

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERIGA

Cintia Vilain Vieira

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA NO FATOR DE POTÊNCIA DE UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

Araranguá

2019

CINTIA VILAIN VIEIRA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO FATOR DE POTÊNCIA DE UM
CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

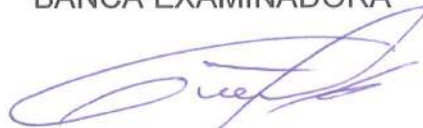
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
à Universidade Federal de Santa Catarina,
como parte das exigências para a obtenção do
título de Engenheiro(a) de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher

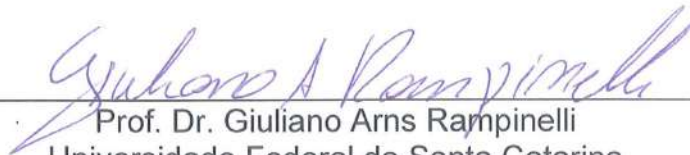
Coorientador: Geóvio Kroth

Araranguá, 20 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Geóvio Kroth (Coorientador)
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Me. Leticia Toret Scarabelot
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vieira, Cintia Vilain Vieira
ANÁLISE DOS EFEITOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO FATOR DE POTÊNCIA DE UM CAMPUS
UNIVERSITÁRIO / Cintia Vilain Vieira Vieira ; orientador,
Luciano Lopes Pfitscher Pfitscher, coorientador, Geóvio
Kroth Kroth, 2019.
22 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Sistemas Fotovoltaicos. 3.
Fator de Potência . 4. Qualidade de Energia. 5. Geração
Distribuída. I. Pfitscher, Luciano Lopes Pfitscher. II.
Kroth, Geóvio Kroth. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV. Título.

ANÁLISE DOS EFEITOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO FATOR DE POTÊNCIA DE UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

EFFECTS ANALYSIS OF AN GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN THE POWER FACTOR OF AN UNIVERSITY CAMPUS

Cintia Vilain Vieira*

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto de um sistema fotovoltaico de microgeração na qualidade de energia de um prosumidor do grupo A, mais especificamente um edifício público de educação. Diversos indicadores são úteis para a análise da qualidade de energia, dentre eles, o fator de potência, que indica a quantidade de energia reativa em relação à energia ativa. O foco deste trabalho será mostrar os valores de fator de potência em um sistema fotovoltaico conectado à rede, além de discutir sua influência na rede local. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são aplicáveis em modelos de geração distribuída. Cabe a este artigo revisar também os conceitos de qualidade de energia, distorções harmônicas e fator de potência. A importância de um sistema fotovoltaico instalado em um campus universitário, não somente da perspectiva da instalação elétrica e de custos com energia, mas também como objeto de estudo para os discentes, serão temas abordados neste estudo.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos. Geração Distribuída. Qualidade de Energia. Fator de Potência.

ABSTRACT

This article aims to analyze the impact of a photovoltaic micro-generation system on the power quality of a group A consumer, specifically a public education building. Several indicators are useful for power quality analysis, among them the power factor, which indicates the amount of reactive energy in relation to the active energy. The focus of this paper will be to show the power factor values in a on-grid photovoltaic system, and to discuss their influence on the local grid. Photovoltaic systems connected on the grid are relevant in distributed generation models. This article also reviews the concepts of power quality, harmonic distortions and power factor. The importance of a photovoltaic system installed on a university campus, not only from the perspective of electrical installation and energy costs, but also as an object of study for students, will be another topic in this study.

Key words: Photovoltaic Systems. Distributed Electricity Generation. Electric Power Quality. Power Factor.

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados de 2018 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), desde 1995, o consumo anual de energia elétrica no Brasil cresceu mais de 90% e apresentou quedas apenas nos anos de 2001, 2009 e 2015. Em 2001, a queda no consumo esteve diretamente ligada ao maior racionamento de energia elétrica do país, em que a estiagem e a falta de investimentos no setor originaram a “crise do apagão”. Já nos anos de 2009 e 2015, crises econômicas afetaram o crescimento da indústria brasileira e, conseqüentemente, o consumo retraiu.

De acordo com o plano decenal de expansão de energia de 2026, a previsão é de um aumento de 13% no consumo de energia elétrica per capita e de 1,9% ao ano no consumo total.

* Graduanda de Engenharia de Energia - UFSC. E-mail: cintia.vilain@gmail.com

Ainda que não represente um crescimento significativo, o desgaste de grandes usinas hidrelétricas e a lenta ampliação dos sistemas de transmissão trazem preocupamentos para a expansão do setor elétrico.

O Balanço Nacional de Energia de 2018 – ano referência 2017 – apresenta a energia hidráulica como principal fonte da matriz elétrica brasileira, correspondendo a 65,2% da geração elétrica. Ainda que a geração hidráulica tenha diminuído 3,42% em relação a 2016, as fontes renováveis ainda constituem mais de 80% da matriz elétrica, graças ao avanço da energia eólica e solar no país, que, compensaram o uso das usinas térmicas a carvão e derivados de petróleo. A capacidade instalada da energia solar fotovoltaica, por exemplo, é de 935 MW e de 174,5 MW na micro e minigeração distribuídas, o que representa um crescimento de 875,6% em 2017. Atualmente, de acordo com o BEN 2019, a capacidade instalada é de 1.798 MW.

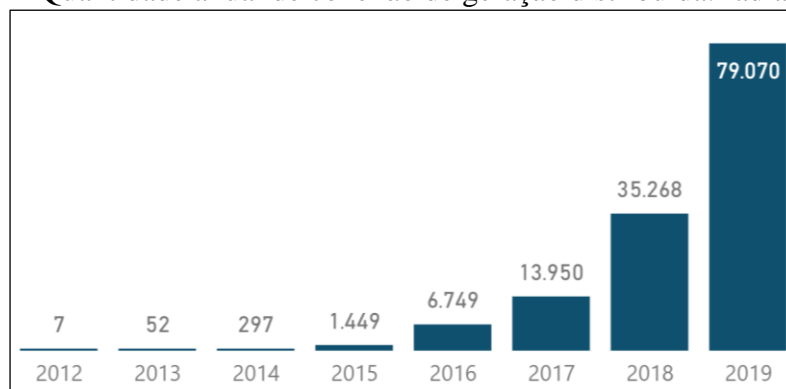
A geração distribuída é definida no Decreto Lei nº 5.163/2004, como sendo “toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador”. Em 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482 que regulamentou o processo de Geração Distribuída (GD) permitindo contabilização de créditos pelas concessionárias. Em 2015, a ANEEL publicou a sua atualização, a Resolução Normativa nº 687.

