



Energia solar e multa por violação de fator de potência: Estudo de caso real para correção em um sistema fotovoltaico

Em situações de instalação de sistemas fotovoltaicos junto à carga e conectados em clientes do grupo A, que possuem tanto a medição de potência ativa (kW) quanto de potência reativa (kVAr) da carga, é possível que apareçam problemas relacionados a cobrança de “excedente de reativo” por parte da concessionária em função da medição de um baixo fator de potência da unidade consumidora.

Isso ocorre porque a usina fotovoltaica passa a fornecer a potência ativa para a carga e o reativo continua sendo suprido pela rede da distribuidora. Isso faz com que o medidor da subestação de entrada “enxergue” um baixo fator de potência mesmo sem ter tido mudança no reativo fornecido.

A ideia deste artigo é contextualizar este assunto e apresentar

um estudo de caso real, onde esse problema começou a ocorrer após a instalação de um sistema fotovoltaico em uma indústria.

Antes de esclarecer conceitos importantes para o entendimento deste artigo, faz-se necessário discorrer que os inversores atuais utilizados em sistemas fotovoltaicos possuem capacidade de trabalhar com diferentes níveis de fator potência (FP).

Para os inversores strings comerciais, comumente aplicados nos sistemas de minigeração, o ajuste do fator de potência em geral, pode ser ajustado entre 0,8 indutivo a 0,8 capacitivo.

A escolha do fator de potência para a operação do equipamento, depende, entre outras coisas, da estratégia utilizada pelo projetista para o controle do fator de potência

da instalação e da viabilidade técnica-financeira que essa estratégia proporcionará, no caso de inversores para aplicação centralizada, o ajuste do fator de potência pode ser indicado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme estudos da rede básica e requisito de estabilidade.

Normalmente, os inversores para a Geração Distribuída (GD) são programados para operar com um fator de potência unitário, por questões de atratividade financeira, já que os créditos de energia elétrica são contabilizados para a energia ativa injetada ($FP = 1$).

Mas há situações em que o fator de potência pode ser ajustado para fornecer potência reativa à rede, o que sempre dependerá do tipo de instalação, cargas implementadas, necessidades locais e retorno



financeiro.

A seguir, será dada uma explicação de tópicos importantes deste artigo para entendimento do fator de potência, antes que seja apresentado o caso prático.

Conceitos importantes em relação ao fator de potência

Antes de abordar o estudo de caso, é necessário entender sobre os três conceitos diferentes de potência que temos nos estudos de circuitos elétricos em corrente alternada e como eles se relacionam com o valor do Fator de Potência.

Potência Ativa (P): Refere-se à energia consumida de maneira útil, sendo convertida em trabalho mecânico, calor, etc. Sua unidade é o quilowatt (**kW**).

Potência Reativa (Q): Relaciona-se à energia necessária para criar e sustentar campos eletromagnéticos, principalmente em cargas indutivas (mais comuns) como motores e transformadores. Mas o conceito serve também para os elementos capacitivos, como os bancos de capacitores. Sua unidade de medida é o **kVar** e diferente da potência ativa, esta não realiza trabalho útil, mas é essencial para o funcionamento de diversos dispositivos, como os citados anteriormente.

Potência Aparente (S): Representa a combinação vetorial das potências ativa e reativa, ou seja, o total de energia fornecida ao sistema. É medida em **kVA**.

A relação dessas grandezas pode ser expressada pela fórmula a seguir:

Onde:

S: Potência aparente (kVA)

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

P: Potência Ativa (kW)

Q: Potência Reativa (kVAr)

Já o fator de potência diz respeito a maneira como a energia elétrica em corrente alternada é utilizada para alimentação das cargas.

