

## EXCEDENTE DE REATIVOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

**Aimé Pinto** – [afpinto@iee.usp.br](mailto:afpinto@iee.usp.br)

**Roberto Zilles** – [zilles@iee.usp.br](mailto:zilles@iee.usp.br)

Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia

**Ildo Bet** – [Ildo@phb.com.br](mailto:Ildo@phb.com.br)

PHB Eletrônica Ltda.

**Resumo.** *Este trabalho faz uma abordagem simples, mas que irá trazer a tona um problema ainda não discutido, sobre a tarifação de excedente de reativos em unidades consumidoras que colocarem geradores fotovoltaicos amparados no sistema de compensação de energia. Com a resolução normativa ANEEL RN 482/2012, que trata da mini e micro geração distribuída, será permitida a instalação de geradores fotovoltaicos para compensar o consumo elétrico, o que irá fazer com que o fator de potência da unidade consumidora caia, de forma que as distribuidoras passarão a cobrar excedentes de reativos, levando a impactos negativos na atratividade econômica dos sistemas fotovoltaicos, além de repelir medidas que irão trazer maior qualidade a estes sistemas, como a mudança do fator de potência para a atenuação do aumento da tensão no ponto de conexão provocado pela injeção de energia na rede.*

**Palavras-chave:** *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Fator de Potência, Reativos*

### 1. INTRODUÇÃO

A partir da Audiência Pública ANEEL 042/2011 foram construídas as bases para Resolução Normativa N° 482/2012, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Esta resolução estabelece a seguinte conceituação para microgeração, minigeração e sistema de compensação de energia:

**Microgeração Distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, nos termos de regulamentação específica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

**Minigeração Distribuída:** central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, nos termos de regulamentação específica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

**Sistema de Compensação de Energia Elétrica:** sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa.

Portanto, esta resolução estabelece o sistema de compensação de energia, o qual irá permitir a instalação de sistemas fotovoltaicos em unidades consumidoras, UC, para que seja compensado parte de seu consumo, ou até mesmo todo. Para adoção do sistema de compensação de energia as UCs deverão instalar medidores eletrônicos. No caso da microgeração distribuída deverá ser instalado medidor bidirecional que deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede, e no caso da minigeração distribuída deverá ser instalado um medidor de 4 quadrantes que possibilita o faturamento de excedente de reativos.

Hoje já é feito o faturamento de excedente de reativos para grandes consumidores, e com a utilização de sistemas fotovoltaicos para reduzir o consumo de energia ativa, haverá uma redução no fator de potência (FP), a qual será interpretada como um excedente de reativos levando a uma cobrança desse “excedente”.

Como o intuito de se colocar um sistema fotovoltaico conectado à rede é a redução dos gastos com energia elétrica, essa cobrança de excedente de reativos pode ser um empecilho para a promoção desta tecnologia, pois, apesar de haver a redução do consumo de energia ativa, também haverá uma redução do fator de potência da unidade consumidora (UC) que gerará um faturamento do excedente de reativos, mesmo com a demanda de reativos sendo a mesma, diminuindo a atratividade deste tipo de sistema de geração de energia.

Para o melhor entendimento deste assunto e qual será o seu impacto na atratividade dos sistemas fotovoltaicos é necessário conhecer a forma como é feito o faturamento dos reativos, e como se comporta o fator de potência de uma unidade consumidora com um sistema fotovoltaico conectado à rede.

## 2. FATURAMENTO DE REATIVOS

A Resolução ANEEL N° 456/2000 define o fator de potência como um índice que mostra o grau de eficiência em que um determinado sistema elétrico está sendo utilizado. Esse índice pode assumir valores de 0 (zero) a 1 (um). Valores altos de FP, acima de 0,92, indicam o uso eficiente do sistema elétrico e valores baixos evidenciam um mau aproveitamento.

Pela legislação atual, o fator de potência de referência ( $f_r$ ) é 0,92, o qual é o FP mínimo exigido para cargas segundo o procedimento de rede PRODIST/ANEEL. Unidades consumidoras que tenham FP menor que 0,92 devem ser tarifadas por esses reativos excedentes ( $FP < 0,92$ ).

