termos de planejamento da operação elétrica, o aumento da penetração de fontes de energia intermitentes diminui a flexibilidade operativa, podendo colocar em risco a segurança e a qualidade do suprimento de energia dos sistemas elétricos de potência.

A substituição de geradores síncronos convencionais por fontes renováveis intermitentes vem sendo amplamente debatida no setor elétrico e tem como consequência a redução da inércia equivalente do sistema, provocando uma diminuição da capacidade de regulação primária e aumento das taxas de variação de frequência na rede. Os dispositivos de armazenamento de energia (Energy Storage Devices – ESD) surgem como uma alternativa viável para contornar essas dificuldades. Projetos de pesquisa impulsionaram o desenvolvimento dessa tecnologia, resultando em um progresso tecnológico significativo nos últimos anos, tornando economicamente viáveis diversas aplicações em sistemas de potência [1]-[7]. O comportamento de ESD na dinâmica de sistemas isolados e no reestabelecimento de energia também deve ser avaliado como uma alternativa de planejamento e operação de sistemas elétricos [8]-[11].

O sistema elétrico do estado de Roraima é predominantemente atendido por um circuito simples de 230 kV oriundo da interligação Brasil – Venezuela, e o restante por pequenas usinas térmicas locais movidas a diesel. A fragilidade dessa interligação expõe toda a carga do estado que vivenciou diversos blecautes nos últimos anos. Atualmente, por questões governamentais, esse sistema elétrico opera de modo isolado do Sistema Interligado Nacional (SIN), dependendo apenas da geração térmica local para atendimento à carga. Soluções utilizando ESD podem ser

aplicadas no sentido de permitir aumento na participação de fontes renováveis de forma segura e robusta, e também, aumentar a eficiência econômica desse subsistema elétrico. Entretanto, não se sabe qual o montante de penetração dessas novas fontes renováveis e qual seria o melhor dimensionamento de ESD que equilibrasse a relação custo-benefício e desempenho dinâmico.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para avaliar o comportamento dinâmico do sistema elétrico isolado do estado de Roraima, considerando a penetração de energia renovável intermitente aliada ao uso de ESD, observando as vantagens que tais dispositivos podem acarretar nesse sistema.

2.0 - SISTEMA ISOLADO DE RORAIMA

O estado de Roraima é predominantemente atendido por um circuito simples de 230 kV oriundo da interligação Brasil – Venezuela até chegar à capital Boa Vista e de pequenas usinas térmicas à óleo diesel. Além disso, um sistema de subtransmissão em 69 kV atende todo o território estadual. A fragilidade dessa interligação expõe toda a carga do estado que vivenciou diversos blecautes nos últimos anos. A Figura 1 apresenta o diagrama geoeletrico do estado de Roraima.

