

# Renováveis

ENERGIAS COMPLEMENTARES

Ano 2 - Edição 26 / Agosto de 2018



Atitude.editorial

## Energia solar fotovoltaica

Análise da viabilidade econômica do suporte de potência reativa por fazendas solares fotovoltaicas

Energia eólica: Um futuro que chega cada vez mais rápido

Energia solar: Geração distribuída solar fotovoltaica, competitividade e eficiência para a matriz



Por Luís Felipe Normandia Lourenço, Renato Machado Monaro,  
Maurício Barbosa de Camargo Salles e José Roberto Cardoso\*



# ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA POR FAZENDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS



## 1 - INTRODUÇÃO

As preocupações ambientais com o aquecimento global e as mudanças climáticas resultaram em uma abrupta mudança do setor de geração de energia elétrica. A princípio, os geradores de energia elétrica eram baseados em recursos ditos despacháveis, ou seja, que a energia elétrica injetada na rede elétrica poderia ser controlada. Porém, com a necessidade de mudança para fontes amigáveis ao meio ambiente, geradores baseados em recursos como o vento e a irradiação solar ganharam espaço em diversas matrizes energéticas ao redor do mundo.

No entanto, estes novos recursos que estão ganhando cada vez um espaço maior na matriz energética possuem uma característica intrínseca: a sua variabilidade. Assim, estes recursos não são classificados como despacháveis, e a integração de níveis cada vez maiores de penetração destes recursos na rede elétrica apresenta um desafio para os operadores dos sistemas de transmissão. No caso das fazendas solares fotovoltaicas, o conversor fonte de tensão necessário para interface entre a geração dos módulos fotovoltaicos em corrente contínua (CC) e a rede elétrica em corrente alternada (CA) é utilizado bem abaixo de sua capacidade nominal durante o dia e, portanto, poderia ser utilizado para prover serviços ancilares à rede elétrica, auxiliando a manter a sua estabilidade.

Uma das preocupações mais recorrentes da integração de altos níveis de penetração de fontes variáveis na rede elétrica é a estabilidade de tensão. Um equipamento bastante utilizado para auxiliar a rede a manter esta estabilidade é o Compensador Estático Síncrono ou STATCOM (Static Var Compensator, do inglês). Este equipamento possui como principal componente um conversor fonte de tensão similar ao utilizado para a interface dos painéis fotovoltaicos com a rede elétrica, e este fato levou à proposição do PV-STATCOM [1]. Assim, dadas as preocupações com a estabilidade de tensão, a tendência é o aumento da utilização dos conversores inteligentes (smart inverters) nas redes de distribuição e transmissão e a revisão dos códigos de rede para incluírem a provisão de serviços ancilares por parte de geradores fotovoltaicos.

Ao se utilizar o conversor de uma fazenda solar fotovoltaica para prover o suporte de potência reativa, uma componente de corrente em eixo de quadratura (relacionada à potência reativa) é adicionada à componente de eixo direto, (relacionada à potência ativa) causando um aumento do uso da capacidade do conversor. Porém, como a soma dessas componentes é vetorial, o impacto nas perdas de energia dentro da fazenda solar deve ser mensurado para a correta avaliação da viabilidade econômica do suporte de reativos. Esta discussão do custo técnico de fazendas solares operando como PV-STATCOMs foi introduzida por [2-4].

O objetivo deste artigo é apresentar uma discussão da viabilidade econômica da operação de fazendas solares fotovoltaicas como PV-STATCOMs sujeitas aos preços praticados no âmbito de serviços ancilares da ANEEL. Para isso, as origens dos custos técnicos e uma breve metodologia para avaliá-los é apresentada e discussões inerentes ao suporte de reativos por fazenda solares são conduzidas.