Uma das maiores vantagens no uso da geração distribuída por parte dos prosumidores é a viabilidade econômica, pois a redução na fatura de energia elétrica ressarcem o investimento inicial. Os grandes centros de geração baseados nas formas tradicionais de geração, sendo a hídrica e térmica as principais, estão normalmente concentrados em regiões distantes dos maiores centros de carga, assim, a geração distribuída, também é uma alternativa para não sobrecarregar as linhas de transmissão.

No Brasil, as Unidades Consumidoras são divididas em grupos, chamados de grupo A e grupo B, dependendo do nível de tensão de fornecimento. Além disso, de acordo com a Resolução Normativa nº 414/2010 da ANEEL, os consumidores podem ser identificados de acordo sua atividade principal, ou seja, a finalidade do consumo da energia. As principais classes tarifárias de consumo são: residencial, industrial, comercial e poder público.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos representam 90,91% do total da capacidade instalada de geração distribuída no Brasil, com mais de 1,5 MW de capacidade instalada. A classe de consumo com maior quantidade de Unidades Consumidoras (UC) com GD é a residencial e a classe comercial retém a maior potência instalada em GD (ANEEL, 2019). A Figura 1 abaixo mostra a quantidade anual de novas conexões e é possível perceber o crescimento exponencial desta fonte na geração distribuída do Brasil.

Figura 1 – Quantidade anual de conexão de geração distribuída: radiação solar.



Fonte: Relatório de Geração Distribuída – ANEEL, novembro de 2019.

No estado de Santa Catarina são 7.455 unidades consumidoras com sistemas de geração distribuída, sendo 20 UCs do poder público. Os centros de ensino públicos estão enquadrados na classe de consumo poder público e no município de Criciúma representam mais de 65% dos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída (ANEEL, 2019). A vantagem da instalação de um sistema de GD, especialmente Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), em centros de ensino, ultrapassa as vantagens econômicas, pois também é útil para o ensino e pesquisa.

Durante o dia os SFCR são capazes de gerar boa parte da potência ativa necessária para o funcionamento das cargas e somente durante a noite a rede de distribuição precisa suprir a demanda de potência ativa. O uso de SFCR trouxe às concessionárias de distribuição de energia novos desafios, ligados à medição e faturamento das unidades consumidoras. Além disso, há a possibilidade de alteração na qualidade de energia que pode afetar a rede de distribuição. Estudos apontam que a presença de harmônicas e a diminuição do fator de potência podem ocorrer em SFCR (FORTES, 2016).

As unidades consumidoras do grupo A, composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômica, são passíveis de cobrança por descumprimento do fator de potência mínimo de 0,92 (ANEEL, 2010).

Os módulos fotovoltaicos produzem energia em corrente contínua, sendo assim, não há razão em referir-se ao fator de potência da saída dos módulos. Por outro lado, o inversor fotovoltaico, responsável por transformar a corrente contínua em corrente alternada, possui a capacidade de regular o fator de potência, ou seja, possibilita o consumo de potência reativa. Vale ressaltar que o inversor é um componente eletrônico sujeito à geração de harmônicas, podendo gerar potência de distorção e, conseqüentemente, alterar o fator de potência.

Diante do exposto e considerando o surgimento de diversos estudos que relacionem o fator de potência com o uso de SFCR, o principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar a variação no fator de potência medido em uma unidade consumidora do grupo A, mais especificamente, uma instituição federal de ensino do município de Criciúma, verificando se a alteração no fator de potência implicaria em custos extras para a instituição e redução na qualidade de energia entregue pelo sistema de geração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentados tópicos específicos que contribuem para o entendimento geral deste trabalho de conclusão de curso.

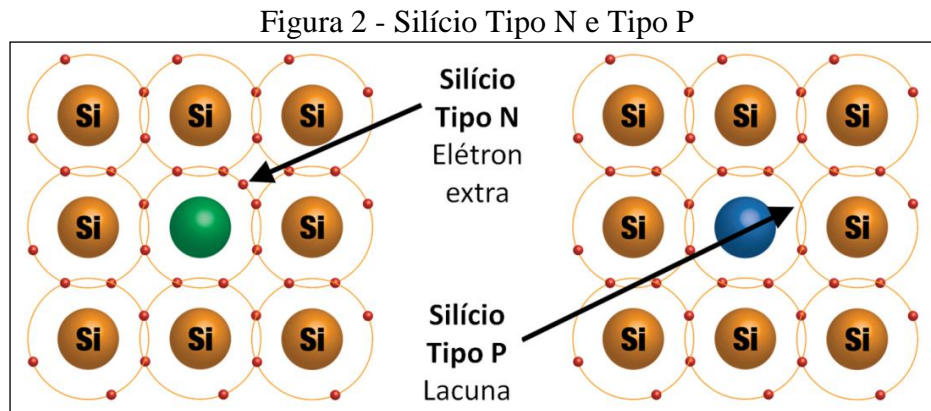
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O Sol é considerado um inesgotável recurso energético, que, diariamente, incide sobre a superfície da terra energia suficiente para suprir a demanda energética anual do planeta (RÜTHER, 2004). A radiação solar é resultado das infinitas reações de fusão nuclear que ocorrem dentro do Sol e, o aproveitamento do recurso solar pode ser feito de forma direta como fonte de energia térmica, ou de maneira indireta, sendo convertido em energia elétrica.

Alexandre Edmond-Becquerel, em 1839, observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico. Enquanto realizava experimentos com eletrodos, percebeu que uma diferença de potencial surgia quando a solução ácida era exposta à luz. No efeito fotoelétrico, a incidência de luz em um material provoca ejeção de elétrons do mesmo, no entanto, no efeito fotovoltaico, quando um material semicondutor absorve radiação, há geração de corrente elétrica, portanto, diz-se que a radiação eletromagnética é convertida de maneira direta em energia elétrica (OLIVATI, 2000).