O artigo 65 da resolução da ANEEL 456/2000 define o faturamento de energia reativa, a qual deve ser feita segundo a Eq. (1).

$$FER = CA \times \left( \frac{f_r}{f_m} - 1 \right) \times TCA \quad (1)$$

$FER$  = valor do faturamento total correspondente à energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

$CA$  = consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento;

$f_r$  = fator de potência de referência igual a 0,92;

$f_m$  = fator de potência indutivo médio, calculado para o período de faturamento (uma em uma hora);

$TCA$  = tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento;

## 3. COMPORTAMENTO DO FATOR DE POTÊNCIA DA UNIDADE CONSUMIDORA COM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Uma unidade consumidora comercial normalmente apresenta fator de potência indutivo e uma curva de carga com pico durante o dia, já a geração fotovoltaica está presente apenas durante o dia, com pico por volta do meio dia. A Fig. 1 ilustra uma curva de carga comercial típica da região de concessão da AES Eletropaulo (AES Eletropaulo, 2007), na qual foi adicionada uma demanda reativa considerando um FP igual a 0,92 fixo durante todo o dia, e uma curva de geração fotovoltaica com capacidade suficiente para compensar todo o consumo diário desta curva de carga.

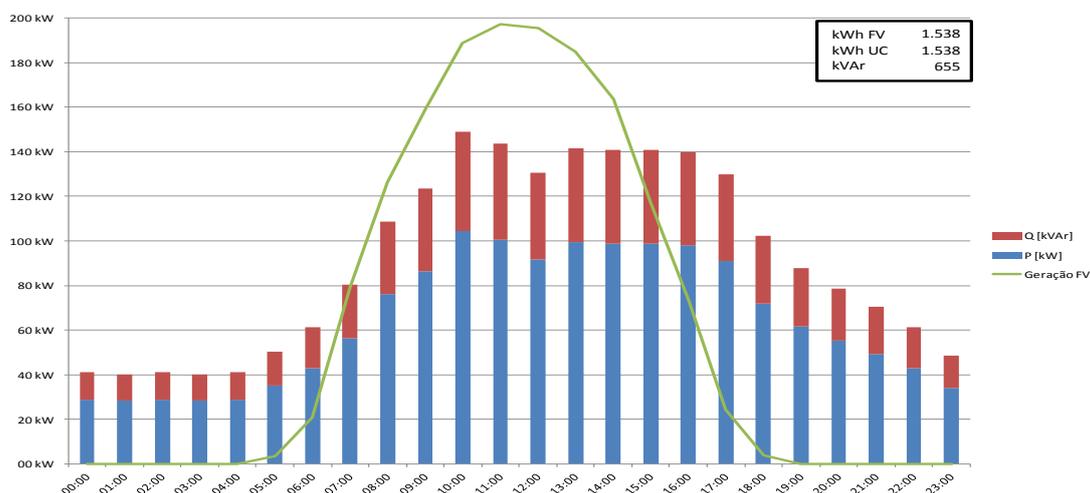


Figura 1 – Curva de carga comercial típica e curva de geração fotovoltaica representativa.

Uma unidade consumidora com o perfil de carga da Fig. 1 não seria faturada por excedente de reativos, visto que consideramos que seu FP é sempre 0,92 durante todo o dia. Porém se adicionarmos a geração fotovoltaica a esta UC, o medidor de faturamento enxergará uma mudança no FP, visto que houve uma redução na demanda de potência ativa. E como neste caso o sistema possui potência fotovoltaica instalada  $> 100$  kW, ele estará enquadrado como minigeração distribuída que exige medidores de quatro quadrantes, portanto a UC poderá ser faturada por excedente de reativos.

Para estudarmos essa mudança no FP visto pelo medidor desta unidade consumidora devemos criar alguns cenários: UC com gerador fotovoltaico produzindo apenas potência ativa ( $FP = 1$ ), UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa indutiva ( $FP = 0,92i$ ) e UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa capacitiva ( $FP = 0,92c$ ).