## 2 - O SUPORTE DE REATIVO POR FAZENDAS SOLARES E SEU CUSTO TÉCNICO

O suporte de reativos por uma fazenda solar depende basicamente de dois fatores: capacidade disponível no conversor CC/CA e do nível de tensão do lado DC do conversor. A capacidade disponível no conversor é determinada pela estratégia da operação da fazenda solar. Caso a prioridade seja dada à geração de potência ativa, então a capacidade remanescente pode ser obtida através de [1].

$$Q_{cap} = \sqrt{S_{nom}^2 - P^2} \quad (1)$$

**Unitron**  
ENERGIA DO SOL.

COMO VOCÊ ESTÁ APROVEITANDO  
A ENERGIA SOLAR?

SEJA QUAL FOR A SUA  
NECESSIDADE  
A UNITRON TEM TODOS  
OS ELEMENTOS PARA  
O APROVEITAMENTO DE  
ENERGIA SOLAR  
FOTOVOLTAICA.

Módulos/Painéis



Luminárias Solares



Inversores



Controladores



Conexão à rede



Postes Solares



Onde  $Q_{cap}$  é a capacidade remanescente do conversor CC/CA,  $S_{nom}$  é potência aparente do inversor e  $P$  é a potência ativa gerada. Porém, dependendo do nível de tensão do lado CC do conversor, a capacidade  $Q_{cap}$  pode ser reduzida conforme mostrado em [2]. No caso de uma fazenda solar fotovoltaica de um estágio, o nível de tensão do lado CC do conversor está ligado ao rastreador do ponto de máxima potência (MPPT, maximum power point tracker do inglês).

Existem quatro estratégias que podem ser adotadas para o aumento de  $Q_{cap}$ : superdimensionamento do conversor, independência do controle de tensão CC em relação ao MPPT, redução da produção de potência ativa ou a adição de um segundo estágio ao conversor. O superdimensionamento do conversor em 10% de sua potência aparente nominal garante a injeção de 46% de reativos na máxima irradiância solar, situação em que toda a capacidade do conversor estaria em uso para a geração de potência ativa. A adoção de controle de tensão CC independente do MPPT garantiria que a tensão do lado CC não seria um limitante da capacidade como ocorre em casos previstos em [2], porém, como o MPPT não é seguido, há uma diminuição da potência ativa gerada, o que acarreta em uma perda de receita pela fazenda solar.

Outra estratégia que impacta a receita da fazenda solar é a redução da produção da potência ativa. Neste caso, o operador do sistema definiria uma capacidade mínima do conversor para ficar disponível para o suporte de potência reativa. Assim, esta capacidade mínima disponível reduziria a produção de potência ativa em algumas horas do dia. Por fim, outra alternativa seria a adição de um segundo estágio à fazenda solar. A adição de um segundo estágio à fazenda solar consiste na inclusão de um conversor CC/CC que desacopla a tensão CC aplicada ao painel da tensão CC de entrada do conversor fonte de tensão. Esta alternativa possui um investimento inicial maior (adição do segundo estágio), porém como os níveis de tensão do MPPT e do conversor estão desacoplados, um controle variável da tensão CC como o sugerido em [2] poderia garantir  $Q_{cap}$  sem afetar a produção de potência ativa. Os esquemas simplificados de uma fazenda solar de um e dois estágios são mostrados nas figuras 1 e 2.