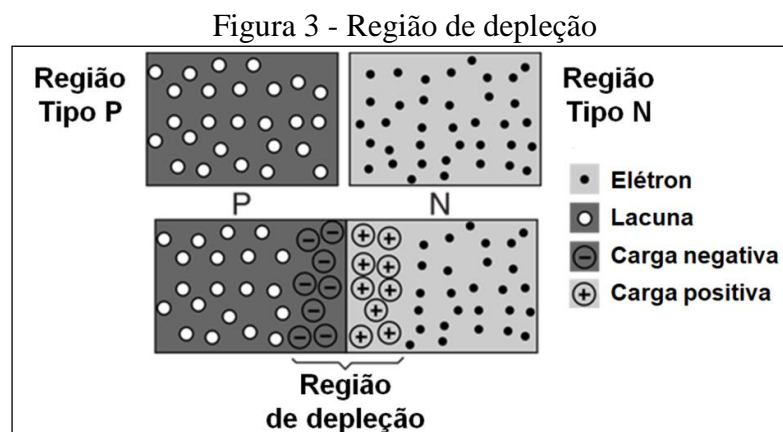
Os dispositivos capazes de transformar a irradiância solar em energia elétrica são chamados de células fotovoltaicas, confeccionadas com material semiconductor, que possui características intermediárias entre isolantes e condutores, sendo muito empregado o silício (Si) que é abundante na Terra (BRUSCHI, 2010). A primeira célula de silício monocristalino foi fabricada em 1941, já em 1954 foi fabricada uma célula de silício com um rendimento de aproximadamente 6% e, apenas três anos depois, a empresa Hoffman Eletronics elevou a eficiência para 8% (ZAIDI, 2018).

Na fabricação das células fotovoltaicas o silício passa pelo processo de dopagem, uma vez que os cristais de silício possuem baixa condutividade elétrica. Denomina-se silício tipo N quando a dopagem é feita com fósforo ou arsênio, que possuem cinco elétrons na camada de valência, assegurando que um elétron não livre esteja na eminência de ser liberado. Quando o silício é dopado com boro ou gálio que são trivalentes, o silício torna-se tipo P, que, ao contrário do tipo N, forma uma lacuna na camada de valência em virtude da ausência de elétron (TOLMASQUIN, 2003). A Figura 2 mostra os arranjos dos átomos no silício tipo P e N.



Fonte: Adaptado de Redarc Eletronics.

A junção PN é a área da união do silício tipo P e N, da qual as células são constituídas. Quando a junção é exposta a luz, a lacuna do semiconductor tipo P (positivo) recebe o elétron aditivo do silício tipo N (negativo) e durante esse processo de migração de cargas, há geração de campo elétrico, que aumenta à medida que as cargas deslocam por entre a junção, até o momento em que o campo formado tenha mais força do que a força atrativa entre as cargas, paralisando a migração e estabelecendo equilíbrio. Forma-se então a região de depleção (Figura 3) que cria uma barreira de potencial, e, quando exposta à luz, cria uma corrente elétrica que tende a atravessar a carga externa (BÜHLER, 2007).



Fonte: Adaptado de Hyper Physics.

As células fotovoltaicas presentes no mercado geram de 1 W a 5 W de potência e são combinadas em série ou paralelo, dependendo da corrente e tensão desejados. As células são soldadas em tiras e encapsulas, e, o resultado dessas combinações é o módulo fotovoltaico com potências nominais de até 350 W. A potência de geração dos módulos depende da irradiância solar de cada região e da eficiência dos módulos que está estritamente ligada ao processo de fabricação (URBANETZ JUNIOR, 2010).

Os sistemas de geração de energia que utilizam os módulos fotovoltaicos para suprir a demanda de determinada unidade são chamados de sistemas fotovoltaicos. Vale ressaltar que os módulos produzem corrente contínua, portanto, caso os aparelhos elétricos requeiram corrente alternada é necessário um conversor. Os sistemas fotovoltaicos são comumente classificados em três categorias: sistemas autônomos, híbridos e conectados à rede (RAMPINELLI; GOMES, 2013).

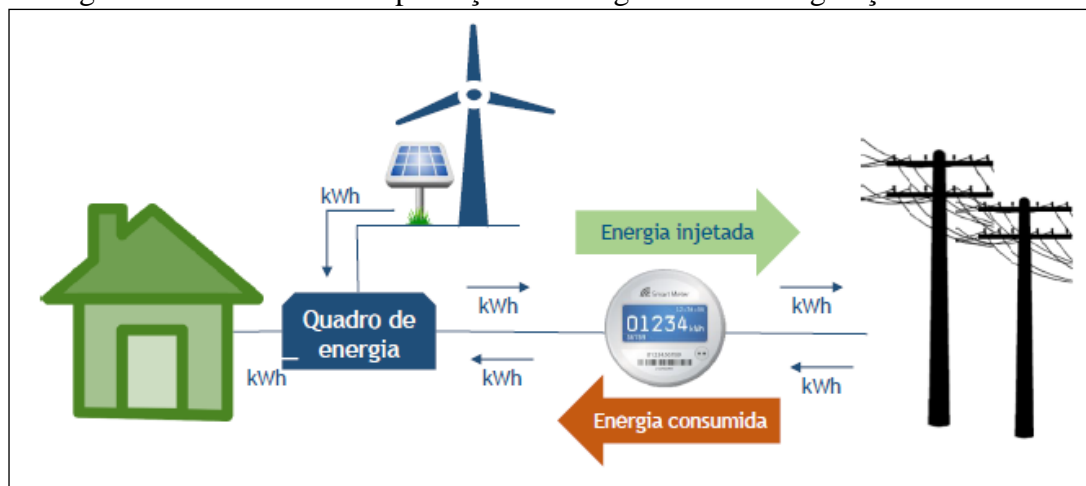
2.1.1 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Quando a geração de energia ocorre próxima ao ponto de consumo, dispensando o uso de longas redes, estando conectada à rede local ou à rede de distribuição, usa-se o termo geração distribuída (BERNARDON, 2015). Em 2004, através do Decreto Lei nº 5.163 o termo geração distribuída foi incluído na legislação brasileira e em 2012, na Resolução Normativa nº 482 da ANEEL o processo de geração distribuída (GD) foi regulamentado no setor elétrico. A Resolução Normativa nº 687 é a versão atualizada da RN nº 482 e está em vigor atualmente.

Os sistemas fotovoltaicos são amplamente utilizados em geração distribuída, por causa da baixa complexidade de instalação e dimensão reduzida de componentes, se comparado a outras fontes. Os sistemas fotovoltaicos autônomos ou isolados são aqueles que estão apenas conectados à rede local do consumo, com independência da distribuidora. Como a geração ocorre apenas durante o dia, algumas ações precisam ser tomadas para garantir eletricidade durante a noite, como por exemplo, o uso de baterias (URBANETZ JUNIOR, 2010).

