

# ANÁLISE DOS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO FATOR DE POTÊNCIA DE UMA EMPRESA AGROINDUSTRIAL

**Lucas Soares Gusman** – lucasgusman@yahoo.com.br

**Heverton Augusto Pereira** – heverton.pereira@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica

**Allan Fagner Cupertino** – afcupertino@ieee.org

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

**Adriano da Silva Antônio** – adrianomrprojelt@gmail.com

Energy Engenharia

**Resumo.** Atualmente, no Brasil, um fator de potência abaixo de 0,92 indutivo ou capacitivo é passível de tarifa, pois isso significa menos potência ativa sendo utilizada para a mesma quantidade de potência aparente recebida, resultando em maior desgaste ou utilização do sistema de distribuição. Geralmente, no Brasil, os SFCRs (sistemas fotovoltaicos conectados à rede) operam em fator de potência unitário, entregando apenas energia ativa para uma unidade consumidora, reduzindo o consumo de energia elétrica ativa da concessionária. Como consequência, ocorre a redução dos custos em energia ativa faturada no final de um mês. No entanto, retirar menos potência ativa da rede e a mesma quantidade de potência reativa, provoca uma queda no fator de potência, que poderá gerar uma cobrança maior sobre a energia reativa. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso para análise dos impactos na cobrança de energia reativa com e sem a utilização de um SFCR instalado em uma empresa de processamento, beneficiamento e comercialização de café localizada em Viçosa, MG. Atualmente, a empresa utiliza bancos de capacitores para correção de potência com operação manual, da qual dados de demanda de potência ativa e reativa foram coletados sem a presença do SFCR. Os dados coletados a cada 15 minutos durante o mês de abril de 2017 foram analisados para verificações do fator de potência. A produção diária do SFCR foi simulada por meio de um software computacional em intervalos de 5 minutos no mesmo local com uma radiação incidente de 4,9kWh/m<sup>2</sup>dia. Uma análise do aumento do custo da energia reativa mostra que a instalação de um SFCR pode não trazer a redução na conta esperada, uma vez que o custo com energia reativa pode ter no mesmo nível da redução obtida com o SFCR mostrou.

**Palavras-chave:** Fator de potência, usinas fotovoltaicas, conta de energia elétrica

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de painéis fotovoltaicos juntamente com conversores eletrônicos vem aumentando constantemente com o uso de novas tecnologias e redução de custos. Assim, empresas já passam a incluí-los como fonte de geração de energia (Divan, et al., 2016). Além de aumentar a economia da energia ativa consumida pela rede da concessionária local, o painel usa uma fonte de energia renovável e altamente confiável, dispensando o uso de matérias primas não-renováveis e prejudiciais à natureza como um todo, sendo, por tais motivos, uma forma de energia cada vez mais utilizada no mundo (Elnozahy e Salama, 2016).

O painel fotovoltaico funciona a partir do efeito fotovoltaico gerando tensões e correntes contínuas. Isso se deve à movimentação de elétrons na presença de energia luminosa em um semicondutor dopado com camadas N e P. Com isso, o painel solar pode ser entendido como uma fonte de corrente dependente da radiação solar (McEvoy, et al., 2013).

Dessa forma, introduzir um SFCR (“Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede”, denominação dada a usinas fotovoltaicas de pequeno porte) é extremamente benéfico, já que o mesmo consegue gerar a potência ativa que será injetada durante o dia através do inversor. Portanto, o consumo de energia ativa faturado durante um mês para uma unidade consumidora será menor.

Como o SFCR normalmente trabalha com fator de potência unitário, o reativo necessário para funcionamento dos equipamentos será demandado da rede e será cobrado pela concessionária. Com a demanda de potência ativa caindo e a reativa se mantendo nas mesmas proporções, o fator de potência (quantidade de potência ativa em relação à potência aparente demandada) diminuirá. Atualmente, no Brasil, um fator de potência abaixo de 0,92 capacitivo ou indutivo gera uma cobrança devido à energia reativa excedente (ANEEL, 2010), o que pode ser relevante para o fluxo de caixa da empresa.

Em termos de qualidade de energia, o controle do fator de potência se torna essencial e um dos focos de muitos trabalhos (González, et al., 2014). Existem métodos de controle de fator de potência fundamentais. Eles podem ser divididos nas seguintes categorias: potência reativa fixa (Q fixo), fator de potência fixo (FP fixo), fator de potência dependente da potência ativa (FP (P)) e potência reativa dependente da potência ativa (Q (P)) (Demirok, et al., 2011). Existem ainda meios interessantes que levam em conta o controle em função da radiação solar, o que é, indiretamente, o método FP (P), sendo uma alternativa aos métodos Q (P) ou FP fixo que são os mais utilizados (Gölkmen, Hu e Chen, 2017).