### 3.1 UC com gerador fotovoltaico produzindo apenas potência ativa (FP = 1)

Considerando uma unidade consumidora com curva de carga igual a da Fig.1 e com um gerador fotovoltaico capaz de zerar o consumo diário, produzindo apenas energia ativa (FP = 1), o medidor instalado nesta UC faturará o consumo de energia ativa e excedente de reativos conforme a Fig. 2.

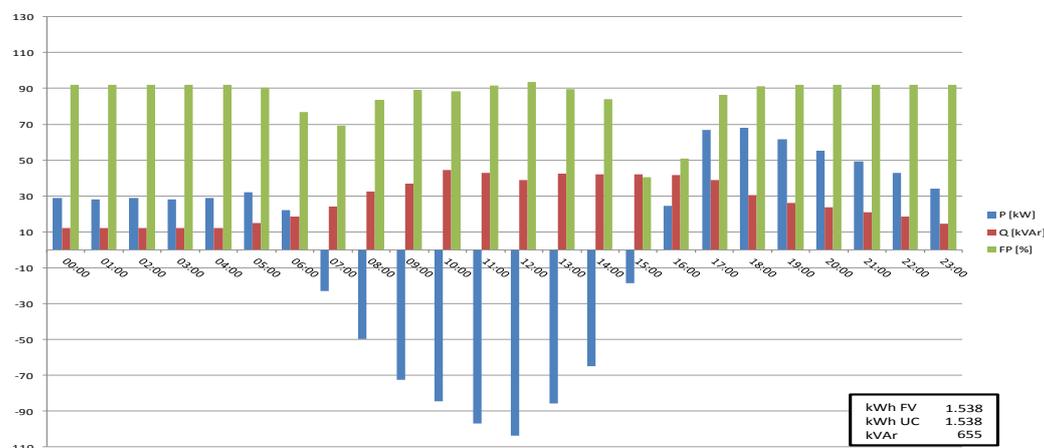


Figura 2 – Consumo faturado pelo medidor da UC com gerador fotovoltaico produzindo apenas potência ativa.

As barras de P (potência ativa) e Q (potência reativa) positivas significam que houve consumo da UC e as negativas significam que houve injeção de potência na rede.

Como o gerador fotovoltaico produziu apenas potência ativa, a demanda de reativos foi a mesma que a da UC sem gerador fotovoltaico, já a demanda de potência ativa sofreu redução, pois parte foi atendida pelo gerador fotovoltaico.

Como houve apenas redução na demanda de potência ativa e não um aumento na demanda de potência reativa, o FP também sofreu reduções, que ultrapassaram o limite de 0,92 em alguns momentos do dia, levando a uma cobrança de excedente de reativos. Esse excedente de reativos seria uma cobrança incompatível com o próprio nome (excedente), visto que a quantidade de potência reativa é a mesma da unidade consumidora sem a geração fotovoltaica, a qual era considerada dentro dos padrões de eficiência de utilização do sistema elétrico.

### 3.2 UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa (FP = 0,92i fixo)

Uma prática inserida pela norma alemã VDE 4105 é a redução do FP da geração fotovoltaica utilizando FP fixo, seja ele indutivo ou capacitivo, visando à melhoria da operação do sistema fotovoltaico junto à rede de distribuição. No caso de FP indutivo esta melhoria procura evitar o aumento da tensão no ponto de conexão, através da redução do fluxo líquido de corrente no sentido gerador para a rede por meio da demanda de correntes reativas.

Esta prática além de visar à redução do aumento da tensão da rede devido à geração fotovoltaica, também visa reduzir os desligamentos da unidade geradora por conta da proteção contra sobretensão, o qual foi provocado pela geração fotovoltaica.

Considerando uma unidade consumidora com curva de carga igual a da Fig.1 e com um gerador fotovoltaico capaz de zerar o consumo diário, entregando potência ativa e reativa indutiva (FP = 0,92i fixo), o medidor instalado nesta UC faturará o consumo de energia ativa e excedente de reativos conforme a Fig. 3.