Ele mede a eficiência do uso da energia elétrica e é expresso pela relação entre a potência ativa, medida em kW e pela potência aparente, medida em kVA. A equação abaixo expressa a fórmula do fator de potência:

Onde:

FP: Fator de potência

$$FP = \frac{P}{S}$$

P: Potência Ativa (kW)

Q: Potência Reativa (kVAr)

O fator de potência pode assumir diferentes valores, podendo variar entre **0 e 1**, sendo:

- Um fator de potência igual a 1 (um) indica que toda a energia fornecida é utilizada para realizar trabalho. Nesse caso, toda a potência aparente é convertida em potência ativa.
- Um fator de potência inferior a 1 (um) indica que parte da energia fornecida é utilizada para sustentar campos eletromagnéticos, caracterizando a presença de potência reativa no sistema.

Três tipos de fatores de potência merecem destaque e são descritos a seguir:

Fator de Potência Indutivo:

Associado a cargas predominantemente indutivas, como motores, onde a corrente elétrica está atrasada em relação à tensão. Nesses casos, o FP é numericamente menor que 1 e é classificado como FP indutivo.

Fator de Potência Capacitivo:

Relacionado a cargas predominantemente capacitivas, onde a corrente elétrica adianta-se em relação à tensão. O FP é numericamente menor que 1 e é classificado como FP capacitivo.

Fator de Potência Unitário:

Ocorre quando a corrente e a tensão estão em fase, indicando que não há presença de potência reativa, resultando em máxima eficiência no uso da energia, ou seja, que toda a energia está sendo utilizada para realizar trabalho (potência ativa igual a aparente).

Fator de Potência Unitário em sistemas fotovoltaicos

Grande parte dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede utilizam os inversores configurados para

operar com fator de potência próximo ao unitário (**FP = 1**), o que significa que eles só injetam potência ativa (kW) na rede, sem injetar ou consumir potência reativa (kVAr). Isso é desejável em muitos casos porque:

- Maximiza a eficiência do sistema, já que não se utiliza energia para alimentar sustentar os componentes reativos;
- Diminuem as perdas do sistema, visto que transmissão de energia nos circuitos é basicamente para gerar trabalho, sem correntes adicionais que geram perdas para alimentar componentes reativas;
- Facilita a integração dos sistemas fotovoltaicos nas redes da distribuidora, pois minimiza as interferências dos controles de variáveis elétricas do sistema;

Possibilidades de Ajuste no Fator de Potência

Os inversores fotovoltaicos modernos, são fabricados com a capacidade de controlar o fator de potência até determinados níveis. Isso permite que eles injetem ou consumam potência reativa conforme o controle do fator de potência que foi ajustado.

Esse recurso é utilizado para:

- Controlar o fator de potência em locais em que há o sistema fotovoltaico e a unidade consumidora passa a pagar multas por baixo FP;
- Manter a estabilidade da rede, já que a injeção de potência reativa pode ajudar a controlar a tensão nos sistemas de distribuição;
- Atender a requisitos de interconexão de distribuidoras, transmissoras e ONS, caso mais comum em gerações centralizadas ou em locais onde a penetração de geração distribuída (GD) é alta.

Os inversores podem operar em diferentes modos para atender aos requisitos de controle de potência reativa. Confira nos tópicos a seguir os principais.

Fator de Potência Fixo

O inversor é programado para operar com um fator de potência fixo (por exemplo 0,95), injetando ou consumindo potência reativa

de forma contínua para ajudar a manter o fator de potência na rede dentro dos limites aceitáveis.

Possui a vantagem de ser bastante simples a aplicação, porém com a desvantagem de que não responde a variações de carga ou geração do sistema. Portanto, não é recomendado para situações em que há grandes flutuações de potência reativa;

Controle Automático de Tensão

Alguns inversores permitem que seja ajustada a quantidade de potência reativa que injetam ou consomem com base nos níveis de tensão do sistema.

A ideia é variar a geração de potência reativa para controle da tensão. Se a tensão subir acima de um determinado ponto, o inversor pode consumir potência reativa (indutiva) para ajudar a reduzir a tensão, ou, se a tensão cair, o inversor pode injetar potência reativa (capacitiva) para aumentar o nível de tensão em um barramento.