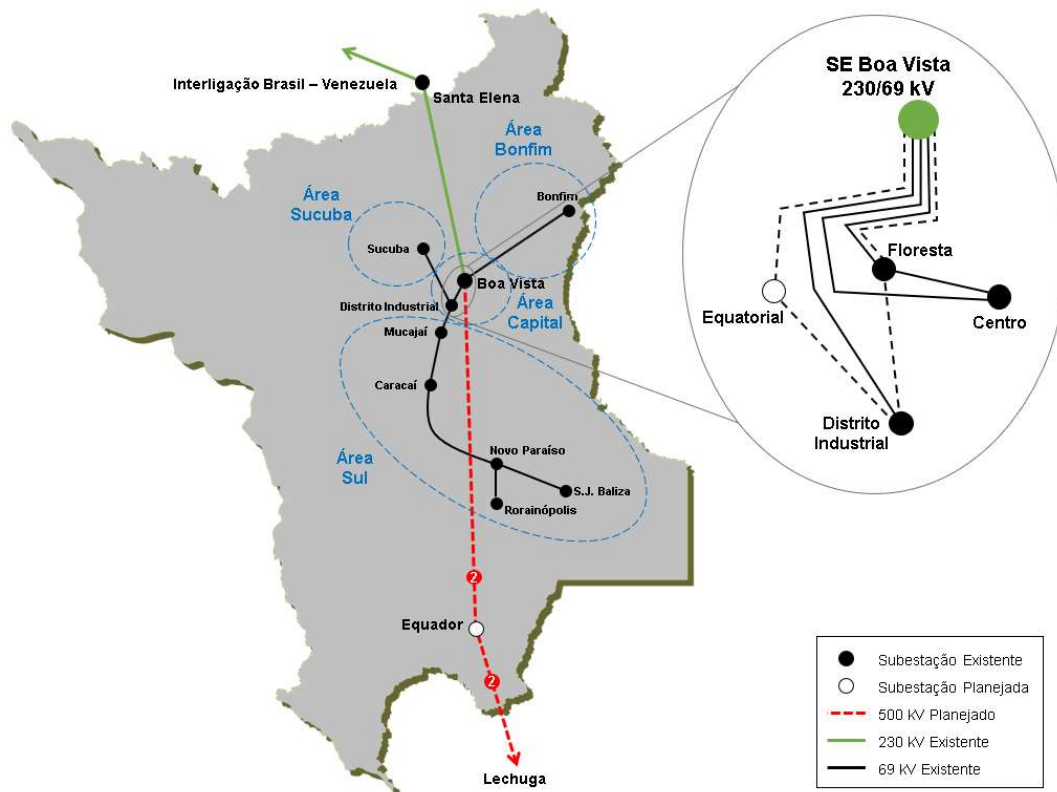


Figura 1 – Diagrama geoeletrico do estado de Roraima.

Por questões políticas e econômicas, o governo da Venezuela interrompeu o fornecimento de energia para o Brasil solicitando o desligamento da interligação. Com isso, foi determinado pelo Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) que o estado de Roraima seria operado de maneira isolada, atendida somente pelo parque gerador térmico local. Esta decisão, por si só, não eliminou as interrupções completas de carga neste sistema.

Em fevereiro de 2019, o Ministério de Minas e Energia (MME), através da Portaria nº 134 [12], alterou alguns dispositivos da Portaria nº 512 de dezembro de 2018 [13], estabelecendo as diretrizes para realização do Leilão exclusivo para o estado de Roraima definindo, através da Nota Técnica [14], as margens para escoamento de geração em cada área elétrica, e com requisitos técnicos mínimos para participação do processo licitatório. Sabe-se que todo o parque gerador térmico local não atende aos requisitos mínimos, sendo necessária a remoção de todas as usinas térmicas hoje em operação [14]. Sabe-se também, que há possibilidade de contratação de energia renovável complementar com objetivo de reduzir custos operacionais. A fonte renovável mais promissora para esta região seria advinda de painéis fotovoltaicos próximos aos centros de carga. Portanto, quanto maior for a penetração de usinas fotovoltaicas, menor será o custo da operação.

A solução estrutural, estudada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), contempla um circuito duplo de mesma torre interligando em 500 kV a subestação Boa Vista com a subestação Lechuga, próximo à cidade de Manaus-AM. Essa linha de transmissão enfrenta diversos problemas socioambientais e atualmente está sem previsão para entrada em operação.

Através do controle de tensão e de frequência, dispositivos de armazenamento de energia poderiam contribuir para uma maior penetração de fontes renováveis, evitando o corte total das cargas do estado nos casos de redução abrupta de geração, mantendo parte do atendimento. Como em [11], o ESD "...pode fornecer uma rápida mudança de potência ativa e reativa em ambas as direções, fornecendo controle nos quatro quadrantes do plano PQ."

Desta forma, as usinas térmicas a óleo diesel poderiam ser gradualmente substituídas por usinas fotovoltaicas, reduzindo o custo da operação e tornando a utilização de armazenamento de energia economicamente viável. Destaca-se que mesmo após a entrada em operação da LT 500 kV Boa Vista - Equador - Lechuga, considerando a desinterligação entre Brasil e Venezuela, os ESD podem contribuir para a segurança do sistema de Roraima na ocorrência da contingência dupla desses circuitos.

3.0 - METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho baseia-se na substituição gradual da geração térmica local do estado de Roraima por geração fotovoltaica. Para cada patamar de penetração de energia renovável, diferentes valores de ESD serão analisados através da realização de simulações dinâmicas no domínio do tempo. Os estudos se concentrarão em contingências que provoquem reduções abruptas da geração fotovoltaica, que podem ser decorrentes de sombra nos painéis ou de perda do transformador elevador entre a planta solar e o sistema de subtransmissão. Nesses eventos, observa-se uma redução significativa da frequência, sendo necessária uma resposta rápida dos controles para evitar blecautes ou cortes parciais de cargas. Nesse trabalho serão avaliadas condições com e sem o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC). Os casos simulados serão classificados segundo os critérios estabelecidos de estabilidade eletromecânica, para que se encontre uma relação entre a penetração de geração fotovoltaica e o dimensionamento de ESD.

As análises de desempenho dinâmico desse sistema foram realizadas por meio de simulações computacionais no domínio do tempo, utilizando dados de usinas térmicas do SIN com características equivalentes aos requisitos mínimos citados em [14]. Para a usina fotovoltaica foi utilizado o modelo da planta São Pedro em operação no SIN [15], e um modelo dinâmico típico para o ESD.