O estudo de caso realizado foi motivado pelo custo gerado devido ao excedente reativo, visto que ela sofre efeito relevante devido a implementação de usinas fotovoltaicas e poucos estudos sobre o assunto são realizados. Tomou-se como referência uma empresa de processamento, beneficiamento e comercialização de café localizada na cidade de Viçosa – MG, durante todo mês de abril/2017, no qual suas potências ativa e reativa foram registrados a cada 15 minutos, conforme foi disponibilizado pela memória de massa da concessionária local. Além disso, o aplicativo Estimate® (GESEP: EStimate, 2017) foi utilizado para projetar uma usina para essa empresa tendo em vista seu consumo atual de energia ativa. Essa empresa ainda conta com um método de correção de fator de potência básico, consistindo de um banco de capacitores manual, ligado ou desligado manualmente por um operador, tendo em vista o valor atual de fator de potência.

Em suma, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso onde serão verificados os efeitos do SFCR no consumo de energia ativa e reativa, e conseqüentemente no fator de potência durante o mês de abril do ano de 2017, a partir de uma base de dados coletados na empresa. Além disso, generalizações do modelo utilizado e considerações sobre os efeitos da queda do fator de potência serão realizadas.

## 2. BASE DE DADOS

Para o início do estudo de caso, a distribuidora com a concessão de ofertar energia elétrica na cidade, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), forneceu a memória de massa contendo os dados de potências ativa, indutiva e capacitiva demandada durante todo o mês de abril de 2017, em intervalos de 15 min. Na Fig. 1, encontram-se as potências ativa (P1), reativa indutiva (P\_Ind) e capacitiva (P\_Cap). O símbolo Qt trata da potência reativa total e é dada pela Eq. (1).

$$Q_t = P_{Ind} - P_{Cap} \quad (1)$$

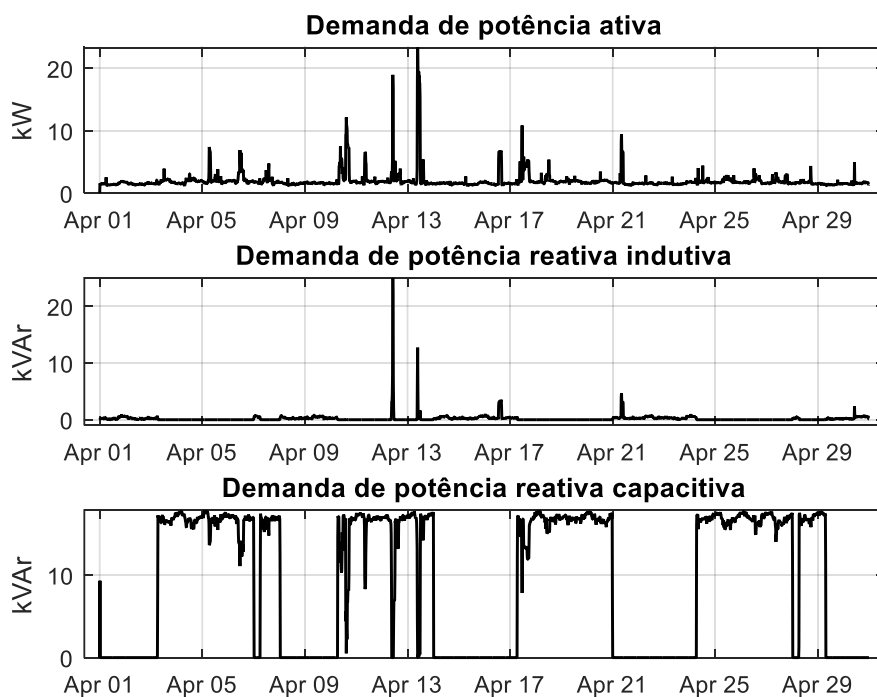


Figura 1 – Demanda mensurada de potências na empresa durante o mês de abril de 2017.