A grande maioria dos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no Brasil são os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Nos SFCR a vantagem é que quando o sistema não está gerando, o suprimento de energia é garantido pela distribuidora e quando a geração é maior que o consumo instantâneo, a energia é injetada na rede de distribuição, portanto, pode-se dizer que a rede funciona como um sistema de armazenamento do sistema (CEPEL, 2014). O esquema do sistema de compensação de energia está representado na Figura 4.

Figura 4 – Sistema de compensação de energia elétrica em geração distribuída



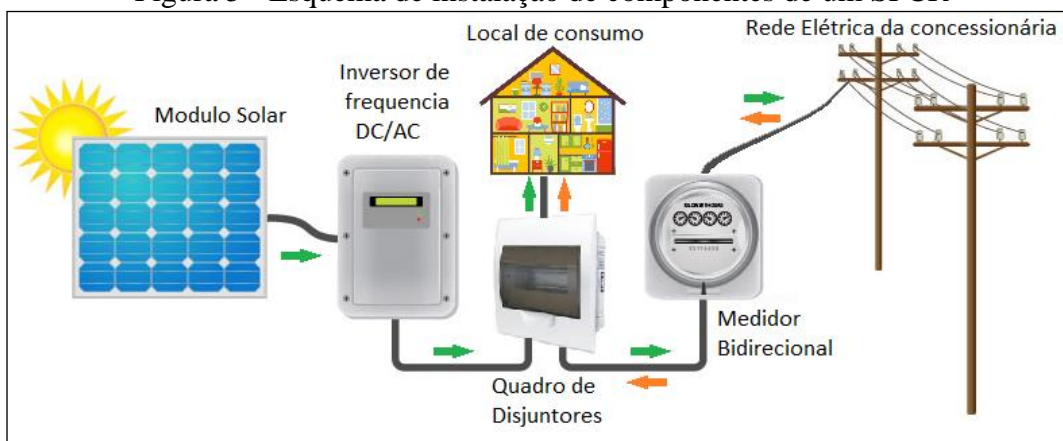
Fonte: ANEEL/SRD.

No Brasil, para que o sistema fotovoltaico seja conectado à rede de distribuição, é necessário o parecer de acesso da distribuidora, liberando a conexão do sistema na rede, além disso, também cabe à distribuidora realizar uma vistoria na unidade consumidora e posteriormente efetuar a troca do medidor, capaz de contabilizar energia injetada e fornecida, denominado medidor bidirecional. Caso a leitura indique que o montante de energia injetada foi maior que a energia consumida do alimentador, geram-se créditos na fatura do cliente, e, esses créditos podem ser utilizados em até 60 meses (ANEEL, 2015).

Os SFCR são subdivididos em microgeração e minigeração. Um sistema de microgeração é aquele que possui potência instalada igual ou inferior a 75 kW e os sistemas de minigeração possuem de 75 kW a 5 MW de potência, além disso, sistemas acima de 3 MW são consideradas usinas de geração e não se encaixam no conceito de GD (ANEEL: RN 687, 2015).

Nos SFCR, além dos módulos fotovoltaicos, que fazem a conversão da energia eletromagnética em energia elétrica, há também outros componentes importantes como o inversor (conversor CC/CA), suportes para os módulos e caixas de proteção, comumente chamadas de *string-box*. A Figura 5 mostra os principais componentes do SFCR. O inversor tem como finalidade a conversão da corrente contínua em corrente alternada, além de desempenhar outras funções (CEPEL, 2014).

Figura 5 - Esquema de instalação de componentes de um SFCR



Fonte: BMC Energia.

2.1.2 Inversor

O inversor é um equipamento eletrônico que, além de converter a corrente contínua em corrente alternada, precisa estar em conformidade com as características impostas pela rede pública de distribuição, entre elas: tensão, frequência, conteúdo de harmônicas e forma de ondas. Existem duas maneiras de estabelecer sincronia com os padrões de rede: através da autocomutação ou da comutação pela própria rede. Na autocomutação, um circuito eletrônico disponibiliza ao inversor a informação dos padrões da rede local. Na comutação pela rede, o inversor recebe sinais da rede de distribuição, identificando os padrões necessários (RÜTHER, 2004).

Os projetos submetidos para solicitação de acesso à rede precisam incluir os certificados de conformidade do inversor a ser utilizado para garantir que o modelo tenha sido aprovado em uma série de ensaios de qualidade. Os inversores com potência de saída nominal de até 10 kW devem possuir registro de concessão do INMETRO para que sejam aceitos pelas concessionárias. No caso de inversores com saída de 10 kW ou mais, em que o INMETRO não possui laboratórios credenciados para teste, devem ser apresentados registros de conformidade

internacionais, desde que em conformidade com normas da ABNT, cabendo a análise da distribuidora para liberação (PRODIST, ANEEL).

Para escolha do inversor é necessário o dimensionamento correto do sistema. Quando os módulos a serem usados no projeto são definidos, é preciso verificar as especificações técnicas de saída, como tensão, corrente e potência para garantir que não ultrapassem os valores máximos aceitos na entrada do inversor. Cada arranjo de módulos em série (*string*) possui uma tensão específica dependendo do número de módulos, além disso, o número de *strings* também precisa estar de acordo com o aceite pelo inversor (CEPEL, 2014).

Os inversores possuem um sistema inteligente de rastreamento de máxima potência, chamado de SPPM (Seguimento de Ponto de Potência Máxima) para garantir a maior eficiência do gerador. O processo de SPPM ocorre geralmente na entrada dos inversores ajustando a tensão onde a potência das células é maior, evitando assim, perdas no sistema (CEPEL, 2014).

No Brasil, os inversores conectados à rede precisam atender os requisitos apresentados na ABNT NBR 16149:2013 que dispõe das características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, dentre eles, alguns parâmetros mínimos de qualidade de energia, como fator de potência, variação de tensão e frequência e distorção harmônica total (ABNT, 2013).

2.2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

O termo qualidade de energia elétrica refere-se a fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a corrente e tensão em dado instante, aplica-se em todo o sistema elétrico, incluindo instalações prediais. Diz-se que a qualidade de energia é ideal quando há bom funcionamento das cargas, considerando ausência de perturbações no sinal senoidal de tensão e corrente, ou seja, com pouca variação na amplitude, frequência e forma de onda (PADILLA, 2008).

