

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PASSIVAS PARA AUMENTO DA PENETRAÇÃO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM MINIRREDES HÍBRIDAS FV+DIESEL

Daniel Odilio dos Santos – daniel.odilio@gmail.com

Marília Braga – mbraga.ufsc@gmail.com

Lucas Rafael do Nascimento – nascimento.ufsc@gmail.com

Helena Flávia Napolini – helena@eel.ufsc.br

Ricardo Rütther – ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina

Campus Universitário Trindade, Caixa Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900

Resumo. O Brasil possui o maior sistema integrado de energia do mundo controlado por um operador centralizado, porém o norte brasileiro possui dificuldades geográficas de conexão na essa rede centralizada. O país ainda possui 212 sistemas isolados, formando o denominado SISOL. Segundo a literatura, a penetração típica de geradores FV em sistemas isolados não automatizados varia de 10% a 20%; contudo, existem estratégias passivas que podem ser utilizadas em sistemas isolados não automatizados que buscam reduzir a variabilidade instantânea da energia solar, possibilitando o aumento na máxima penetração FV. Neste trabalho, são analisados os efeitos de quatro estratégias passivas para aumentar o nível máximo de penetração FV. Os resultados mostraram que, a divisão de potência do grupo gerador Diesel em múltiplos geradores proporcionaria penetração máxima FV de 21%; a dispersão geográfica dos sistemas FV proporcionaria penetração máxima FV de 30%; o uso de rastreadores de um eixo nos sistemas FV proporcionaria penetração FV máxima de 21% e o sobrecarregamento dos inversores FV proporcionaria penetração FV máxima de 24%.

Palavras-chave: Amazônia. Sistemas Isolados. Aumento de penetração fotovoltaica.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui o maior sistema interligado de energia do mundo controlado por um operador centralizado (Sistema Interligado Nacional - SIN), porém algumas localidades brasileiras possuem dificuldades geográficas de conexão nessa rede centralizada. O Brasil possui 212 sistemas isolados, formando o denominado SISOL.

Tradicionalmente, estes sistemas isolados são atendidos predominantemente por UTEs Diesel (RIBEIRO et al., 2012; ASENSIO; CONTRERAS, 2014). Estes geradores apresentam baixo custo inicial de implantação, além de certa facilidade em seu projeto, instalação e descomissionamento, sendo prática a realocação dos geradores para outra localidade após o término de contratos de fornecimento. A logística de transporte de combustível Diesel também é facilitada em relação a outras fontes de energia termoeleétrica, tais como, carvão e gás natural.

Entretanto, os sistemas isolados estão usualmente situados a longas distâncias de centros de distribuição e em regiões que possuem obstáculos geográficos naturais (relevo, vegetação e hidrografia) e infraestrutura de transporte deficiente, fatores que encarecem o fornecimento de óleo Diesel, resultando em um custo elevado para a geração de energia. A equipe de operação e manutenção (O&M) necessária para o funcionamento destas UTEs tem custo fixo elevado, o que encarece esta fonte de energia. Adicionalmente, existe ainda um impacto ambiental e social atrelado à emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e ao ruído dos geradores das UTEs.

Em suma, o suprimento de eletricidade nos sistemas isolados, realizado nos moldes tradicionais, é extremamente dependente de uma fonte de energia não renovável e não disponível junto aos pontos de consumo, além de possuir elevados custos de operação e manutenção (PINHO et al., 2008; SOARES, 2008; ELETROBRAS, 2014; SALAS et al., 2015; HIGUERA, 2017).

Nos últimos anos, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) começou a incentivar a adoção de soluções alternativas na tentativa de reduzir o consumo de Diesel para geração de eletricidade em sistemas isolados. Simultaneamente, houve na última década um declínio significativo nos custos de equipamentos fotovoltaicos (FV) e de sistemas de armazenamento de energia (SAE), resultado da produção em grande escala, de inovações tecnológicas e de incentivos governamentais (BHATTACHARYYA; PALIT, 2016; KAVLAK, 2018; GOLDIE-SCOT, 2019).

É importante notar que os sistemas isolados são sistemas cuja operação é mais sensível, pois não existe um sistema integrado capaz de absorver oscilações de potência, se fazendo necessário um sistema robusto e confiável para o suprimento ininterrupto de energia para estas localidades. A fonte de energia renovável avaliada neste estudo é a energia solar fotovoltaica, que dispensa o uso de combustível, entretanto, é intermitente, ou seja, necessita de estratégias de suporte para garantir o suprimento e estabilidade da minirrede de forma constante. Sendo assim, uma maior penetração de energia proveniente de fonte renovável reduz os custos de operação e manutenção e as emissões de gases do efeito estufa da mini rede. Todavia a inserção de fontes renováveis introduz um nível de vulnerabilidade e incerteza ao sistema, tornando necessários estudos de de estratégias de mitigação para evitar déficit no suprimento da minirrede. Esse estudo visa avaliar, através de simulações, a efetividade de estratégias que buscam aumentar a confiabilidade de sistemas híbridos com fontes renováveis e intermitentes de energia, permitindo uma maior penetração de energia renovável nestes sistemas.

2 MÉTODO E PREMISSAS

As simulações foram realizadas através do *software* HOMER Pro®, especializado na simulação de minirredes e capaz de realizar o despacho da UTE Diesel em paralelo com outras fontes de energia para o atendimento da demanda. O parâmetro utilizado para quantificar a penetração FV de potência em relação à demanda da localidade é o Nível de Penetração Fotovoltaica (NP_{FV}), definido pela razão entre a potência CC instalada do sistema FV, expressa em W_p (P_{FV}) e a máxima potência de demanda medida na localidade de estudo em W (P_{max}). Outro parâmetro importante utilizado é o Nível de Penetração Energética (NPE), dado pela energia consumida proveniente do sistema FV (E_{FV}) e a energia total consumida pela carga da localidade (E_{total}). O NPE visa quantificar a penetração energética da fonte renovável, e é equivalente à redução de consumo de combustível e à redução de emissões de gases do efeito estufa do sistema isolado. Vale ressaltar que no cálculo do NPE, não é considerada a energia perdida no sistema FV em razão de perdas ou qualquer limitação imposta pela minirrede.