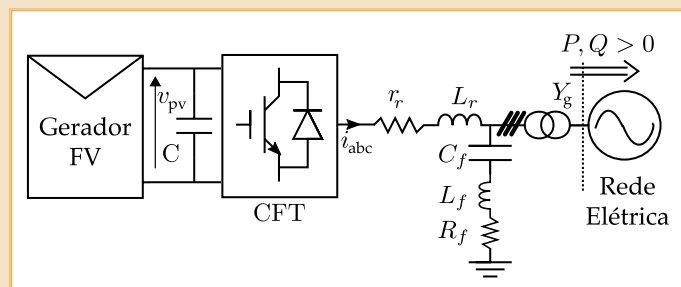


Figura 1 - Fazenda solar fotovoltaica de um estágio

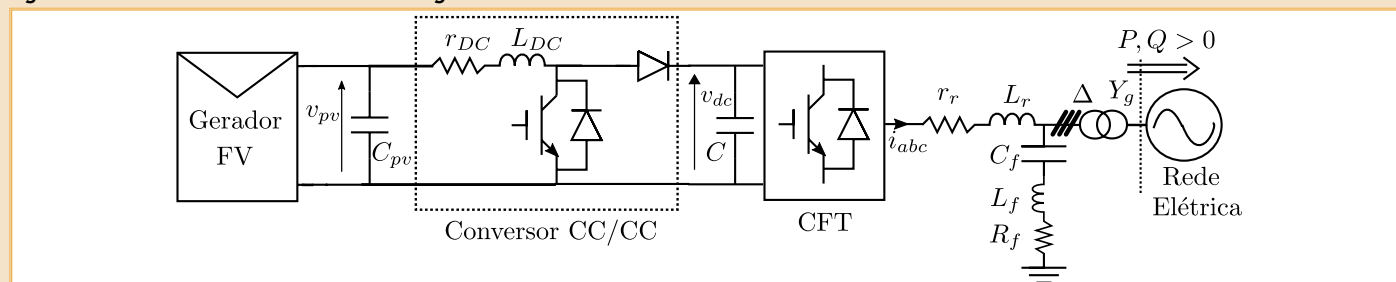


Figura 2 - Fazenda solar fotovoltaica de dois estágios

Nas figuras 1 e 2 estão representadas a conexão do Gerador Fotovoltaico (FV) à rede elétrica por meio de conversores de um e dois estágios respectivamente. O acrônimo CFT significa conversor fonte de tensão. Nestas figuras  $r_r$  e  $L_r$  indicam a resistência e a indutância do reator de interface;  $R_f$ ,  $L_f$  e  $C_f$  a resistência, indutância e capacitância do filtro;  $P$  e  $Q$  indicam a potência ativa e reativa e têm seus sentidos positivos marcados na figura;  $C$  indica a capacitância conectada à entrada do CFT e  $v_{pv}$  a tensão CC aplicada ao gerador FV. O transformador é conectado em estrela-triângulo como indicado. Na figura 2,  $C_{pv}$  indica o capacitor entre o gerador FV e o conversor CC/CC;  $v_{dc}$  indica a tensão de entrada no CFT; por fim,  $r_{DC}$  e  $L_{DC}$  indicam a resistência e indutância utilizadas no projeto do conversor CC/CC.

O custo técnico da operação de uma fazenda fotovoltaica durante a sua operação é devido às perdas de energia elétrica no funcionamento de seus componentes. Para uma fazenda solar de um estágio, as principais fontes de perdas de energia são o reator de interface, o transformador, o filtro e o conversor fonte de tensão. Na fazenda solar de dois estágios, além de todos os componentes mencionados há a adição das perdas do conversor CC/CC. O custo técnico de fazendas solares de dois estágios é discutido em detalhe em [3]. Neste artigo, o foco está na discussão dos custos técnicos das fazendas solares de um estágio.

O principal fator que afeta as perdas de energia no reator de interface, filtro e transformador é a corrente elétrica. Quando há suporte de potência reativa por parte da fazenda solar, a soma entre a componente da corrente em quadratura e a componente da corrente em eixo direto (relacionada à potência ativa) é vetorial. Assim, há um aumento não linear nas perdas de energia comparando ao cenário onde apenas potência ativa é injetada na rede elétrica. Já a tensão do lado CC do conversor fonte de tensão é o principal parâmetro que influencia as perdas deste equipamento.

Frente as quatro estratégias apresentadas anteriormente, pode-se notar que todas aquelas que se aplicam às fazendas solares de um estágio possuem influência na tensão CC de entrada do conversor fonte de tensão e/ou sobre o nível de corrente no sistema. Assim, a análise dos custos técnicos se faz importante para avaliar o impacto na receita das fazendas solares para que elas sejam adequadamente remuneradas pelo provimento do suporte de potência reativa. Quando há o suporte de potência reativa, o custo técnico dessa operação foi definido por [4] como sendo a diferença entre as perdas de energia no cenário com suporte de potência reativa e as perdas de energia no cenário sem suporte de potência reativa. Assim, pode-se determinar se o preço

sendo pago pelo mercado de reativos viabiliza este tipo de operação por parte das fazendas solares. Nos cenários nos quais há a redução de potência ativa para o aumento da capacidade disponível ou naqueles em que a prioridade não é dada para a geração de potência ativa (tensão CC de entrada do conversor fonte de tensão não segue o MPPT) também deve ser incluída a perda de receita da possível geração de potência ativa para verificar se a remuneração está adequada.