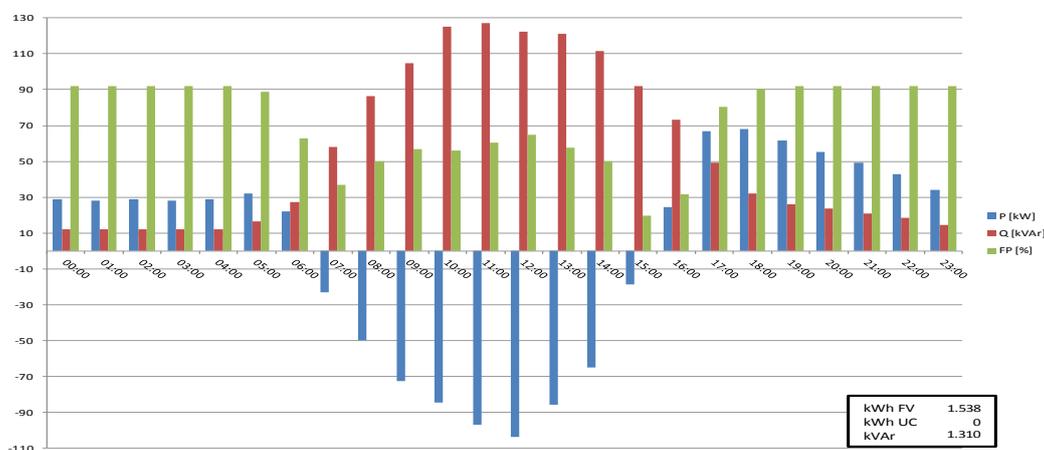


Figura 3 – Consumo faturado pelo medidor da UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa com FP fixo de 0,92 indutivo.

Apesar dos benefícios da redução do aumento da tensão no ponto de conexão provocado pelo fluxo de energia no sentido do gerador para a rede, esta prática aumenta a demanda de reativos, o que leva a uma redução do FP para valores abaixo de 0,92 em boa parte do dia, acarretando em cobrança de excedente de reativos durante todo o período de geração.

### 3.3 UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa (FP = 0,92i)

Uma outra prática, que também foi inserida com a norma alemã VDE 4105, é a redução do FP da geração fotovoltaica (para carregamentos superiores a 50%) utilizando uma curva característica de FP x carregamento, com o intuito de reduzir o aumento de tensão provocado pelo fluxo reverso de potência na rede, através do aumento da demanda de potência reativa (redução do FP) por parte do gerador fotovoltaico.

Esta prática além de visar à redução do aumento da tensão da rede devido à geração fotovoltaica, também visa reduzir os desligamentos da unidade geradora por conta da proteção contra sobretensão, o qual foi provocado pela geração fotovoltaica.

Considerando uma unidade consumidora com curva de carga igual a da Fig.1 e com um gerador fotovoltaico capaz de zerar o consumo diário, entregando potência ativa e reativa indutiva (FP = 0,92i) com curva característica igual a Fig. 4, o medidor instalado nesta UC faturará o consumo de energia ativa e excedente de reativos conforme a Fig. 5.

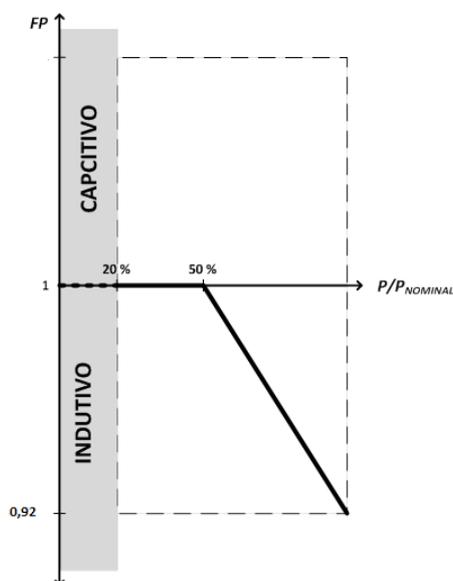


Figura 4 – Curva característica de FP x carregamento do gerador fotovoltaico.