3.1 Modelos Dinâmicos do Sistema

Para a realização desse estudo, todo o parque gerador foi constituído por usinas térmicas que se referenciam nos requisitos mínimos citados. A saber, tendo potência aparente mínima de 10 MVA e constante de inércia mínima de 1,6 segundos para as usinas conectadas nos barramentos classificados como Capital, e potência aparente mínima de 3,5 MVA e constante de inércia mínima de 1,25 segundos para as usinas conectadas nos barramentos classificados como Interior, que contemplam área Sucuba, área Bonfim e área Sul. Todas as usinas térmicas possuem regulação de velocidade e participam da regulação primária de frequência. Na Tabela 1 consta a capacidade instalada das usinas de acordo com as margens remanescentes de escoamento de energia, que foram estabelecidas pela nota técnica através da análise de fluxo de potência, da disponibilidade física para conexão de novos empreendimentos e também, de violação do nível de curto circuito em barramentos candidatos. Cabe ressaltar que não foi encontrado na base de dados [15] uma usina térmica com constantes de inércia pouco superior ao requisito mínimo da Capital, sendo utilizada uma usina térmica com constantes de inércia pouco inferior de forma conservativa.

Tabela 1 – Capacidade instalada das usinas no sistema Roraima

Área	Usina	Unidades	MW	MVA	Total (MW)	Total (MVA)	H(s)	
Interior	Bonfim	UTE Bonfim	17	2,48	4,06	42,16	69,05	1,31
	Sucuba	UTE Sucuba	17	2,48	4,06	42,16	69,05	1,31
	Sul	UTE Novo Paraíso	9	2,48	4,06	22,32	36,56	1,31
		UTE Rorainópolis	9	2,48	4,06	22,32	36,56	1,31
Capital	Capital	UTE Floresta	2	16,00	21,28	32,00	42,56	1,42
		UTE Boa Vista	9	16,00	21,28	144,00	144,00	1,42

A usina fotovoltaica pode controlar a potência ativa, potência reativa, tensão e frequência. Para as simulações dinâmicas realizadas, os inversores da planta solar operam controlando a tensão terminal e com modo de controle de potência ativa constante. Desta forma, não participam da regulação primária de frequência desta rede. O modelo de usina fotovoltaica utilizado foi a UFV São Pedro.

Os ESD são compostos por baterias que se conectam ao sistema elétrico através de inversores do tipo Voltage Source Inverter (VSI). Através do sistema de controle, o conversor é capaz de controlar a injeção de potência ativa e reativa na rede em função das grandezas que se deseja controlar, como potência ativa, potência reativa, tensão e frequência. Para essa análise, os ESD são representados nas simulações como um modelo típico de fonte de corrente controlando a tensão terminal e a frequência do sistema. O modelo utilizado é uma adaptação de [16] e utiliza um controlador do tipo proporcional-integral (PI) para tratar dos desvios de frequência da rede. É considerado um estatismo baseado na realimentação de potência elétrica para permitir a participação da regulação primária com as outras usinas do sistema. Os ESD dispõem ainda de capacidade de controle da tensão terminal ou da potência reativa, através de um controlador do tipo PI, conforme apresentado na Figura 2.

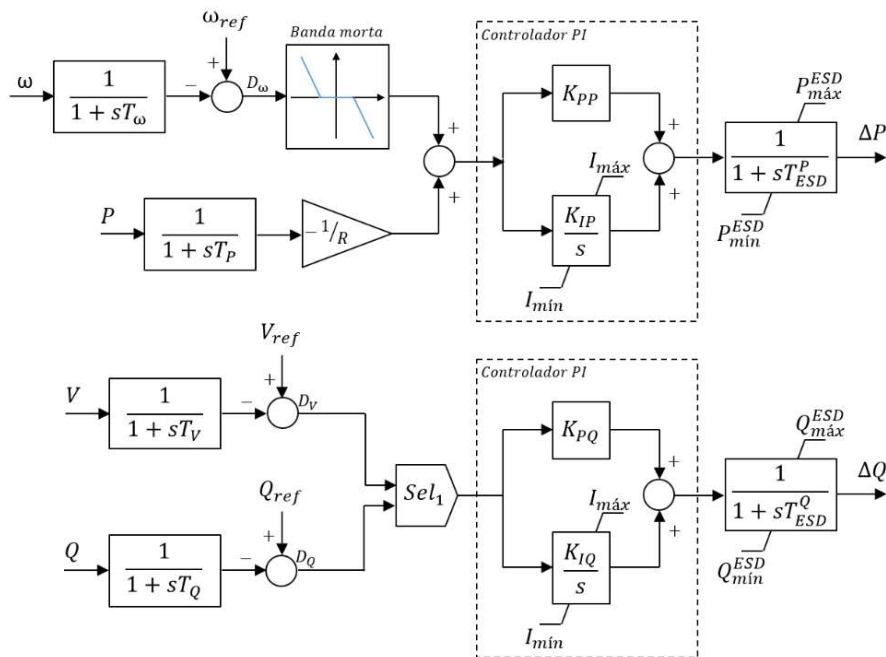


Figura 1 – Diagrama de blocos de um modelo simplificado de ESD.