### 3 - LEVANTAMENTO DOS CUSTOS TÉCNICOS NO SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA POR FAZENDAS SOLARES

Para o levantamento dos custos técnicos é necessário, primeiramente, identificar a sua origem. No reator de interface de núcleo de ar, as principais perdas são devidas ao efeito Joule, assim como no filtro. Estas perdas são calculadas como produto da resistência pelo quadrado da corrente que passa nestes equipamentos.

No transformador, as perdas são divididas em duas categorias: perdas no núcleo e perdas no cobre. As perdas no núcleo são devidas à histerese magnética e também às correntes de Foucault. Elas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada nos enrolamentos do transformador. As perdas no cobre são devidas ao efeito Joule. Elas são calculadas como o produto entre a resistência do enrolamento e o quadrado da corrente que circula nos enrolamentos.

O conversor fonte de tensão é baseado em transistores bipolares com porta isolada (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor do inglês) com diodos em antiparalelo. Os diodos e IGBTs são dispositivos semicondutores e suas perdas podem ser divididas em duas classes: as perdas por condução e as perdas por chaveamento. As perdas por condução são devidas ao efeito Joule por haver circulação de corrente em uma junção polarizada por tensão. Já as perdas por chaveamento são devidas à incapacidade dos dispositivos semicondutores de extinguirem a corrente que passa por eles imediatamente após desligados, ou de levar a corrente para seu nível ligado imediatamente quando acionados. Esta parcela das perdas do conversor não é trivial para ser calculada precisamente através de fórmulas fechadas como as demais perdas descritas nesta seção.

Uma maneira imediata de se calcular as perdas por chaveamento é a modelagem precisa da física dos dispositivos semicondutores. Porém esta abordagem é computacionalmente inviável para a análise de grandes sistemas de potência [5]. Isso ocorre, pois, a física dos semicondutores necessita de passos de simulação da ordem de nano segundos, enquanto que as simulações de interesse em sistemas de potência podem requerer que segundos sejam simulados para análise de um fenômeno específico. Assim, uma alternativa viável para o cálculo das perdas destes componentes sem sobrecarregar de forma extrema as simulações de sistemas de potência é através de look-up tables [6]. Fluxogramas detalhados de como calcular as perdas em fazendas solares fotovoltaicas de um e dois estágios são apresentados em [3]. A partir dos detalhes apresentados acima, para o cálculo dos custos técnicos, é necessário agora levantar as perdas de energia em dois cenários: o primeiro com o suporte de reativos e o segundo sem. Assim, subtraindo a primeira parcela da segunda, obtém-se finalmente os

custos técnicos da operação de fazendas voltaicas provendo suporte de potência reativa para a rede elétrica.

## 4 - MAPAS DE OPERAÇÃO E CUSTOS TÉCNICOS ASSOCIADOS

Nesta seção é apresentada a derivação dos custos técnicos da operação de uma fazenda solar fotovoltaica de um estágio como PV-STATCOM com potência nominal de 850 kWp. A partir dos custos técnicos obtidos e dos preços praticados pela energia solar e pelo suporte de potência reativa no mercado brasileiro, uma estimativa do lucro bruto da operação como PV-STATCOM é obtida. Vale ressaltar que consideramos o lucro bruto o resultado da operação receita no fornecimento de reativos subtraída dos custos técnicos para o fornecimento dos reativos. O custo de operação e manutenção não é considerado neste trabalho. Os parâmetros para simulação escolhidos estão expostos em [3].

### 4.1 - OPERAÇÃO SEM O SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA

Conforme mencionado, para a estimativa dos custos técnicos de uma fazenda solar operando como PV-STATCOM, é primeiramente necessário obter as perdas durante a operação considerando apenas a geração de potência ativa. Os resultados obtidos são mostrados na figura 3.