A qualidade de energia também está relacionada com interrupções que afetam o desempenho da rede elétrica, desde a transmissão até a utilização da energia (SILVA, 2008). Alguns índices foram criados pelas agências reguladoras do setor para garantir a qualidade nos sistemas de distribuição. No Brasil, a ANEEL definiu os índices DIC e FIC como indicadores da qualidade individual do produto entregue ao consumidor. O DIC determina a duração de interrupção individual por unidade consumidora e o FIC indica a frequência da interrupção. Caso as concessionárias não atendam os limites estabelecidos em cada indicador, devem ressarcir os seus clientes (ANEEL: PRODIST, 2015).

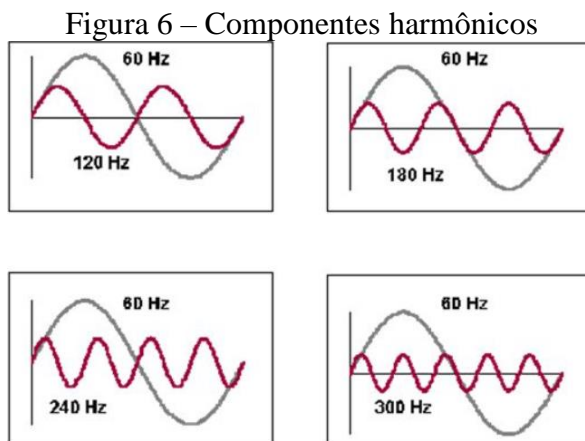
Os órgãos reguladores não se atêm somente a qualidade do serviço das distribuidoras, analisando as interrupções no fornecimento, mas também se preocupam com a qualidade do produto, ou seja, a qualidade da energia elétrica entregue. As perdas nos sistemas de transmissão e distribuição, também estão relacionadas com a baixa qualidade de energia elétrica (QEE). Altos conteúdos de harmônicas, por exemplo, acabam gerando perdas nos transformadores e condutores dos sistemas elétricos de potência, portanto, a análise do teor harmônico nas redes torna-se relevante (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994).

O módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - ANEEL) define indicadores da qualidade do produto, caracterizando os fenômenos e perturbações na forma de onda e estabelecendo os limites aceitáveis e os valores de referência. O ideal é que as distribuidoras forneçam energia com tensão exclusivamente senoidal, com amplitude e frequência constantes (GARCIA, 2008).

Outro fator relevante na qualidade de energia é o Fator de Potência (FP), pois sinaliza o consumo de energia reativa das cargas. A energia reativa pode ser indutiva ou capacitiva e seu consumo traz prejuízos às distribuidoras pois representa perdas e sobrecarga dos sistemas elétricos de potência (AMARAL, 2015).

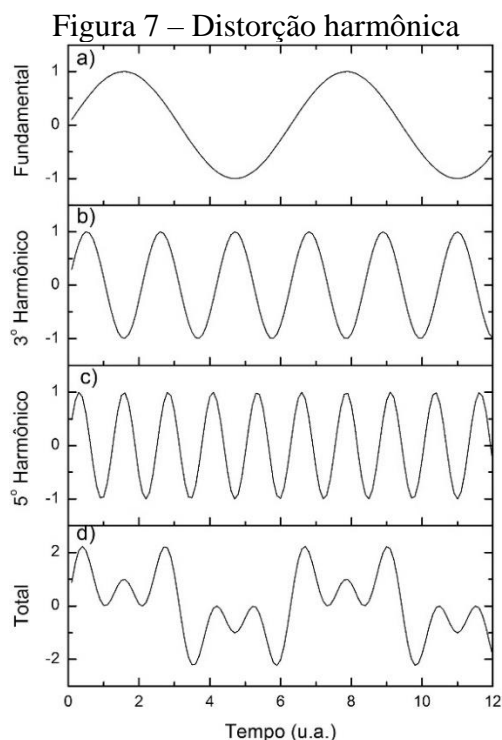
2.2.1 Distorções Harmônicas

Componentes harmônicos são os componentes senoidais de uma onda periódica, que possuem frequência múltipla da frequência fundamental, sendo essa, 60 Hz no Brasil. Na Figura 6 abaixo, é possível identificar a onda fundamental (cinza) e também ondas com frequência múltipla de 60 Hz (vermelho) (NISKIER; MACINTYRE, 2014).



Fonte: ABB Ltda.

As distorções harmônicas, ou apenas harmônicas são o resultado da presença de componentes harmônicos em ondas com frequência fundamental. A soma da onda com frequência fundamental e de outra com frequência múltipla de 60 Hz resulta em uma onda com um formato não senoidal, ilustrado na Figura 7. Essas perturbações podem ser causadas tanto no sinal senoidal da corrente quanto no sinal da tensão elétrica (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994). Na Figura 7 parte *a*), a onda possui frequência fundamental enquanto que a parte *d*) mostra a onda distorcida pelo 3º e 5º harmônico.



Fonte: AZEVEDO; ROMÃO; MENEGATTI, 2019.

As ondas múltiplas de 60 Hz também são nomeadas de acordo com sua ordem que é encontrada através da razão entre a frequência do componente harmônico e a frequência da onda fundamental. Um harmônico com frequência de 120 Hz, por exemplo, é considerado de segunda ordem e assim por diante (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994).

Alguns indicadores podem ser úteis para determinar o nível de distorção harmônica em relação à onda senoidal de frequência fundamental. Através de critérios de avaliação é possível quantificar a distorção harmônica individual e a distorção harmônica total em sistemas elétricos, seja para o sinal da corrente ou da tensão (NUNES, 2007). A distorção harmônica individual (DHI) é a razão entre a componente harmônica e sua correspondente na frequência fundamental. A distorção harmônica individual de corrente (2) e tensão (3) são definidas pelas equações abaixo:

$$DHI_i = \frac{i_h}{i_1} \quad DHI_v = \frac{v_h}{v_1} \quad (1, 2)$$

A distorção harmônica total (THD) é dada pela raiz quadrada do quociente entre o valor médio quadrático de todos os componentes harmônicos (2º, 3º, etc.) e o valor da componente fundamental:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_2^{50} i_h^2}}{i_1} \quad THD_v = \frac{\sqrt{\sum_2^{50} v_h^2}}{v_1} \quad (3, 4)$$