3.2 Método de Definição da Contingência Mais Severa

Para definição da contingência mais severa de um sistema isolado, do ponto de vista de estabilidade dinâmica da frequência, deve-se considerar as características do parque gerador e da rede de transmissão ou subtransmissão que atendem às cargas. Para o sistema de transmissão, fica estabelecido o critério de atendimento à contingência de um elemento da rede sem ocorrência de corte de carga descontrolado. Conhecendo as características do parque gerador, deve-se levar em conta a perda de unidades de maior capacidade nominal de potência nos casos de usinas hidrelétricas e termelétricas. Para as usinas renováveis como solar e eólica, deve-se considerar a perda do maior conversor ou do transformador elevador que conecta a planta renovável à rede elétrica.

Outra avaliação a ser feita diz respeito à imprevisibilidade da fonte renovável, quando uma sombra pode reduzir abruptamente a geração solar ou uma alteração rápida de ventos podem interromper o fornecimento de energia advindo de unidades eólicas.

Para essa análise, será dada atenção ao efeito de sombreamento provocado nos painéis fotovoltaicos avaliados em [17] e [18], que mostrou que *“os sombreamentos causados por nuvens móveis podem ter um efeito importante na operação e eficiência geral das usinas fotovoltaicas”*. Nesta análise, concluiu-se que na média o sombreamento reduz em cerca de 60% a intensidade luminosa do sol. Porém, em 0,08% dos casos, podem apresentar reduções superiores à 90% e em 3,9% dos casos podem apresentar reduções superiores à 80%.

Para o sistema Roraima isolado, mesmo com a possibilidade de baixa penetração de usinas fotovoltaicas, a redução de potência por efeito de sombreamento pode ser superior a perda da maior máquina, e também superior a perda de um elemento do sistema de transmissão que modificaria o equilíbrio carga-geração desse sistema isolado. Assim, ficou definido que independente da penetração de usinas fotovoltaicas, a contingência mais severa para o sistema Roraima será o efeito sombreamento. Nesta avaliação, serão considerados os montantes de 95%, 80%, 65% e 40% de redução de potência injetada pelos painéis fotovoltaicos para cada montante de penetração simulado. Neste contexto, estipula-se usar níveis de ESD variando de 5 em 5% da geração total para comparação dos resultados. Nessas condições, foram considerados cortes parciais de carga através do ERAC, e também, relés de subfrequência para desconexão de banco de capacitores, a fim de evitar sobretensões excessivas decorrente desses cortes de carga.

3.3 Definições dos Casos de Análise

Na construção dos casos de referência para análise, foi considerada a projeção da demanda máxima com 272,94 MW e 136,91 Mvar, sendo aproximadamente 75% da demanda na capital e o restante no interior. Apesar do baixo valor de fator de potência indutivo, atualmente essa rede é bem compensada com equipamentos shunts. No futuro, esta compensação que poderá chegar ao valor de 207,50 Mvar capacitivo.

Na composição do despacho, foram consideradas as usinas térmicas do interior com prioridade, dado que essas usinas tem a constante de inércia inferior, representaram a menor constante de inércia equivalente possível e desta forma a análise foi conservativa. As plantas fotovoltaicas e o ESD foram consideradas no barramento de 69 kV da SE Boa Vista, entendendo também que esta decisão seria conservativa. Com uma melhor distribuição geográfica tanto dos painéis fotovoltaicos quanto dos ESD, o sistema tende a se comportar dinamicamente melhor. Na premissa de que as plantas solares podem estar geograficamente separadas, reduz significativamente a possibilidade de redução instantânea de geração por ocorrência de sombreamento dos painéis fotovoltaicos.

Foram considerados os valores de 10%, 20%, 30% e 40% de penetração de usinas fotovoltaicas e para cada nível de penetração, variou-se o ESD em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Esses valores são percentuais da geração total do sistema isolado de Roraima que é a soma da carga total com as perdas elétricas. No aumento da penetração de usinas fotovoltaicas foram sendo substituídas das máquinas com maior constante de inércia para as máquinas com menor constante de inércia, sempre garantindo um posicionamento conservativo.