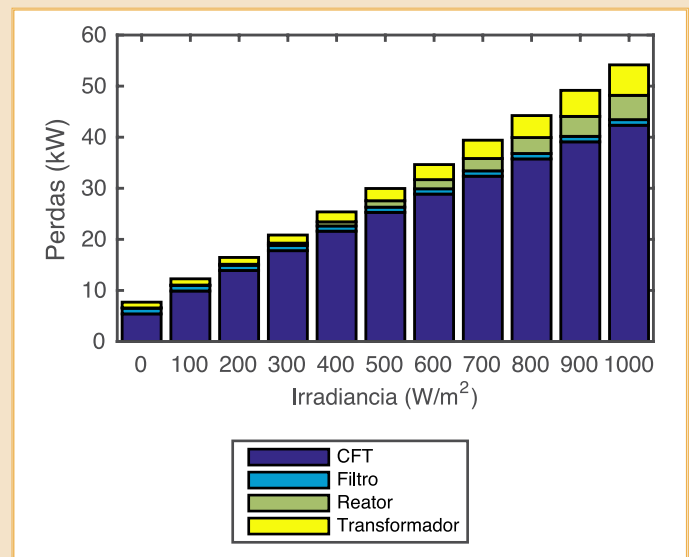


Figura 3 - Perdas por equipamento em uma fazenda solar operando sem suporte de potência reativa

Analisando a figura 3 nota-se que as perdas aumentam de forma aproximadamente linear com a irradiância solar incidente. Além disso, nota-se que as perdas no conversor fonte de tensão são dominantes em relação aos demais equipamentos da fazenda solar. Durante a fase de projeto, nota-se a importância da escolha adequada do conversor.

### 4.2 - OPERAÇÃO COM O SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA

Para a obtenção das perdas da fazenda solar fornecendo o suporte de reativos para a rede elétrica é necessário avaliar um grande conjunto



de cenários. Deve-se variar a referência de potência reativa de -1,0 p.u. a 1,0 p.u. (considerando como base a capacidade do conversor) e também a irradiância solar incidente de 0 a 1000 W/m<sup>2</sup> (ou até a irradiância máxima do local escolhido). Assim, obtém-se uma família de curvas semelhantes à figura 3, a curva para quando a irradiância solar incidente é 600 W/m<sup>2</sup> é mostrada na figura 4.

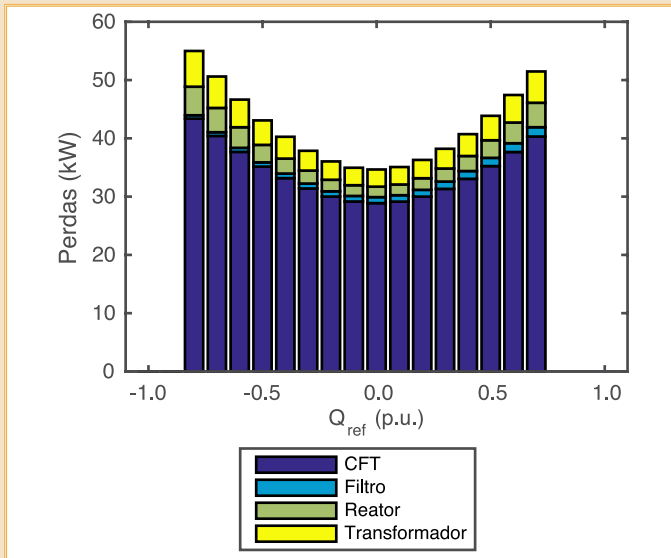


Figura 4 - Perdas por equipamento em uma fazenda solar operando com suporte de potência reativa.

Na figura 4, duas características podem ser ressaltadas: a primeira delas é que a figura não é simétrica em relação ao zero e que segue um comportamento quadrático, diferentemente da figura 3 que segue um comportamento linear. As perdas não são simétricas em relação ao zero, pois há limitações diferentes para o suporte de reativos de sinais diferentes quando a irradiância solar é 600 W/m<sup>2</sup>. Para valores negativos, o limite que restringe a injeção de reativos é a capacidade do conversor e, para valores positivos, o limite é o nível de tensão CC na entrada do conversor pois os cenários aqui considerados priorizam a geração de potência ativa, ou seja, a tensão CC deve seguir o MPPT.