2.1 DADOS DO LOCAL DO ESTUDO DE CASO

O estudo aqui apresentado para a maximização do nível de penetração de energia renovável em sistemas isolados utiliza como referência da carga e do recurso solar de Izidolândia-RO, visando a extrapolação para outras comunidades do SISOL. O clima local, segundo a classificação de Köppen-Geiger é tropical úmido (AM). As análises foram realizadas em base horária, pois os dados de demanda e do recurso solar foram caracterizados nesta base (horaria). O uso de dados na base horária implica em uma atenuação de eventos de curta duração que podem afetar a geração FV, tais como a passagem de nuvens, podendo interferir na estabilidade da minirrede.

De acordo com o Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2024 – Ciclo 2019 (EPE, 2019) o SISOL possui um consumo médio de 10.806 MWh e consumo mediano de 1.410 MWh. As características de demanda e de consumo de Izidolândia-RO (localidade escolhida), essa localidade possuiu características elétricas próximas a mediana do sistema, caracterizando assim o SISOL. Além disso a escolha da localidade se deu pela disponibilidade de dados de consumo energético da mesma em domínio público.

A Figura 1 apresenta para o ano de 2019, a evolução horária da demanda medida de Izidolândia-RO (disponibilizado pela EPE para o Leilão dos Sistemas Isolados de 2021(EPE,2020)).

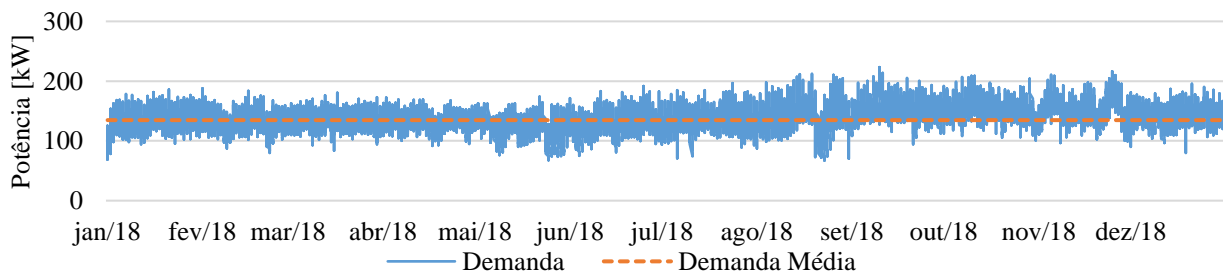


Figura 1 – Evolução horária da demanda medida do sistema isolado de Izidolândia-RO (EPE,2020) - 2019

A demanda máxima medida neste período foi de 225 kW e a demanda média foi de 135 kW. De acordo com as diretrizes do Leilão para Suprimento aos Sistemas Isolados de 2021 (EPE,2020), a disponibilidade de potência requerida para a localidade de Izidolândia-RO é de 337,5 kW, equivalente a 150% da demanda máxima. Este valor foi adotado como capacidade do grupo gerador Diesel de referência do estudo. As análises foram realizadas para o período de um ano sem considerar aumento de carga.

Para estimar a produção de energia dos geradores FV do estudo foram utilizados dados de irradiação solar global horizontal do Atlas Brasileiro de Energia Solar e de temperatura do *software* Meteonorm 8.0.

A Figura 2 apresenta a evolução mensal da irradiação global horizontal média diária e da temperatura ambiente para a localidade do estudo, bem como as respectivas médias anuais. Observa-se que o perfil de demanda apresenta correlação com o perfil solarimétrico da localidade. Nos meses de agosto a dezembro há maior incidência de recurso solar e aumento da demanda.

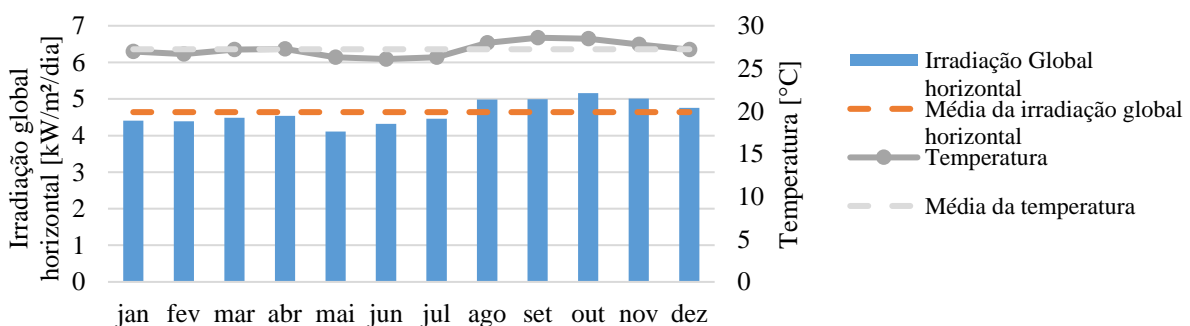


Figura 2 – Evolução mensal e média anual da irradiação solar global horizontal média diária e da temperatura média ambiente - Izidolândia-RO.

2.2 GRUPO GERADOR DIESEL

Para sistemas simulados com múltiplos geradores Diesel por UTE, o despacho é realizado de forma que os geradores Diesel busquem pontos de operação acima de 30% de sua potência nominal, sendo este o valor limite de carregamento de cada gerador Diesel. Nas simulações realizadas, o atendimento à demanda é analisado em base horária. A estratégia de acionamento de novos geradores depende do modelo, curva de consumo específico e automatização do gerador Diesel. No estudo de caso aqui avaliado, visando a integração das fontes intermitentes, foi considerado 65% do carregamento do gerador como limite para acionamento de uma nova máquina. Logo, caso cada gerador no sistema esteja operando com carga superior à 65%, há possibilidade de ligar novos geradores. Se houver mais de um gerador no sistema, caso cada gerador esteja operando a 30% ou menos de sua capacidade nominal, há a possibilidade de desligá-lo.