De fato, os valores de potências reativas estão muito altos em relação aos da potência ativa. Isso mostra que o fator de potência tende a ser mais baixo. As variações do fator de potência (indutivo e capacitivo) durante o mês foram calculadas conforme mostra a Eq. (2) (Johnson, *et al.*, 1990) e se encontram na Fig. 2.

$$FP_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_t^2}} \quad (2)$$

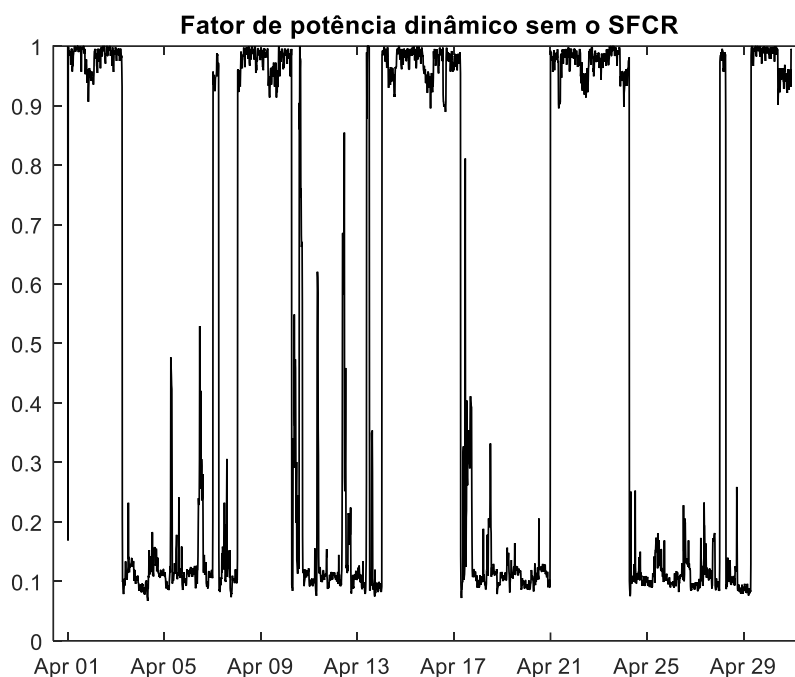


Figura 2 - Variações do fator de potência ao longo do mês sem a presença do SFCR.

De fato, a potência reativa total trata da diferença entre a potência indutiva requerida da rede e a potência fornecida pelo banco de capacitores para correção do fator de potência. Observe na Fig. 3 os meios tarifários para cobrança da tarifa de energia. Pode-se optar por tarifar apenas excedente capacitivo no período de 00:00h até 06:00h e apenas excedente indutivo entre 06:00 e 24:00h, ou apenas o excedente indutivo durante as 24h do dia. A CEMIG opta pelo primeiro método, sendo que fatores de potência capacitivos e indutivos são cobrados da mesma forma.

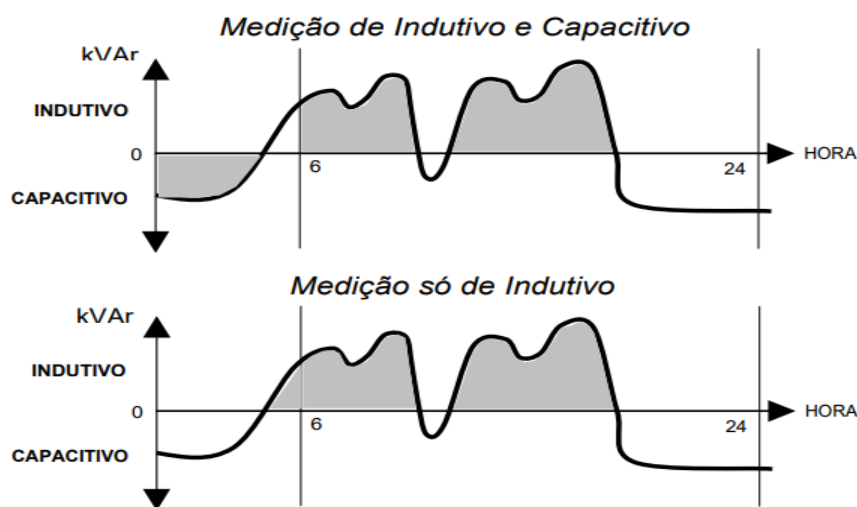


Figura 3 - Horários e seus métodos tarifários (CODI - Comitê de distribuição de energia elétrica, 2004).