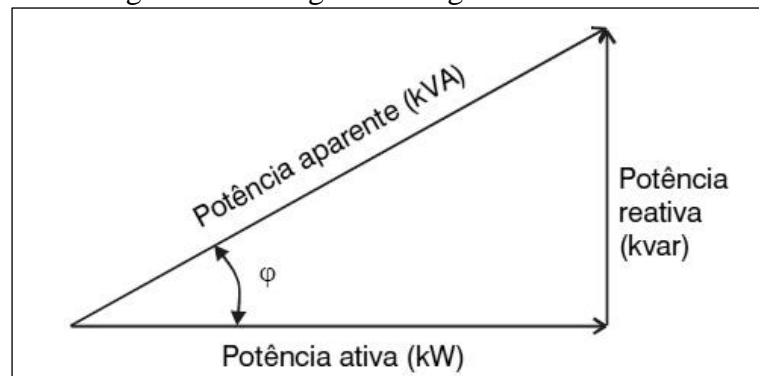
As distorções harmônicas em sistemas elétricos ocorrem pela presença de cargas não lineares que estão cada vez mais presentes na atualidade. As cargas não lineares são aquelas que consomem energia de maneira descontínua, ou seja, com interrupções no sinal, por causa de acionamentos e sistemas de chaveamento (DECKMANN; POMILIO, 2017).

2.2.2 Fator de Potência

Como mencionado anteriormente, o Fator de Potência (FP) também é um indicador de qualidade de energia e pode ser definido como a razão entre a potência ativa (P) em W (Watt) e a potência aparente ou total (S) em VA (Volt-Ampere). Quanto mais alto o fator de potência, mais eficiente é o uso da energia, pois mostra que a potência aparente está próxima do valor da potência ativa (AMARAL, 2015).

O triângulo retângulo das potências (Figura 8) é frequentemente utilizado para demonstrar a relação entre a potência ativa, aparente e reativa. Através desta representação é possível perceber que o FP é o cosseno do ângulo formado no triângulo entre a potência ativa e aparente (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 8 – Triângulo Retângulo das Potências



Fonte: Engelétrica serviços elétricos.

$$FP = \cos \varphi = \frac{P (W)}{S (VA)} \quad (5)$$

A potência ativa é aquela efetivamente usada pela carga para gerar trabalho e a potência aparente é a soma de todas as potências consumidas pela carga, incluindo a potência reativa (Q) que é usada para criar e manter campos eletromagnéticos e é medida em VAR (Volt-Ampere Reativo) (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Geometricamente, é possível chegar nas seguintes deduções:

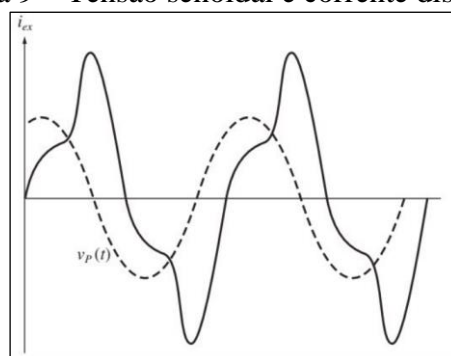
$$FP = \cos \varphi = \cos \left(\arctan \frac{Q}{P} \right) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6)$$

Como FP é a razão entre P e S, logo S é igual a:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (7)$$

Além das definições apresentadas acima, é importante definir o fator de potência de cargas não-lineares, ou seja, aquelas que podem gerar distorções harmônicas. A potência de distorção (H), medida em VA, é a potência em condições não senoidais. Para o cálculo da potência de distorção é preciso levar em consideração as alterações no formato de onda da corrente, uma vez que a tensão fornecida pela rede de distribuição apresenta estabilidade em seu formato de onda (DECKMANN; POMILIO, 2017). Na Figura 9 é possível perceber que a diferença no formato de ondas da corrente e tensão, resultará em distorção da potência.

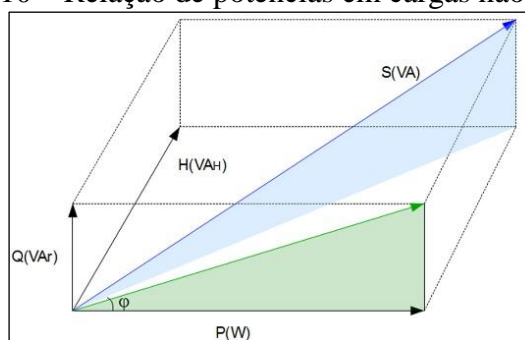
Figura 9 – Tensão senoidal e corrente distorcida



Fonte: EMANUELLI, 2017.

Como a potência é o produto da corrente e tensão, tem-se a potência de distorção que também deve ser considerada nos cálculos de fator de potência. Na Figura 10 a seguir o triângulo das potências passa a ser tridimensional e é possível visualizar a influência da potência de distorção (H) na potência aparente (S) (DECKMANN; POMILIO, 2017).

Figura 10 – Relação de potências em cargas não-lineares



Fonte: Gelo Peças Refrigeração Ltda.

Considerando a potência de distorção, vê-se um acréscimo no valor da potência aparente, portanto o FP diminui. No caso de cargas não-lineares, a potência aparente é:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2} \quad (8)$$

A qualidade de energia de um sistema fotovoltaico é regida por normas referentes a parâmetros de energia, sendo o fator de potência um deles. Essas normas estabelecem limites de desvio para esses parâmetros, sendo assim, o sistema fotovoltaico deve ser capaz desligar o fornecimento de energia caso os parâmetros não estejam de acordo.

Segundo a ABNT NBR 16149:2013 o local de medição dos parâmetros de qualidade de energia (tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência) deve ser no ponto de conexão entre à rede, exceto quando houver indicação de outro ponto. Para manter o FP em um valor constante e predefinido, o sistema fotovoltaico, após perceber uma variação da potência ativa deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída. Esse ajuste tem que ser feito em no máximo 10 s e o inversor deve sair de fábrica com FP unitário.

Os sistemas fotovoltaicos são divididos em três grupos de potência. Até 3 kW, entre 3 kW e 6 kW e acima de 6 kW. O fator de potência deve ser unitário ajustado de fábrica, com tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. Para a faixa de 3 kW a 6 kW o inversor deve oferecer a opção de ser ajustado de acordo com a curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor. Para a faixa acima de 6 kW o inversor deve oferecer as opções da faixa anterior e também o controle da potência reativa (ABNT, 2013).

No Brasil, o Decreto Lei nº 479/2012 ajustou o limite mínimo do fator de potência para 0,92 que deve ser mantido pelo consumidores e concessionárias, além do mais, garante às distribuidoras o direito de cobrança por consumo de excedente reativo. Alguns inversores fotovoltaicos são construídos com módulos de controle específicos para que consigam ajustar o próprio fator de potência, seja injetando potência ativa ou potência reativa, portanto, nestes equipamentos é impossível prever um comportamento, devendo este ser monitorado para garantir a correção de fator de potência (SILVA, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados para alcançar o objetivo deste trabalho.