Uma grande vantagem do controle automático é que ele aumenta dá mais robustez a estabilidade da rede elétrica, que, por sua vez, melhoram os índices de qualidade de energia da mesma, já que atuam de maneira dinâmica no problema.

A desvantagem é que é um sistema complexo e que carece de um sistema de interface de comunicação sofisticada com a distribuidora ou com o ONS. É um sistema mais comum em grandes parques de usinas fotovoltaicas centralizadas.

Controle por curvas Potência Ativa e Reativa (Curvas PQ)

Este modo permite um ajuste dinâmico da potência reativa fornecida ou consumida pelo inversor em função da potência ativa gerada. Alguns inversores permitem o uso de curvas de controle de potência ativa versus potência reativa, onde o inversor reduz a geração ativa em momentos de alta injeção de reativos, o que pode ajudar a manter a estabilidade do sistema em situações de variação rápida da demanda e permite o ajuste do fator de potência.

O problema do fator de potência em sistemas fotovoltaicos junto às cargas

Em unidades consumidoras (UC) atendidas em média tensão, em que há medição de fator de potência,

deve-se respeitar os limites mínimos estabelecidos pela regulação, que estabelece que o FP não pode ser inferior a 0,92, pois estarão sujeitos a multa por excesso de consumo de energia reativa.

Mesmo em unidades consumidoras em que o fator de potência está controlado e acima de 0,92, a inserção de sistemas fotovoltaicos pode fazer com que se tenha a cobrança pelo excedente de consumo de energia reativa.

Em muitos casos não se trata de um aumento de utilização de energia reativa e sim que houve uma queda no consumo de energia ativa da rede em relação ao que o medidor da concessionária auferiu no mês de faturamento, já que o sistema fotovoltaico passa a suprir a demanda de potência ativa para a carga nos momentos de geração e assim, como os inversores são naturalmente configurados para operarem com fator de potência unitário, a mesma quantidade de reativo anterior continua sendo extraída da rede e é contabilizado pelo medidor de energia.

Isso traz um desbalanço do consumo de ativo e reativo comprados da rede (que está sendo medido na entrada da UC), fazendo com que o sistema de medição da distribuidora enxergue isso como um consumo excedente de reativo, já que ele está calculando o fator de potência a partir do balanço potência ativa e reativa auferido pelo medidor de energia da subestação de entrada de energia da unidade consumidora.

Repare que, mesmo sem o aumento do consumo de energia reativa, o fato do sistema fotovoltaico passar a fornecer parte da energia ativa diretamente as cargas no momento de geração, faz com que o FP enxergado pelo sistema de medição da distribuidora diminua, já que há um desequilíbrio no balanço potência ativa/reactiva se comparados com o estado inicial sem o sistema fotovoltaico.

Repare que o desequilíbrio ocorre porque a potência ativa demandada da rede da distribuidora diminuiu, já que parte da energia ativa agora é suprida diretamente pelo sistema fotovoltaico as cargas da unidade consumidora. Assim, é comum que unidades consumidoras com cargas locais que demandam de energia reativa para magnetização dos campos magnéticos das cargas, principalmente motores e transformadores, passem a pagar excedente

de reativo em suas faturas.

Estudo de caso real

Um cliente atendido em média tensão e que possui cargas locais não era cobrado por utilização de excedentes de reativos antes da instalação de um sistema FV.

Após a instalação de um sistema fotovoltaico de 1 MW, percebeu-se que a sua fatura de energia passou a cobrar um valor significativo de multa relacionada à energia reativa consumida nos horários fora de ponta.

Como o problema já era conhecido e típico de acontecer em unidades consumidoras semelhantes, foi solicitada a memória de massa de medidor de energia junto à distribuidora para estudar os valores de potências ativas, reativas e FP registrados.

Após a disponibilização dos dados, em uma janela de medição de 30 dias, gráficos foram construídos contendo a potência ativa, reativa e os fatores de potências registrados, conforme pode-se ver na Figura 1.