Foram então elaborados 5 casos de referência para análise conforme demonstra a Tabela 2. Exceto o primeiro caso, que serviu de partida para os demais, todos os outros 4 casos se desdobram em 24 análises, considerando a variação da potência nominal dos ESD em percentual da geração total, conforme a Tabela 3 e também, a variação da contingência considerada que é a redução de geração fotovoltaica, totalizando 96 casos de simulação.

Tabela 2 – Casos de referência para análise

Caso	Título	Redução de UFV			
		40%	65%	80%	95%
1	0% Penetração de Fotovoltaicas (0 MW)	-	-	-	-
2	10% Penetração de Fotovoltaicas (29 MW)	12 MW	19 MW	23 MW	28 MW
3	20% Penetração de Fotovoltaicas (58 MW)	23 MW	37 MW	46 MW	55 MW
4	30% Penetração de Fotovoltaicas (87 MW)	35 MW	57 MW	70 MW	83 MW
5	40% Penetração de Fotovoltaicas (116 MW)	46 MW	75 MW	93 MW	110 MW

Tabela 3 – Capacidade nominal dos ESD

ESD	Capacidade Nominal
5% da Geração Total	14 MW
10% da Geração Total	29 MW
15% da Geração Total	43 MW
20% da Geração Total	58 MW
25% da Geração Total	72 MW

4.0 - RESULTADOS

Diante dos casos analisados, foram elaborados gráficos que apresentam a relação do aumento gradual da penetração de usinas fotovoltaicas com o aumento gradual da capacidade nominal dos ESD. Para cada condição, ficou estabelecido que os casos poderiam ser estáveis, ou seja, o sistema isolado de Roraima se mantém íntegro, poderiam apresentar cortes parciais de carga em até 5 estágios, ou poderiam apresentar instabilidade ou violação de critérios do ponto de vista de estabilidade de frequência. Para a construção de cada gráfico, foi determinado um montante fixo de redução de geração com intuito de promover a similaridade das análises. Os resultados das simulações estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da simulação considerando patamares de redução da geração fotovoltaica

Redução de 95% da Geração Fotovoltaica					Redução de 65% da Geração Fotovoltaica				
ESD %	10	20	30	40	ESD %	10	20	30	40
25	Estável	Estável	Estável	2 Estágios	25	Estável	Estável	Estável	Estável
20	Estável	Estável	1 Estágio	3 Estágios	20	Estável	Estável	Estável	1 Estágio
15	Estável	Estável	2 Estágios	Blecaute	15	Estável	Estável	Estável	2 Estágios
10	Estável	1 Estágio	4 Estágios	Blecaute	10	Estável	Estável	1 Estágio	3 Estágios
5	Estável	2 Estágios	Blecaute	Blecaute	5	Estável	1 Estágio	3 Estágios	Blecaute
0	Estável	3 Estágios	Blecaute	Blecaute	0	Estável	2 Estágios	4 Estágios	Blecaute
	Penetração UFV (%)					Penetração UFV (%)			
	a)					c)			

Redução de 80% da Geração Fotovoltaica					Redução de 40% da Geração Fotovoltaica				
ESD %	10	20	30	40	ESD %	10	20	30	40
25	Estável	Estável	Estável	1 Estágio	25	Estável	Estável	Estável	Estável
20	Estável	Estável	Estável	2 Estágios	20	Estável	Estável	Estável	Estável
15	Estável	Estável	1 Estágio	4 Estágios	15	Estável	Estável	Estável	Estável
10	Estável	Estável	2 Estágios	Blecaute	10	Estável	Estável	Estável	1 Estágio
5	Estável	1 Estágio	4 Estágios	Blecaute	5	Estável	Estável	1 Estágio	2 Estágios
0	Estável	2 Estágios	Blecaute	Blecaute	0	Estável	1 Estágio	2 Estágios	Blecaute
	Penetração UFV (%)					Penetração UFV (%)			
	b)					d)			

Como esperado, o aumento da capacidade nominal dos ESD apresenta uma relação direta com a estabilidade de frequência do sistema isolado de Roraima. Entretanto, o crescimento da proporção de geração de usinas fotovoltaicas pode provocar o corte total das cargas do estado, mesmo considerando a utilização de armazenamento. Nota-se também que a suavização da contingência de sombreamento dos painéis fotovoltaicos atenua a possibilidade de blecaute.

De forma a minimizar qualquer possibilidade de blecaute, a escolha de um ESD correspondente a 10% da geração total do sistema (29 MW) permitiria uma penetração de até 30% de usinas fotovoltaicas (87 MW) neste sistema isolado. Pelas observações feitas no item 3.2, esse mesmo montante de ESD também poderia ser dimensionado para penetração de até 40% de usinas fotovoltaicas, considerando um risco aproximado de 5% de ocorrer blecaute. A Tabela 5 apresenta as possibilidades de penetração com relação à redução abrupta de geração fotovoltaica considerando um ESD de 29 MW.