3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO DE REFERÊNCIA

Para elaboração da análise de qualidade de energia desenvolvida neste trabalho, foi utilizado um sistema fotovoltaico de microgeração distribuída para coleta de dados. No Campus Criciúma do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), sobre o telhado de fibrocimento da instituição, foram instalados 229 módulos com potência de 320 Wp cada, resultando em um sistema de 73,28 kWp. Foram instalados cinco inversores com potência nominal de saída igual a 15 kW cada. O sistema entrou em operação em 2017.

Os inversores foram enumerados de 1 a 5. O inversor 1 foi conectado à duas strings de 21 módulos cada (da mesma forma foram conectados os inversores 3 e 5). O inversor 2 foi conectado à três strings, duas de 21 módulos e uma de 20. O inversor 4 foi conectado à uma string de 21 módulos e uma de 20. A Figura 11 mostra a foto dos cinco inversores instalados na instituição de ensino.

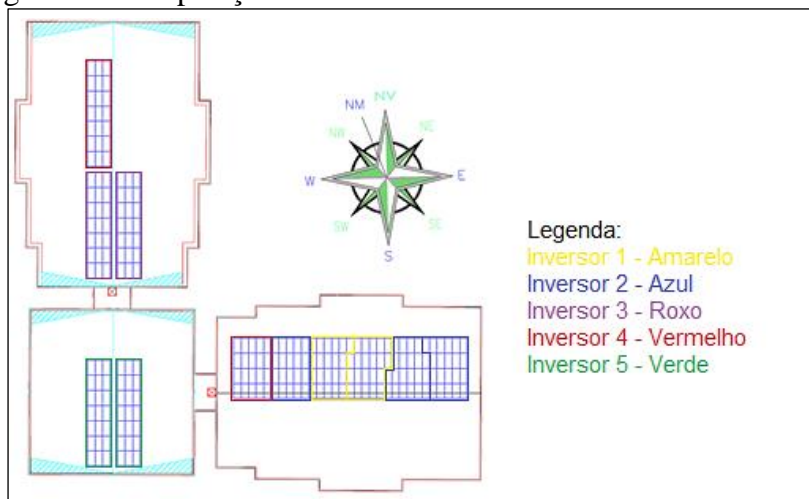
Figura 11 – Foto dos inversores instalados



Fonte: Elaborado pela autora.

O sistema foi projetado e instalado pela Alba Energia e Automação Ltda que dimensionou a potência necessária de geração, itens de proteção, posicionamento dos módulos, entre outros. O arranjo dos módulos foi projetado conforme Figura 12, sendo que 124 módulos foram direcionados para o norte, 42 para o leste e 63 para oeste (pontos geográficos).

Figura 12 – Disposição dos módulos nos telhados do IFSC Criciúma



Fonte: Diagrama Elétrico Simplificado elaborado por Alba Energia e Automação Ltda.

Os inversores utilizados neste projeto foram os da marca Fronius, modelo Symo Brasil 15.0-3. Abaixo, na Tabela 1, seguem as principais informações do inversor, obtidas através do catálogo do fabricante:

Tabela 1 – Especificações técnicas do inversor Fronius Symo Brasil 15.0-3

Fronius Symo Brasil 15.0-3	
Máxima potência de saída	15 000 VA
Máxima corrente de saída	41,6 A
Consumo noturno	< 1 W
Frequência de saída	60 Hz
Distorção Harmônica Total (THD)	3,5 %
Fator de Potência	0-1 indutivo/capacitivo

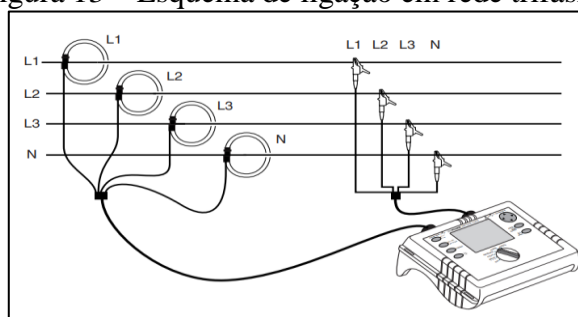
Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA

Para realização das medições foi utilizado o analisador de qualidade de energia da marca Fluke, modelo 1735 Power Logger, que não somente analisa a qualidade, mas é também capaz de medir consumo, dimensionar circuitos e proteções e aplicações relacionadas à eficiência energética. Através do software PowerMANAGER, disponibilizado pelo fabricante, é possível importar os dados, além de gerar gráficos e relatórios pré-programados.

As principais grandezas medidas são: tensão por fase e média, corrente por fase e média, corrente de neutro, fator de potência por fase e médio, fatores de potência máximos e mínimos, consumo ativo e reativo trifásico, demanda ativa e reativa trifásica, frequência da fase de referência (Hz) e harmônicas. Na Figura 13 está representado o esquema de ligação em rede de energia trifásica com conexão Y que foi aplicado para as análises deste estudo.

Figura 13 – Esquema de ligação em rede trifásica



Fonte: Fluke Corporation.

3.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE QUALIDADE

Para as análises de qualidade de energia, alguns métodos de restrição foram tomados. Foram usados os dados coletados durante o dia, considerando assim, somente o período de geração de energia do sistema fotovoltaico. Para selecionar apenas estes dados, foi feita uma média aritmética com os horários onde havia geração, portanto, considerou-se o período das 08:30 até 20:30 para as análises feitas no horário de verão, e das 07:30 até às 18:00 para as análises em fuso horário normal.

Além disso, os dados de todas as grandezas disponibilizados pelo analisador são sempre apresentados de três maneiras: mínimo, médio e máximo, considerando o intervalo de 10 minutos. Para fins de análise neste trabalho, serão desconsiderados os picos máximos e mínimos de cada período, portanto, considera-se apenas a média. Vale ressaltar que os dados usados também consideram apenas o valor total e não os referentes à cada fase.