A planilha construída para os cálculos permite a separação desses dados por data e janela de medição horária. Isso facilita a visualização do gráfico e permite que se possa separar com facilidade os momentos em que o fator de potência ficou abaixo de 0,92 (mínimo regulatório). Na Figura 1, por exemplo, o dia escolhido para análise foi o dia 04/08/2024 e a apresentação nessa figura compreendeu o período das 6h às 18h.

Repare que em verde tem-se a potência ativa, a barra vermelha representa a potência reativa e há uma linha tracejada preta com os respectivos valores de FP medidos. No eixo X pode se observar as horas, no eixo Y à esquerda tem-se os valores das potências (ativas e reativas) e no eixo Y à direita o indicador dos valores de fator de potência.

Tem-se ainda uma linha vermelha indicando o fator de potência limite de 0.92 (mínimo regulatório), para que se facilite a visualização de quando a linha tracejada do FP medido está abaixo do limite pré-estabelecido na regulação.

Repare que são 4 medições no intervalo de uma hora, esse é o padrão utilizado pela distribuidora para a integralização das medições de potência ativa, reativa e FP.

A título de curiosidade, algumas distribuidoras disponibilizam esses

mesmos dados, mas com medições de 5 em 5 minutos.

Outro detalhe importante que também pode ser visto na Figura 1 é que no início e no final do dia (06h e 18h) os valores

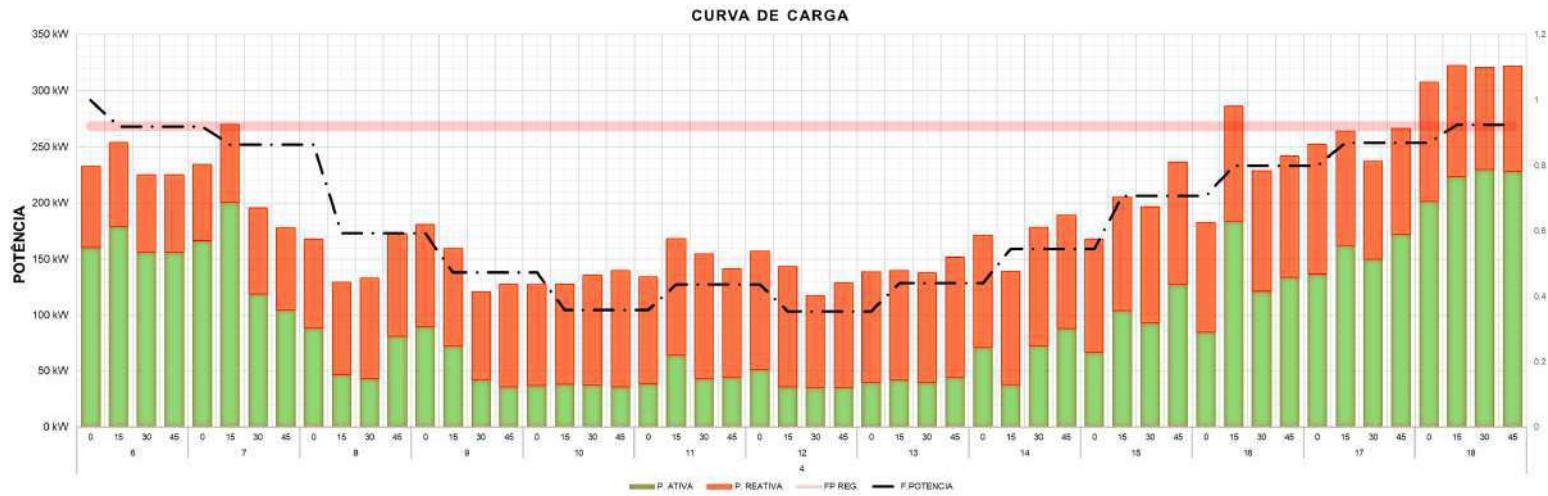


Figura 1 – Potência Ativa, Reativa e FP medido entre as 06h e 18h do dia 04/08/2024.

de fator de potência estão dentro dos limites estabelecidos pela regulação (maior ou igual a 0,92), nos outros horários já se percebe um fator de potência com valores inferiores devido a injeção de potência ativa do sistema fotovoltaico diretamente para as cargas da unidade consumidora, fazendo com que a proporcionalidade da energia reativa fornecida pela rede elétrica da distribuidora aumente em relação a ativa, fazendo com que as medições indiquem um baixo fator de potência e o cliente seja cobrado por isso.