### 3. CARACTERÍSTICAS DO SFCR

Para mostrar os efeitos diretos da implementação de um SFCR, primeiro consideramos suas características construtivas e dados nominais. A construção considerada foi um sistema básico de microgeração (ou apenas SFCR), como ilustrado na Fig. 4. Nessa configuração, o sistema gera potência ativa e fornece energia ativa durante os horários com radiação solar e a rede supre essa demanda durante horários nos quais os painéis solares não conseguem gerar potência suficiente para atender a demanda. Quando a potência ativa que o SFCR gera excede o necessário à carga, é injetada na rede e descontada do consumo de energia no final do mês.

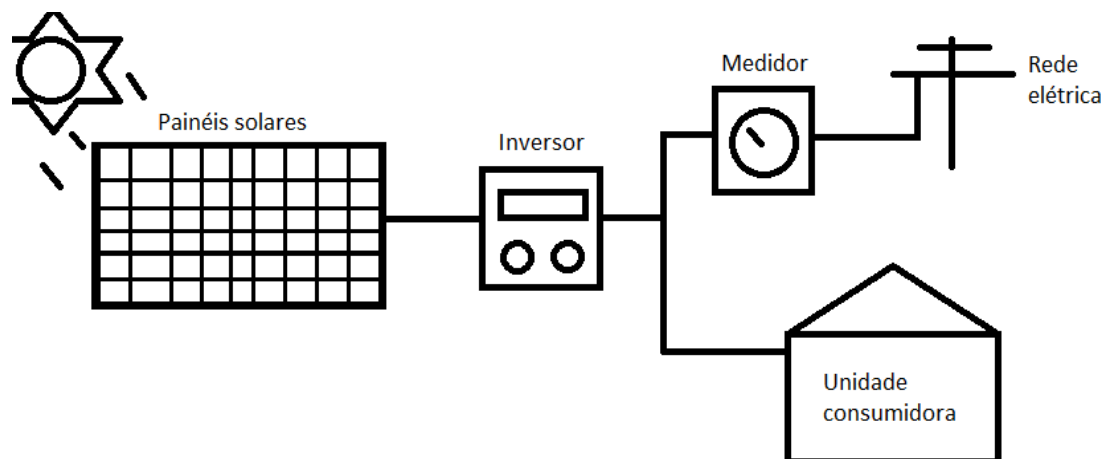


Figura 4 – Configuração de um sistema de microgeração fotovoltaica.

A potência total demanda da rede pela unidade consumidora é a diferença entre a potência demandada pela empresa e a produzida pelo SFCR. Neste trabalho, denotaremos essa nova potência como  $P_N$ , a qual é dada pela Eq. (3). O símbolo  $P_{PV}$  representa a potência gerada pelo sistema em dado instante.

$$P_N = P_1 - P_{PV} \quad (3)$$

As especificações técnicas dos painéis e inversores foram obtidas através do aplicativo Estimate® (GESEP: EStimate, 2017), o qual projeta uma central fotovoltaica a partir dos dados de consumo de energia observado ao longo dos meses pelo cliente. O SFCR projetado pelo aplicativo teve o objetivo de atender a um consumo de 1.435 kWh/mês, que foi o consumo médio de energia durante o mês de abril nessa empresa. Esse valor foi utilizado apenas para fins teóricos, visto que o projeto é feito com base no consumo anual. As informações técnicas dos painéis fotovoltaicos estão indicadas na Tab. 1, enquanto as informações dos inversores utilizados se encontram na Tab. 2.

Tabela 1 - Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos da empresa Canadian para radiação local de 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura de 25°C e espectro AM de 1,5 (Canadian Solar, 2009).

Potência nominal	270W <sub>p</sub>
Tensão ótima de operação (V <sub>pv</sub> )	30,8V
Corrente ótima de operação (I <sub>pv</sub> )	8,75 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	37,9V
Corrente de curto circuito (I <sub>sc</sub> )	9,32 A
Eficiência	16,79%
Temperatura de operação	-40°C a +85°C
Inclinação	20,45°

Tabela 2 - Especificações técnicas dos inversores da empresa Fronius (Neo Solar, 2017).