A Figura 3 apresenta um exemplo de operação de uma UTE com dois geradores Diesel.

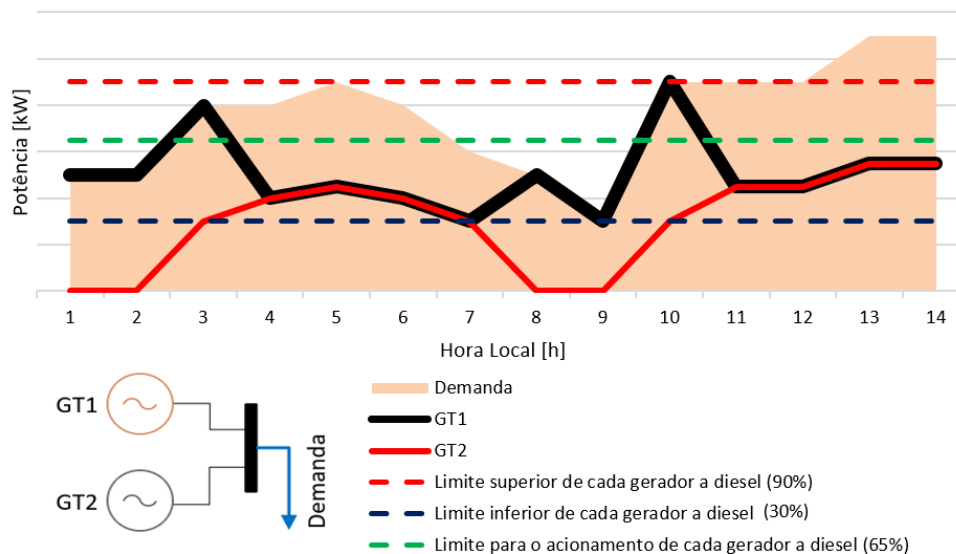


Figura 3 – Exemplo de operação de uma UTE com dois geradores Diesel.

Observa-se que inicialmente o gerador 1 (GT1) atende à demanda completa. Na hora 3, a demanda ultrapassa 65% da potência nominal do GT1, sendo que nesse instante o gerador 2 (GT2) é acionado. A partir da hora 4 o gerador GT2 está pronto para operar, portanto, GT1 e GT2 passam a dividir a carga, operando com aproximadamente 32,5% de sua capacidade nominal cada. Na hora 7, os geradores estão trabalhando a 30% da carga e a demanda é menor do que na hora anterior, nesse instante o GT2 desliga e o GT1 assume o atendimento da demanda.

Com a inserção de geração FV, inicialmente a demanda é subtraída da geração FV para se obter a demanda líquida a ser atendida pela UTE. A partir da demanda líquida, o despacho dos geradores é realizado como apresentado anteriormente. A premissa utilizada para o consumo do gerador Diesel é de 234 l/MWh e a densidade do combustível de 0,85 kg/l.

2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema FV de referência utilizado neste estudo foi simulado no *software* PVsyst®, em blocos de 6,6 kWp de potência. Os sistemas de 6,6 kWp (base) foram considerados como fixos, com 10° de inclinação e orientados ao norte, a exceção dos sistemas com rastreador, para os quais foram utilizados rastreadores de um eixo (rastreamento L-O) com variação de inclinação de $\pm 60^\circ$. Os módulos FV utilizados no estudo são monofaciais de silício monocristalino, 156 células *half-cell*, potência individual de 440 Wp, eficiência de 20,31% e taxa de desempenho de 79,3%.

Os blocos FV utilizados como base são de baixa potência para possibilitar a análise gradual da penetração de potência e da penetração de energia nos sistemas isolados. Quando os blocos são agrupados, o sistema pode passar a utilizar inversores com potência compatível com a soma das potências dos blocos. Para as análises de estratégias que não envolvem variação de carregamento de inversor, o fator de carregamento do inversor (FCI) (dado pela razão entre a potência de pico CC da usina FV e a potência nominal CA de seus inversores) utilizado neste estudo foi de 120%.

2.4 EVENTOS DE VULNERABILIDADE DA MINIRREDE

Para a análise das estratégias de aumento da penetração de energia FV é necessário definir os eventos de vulnerabilidade do sistema. O sistema pode apresentar vulnerabilidade quando um ou mais geradores Diesel da UTE

operam com carga demasiadamente baixa (subcarga), o que pode acontecer quando a demanda é muito baixa ou quando a geração FV é muito alta e resta pouca demanda para ser atendida pelo grupo gerador Diesel. A vulnerabilidade pode ocorrer também em decorrência de eventos de rampa onde o sistema solicita um aumento súbito de potência para atender a demanda e os geradores ativos não são capazes de atender a este aumento, sendo necessária a partida de um novo gerador, sem margem para uma transição suave de carga entre os geradores já operando e o gerador recém inicializado. Neste estudo, a caracterização do evento de vulnerabilidade por subcarga se dá quando o gerador Diesel trabalha abaixo de 30% de sua potência nominal.

A Figura 4 ilustra um exemplo de dia com vulnerabilidade para um sistema híbrido FV+Diesel, onde há a operação de apenas um gerador Diesel associado a um sistema FV com potência nominal de aproximadamente 20% da demanda de referência do sistema (20% de penetração de potência) e FCI de 120%.