Na Figura 2 separou-se um intervalo diferente para destacar períodos do dia 04/08/2024 em que o FP foi bastante baixo, nesse intervalo foi escolhida a janela entre as 10h e 14h. Observe que houve FP de 0,36, que é muito abaixo do limite estabelecido na regulação.

Pode-se identificar também que há sucessivos registros de fatores de potência bem abaixo de 0,92 neste intervalo escolhido, confirmando que em períodos de maior geração e a partir do perfil da curva de carga do cliente, o fator de potência se degrada bastante pelos motivos já descritos neste texto.

Por questões de retorno financeira, optou-se por fazer a correção deste fator de potência através do dimensio-

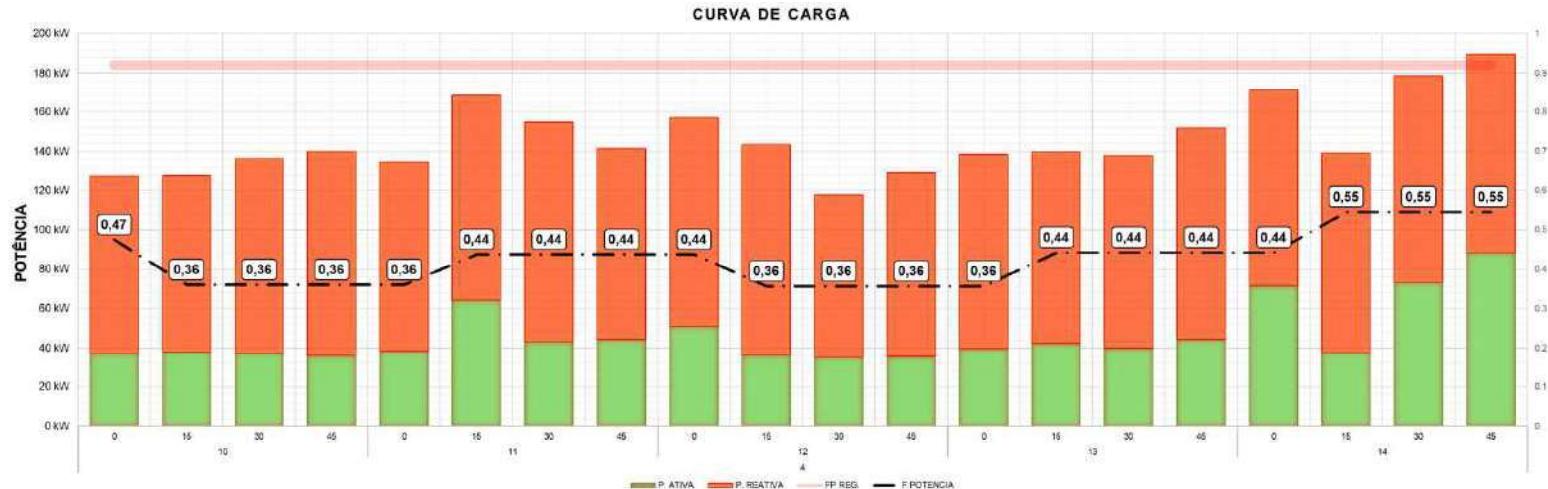


Figura 2 – Potência Ativa, Reativa e FP medido entre as 10h e 14h do dia 04/08/2024.

namento de um banco de capacitor que pudesse fazer a injeção de reativo capacitivo para compensar o reativo indutivo que está sendo solicitado da rede. Escolheu-se então dimensionar um banco de capacitor com ajuste automático e que possui níveis de reativos que variam de 5 em 5 kVAR.