Tensão máxima de entrada	1000V <sub>cc</sub>
Faixa de tensão do MPPT	240 a 800V <sub>cc</sub>
Tensão mínima de entrada	80V <sub>cc</sub>
Corrente máxima de entrada	18 A
Potência nominal de saída	6000W
Faixa de tensão de saída	180 a 270V <sub>ca</sub>
Frequência de saída	60Hz
Corrente máxima de saída	26,1 A

O sistema estudado utilizou 29 painéis fotovoltaicos da empresa Canadian e 2 inversores da empresa Fronius, totalizando um custo aproximado de R\$26.570,00. O aplicativo leva em conta a incidência de 4,9kWh/m<sup>2</sup>dia, indicando o perfil de produção conforme a Fig. 5. Sua produção mensal foi de 1.434kWh/mês. Devido a condições de sombreamento, ou sujidade por exemplo, a produção das placas é reduzida, o que faz o valor real de produção ser menor do que o projetado.

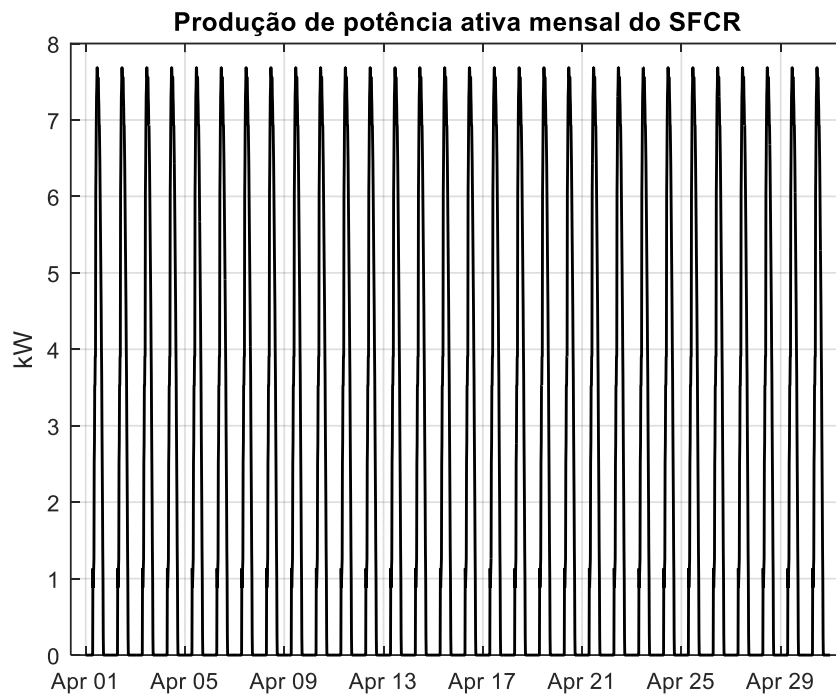


Figura 5 - Produção mensal do SFCR estudado.

#### 4. EFEITOS DO SFCR NO CONSUMO DE ENERGIA E NO FATOR DE POTÊNCIA

Com a implementação do sistema, a energia ativa consumida pela empresa diminui durante o mês, enquanto a energia reativa se mantém inalteradas (mesmo valor absoluto). Dessa forma, o fator de potência visto pela concessionária tende a cair. Os novos perfis de potência demandada da rede são exibidas na Fig. 6.

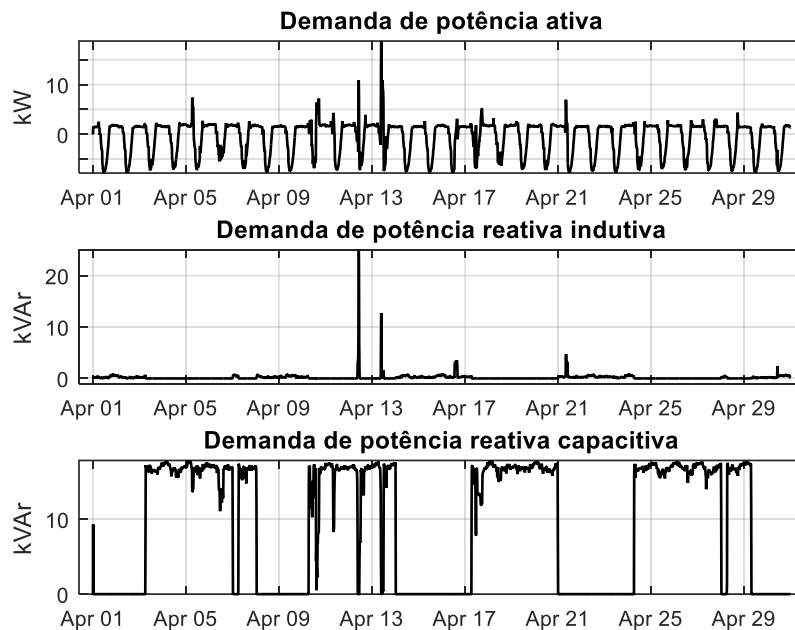


Figura 6 - Perfis de potência com a inserção do sistema fotovoltaico.