Tabela 5 – Resultado da simulação considerando um ESD de 10% da geração total do sistema

Penetração UFV %	40	65	80	95	Redução UFV %
40	1 Estágio	3 Estágios	Blecaute	Blecaute	
30	Estável	1 Estágio	2 Estágios	4 Estágios	
20	Estável	Estável	Estável	1 Estágio	
10	Estável	Estável	Estável	Estável	

Pelos gráficos apresentados nas Figuras 3 a) e b), pode-se visualizar as diferenças de frequência e de tensão para cada nível de redução de geração fotovoltaica, considerando a hipótese de 10% de ESD e 30% de penetração de fotovoltaica. Notadamente, quanto maior for a redução de geração fotovoltaica, menor será a frequência do sistema e consequentemente, mais estágios de ERAC serão necessários.

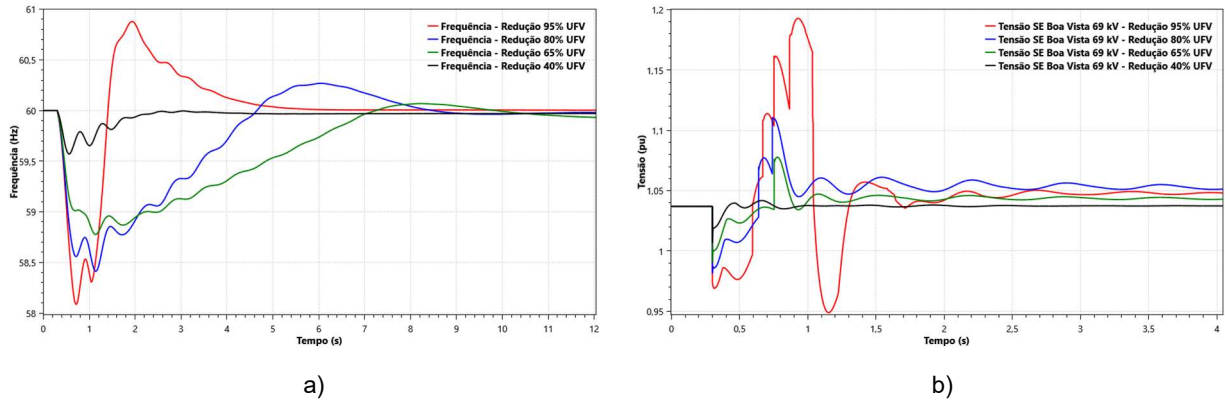


Figura 3 – Frequência e tensão na SE Boa Vista 69 kV.

Pode-se comparar a injeção de potência ativa do ESD com 10% da geração total para cada redução de geração fotovoltaica, mantendo o nível de penetração em 30%. Para todos os casos, como visto nas Figuras 4 a) e b), o ESD atinge o valor máximo e ainda tolera uma sobrecarga temporizada. Do ponto de vista da potência reativa, o ESD mais contribui quanto maior for o déficit de geração absoluta dos casos. Com a atuação do ERAC e consequente corte de carga parcial, o déficit de geração deixa de existir, zerando o valor da potência injetada pelo ESD. Além disso, tende a ocorrência de sobretensões no sistema, sendo necessária a absorção de potência reativa por parte do ESD.

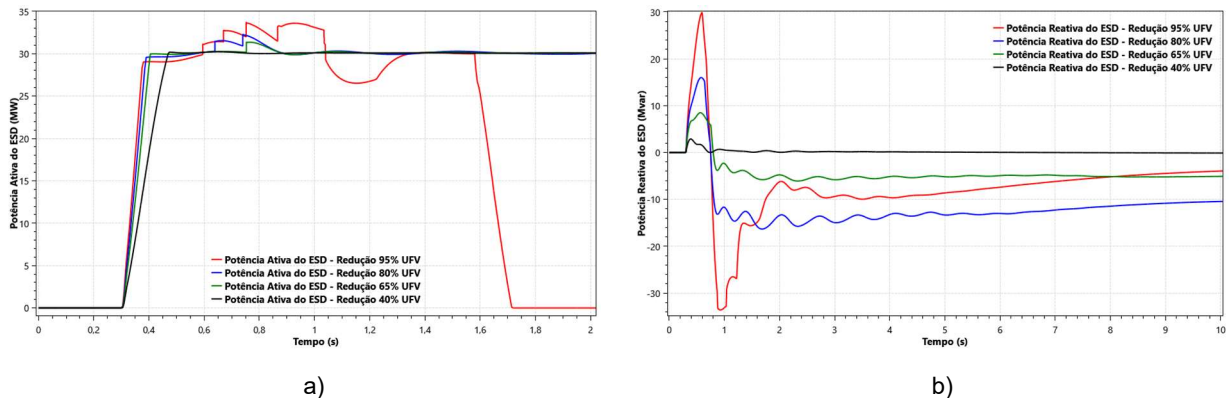


Figura 4 – Potência ativa e potência reativa do ESD.