Para os 30 dias de medições dis-

poníveis, calculou-se o tamanho do banco de capacitor que seria necessário para corrigir o FP para no mínimo 0,92, para não ocorrer o pagamento de “excesso de reativo” nos momentos em que a UFV está em operação.

A fórmula utilizada para calcular o banco de capacitor é descrita a seguir:

Onde:
QBC: Potência reativa necessária para o banco de capacitores (kVAR)

$$Q_{BC} = Q_1 - Q_2$$

Q1: Potência reativa antes da correção (kVAr)

Q2: Potência reativa desejada após a correção (kVAr)

Como a energia reativa é calculada por:

Onde:

Q: Potência reativa (kVAr)

P: Potência ativa (kW)

$$Q = P \times \tan(\cos^{-1}(FP))$$

cos-1: arco cosseno

tan: tangente

FP: Fator de Potência

Desta forma, os valores calculados de potência reativa do banco de capacitores será dado por:

Onde:

FP1: Fator de Potência Antes da Correção]

$$Q_{BC} = P \times [\tan(\cos^{-1}FP_1) - \tan(\cos^{-1}FP_2)]$$

FP2: Fator de Potência após a correção (FP 2= 0,92)

Com a equação do dimensionamento do banco de capacitores encontrou-se todos os valores de potência reativa para cada uma das medições disponíveis na memória de massa da distribuidora. Esse cálculo não encontrou valores inteiros múltiplos de 5 kVAr, porém, para os valores encontrados foi estabelecido um banco de capacitor múltiplo de 5 logo acima do valor encontrado na equação. Este banco operará de maneira automática e estabelecendo um valor adequado de capacitores em operação de acordo com a dinâmica de variação de potência reativa requerida pela unidade consumidora.

A máxima potência reativa encontrada para o sistema foi de 145 kVAr, registrada no dia 30/08/2024 às 14:15h, como pode ser visto na Figura 3. Repare que duas novas variáveis surgiram neste gráfico, são elas:

P. Capacitor: Potência reativa (kVAr) do banco de capacitores necessária para corrigir o fator de potência dessa medição (representado pela barra negativa em amarelo no gráfico);

FP Corrigido: Fator de Potência corrigido após a inserção do banco de capacitores. Representado pela linha tracejada vermelha, repare que os seus valores estão sempre

iguais ou acima do FP da regulação (0,92).

Assim como aconteceu no exemplo apresentado da Figura 1, repare que na Figura 3, no início e fim do dia (06 e 18h), as medições apresentaram fatores de potência acima ou próximos de 0,92. À medida que a injeção de energia do sistema fotovoltaico aumenta, é necessário a introdução do banco de capacitores para correção do fator de potência.

A Figura 4 apresenta as mesmas medições da Figura 3, porém para um intervalo de tempo menor (janela de 10 às 14h). Nessa Figura 4 estão em destaque os valores dos banco de capacitores utilizados, os valores de fatores de potência antes da correção e pela linha tracejada em vermelho pode-se verificar que a correção foi feita de maneira adequada, elevando todos os valores de FP acima do limite de 0,92 (destacado na figura).