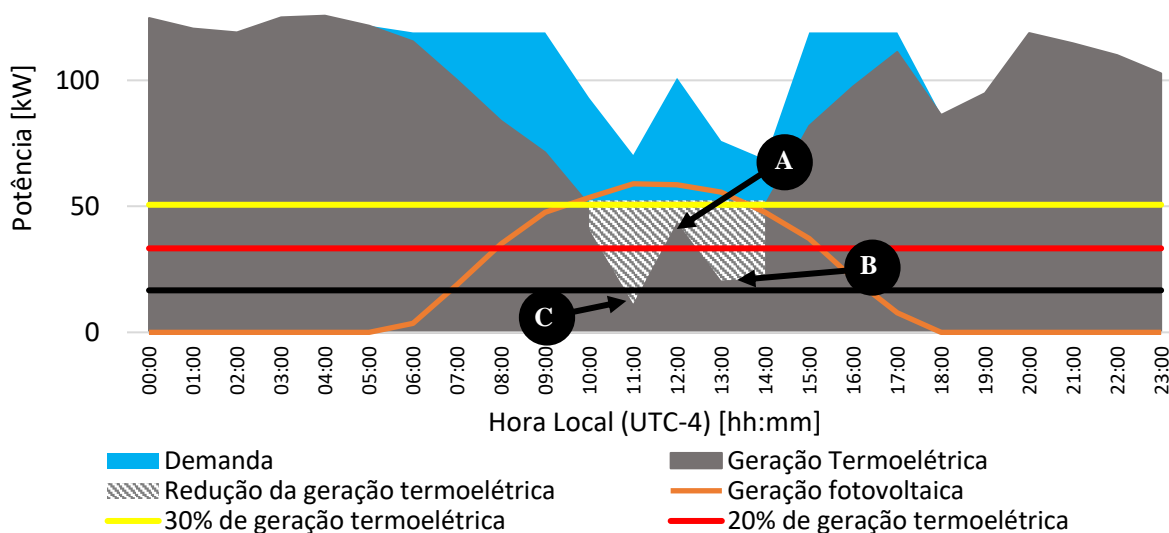


Figura 4 – Exemplo de evento de vulnerabilidade na minirrede causado por subcarga de geradores Diesel.

Observa-se que próximo das 10:00 a geração FV é elevada e a demanda cai abruptamente, resultando em uma demanda líquida (demanda subtraída de potência FV) muito baixa. Neste momento tem-se uma vulnerabilidade na minirrede, situação que se estende até as 14:00. Nesse intervalo a UTE trabalhou em 3 (três) situações distintas de subcarga:

- Ponto A – UTE trabalhando em regime não ótimo com carga abaixo de 30%, mas acima de 20% da carga nominal;
- Ponto B – UTE trabalhando em regime preocupante com carga abaixo de 20%, mas acima de 10% da carga nominal;
- Ponto C – UTE trabalhando em regime crítico de vulnerabilidade com carga abaixo de 10% da carga nominal.

Outro evento de vulnerabilidade que pode acontecer em minirredes sem automatização e sistemas de armazenamento são os eventos de vulnerabilidade causados por aumento rápido de potência demandada, que tipicamente acontecem quando há mais de um gerador Diesel no sistema. Este evento de vulnerabilidade é caracterizado pela solicitação instantânea de carga implicando na necessidade de partida de mais um gerador Diesel do sistema, sem margem para uma transição suave de potência entre as máquinas. As máquinas rotativas necessitam de um tempo mínimo em operação para atingir estabilidade de frequência e tensão, assim o evento de vulnerabilidade se dá pela falta de potência disponível no momento para atender a necessidade de demanda.

A Figura 5 apresenta um dia que ocorre um evento de vulnerabilidade por rampa. Nesse exemplo a potência de referência está dividida em quatro máquinas para o sistema.

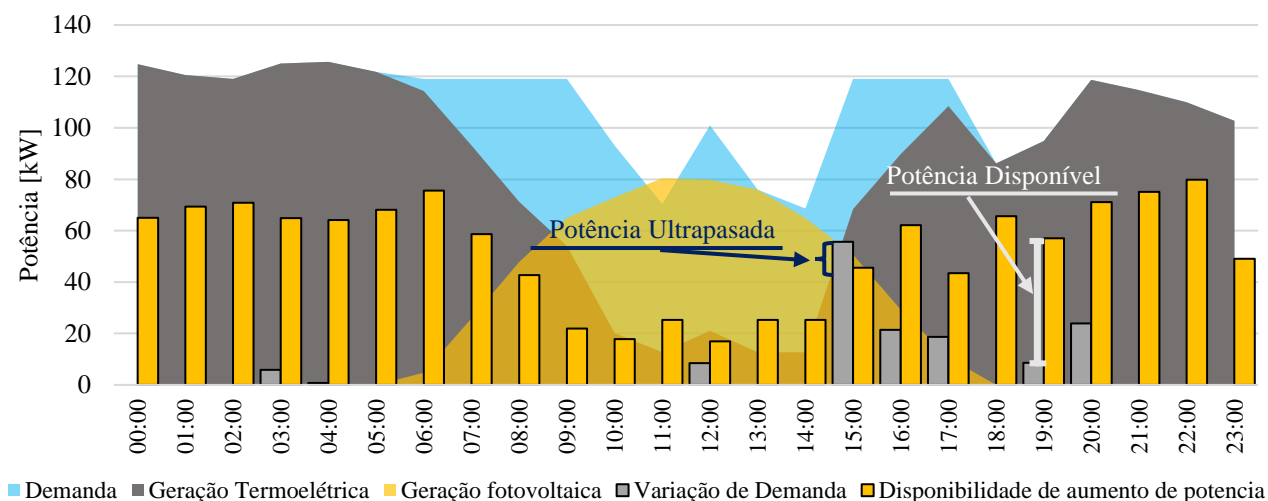


Figura 5 – Exemplo de evento de vulnerabilidade na minirrede causado por rampa de potência de geradores Diesel.

Observa-se existe uma margem de potência demandada que os geradores, em sua configuração atual (número de máquinas ligadas naquele instante), podem atender (barras verdes). Entretanto, essas margens podem não ser suficientes para atender a demanda, por exemplo, às 15:00 a variação de demanda requerida do grupo gerador foi maior que a disponibilidade de geração a Diesel naquele instante, causando assim um evento de instabilidade na minirrede.