Com objetivo de visualizar o ganho efetivo com o aumento da capacidade nominal do ESD para controle de tensão e frequência, é apresentada a Figura 5 que promove a comparação dos desvios de frequência para cada valor de ESD. Como visto, quanto maior for a capacidade de injeção de potência ativa por parte do ESD menor será o desvio de frequência do sistema isolado.

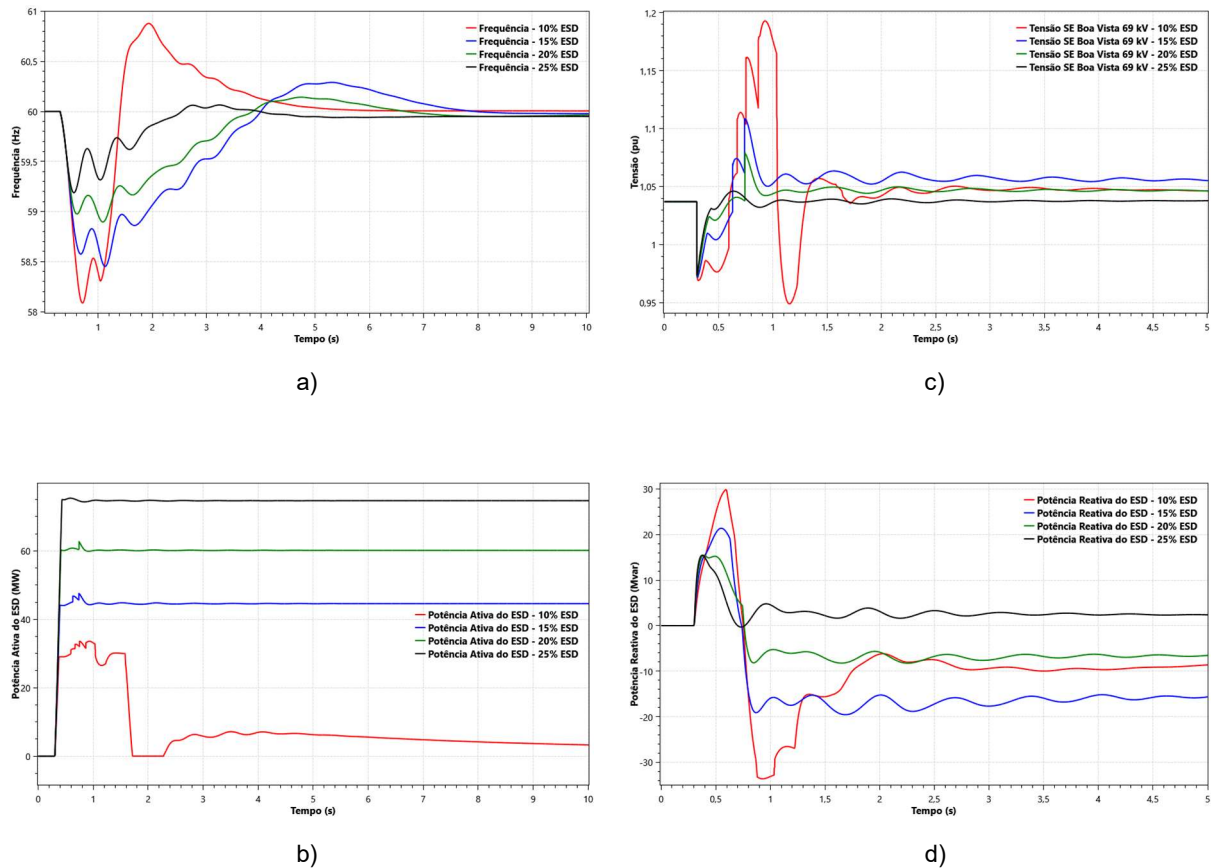


Figura 2 – Comparação dos desvios de frequência e de tensão para valores distintos de ESD.

Como o caso simulado considerando 10% de capacidade nominal do ESD apresenta um corte parcial da carga em 4 estágios de ERAC, portanto superior aos demais, o sistema apresenta, em certo momento, uma sobrefrequência que é atenuada pela redução de potência injetada pelo ESD. Nota-se que, por motivo de instabilidade eletromecânica com perda de sincronismo entre as máquinas e inevitável blecaute na simulação correspondentes à 5% de capacidade nominal do ESD, as curvas desta simulação foram suprimidas na comparação dos desvios de frequência e de tensão.