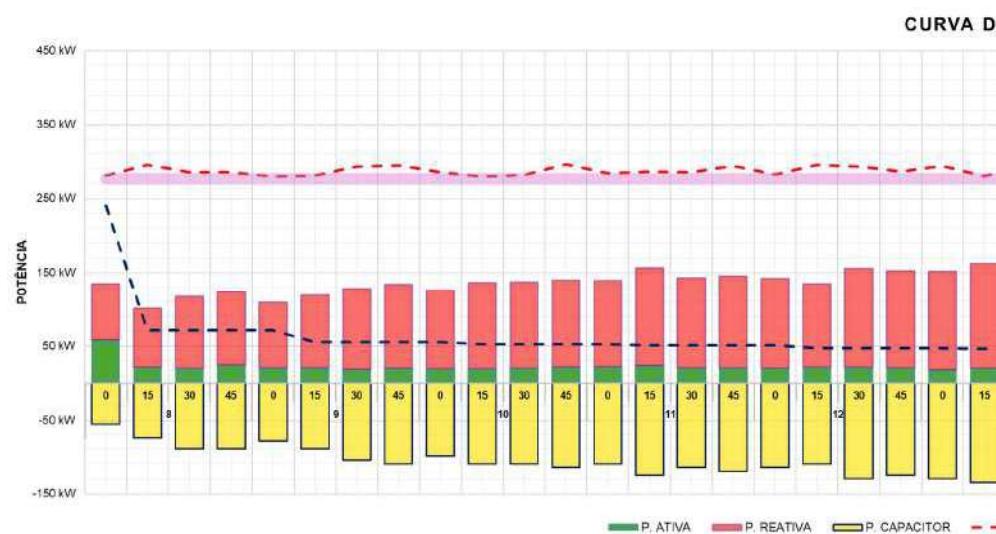


Figura 3 – Potência Ativa, Reativa, FP sem correção, FP corrigido e Potência reativa do banco de capacitores.

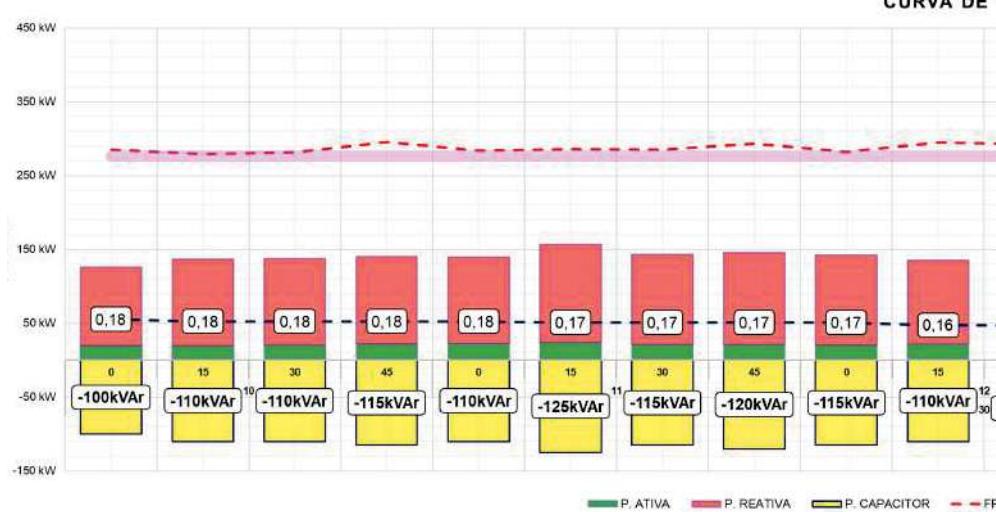


Figura 4 – Potência Ativa, Reativa, FP sem correção, FP corrigido e Potência reativa do banco de capacitores.

Considerações Finais

Este artigo descreveu sobre o problema de fator de potência que ocorre em unidades consumidoras que possuem geração fotovoltaica junto a carga. O problema é identificado pelo fato do sistema de energia solar fornecer a energia ativa para as cargas e a energia reativa continuar sendo suprida pela rede da distribuidora. Assim, a proporção do reativo em relação ao ativo visto pelo medidor da concessionária

é modificado e isso faz com que o fator de potência medido fique abaixo do regulamentado em alguns momentos do dia.