Agora, com a nova potência ativa demandada e denotada por  $P_N$ , pode-se calcular o novo fator de potência através da Eq.(2). O perfil do novo fator de potência mensal, encontra-se na Fig. 7.

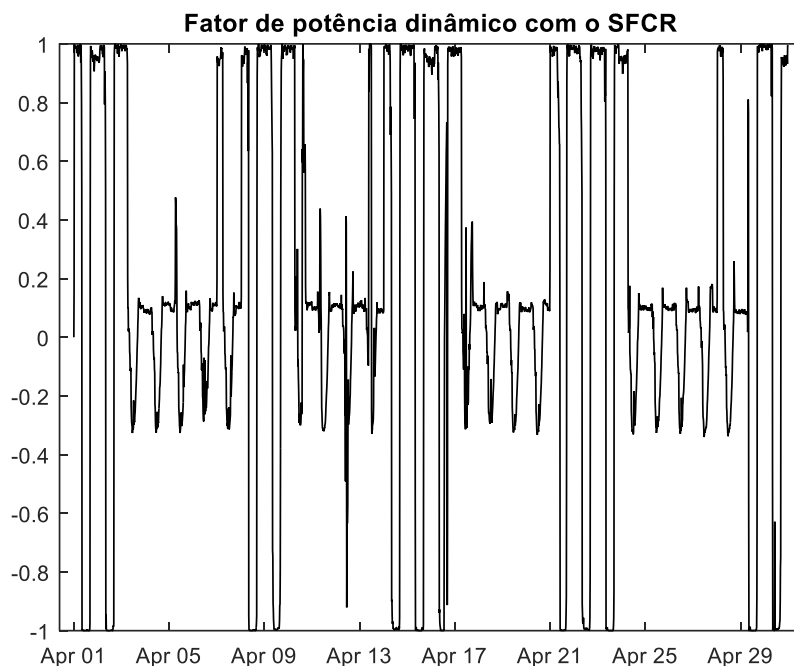


Figura 7 - Fator de potência mensal com a inserção do sistema fotovoltaico. Note que os valores negativos de FP se tratam da inserção de potência na rede.

## 5. METODOLOGIAS E CÁLCULOS DO REATIVO EXCEDENTE NA EMPRESA

De posse de todos os dados anteriores, é possível calcular a cobrança sobre a energia reativa excedente da unidade consumidora. Anteriormente, é interessante destacar os símbolos utilizados conforme os artigos 96 e 97 da resolução 414 da ANEEL (ANEEL, 2010), visto que são todos utilizados nas equações para cálculo. Tais símbolos se encontram na Tab. 3.

Tabela 3 - Símbolos para cálculos dos faturamentos mensais, conforme a ANEEL (ANEEL, 2010) e (CODI - Comitê de distribuição de energia elétrica, 2004).

$ERE$	Fatura de energia reativa excedente (em R\$)
$EEAM$	Energia ativa consumida no local (em kWh)
$f_R$	Fator de potência de referência (0,92 no Brasil)
$f_M$	Fator de potência médio mensal
$VR_{ERE} (HFP)$	Tarifa de excedente reativo referente ao grupo B1 (em R\$/kWh)
$FEA$	Fatura de energia ativa (em R\$)
$CA$	Consumo de energia ativa mensal (em kWh)
$VR_{FEA} (HP)$	Tarifa de consumo ativo referente ao grupo B1 (em R\$/kWh)
$VR_{FEA} (HFP)$	Tarifa de consumo ativo referente ao grupo B1 (em R\$/kWh)
$PPV$	Produção da usina fotovoltaica no mês (em kWh)

As tarifas explicitadas na Tab. 3 têm como base unidades consumidoras do tipo B1, e seus valores foram retirados da conta final de energia do cliente (CEMIG, 2017), referentes ao mês de abril de 2017. Além disso, especificou-se os valores em horários de ponta (HP), as 3 horas consecutivas de maiores picos de energia no dia (ANEEL, 2010), e as horas restantes, que são fora de ponta (HFP). Os gastos calculados foram focados em consumo de energia elétrica. A energia reativa é tarifada apenas em HFP.