3 ESTRATÉGIAS ADOTADAS PARA AUMENTO DE PENETRAÇÃO FV, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo a literatura, a penetração típica de geradores FV em sistemas isolados não automatizados varia entre de 10% a 20% (LAVE; STEIN; ELLIS, 2012; SHIVASHANKAR et al., 2016; RÜTHER et al., 2003). Contudo, existem estratégias passivas que podem ser utilizadas em sistemas isolados não automatizados que buscam reduzir a variabilidade instantânea da energia solar, possibilitando o aumento na máxima penetração FV. Neste trabalho, são analisados os efeitos de quatro estratégias passivas para aumento no nível de penetração máximo FV, sendo elas:

- Divisão de potência do grupo gerador Diesel em múltiplos geradores;
- Dispersão geográfica dos sistemas FV;
- Uso de rastreadores de um eixo nos sistemas FV;
- Sobrecarregamento dos inversores FV.

3.1 DIVISÃO DE POTÊNCIA DO GRUPO GERADOR DIESEL

Esta estratégia visa dividir a potência total requerida do sistema em um número maior de máquinas, com capacidade individual reduzida. Reduzindo a potência dos geradores, o limiar de indisponibilidade da minirrede por subcarga é reduzido proporcionalmente, possibilitando uma maior penetração FV. Contudo, esta divisão da potência requerida em um número maior de máquinas aumenta a dinâmica de desligamento e acionamento de geradores, fazendo com que o sistema fique mais susceptível a eventos de indisponibilidade por rampa de potência. Adicionalmente, em sistemas com maior número de geradores a Diesel o CAPEX da geração termoeétrica tende a ser mais elevado.

Para o cenário em que se tem apenas um gerador Diesel para atender à potência requerida da localidade, o próprio perfil de demanda já ocasiona eventos de vulnerabilidade por subcarga. Para múltiplos geradores esses eventos de vulnerabilidade não acontecem no caso base, ou seja, sem inserção de outra fonte de energia no sistema.

Para analisar os efeitos da inserção de geração FV em sistemas com múltiplos geradores Diesel, foram simulados diversos cenários aumentando-se a penetração FV em passos de 3% de potência em relação à potência máxima da demanda e observando-se os eventos de vulnerabilidade na minirrede.

Observa-se que ao aumentar o número de geradores é possível aumentar a penetração FV quando analisado os eventos de subcarga, pois os geradores são menores e a carga mínima de trabalho consequentemente é menor. Todavia, o aumento de número de geradores resulta em desligamentos frequentes de geradores, deixando o sistema mais susceptível a eventos de vulnerabilidade causados por rampa de potência.

Dentre os cenários analisados, o cenário ótimo é aquele em que se tem quatro ou oito geradores Diesel na UTE, dividindo a potência total requerida para o sistema igualmente entre as máquinas. Nestes cenários, foi possível alcançar a máxima penetração de potência FV de 21% em relação à máxima demanda do sistema.

A Tabela 1 apresenta eventos de vulnerabilidade observados no período de um ano para cenários de divisão da potência requerida de geradores Diesel.

Tabela 1 – Eventos de vulnerabilidade observados no período de um ano para cenários de divisão da potência requerida de geradores Diesel.

NP FV	Eventos de subcarga				Eventos de rampa				Eventos de vulnerabilidade			
	1 gerador Diesel	2 geradores Diesel	4 geradores Diesel	8 geradores Diesel	1 gerador Diesel	2 geradores Diesel	4 geradores Diesel	8 geradores Diesel	1 gerador Diesel	2 geradores Diesel	4 geradores Diesel	8 geradores Diesel
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3%	42	0	0	0	0	1	1	1	42	1	1	1
6%	125	0	0	0	0	0	0	0	125	0	0	0
9%	232	0	0	0	0	1	2	2	232	1	2	2
12%	375	1	0	0	0	0	2	3	375	1	2	3
15%	554	2	0	0	0	0	2	2	554	2	2	2
18%	726	4	0	0	0	0	1	0	726	4	1	0
21%	930	5	0	0	0	0	1	2	930	5	1	2
24%	1116	6	0	0	0	0	4	5	1116	6	4	5
27%	1316	20	1	0	0	0	7	9	1316	20	8	9
30%	1511	46	2	0	0	0	10	12	1511	46	12	12
32%	1707	84	3	1	0	0	9	13	1707	84	12	14
35%	1871	127	3	1	0	0	10	17	1871	127	13	18
38%	2029	202	11	3	0	1	13	27	2029	203	24	30
41%	2136	276	23	3	0	3	18	37	2136	279	41	40
44%	2240	385	52	7	0	4	33	57	2240	389	85	64

Analisar resultados da Tabela 1

3.2 DISPERSÃO GEOGRÁFICA DO SISTEMA FV

A estratégia de dispersão geográfica do sistema FV consiste na divisão da potência FV total de um sistema em subsistemas FV dispersos em uma determinada região, de modo a reduzir efeitos transitórios de passagens de nuvens. Com sistemas FV espalhados geograficamente, a passagem de nuvens irá sombrear os diferentes subsistemas em momentos diferentes, reduzindo variações abruptas na geração FV como um todo. Seu objetivo é suavizar a curva resultante de potência total do sistema FV, pois um espalhamento em área tende a descorrelacionar os eventos de nuvem nos sistemas FV da minirrede (MURATA; YAMAGUCHI; OTANI, 2009; WEIGL et al., 2012; MARCOS et al., 2012; LAVE; STEIN; ELLIS, 2012). Para que este efeito seja observado, é necessário que os subsistemas FV estejam geograficamente separados por uma distância suficiente para que os eventos de sombreamento por nuvens possam ser considerados não correlatos entre as múltiplas localidades. A distância pode variar de acordo com a geografia e as condições climáticas locais. Em MARCOS et al. (2012), uma distância de 6 km entre usinas apresentou comportamento de descorrelação entre dados solarimétricos. No caso de emprego desta estratégia, é fundamental que um levantamento prévio e detalhado seja realizado nas comunidades de modo a avaliar a possibilidade e limiares para tal distribuição geográfica dos sistemas FV.