Foi apresentado um estudo de caso real que mostrou o problema de fator de potência identificado em uma unidade consumidora logo após a instalação da usina solar fotovoltaica e foi apresentada uma solução com a correção via instalação de um banco de capacitores, que injeta potência reativa capa-

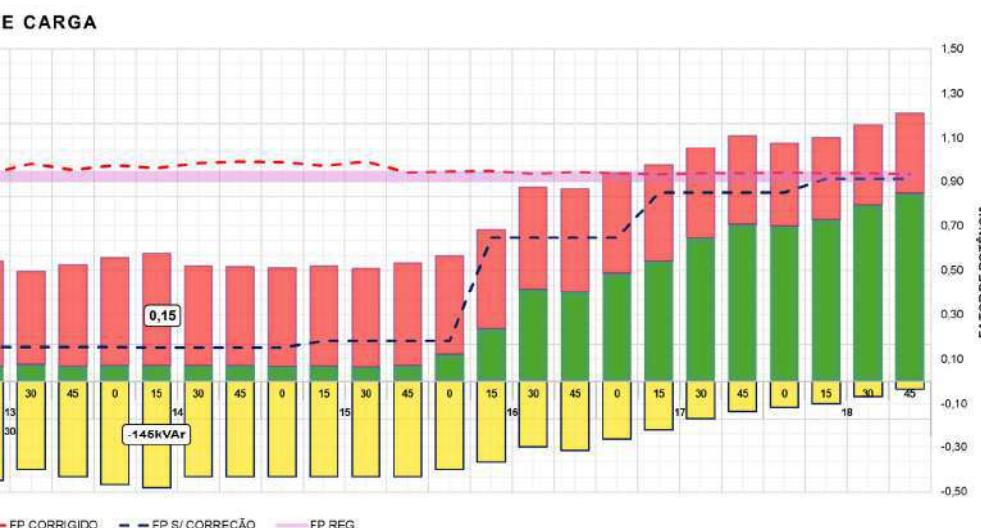
titiva para compensar o reativo demandando da rede.

Isso fez com que os valores de fator de potência vistos pelo medidor voltassem aos padrões exigidos pela regulação para não pagamento de multa.

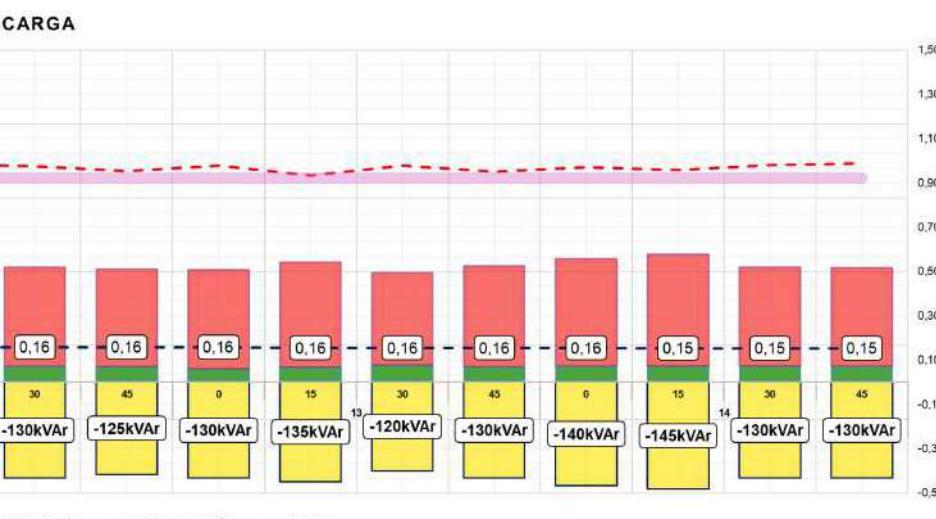
Um fato relevante de se observar é que em nenhum momento houve um aumento do consumo de energia reativa após a instalação do sistema solar fotovoltaico, ou seja, não houve mudança no perfil de consumo da unidade consumidora.

O que ocorreu foi que parte da potência ativa consumida pelas cargas agora é fornecida pelo sistema fotovoltaico, fazendo com que se aumentasse a proporção do reativo em relação ao ativo que se demanda da rede da distribuidora, o que causou um registro de “excedente” de reativo na fatura de energia.

Na prática, esse “excedente” não existiu se comparado ao mesmo perfil de consumo anterior à instalação da usina fotovoltaica.



ores medidos entre as 06h e 18h do dia 30/08/2024.



ores medidos entre as 10h e 14h do dia 30/08/2024.