Segundo o artigo 97 da resolução da ANEEL (ANEEL, 2010), uma forma de calcular o faturamento de energia reativa mensal é dada pela Eq. (4). Esta fórmula foi escolhida em detrimento da presente no artigo 96 por ser de maior simplicidade e por verificação de seu resultado experimental ao utilizá-la nos dados da empresa.

$$ERE = CA \left( \frac{f_R}{f_M} - 1 \right) \cdot VR_{ERE}, \quad (4)$$

onde, os valores de  $EEAM$ ,  $CA$  e  $f_M$  devem ser definidos através dos dados atuais de potências da instalação. A variável  $f_M$  é o valor médio mensal da instalação, enquanto  $EEAM$  indica a quantidade de energia elétrica demandada da rede durante o mês.

A Tab. 4 indica o saldo de energia recebida e consumida com a produção do SFCR durante o mês de abril de 2017. As fórmulas anteriormente descritas podem agora ser aplicadas nos dados com e sem a instalação do sistema.

A FEA é calculada apenas multiplicando-se as energias ativas consumidas pelos seus respectivos valores de referência mensal (HP e HFP), conforme a Eq. (5). É apenas um dos parâmetros cobrados pela empresa, utilizado aqui como uma referência na economia de energia ativa pelo sistema fotovoltaico.

$$FEA = EEAM(HP) \cdot VR_{FEA}(HP) + EEAM(HFP) \cdot VR_{FEA}(HFP) \quad (5)$$

Tabela 4 – Valores calculados em relação às tarifas de energia ativa no mês de referência.

Dados	Sem o SFCR	Com o SFCR
CA (quantidade consumida no local)	1.413,5 kWh/mês	1.413,5 kWh/mês
EEAM (quantia fornecida pela rede)	1.413,5 kWh/mês	0 kWh/mês
EEAM (HP)	82 kWh/mês	0 kWh/mês
EEAM (HFP)	1.331,5 kWh/mês	0 kWh/mês
VR <sub>FEA</sub> (HP)	R\$ 11,76 por kWh	R\$ 11,76 por kWh
VR <sub>FEA</sub> (HFP)	R\$ 0,3835 por kWh	R\$ 0,3835 por kWh
<b>FEA</b>	<b>R\$ 1.474,95</b>	<b>R\$ 38,35<sup>1</sup></b>

Observa-se uma mudança expressiva no custo da energia ativa em termos de economia devido ao sistema, confirmando sua vantagem e crescente utilização. Cabe agora analisar também o impacto do sistema fotovoltaico na parcela da tarifa correspondente à energia reativa, o que é mostrado na Tab. 5.

Tabela 5 - Valores calculados em relação às tarifas de energia reativa no mês de referência.

Dados	Sem o SFCR	Com o SFCR
VR <sub>ERE</sub> (HFP)	R\$ 0,2504	R\$ 0,2504
<b>ERE</b>	<b>R\$297,31</b>	<b>R\$1.691,90</b>

Houve uma diminuição da tarifa por consumo de energia ativa, com uma queda de R\$ 1.433,60 enquanto a taxa sobre a energia reativa subiu R\$1.394,00. Dessa forma, há uma certa desvantagem, pois, a economia em energia é contrabalanceada pelas tarifas por excedente reativo.

Esses resultados servem de motivação mostrando que um controle preciso do fator de potência é extremamente importante, com a utilização da própria função Volt/Var dos inversores (Divan, *et al.*, 2016), métodos explorados para usinas com alta penetração na rede no Brasil (Abud, *et al.*, 2015) (Ding, *et al.*, 2016) e diversos outros métodos na bibliografia. Em suma, para um aproveitamento melhor do sistema fotovoltaico, tais excedentes devem ser adequadamente controlados.

## 6. CONCLUSÃO

De fato, o impacto do sistema fotovoltaico em relação às potências reativas foi expressivo. O faturamento de energia reativa aumentou e existem maiores perdas (as quais demandam um estudo detalhado) devido às quedas de fator de potência no sistema. Pode-se perceber que um controle preciso e apurado é fundamental na implementação de uma usina desse tipo visto que esse efeito foi causado pela simples queda do fator de potência.

É fundamental um estudo apurado e detalhado da relação entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica, visto que a qualidade da energia recebida é fundamental para os clientes. Além disso, é interessante uma análise detalhada do funcionamento das cobranças de energia elétrica e como a inclusão desse sistema se comporta nesses termos. É importante a análise da potência utilizada pelos bancos de capacitores, bem como seus horários de funcionamento para que o reativo capacitivo não exceda o fator de potência gerando cobrança no lugar de sua possível correção.