É importante destacar que, em um dia sem nuvens, os subsistemas FV dispersos apresentariam a mesma curva de geração FV total de um sistema FV centralizado, sendo que neste caso esta estratégia não traria benefícios para o sistema. Por esta razão, esta estratégia visa mitigar somente eventos de vulnerabilidade causados por rampa de potência do sistema (KLIMA; APT, 2015.SANTIAGO et al., 2016), e não eventos de vulnerabilidade por subcarga, visto que a potência total do sistema FV segue sendo a mesma em dias sem nuvens, mesmo com a dispersão do sistema em subsistemas afastados.

Neste estudo, foram analisados três cenários de dispersão geográfica de sistemas FV, conforme listado abaixo. Cada um dos cenários foi aplicado em conjunto com três dos cenários apresentados anteriormente de divisão de potência do grupo gerador Diesel em dois, quatro e oito máquinas.

- Potência instalada FV centralizada em apenas uma localidade;
- Potência instalada FV dividida igualmente em duas localidades;
- Potência instalada FV dividida igualmente em três localidades.

O sistema com apenas um gerador Diesel não apresenta eventos de vulnerabilidade por rampa de potência, logo não há interferência da dispersão geográfica sobre ele.

Os resultados da análise são apresentados na Tabela 2. Nos eventos de vulnerabilidade observados para o cenário com dois geradores Diesel para a UTE o fator limitante de penetração FV ainda é a ocorrência de eventos causados por subcarga dos geradores a Diesel, sendo que a dispersão geográfica dos sistemas FV não possibilita uma maior penetração

FV, que fica limitada em 15% da demanda máxima da localidade independente da dispersão geográfica. Nos cenários com quatro e oito geradores Diesel há uma vantagem em espalhar o sistema FV em três localidades, o que resulta em uma penetração máxima de potência FV de 30%, o dobro em relação ao cenário base para estas motorizações.

Tabela 2 – Máxima penetração FV para diferentes configurações de geradores Diesel considerando-se sistemas FV dispersos geograficamente.

Número de Geradores	Dispersão Geográfica		
	1 Localidade	2 Localidades	3 Localidades
2 geradores a Diesel	15%	15%	15%
4 geradores a Diesel	21%	27%	30%
8 geradores a Diesel	21%	27%	30%

Em suma, observa-se que para uma dispersão geográfica dos sistemas FV em três localidades há um aumento significativo da penetração de sistemas FV em sistemas que possuem quatro ou mais geradores Diesel, os quais são mais susceptíveis a eventos de rampa por apresentarem desligamentos e acionamentos de geradores com maior frequência. Portanto, quanto maior o número de máquinas do sistema, maior a importância dos eventos de rampa em relação a eventos de subcarga e maior será o impacto da dispersão geográfica. Para sistemas com um ou dois geradores Diesel por UTE, não há aumento na máxima penetração de potência FV, visto que nestes sistemas a penetração FV é limitada por eventos de vulnerabilidade ocasionados por subcarga dos geradores Diesel, e não por rampa de potência.

É importante ressaltar que este estudo possui uma limitação importante no que diz respeito a eventos transitórios como o de passagem de nuvens: esta análise foi realizada com dados na base horária, enquanto eventos transitórios de passagem de nuvens podem durar alguns segundos. Levando este fato em consideração, pode-se concluir que os resultados aqui apresentados são o pior cenário para o emprego da estratégia de dispersão geográfica da potência instalada FV, e sua efetividade pode ser mais significativa quando analisados dados com maior resolução temporal.

3.3 USO DE RASTREADORES DE UM EIXO NO SISTEMA FV

Os rastreadores solares de um eixo possibilitam que o sistema tenha um melhor aproveitamento do recurso solar ao decorrer do dia, fazendo com que os módulos FV acompanhem a trajetória solar de leste a oeste. A principal mudança que esse tipo de estrutura de fixação traz para a curva de geração do sistema FV é a maior potência entregue nos períodos intermediários da manhã e da tarde. Para a localidade do estudo, o aumento da produtividade anual do sistema FV é da ordem de 14% (1.872 kWh/kWp com rastreamento vs. 1.640 kWh/kWp sem rastreamento), um valor ligeiramente abaixo do encontrado na literatura para sistemas similares com rastreador na região nordeste do Brasil (VERÍSSIMO e colab., 2020).

O sistema com apenas um gerador Diesel, que no caso base não admite penetração de energia solar FV, não é impactado pela inserção de rastreador de um eixo no sistema, sendo que a inserção de um sistema FV com rastreador de um eixo ainda resulta em um número significativo de eventos de vulnerabilidade para o sistema com esta motorização.

A Tabela 3 apresenta, para diferentes configurações de geradores Diesel por UTE, as penetrações máximas para um sistema com rastreador de um eixo e para um sistema sem rastreador.

Tabela 3 – Máxima penetração FV para diferentes configurações de geradores Diesel e de geração FV (rastreador de um eixo e sem rastreador).

Número de Geradores	Sem rastreador	Com rastreador
2 geradores a Diesel	15%	21%
4 geradores a Diesel	21%	15%
8 geradores a Diesel	21%	18%

Observa-se que quando um sistema FV com rastreador é adicionado a um sistema que possui UTE com múltiplos geradores Diesel, o número de eventos de vulnerabilidade causados por rampa de potência tende a aumentar. Portanto, a estratégia de uso de sistema de rastreamento solar para aumento do nível máximo de penetração FV se mostra mais eficiente em sistemas limitados por eventos de subcarga, como os que possuem apenas dois geradores Diesel em sua UTE.

Vale ressaltar que a máxima penetração FV encontrada nesta análise é de 21%, que pode ser alcançada de três formas, conforme listado abaixo:

- Sistema com dois geradores Diesel e sistema com rastreador solar de um eixo;
- Sistema com quatro geradores Diesel e sistema FV fixo;
- Sistema com oito geradores Diesel e sistema FV fixo.