5.0 - CONCLUSÃO

A metodologia proposta para avaliar o comportamento dinâmico em sistemas isolados, considerando a penetração de energia renovável intermitente e o uso de ESD, apresentou resultados coerentes com o esperado quando aplicado no sistema elétrico isolado do estado de Roraima. Através das tabelas que resumem os resultados das simulações dinâmicas desta metodologia, com o princípio de minimizar qualquer possibilidade de blecaute, foi escolhido um ESD correspondente a 10% da geração total do sistema (29 MW), que permitiria uma penetração de até 30% (87 MW) de usinas fotovoltaicas neste sistema isolado.

Análises de otimização energética poderiam complementar essa avaliação do dimensionamento que melhor equilibra a relação custo-benefício e desempenho dinâmico, promovendo a penetração de fontes de energia renováveis e o uso de ESD.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) X. Ai et al., "Multi-time-scale coordinated ramp-rate control for photovoltaic plants and battery energy storage", IET Renewable Power Generation, v. 12, n. 12, p. 1390-1397, 2018.

- (2) L. Wang, F. Bai, R. Yan, T. K. Saha, "Real-time coordinated voltage control of PV inverters and energy storage for weak networks with high PV penetration", *IEEE Trans. on Power Systems*, v. 33, n. 3, pp. 3383-3395, 2018.
- (3) K. Dhingra, M. Singh, "Frequency support in a micro-grid using virtual synchronous generator based charging station", *IET Renewable Power Generation*, v. 12, n. 9, p. 1034-1044, 2018.
- (4) H. Vasconcelos, C. Moreira, A. Madureira, J. P. Lopes, V. Miranda, "Advanced control solutions for operating isolated power systems: examining the Portuguese islands.," in *IEEE Electrification Magazine*, v. 3, n. 1, p. 25-35, 2015.
- (5) Y. Shi, B. Xu, D. Wang, B. Zhang, "Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains", *IEEE Trans. on Power Systems*, v. 33, n. 3, p. 2882-2894, 2018.
- (6) C. A. Sepulveda Rangel, L. Canha, M. Sperandio, R. Severiano, "Methodology for ESS-type selection and optimal energy management in distribution system with DG considering reverse flow limitations and cost penalties", *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, n. 5, p. 1164-1170, 2018.
- (7) A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler, "Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control", *IEEE Trans. on Power Systems*, v. 22, n. 3, p. 1259-1266, 2007.
- (8) Y. Tan et al., "Enhanced frequency regulation using multilevel energy storage in remote area power supply systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, v. 34, n. 1, p. 163-170, 2019.
- (9) G. Delille, B. François, G. Malarange, "Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, v. 3, n. 4, p. 931-939, 2012.
- (10) P. Mercier, R. Cherkaoui, A. Oudalov, "Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24 (3), pp. 1469-1477, 2009.
- (11) J.A.P. Lopes, C.L. Moreira, A.G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 2, p. 916-924, 2006.
- (12) MME, "Portaria MME nº 134/2019", de 13 de fevereiro de 2019.
- (13) MME, "Portaria MME nº 512/2018", de 24 de dezembro de 2018.
- (14) "Definição das Características Elétricas para o Leilão de Suprimento a Roraima", nº EPE-DEE-NT073/2017-rev2 / ONS NT 0143/2017, março 2019.
- (15) ONS, "Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos", março 2019
- (16) Ortega, F. Milano, "Generalized model of VSC-based energy storage systems for transient stability analysis", *IEEE Trans. Power Syst.*, v. 31, n. 5, p. 3369-3380, 2016.
- (17) Kari Lappalainen, Seppo Valkealahti, "Analysis of shading periods caused by moving clouds", *Solar Energy*, v. 135, p. 188-196, 2016.
- (18) Kari Lappalainen, Seppo Valkealahti, "Recognition and modelling of irradiance transitions caused by moving clouds", *Solar Energy*, v. 112, p. 55-67, 2015.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



IGOR DE OLIVEIRA BARRETO é graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2009. Atualmente, é aluno regular do curso de mestrado em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Atua na área de planejamento da operação elétrica no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) desde 2010.

ARMANDO M. LEITE DA SILVA é Doutor em Engenharia Elétrica pelo UMIST, University of Manchester (UK), Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio e IEEE Fellow.

JORGE L. A. JARDIM é Doutor em Engenharia Elétrica pelo Imperial College (UK) e Diretor Geral da HPPA (High Performance Power Systems Applications) Consultoria, Rio de Janeiro, RJ.