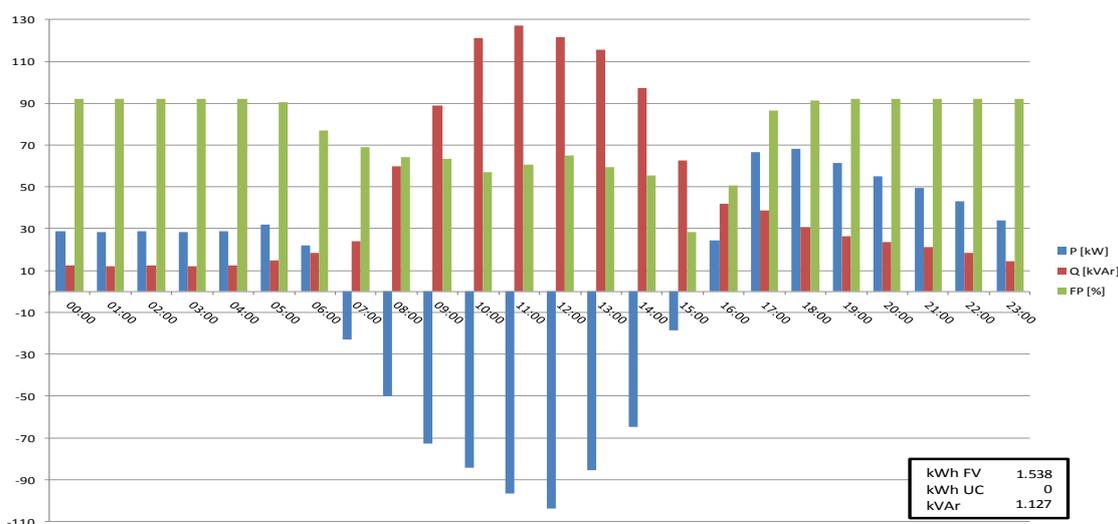


Figura 5 – Consumo faturado pelo medidor da UC com gerador fotovoltaico entregando potência ativa e reativa com curva característica de FP x carregamento.

Com a geração fotovoltaica a demanda de potência ativa da UC reduziu e a de reativos aumentou somente nas horas em que o carregamento da geração foi superior a 50 %, levando a uma redução do FP para valores pouco abaixo de 0,92 nas horas de baixa geração e valores bem abaixo de 0,92 nas horas de muita geração.

A utilização de uma curva característica de FP x carregamento mostrou que além de poder melhorar a tensão na rede (reduzindo a elevação da tensão devido ao fluxo de corrente no sentido do gerador fotovoltaico para a rede), também mostrou ser capaz de reduzir um pouco a cobrança de excedente de reativos em relação a utilização do FP fixo para a mesma finalidade.

### 3.4 UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa (FP = 0,92c)

Outra prática que foi inserida com a norma alemã VDE 4105, é a possibilidade de produção de potência reativa de forma a compensar a demanda de reativos da UC, levando a uma redução do fluxo de reativos na rede da distribuidora. A possibilidade de trabalhar com fator de potência capacitivo (geração de reativos) não apresenta curva característica, pois deve ser ajustada de acordo com a demanda de reativos da unidade consumidora, portanto adota-se um FP fixo de 0,92 capacitivo.

Considerando uma unidade consumidora com curva de carga igual a da Fig.1 e com um gerador fotovoltaico capaz de zerar o consumo diário, entregando potência ativa e reativa capacitiva (FP = 0,92c fixo ao longo do dia), o medidor instalado nesta UC faturará o consumo de energia ativa e excedente de reativos conforme a Fig. 6.