Dentre as opções listadas, a opção 2 (quatro geradores Diesel e sistema FV fixo) é a forma mais simples de se alcançar a máxima penetração, visto que uma instalação FV com rastreamento necessita de maior investimento para sua implantação, além de possuir montagem mais complexa, mais componentes eletrônicos e partes móveis, aumentando a frequência de atividades de manutenção do sistema. Sendo assim, pode-se concluir que o uso de rastreador solar de um eixo, nesta análise, não possui contribuição significativa para o aumento de penetração de potência FV em minirredes. É importante ressaltar que este estudo visa analisar apenas os efeitos da mitigação de eventos de vulnerabilidade em minirredes, porém o uso de rastreadores solares de um eixo em sistemas FV é hoje muito comum em sistemas conectados à rede, sendo utilizado na grande maioria das usinas FV de grande porte no Brasil.

3.4 SOBRECARGAMENTO DE INVERSORES FV

Com a redução do preço de módulos FV observada na última década, a prática de sobrecarregamento de inversores para otimização econômica de sistemas FV se tornou muito comum em sistemas conectados à rede. Os valores ótimos de sobrecarregamento são influenciados pelo perfil de irradiância de cada região, sistema de fixação (fixo ou com rastreamento), além da topologia dos módulos FV. Um inversor sobrecarregado irá limitar sua potência de saída através do aumento da tensão de operação do sistema FV, o que reduz a corrente de operação e a potência como um todo. Em um sistema isolado, esta estratégia consiste em aumentar o carregamento dos inversores, fazendo com que os picos de geração sejam limitados pelo próprio inversor e a curva de geração FV se torne mais constante ao longo do dia.

A limitação de potência pelo inversor resulta em um potencial desperdício de parte da energia solar recebida (*clipping losses*), o que reduz a taxa de desempenho do sistema FV. Por outro lado, variações abruptas da irradiância solar, podem ser absorvidas pela potência que virtualmente estaria sendo perdida pelos inversores. Portanto, essa estratégia modifica o comportamento da curva de potência da geração solar FV e tende a minimizar eventos de vulnerabilidade nos períodos com maiores irradiâncias.

Neste estudo, as análises foram realizadas para FCIs de 110%, 120%, 130%, 140% e 150%, de modo a manter os cenários analisados dentro das recomendações de fabricantes de inversores FV e evitar perdas demasiadamente elevadas por sobrecarregamento, o que pode aumentar o custo da energia gerada. Para se obter carregamentos diversos para um mesmo nível de penetração FV foi mantida a mesma potência CC e a potência CA do sistema foi variada. A Tabela 4 apresenta a máxima penetração FV para diferentes configurações de geradores Diesel e diferentes níveis de sobrecarregamento dos inversores.

Tabela 4 – Máxima penetração FV para diferentes configurações de geradores Diesel e diferentes níveis de sobrecarregamento dos inversores.

Número de Geradores	Níveis de sobrecarregamento dos inversores				
	110%	120%	130%	140%	150%
2 geradores a Diesel	15%	15%	15%	15%	15%
4 geradores a Diesel	21%	21%	24%	24%	24%
8 geradores a Diesel	21%	21%	21%	24%	24%

Os resultados obtidos mostram que a estratégia de aumento do FCI do sistema FV é capaz de aumentar a penetração FV através de mitigação de eventos de vulnerabilidade por rampa de potência. Sendo assim, esta estratégia se mostrou mais eficaz quando aplicada à sistemas com quatro ou oito geradores por UTE. É importante ressaltar que este estudo visou analisar apenas os efeitos de mitigação de eventos de vulnerabilidade em minirredes, porém o aumento do FCI de sistemas FV é um tema recorrente dentro do setor com a finalidade de otimização econômica do sistema FV.

Os resultados apresentados mostram que as estratégias passivas avaliadas resultam em um aumento do nível máximo de penetração de potência FV em sistemas isolados híbridos FV+Diesel.

A Tabela 5 resume os resultados obtidos para estratégias passivas de aumento do nível de penetração FV, apresentando as máximas penetrações de potência nos sistemas FV para os diferentes cenários estudados e suas respectivas penetrações energéticas.

Tabela 5 – Penetração máxima de potência e de energia (entre parênteses) da geração FV em sistemas sem automatização para estratégias passivas que visam o aumento da penetração FV.

Estratégia	1 Gerador Diesel	2 Geradores Diesel	4 Geradores Diesel	8 Geradores Diesel
Nenhuma	0% (0%)	15% (5%)	21% (7%)	21% (7%)
Dispersão Geográfica	0% (0%)	15% (5%)	30% (9%)	30% (9%)
Rastreador	0% (0%)	21% (7%)	21% (7%)	21% (7%)
Sobrecarregamento	0% (0%)	15% (5%)	24% (8%)	24% (8%)

A estratégia mais efetiva para o aumento do nível de penetração de sistemas FV é o uso de geradores Diesel menores nas UTEs, dividindo a potência requerida total da localidade em múltiplas máquinas. Esta estratégia resulta no uso de máquinas com menor capacidade nominal de potência, o que diminui a probabilidade e ocorrência de eventos de

vulnerabilidade por subcarga dos geradores em instantes nos quais a demanda líquida (demanda da localidade subtraída da potência FV naquele instante) é reduzida, seja por redução da demanda ou por aumento na potência FV. Entretanto, observou-se também que o aumento demasiado do número de geradores Diesel resulta em um aumento dos eventos de vulnerabilidade causados por rampas de potência, resultado de uma maior dinâmica de desligamento e acionamento das máquinas de menor potência, o que deixa o sistema mais susceptível à ocorrência de vulnerabilidade por rampa de potência. Sendo assim, conclui-se que a melhor divisão de potência do grupo gerador é de quatro ou oito máquinas, cada uma com 25% ou 12,5% da potência requerida da localidade, permitindo uma penetração de potência FV máxima de 21% da demanda máxima e penetração energética de 7% da fonte renovável.

4 CONCLUSÃO

Todas as estratégias apresentaram algum incremento do nível de penetração de inserção FV nas minirredes.