### 4.3- MAPA DE CUSTOS TÉCNICOS DE UMA FAZENDA SOLAR FORNECENDO SUPORTE DE POTÊNCIA REATIVA

O mapa de operação de custos técnicos pode ser obtido através da subtração das curvas obtidas na seção 4.2 das curvas obtidas na seção 4.1. O resultado desta operação é mostrado na figura 5.

Na figura 5 estão resumidas as principais informações sobre a operação de uma fazenda solar como PV-STATCOM: a capacidade disponível para o suporte de potência reativa e o seu custo associado para cada um dos pontos de operação definidos pela irradiância solar e pelo sinal de referência de potência reativa. Esta figura, no entanto, não é suficiente para determinar a viabilidade econômica deste tipo de

## Sistema de Gerenciamento de Energia

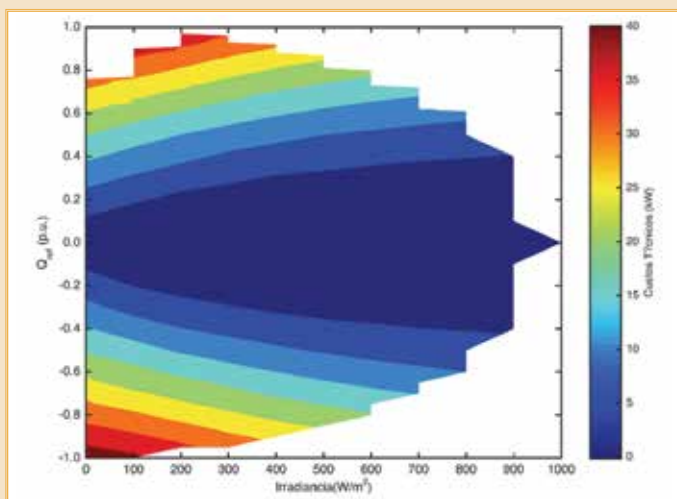
### Utiliza base instalada de relés de proteção

Não requer instalação de TCs de medição e multimedidores dedicados por carga

### Integração com relés de diferentes fabricantes

Através de protocolos de comunicação padrão como DNP3, Modbus e IEC 61850

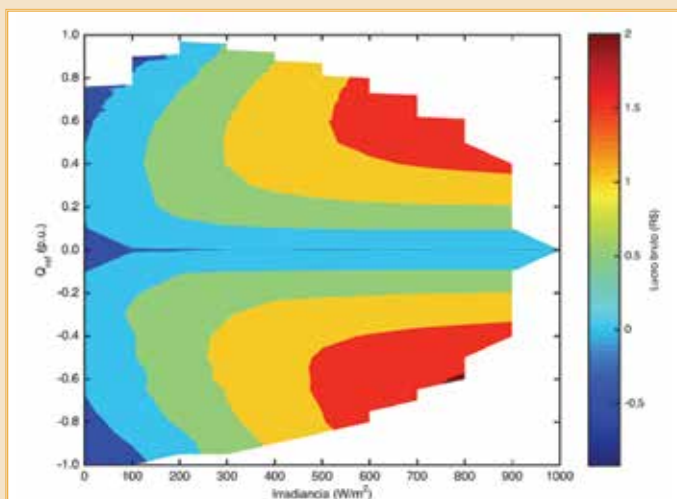




**Figura 5 - Mapa de custos técnicos de uma fazenda solar fotovoltaica fornecendo suporte de potência reativa**

operação da fazenda solar.

Assim, um mapa do lucro bruto pode ser obtido baseado nas informações disponíveis na figura 5. Considera-se como lucro bruto a receita do suporte de potência reativa subtraída dos custos técnicos para o suporte de potência reativa. Para a obtenção da receita do suporte de potência reativa foi considerado um valor de 6,88 R\$/MVarh [7]. Já para os custos técnicos, foi considerado o valor de 145,68 R\$/MWh, valor médio da energia solar negociada nos últimos leilões de energia. O resultado está mostrado na figura 6.