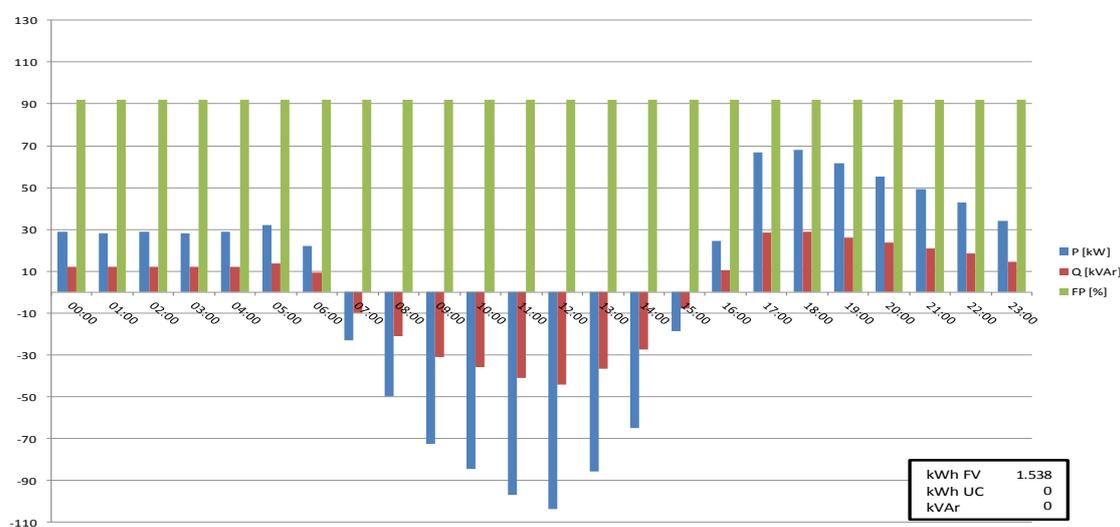


Figura 6 – Consumo faturado pelo medidor da UC com gerador fotovoltaico produzindo potência ativa e reativa capacitiva.

Esta prática é a que agrega mais benefícios às distribuidoras de energia, pois reduz a circulação de potência reativa na rede, e pode ser utilizada até para compensar os reativos de outras unidades consumidoras, respeitando os limites dos inversores utilizados, porém não ajuda a evitar o aumento da tensão no ponto de conexão provocado pelo fluxo de potência no sentido do gerador para a rede.

## 4. IMPACTOS NA ATRATIVIDADE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A tarifação do excedente de reativos gera um impacto negativo na atratividade da geração fotovoltaica amparada no sistema de compensação de energia, visto que essa tarifação reduz a economia feita pela produção de energia. Essa redução no montante de capital economizado pode ser convertida em uma redução na produtividade do sistema, de forma que possa se avaliar os impactos na atratividade da geração fotovoltaica. Para tal, considerou-se 6 casos:

**Caso 1:** Unidade consumidora com geração fotovoltaica com FP unitário e sem cobrança de excedente de reativos (Fig. 2).

**Caso 2:** Unidade consumidora com geração fotovoltaica com FP unitário e com cobrança de excedente de reativos (Fig. 2).

**Caso 3:** Unidade consumidora com geração fotovoltaica com FP 0,92 fixo e indutivo e com cobrança de excedente de reativos (Fig. 3).

**Caso 4:** Unidade consumidora com geração fotovoltaica com FP 0,92 indutivo com curva característica e com cobrança de excedente de reativos (Fig. 5).

**Caso 5:** Unidade consumidora com geração fotovoltaica com FP 0,92 capacitivo e com cobrança de excedente de reativos (Fig. 6).

Tomando como base o Caso 1 e considerando que a demanda e geração de todos os casos é igual a da Fig. 1, que todos os dias do ano têm geração e demanda iguais e que a UC não precisa pagar o custo de disponibilidade, pode-se analisar quanto será a redução da taxa interna de retorno, *TIR*, da geração fotovoltaica.

Com a Eq. 2 pode ser feita a conversão do montante gasto com excedente de reativos em uma redução da quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

$$RE_{FV}\% = \frac{E_{FV} - \frac{CA \times \left(\frac{f_r}{f_m} - 1\right) \times TCA}{TCA}}{E_{FV}} - 1 \times 100 \quad (2)$$

$RE_{FV}\%$  = Redução percentual na produção da energia fotovoltaica equivalente ao montante gasto com a cobrança de excedente de reativos.

$E_{FV}$  = Energia produzida pelo sistema fotovoltaico.

Para o cálculo da *TIR* de cada caso consideraram-se as seguintes premissas: investimento inicial igual a 7.500 R\$/kW, vida útil de 25 anos, custo anual de operação e manutenção (O&M) de 1%, tarifa de energia ativa de 0,5 R\$/kWh, aumento anual da tarifa de 5%, decaimento anual da produtividade do sistema de 1%. Além disso, considerou-se que o caso 1 tem fator de capacidade (FC) de 14 % e os demais casos apresentam uma redução percentual no FC, em relação ao caso 1, igual à redução percentual na produção da energia fotovoltaica equivalente ao montante gasto com a cobrança de excedente de reativos.