A estratégia mais efetiva para o aumento do nível de penetração de sistemas FV é o uso de geradores Diesel menores nas UTEs, dividindo a potência requerida total da localidade em múltiplas máquinas. Esta estratégia resulta no uso de máquinas com menor capacidade nominal de potência, o que diminui a probabilidade e ocorrência de eventos de vulnerabilidade por subcarga dos geradores em instantes nos quais a demanda líquida (demanda da localidade subtraída da potência FV naquele instante) é reduzida, seja por redução da demanda ou por aumento na potência FV. Entretanto, observou-se também que o aumento demasiado do número de geradores Diesel resulta em um aumento dos eventos de vulnerabilidade causados por rampas de potência, resultado de uma maior dinâmica de desligamento e acionamento das máquinas de menor potência, o que deixa o sistema mais susceptível à ocorrência de vulnerabilidade por rampa de potência. Sendo assim, conclui-se que a melhor divisão de potência do grupo gerador é de quatro ou oito máquinas, cada uma com 25% ou 12,5% da potência requerida da localidade, permitindo uma penetração de potência FV máxima de 21% da demanda máxima e penetração energética de 7% da fonte renovável.

A estratégia de divisão da potência requerida em múltiplos geradores Diesel acaba sendo limitada pela ocorrência de eventos de vulnerabilidade por rampa de potência, os quais podem ser mitigados combinando esta estratégia com outra estratégia passiva de aumento de nível de penetração FV. Dentre as estratégias analisadas, a que permitiu maior penetração FV foi a dispersão geográfica dos sistemas. A combinação destas duas estratégias (divisão da potência do grupo gerador e dispersão geográfica) resulta em um nível de penetração máximo de potência FV de 30% (aumento de 9% em relação ao caso base) e penetração energética de 9% (aumento de 2%).

Para UTEs com dois geradores Diesel, apenas o uso de rastreador solar resultou em um aumento do nível de penetração máximo de potência FV, que passou de 15% (no cenário base) para 21% (aumento de 6%).

Para UTEs com um gerador Diesel, nenhuma estratégia possibilita o uso de energia solar FV para atendimento parcial da demanda. Isso ocorre porque a potência requerida para esta localidade é bastante acima da demanda medida no ano analisado, sendo que mesmo um sistema FV de pequeno porte já causa eventos de vulnerabilidade por subcarga do gerador.

Para maior penetração FV no contexto de redes isoladas híbridas, poderiam ser utilizados sistemas FV automatizados com a operação da geração. Além disso uma alternativa para uma maior penetração FV é a utilização de sistemas de armazenamento de energia elétrica em baterias.

5 Agradecimentos

Os autores apoiamos recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através de suas bolsas de doutorado e mestrado

6 REFERÊNCIAS

- ASENSIO, Miguel e CONTRERAS, Javier. Impact of demand response in an isolated system with high PV penetration. Set 2014, [S.l.]: IEEE, Set 2014. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6934605/>>.
- KLIMA, Kelly e APT, Jay. **Geographic smoothing of solar PV: Results from Gujarat**. Environmental Research Letters, v. 10, n. 10, 2015.
- LAVE, Matthew e STEIN, Joshua S. e ELLIS, Abraham. **Analyzing and simulating the reduction in PV powerplant variability due to geographic smoothing in Ota City, Japan and Alamosa, CO**. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, v. 2, n. PART 2, 2012.
- MARCOS, Javier e colab. **Smoothing of PV power fluctuations bygeographical dispersion**. PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS, v. 20, n. 6, p. 226–237, 2012.
- MURATA, Akinobu e YAMAGUCHI, Hiroshi e OTANI, Kenji. **A method of estimating the output fluctuation of many photovoltaic power generation systems dispersed in a wide area**. Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi), v. 166, n. 4, p. 9–19, 2009.
- RIBEIRO, Luiz A.de S. e colab. **Making isolated renewable energy systems more reliable**. Renewable Energy, v. 45,

p. 221–231, 2012.

RÜTHER, Ricardo e colab. **Cutting on Diesel, boosting PV: The potential of hybrid Diesel/PV systems in existing mini-grids in the Brazilian Amazon.** Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, v. C, p. 2620–2623, 2003.

SANTIAGO, Isabel e colab. **Influence of photovoltaic installation angles and geographical dispersion in the smoothing of photovoltaic fleet power fluctuations.** IEEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016.

SHIVASHANKAR, S. e colab. **Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources - A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 59, p. 1170–1184, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.059>>.

VERÍSSIMO, Pedro Henrique Alves e colab. **Area and LCOE considerations in utility-scale, single-axis tracking PV power plant topology optimization.** Solar Energy, v. 211, n. July, p. 433–445, 2020.

WEIGL, Toni e colab. **Modelling and validation of spatial irradiance characteristics for localised irradiance fluctuations and enhancements.** Proc. of PVSEC 2012, p. 3801–3804, 2012.

EVALUATION OF PASSIVE STRATEGIES TO INCREASE THE PENETRATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC GENERATION IN FV+DIESEL HYBRID MINIGRIDS

Abstract: Brazil has the largest integrated energy system controlled by a centralized operator in the world, but the north of Brazil has geographical difficulties in connecting to this centralized network. Considering this, Brazil still has 212 isolated systems, forming the so-called SISOL. According to the literature, the typical penetration of PV generators in non-automated isolated systems varies from 10% to 20%; however, there are passive strategies that can be used in non-automated isolated systems that seek to reduce the instantaneous variability of solar energy, enabling the increase in maximum PV penetration. In this paper, the effects of four passive strategies for increasing the level of maximum PV penetration are analyzed, these being: splitting Diesel generator set power into multiple generators, which provides a maximum penetration of 21%; geographic dispersion of PV systems, which provides a maximum penetration of 30%; use of single-axis trackers in PV systems, which provides a maximum penetration of 21%; and overloading of PV inverters, which provides a maximum penetration of 24%.

Keywords: Amazon. Isolated Systems. Increased PV penetration.