**Figura 6 - Lucro bruto da operação de suporte de potência reativa considerando uma hora de operação por ponto**

A figura 6 considera que a fazenda solar operou durante uma hora em cada um dos pontos de operação determinados pela irradiância solar e pelo sinal de referência de potência reativa. Nota-se que existem áreas onde o lucro bruto é negativo, ou seja, para estes pontos de operação, o suporte de potência reativa não é vantajoso do ponto de vista da fazenda solar. Duas alternativas devem ser analisadas: a revisão da tarifa para estes pontos de operação ou facultar à fazenda solar de participar no suporte de potência reativa nestas condições.

## 5 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma discussão sobre os custos técnicos da operação de uma fazenda solar como PV-STATCOM, considerando os preços praticados no mercado brasileiro. Primeiramente, apresentou-se uma discussão sobre os limites do suporte de potência reativa e na sequência foram apresentadas às origens de perdas numa fazenda solar, bem como discutiu-se brevemente maneiras de calculá-las. A partir dos cálculos das perdas foi possível obtê-las em duas situações: com o suporte de potência reativa e sem o suporte de potência reativa. Através da subtração destes dois casos foi obtido o mapa de custos técnicos da operação de uma fazenda solar como PV-STATCOM. Além disso, foi obtido um mapa de lucro bruto (receita do serviço ancilar subtraída dos custos técnicos, sem incluir operação e manutenção) durante este tipo de operação. Notou-se a existência de alguns pontos de operação nos quais o suporte de reativos não é economicamente vantajoso para a fazenda solar. Desta forma, a regulação do suporte de potência reativa de fazendas solares deve ser discutida, revisando as tarifas para que as fazendas solares fotovoltaicas sejam adequadamente remuneradas pelo serviço prestado à rede elétrica.

## REFERÊNCIAS

1. Varma, R.K.; Khadkikar, V.; Seethapathy, R. Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2009, 24, 983–985.
2. Lourenco, L. F. N., Salles, M. B., Monaro, R. M., & Quéval, L. [2018]. Technical Cost of Operating a Photovoltaic Installation as a STATCOM at Nighttime. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
3. Lourenço, L. F., Monaro, R. M., Salles, M. B., Cardoso, J. R., & Quéval, L. [2018]. Evaluation of the Reactive Power Support Capability and Associated Technical Costs of Photovoltaic Farms' Operation. *Energies*, 11(6), 1–19.
4. Lourenço, L. F. N., de Camargo Salles, M. B., Monaro, R. M., & Quéval, L. [2017, November]. Technical cost of PV-STATCOM applications. In *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017 IEEE 6th International Conference on (pp. 534–538). IEEE.
5. Rajapakse, A.; Gole, A.; Wilson, P. Electromagnetic transients simulation models for accurate representation of switching losses and thermal performance in power electronic systems. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005, 20, 319–327.
6. Munk-Nielsen, S.; Tutelea, L.N.; Jaeger, U. Simulation with ideal switch models combined with measured loss data provides a good estimate of power loss. In *Proceedings of the Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference, Rome, Italy, 8–12 October 2000; Volume 5*, pp. 2915–2922.
7. Tarifas de Energia de Otimização e de Serviços Ancilares para 2018. Disponível online: [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/fixadas-as-tarifas-de-energia-de-otimizacao-e-de-servicos-ancilares-para-2018/656877?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/fixadas-as-tarifas-de-energia-de-otimizacao-e-de-servicos-ancilares-para-2018/656877?inheritRedirect=false) (acessado em 07/06/2018).

Maurício B. C. Salles é Professor do Laboratório de Redes Elétricas Avançadas - LGrid, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado - LMAg Núcleo de Pesquisa em Redes Elétricas Inteligentes - NAPREI Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pós-Graduação: Integração de Energias Renováveis em Sistemas Elétricos. Graduação: Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia e equipe