A Tab. 1 Apresenta os resultados da avaliação do impacto da cobrança de excedente de reativos na taxa interna de retorno, *TIR*, dos casos analisados.

Tabela 1 – Resultados da avaliação do impacto da cobrança de excedente de reativos na taxa interna de retorno, *TIR*, dos casos 1,2,3,4 e 5.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
$RE_{FV}\%$	0%	5,25%	33,15%	23,92%	0
FC	14,00%	13,27%	9,36%	10,65%	14,00%
<i>TIR</i>	9,48%	8,88%	5,34%	6,60%	9,48%

Com a Tab. 1 é fácil perceber que a tarifação do excedente de reativos provoca uma queda significativa na atratividade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Além disso, pode-se concluir que a utilização de uma curva característica para FP x carregamento além de ajudar na redução do aumento da tensão no ponto de conexão, também diminui a tarifação do excedente de reativos, contribuindo para a manutenção da atratividade do sistema.

Vale ressaltar que não foi avaliado a redução do FC devido ao aumento dos desligamentos provocados pelo aumento da tensão no ponto de conexão quando se utiliza o fator de capacidade capacitivo, mas em uma análise mais profundo, este fator deve ser levado em conta.

## 5. CONCLUSÃO

Com a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede através do sistema de compensação de energia elétrica o problema da configuração do fator de potência dessa geração distribuída irá surgir, pois se houver tarifação de excedente de reativos, qualquer configuração que seja escolhida (FP unitário, indutivo ou capacitivo) não será a que engloba todos os aspectos técnicos e econômicos.

Com a tarifação dos reativos, o proprietário do sistema fotovoltaico deverá escolher se irá operar com inversores com fator de potência unitário podendo sofrer desligamentos, por causa do aumento da tensão no ponto de conexão, reduzindo um pouco a atratividade do sistema; trabalhar com inversores com fator de potência indutivo reduzindo os desligamentos provocados pelo aumento da tensão no ponto de conexão, porém reduzindo a remuneração e atratividade do sistema devido à cobrança de excedente de reativos; ou trabalhar com inversores com fator de potência capacitivo compensando os reativos da UC, porém aumentando a probabilidade de sofrer desligamentos por causa do aumento tensão no ponto de conexão.

Frente ao exposto constata-se a necessidade do estabelecimento de regras e recomendações por parte dos reguladores do sistema e das distribuidoras levando em consideração os aspectos técnicos (redução dos desligamentos e sobretensão) e econômicos (redução da remuneração do capital) de forma a tentar utilizar as vantagens de cada configuração.

## REFERÊNCIAS

AES Eletropaulo, NT 2.018 - Cálculo de Demanda Rede para Acréscimo de Novas Cargas na Rede de Distribuição de Baixa Tensão, 2007.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Aneel n° 456/2000, 2000.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Audiência Pública n° 042/2011, 2011.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

Verband Deutscher Elektroingenieure, VDE-AR-N 4105 Generators connected to the low-voltage distribution network – Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks, 2011.

## REACTIVE POWER EXCESS CHARGING IN GRID-CONNECTED PV SYSTEMS

**Abstract.** *This paper makes a simple approach, which will bring up a not yet discussed problem, to the reactive power excess charging in electrical consumer units that install photovoltaic generator under the energy compensation system. With the ANEEL regulation RN 482/2012, about mini and micro distributed generation, shall be allowed the installation of PV generators to offset electricity consumption, which will cause the power factor of the consumer unit to fall, permitting the utilities to charge the reactive power excess, leading to negative impacts on the economic attractiveness of PV systems, in addition to repelling measures that will bring higher quality to these systems, such as changing the power factor to reduce the increase of voltage in the point of common coupling caused by the energy feeding into the grid.*

**Key words:** Grid Connected PV System, Power Factor, Reactive Power