Para estudos futuros, bancos de capacitores variáveis e automáticos podem ser explorados gerando correções otimizadas para esse problema em questão. Degraus de potência capacitiva com valores corretos e no tempo ideal seriam injetados conforme são necessários e comparados com outros métodos convencionais existentes para anulação dessa cobrança.

### Agradecimentos

Este trabalho está sendo desenvolvido com auxílio financeiro das agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPQ.

<sup>1</sup> Tarifa mínima de energia a ser paga no mês. Por ser um sistema trifásico, é o valor referente a 100kWh na tarifa de HFP, conforme o artigo 98 da resolução 414 da ANEEL (ANEEL, 2010).

## REFERÊNCIAS

- Abud T. P. [et al.] (2015), Voltage Control Analysis of Photovoltaic Inverters Using a Real Brazilian Distribution Network.
- Abud T. P., Borba, B. S. M. C., Maciel, R. S., Machado, I. D. S., Fortes, M. Z (2015), Voltage Control Analysis of Photovoltaic Inverters Using a Real Brazilian Distribution Network.
- ANEEL (2010), Resolução normativa nº 414.
- Canadian Solar (2009). Acessado em 20 de Janeiro de 2018. Link: <http://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto34002IdArquivo3944.pdf>.
- CODI (2004), Comitê de distribuição de energia elétrica Manual de orientação aos consumidores: energia reativa excedente.
- Demirok E. [et al.] (2011), Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 1, n. 2, pp. 174-182.
- Ding F., Pratt, A., Member, S., Bialek, T., Bell, F., Mccarty, M., Gotseff, P., Voltage support study of smart PV inverters on a high-photovoltaic penetration utility distribution feeder, 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1375–1380.
- Divan D., Moghe R. e Chun H. (2016). Managing Distribution Feeder Voltage Issues Caused by High PV Penetration, IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, pp. 1-8 .
- Elnozahy M. S. e Salama M. M. A. (2013), Technical impacts of grid-connected photovoltaic systems on electrical networks — A review, Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 5.
- GESEP: EStimate Google Play Apps [Online]. (2017). – Acesso: 20 de Janeiro de 2018. [https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate&hl=pt_BR).
- Gökmen N., Hu W. e Chen Z. (2017). A Simple PV Inverter Power Factor Control Method Based on Solar Irradiance Variation. IEEE Manchester PowerTech.
- González P. [et al.] (2014), Grid-Connected PV Plants. Power Quality and Technical Requirements, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, pp. 169–176.
- Johnson David E., Hilburn John L. e R. Johnson Johnny (1990), Fundamentos de Análises de Circuitos Elétricos, Ed. LTC, 4ª Edição.
- McEvoy A, Markvart T. e Castañer L. (2013). Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation [Livro]. Amsterdam: Academic Press, 2013. vol. 2.
- NeoSolar (2017). Acesso em 04 de 11 de 2017. <https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-fronius-primo-6-0-1-6000w.html>.

### ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE USE OF A GCPS IN THE POWER FACTOR OF THE ELECTRICAL NETWORK OF AN AGRO-INDUSTRIAL COMPANY

**Abstract.** *Currently in Brazil, a power factor below 0.92 inductive or capacitive is billed because this means less active power being used for the same amount of apparent power received, resulting in a bad use of the distribution system. Generally, in Brazil, the GCPSs (grid-connected photovoltaic systems) operate in unit power factor, delivering only active energy to a consumer unit. It reduces the energy consumption of the power company of this company, resulting in less active energy charges at the end of the month. However, demanding less active power from the grid and the same amount of reactive causes a drop in the power factor that will generate a higher charge on the reactive energy. The present work has the objective of carrying out a case study to analyze the impacts on reactive energy fees with and without the use of an SFCR. This system is installed in a coffee processing, processing and marketing company located in Viçosa, MG, capacitors for manual power correction, from which active and reactive power demand data were collected without the presence of SFCR. Data collected every 15 minutes during the month of April 2017 were analyzed for power factor checks. The daily SFCR production was simulated by means of software in 5 minute intervals in the same place with an incident radiation of 4.9kWh / m<sup>2</sup>day. An analysis of the increase in the cost of reactive will be made to verify the risks in relation to the electric energy charges in the company and what the proportions of this effect in the electric energy bill of the company.*

**Key words:** *Power factor, photovoltaic power plants, electric energy bills*