A fim de análise neste trabalho foram coletados os dados das saídas dos inversores 2 e 5. Na Tabela 2 estão as principais considerações das coletas:

Tabela 2 – Pontos de coleta de dados

Ponto	Data inicial	Data final	Dias de coleta	Direção	Strings	Módulos
Inversor 2	15/fev	15/mar	28	Norte	3	62
Inversor 5	15/ago	23/ago	8	Leste e Oeste	2	42

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE FATURAS

Além da análise dos dados coletados pelo analisador de energia, foi feita uma análise das faturas de energia. As faturas do Campus IFSC Criciúma analisadas foram aquelas

referentes às leituras de Dezembro de 2015 a Outubro de 2019, com o intuito de verificar consumo de energia ativa e reativa, bem como, a energia injetada pelo sistema de microgeração. Os dados foram transcritos para ferramentas de planilhas a fim de criar gráficos e facilitar o estudo.

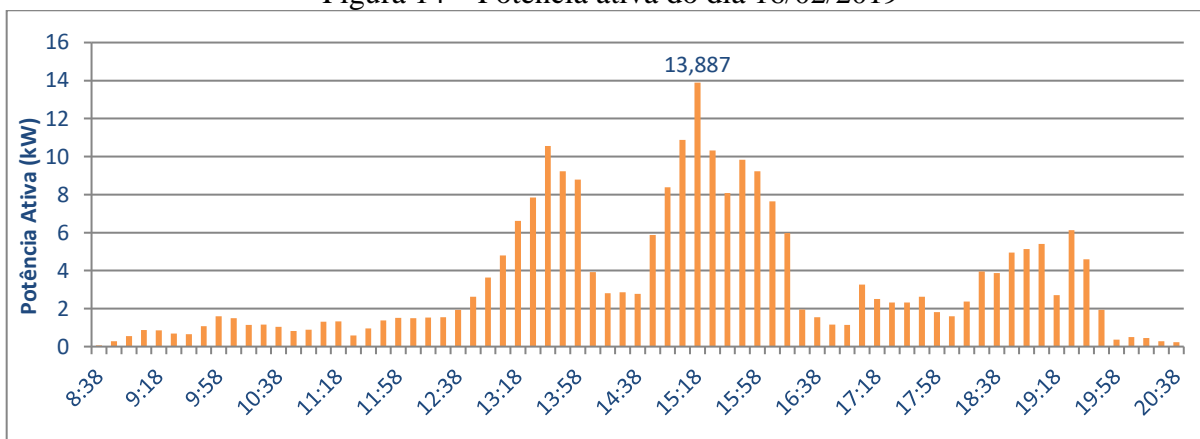
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões deste trabalho serão apresentados a seguir em dois tópicos distintos: analisador de qualidade de energia e análise de faturas de energia.

4.1 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA

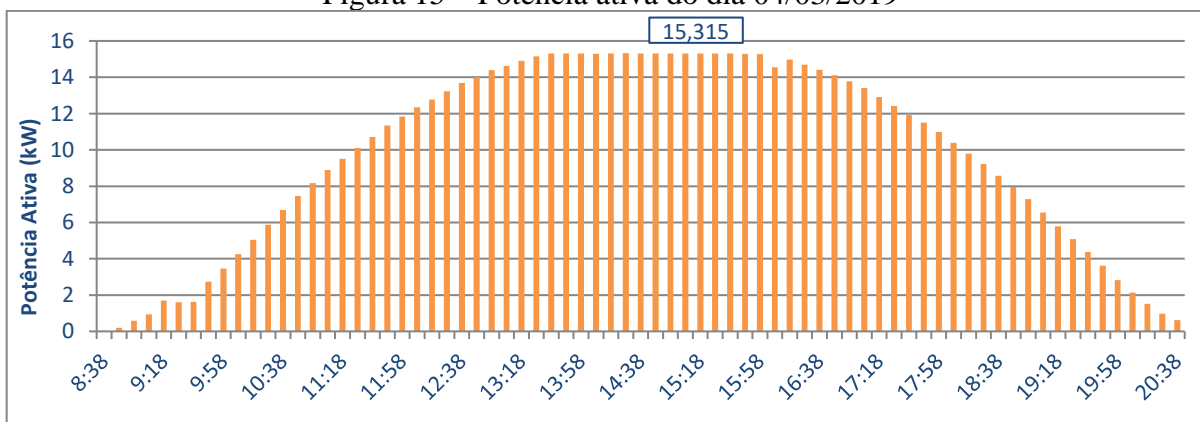
Como já visto, a potência de geração de um sistema fotovoltaico está diretamente ligado à irradiância solar. As medições realizadas na saída do inversor 2 totalizaram 29 dias de dados e para descobrir os dias com maior e menor irradiância, os gráficos de potência diária foram plotados. Abaixo, seguem gráficos dos dias 16/02/2019 (Figura 14) e do dia 04/03/2019 (Figura 15), dias com irradiância mais baixa e mais alta, respectivamente. É possível perceber que no dia 16/02 a geração foi baixa (potência ativa) e no dia 04/03/2019 a geração foi alta.

Figura 14 – Potência ativa do dia 16/02/2019



Fonte: Elaborado pela autora.

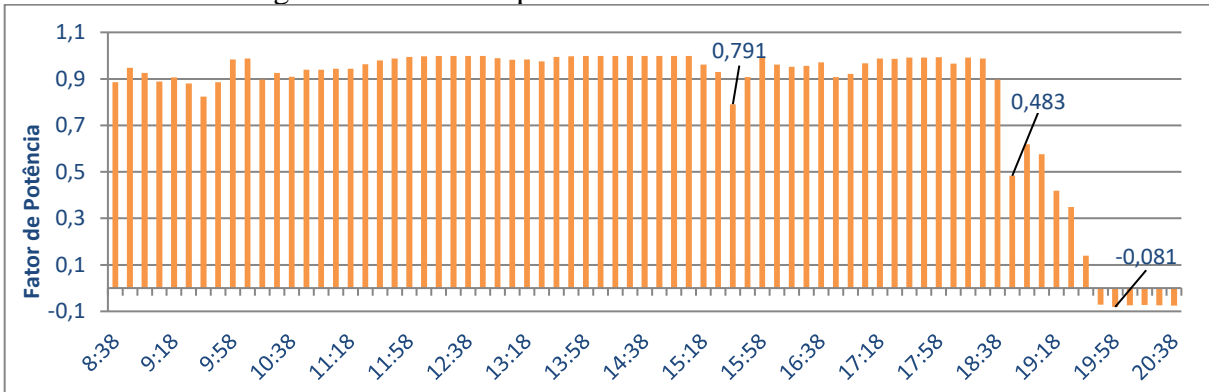
Figura 15 – Potência ativa do dia 04/03/2019



Fonte: Elaborado pela autora.

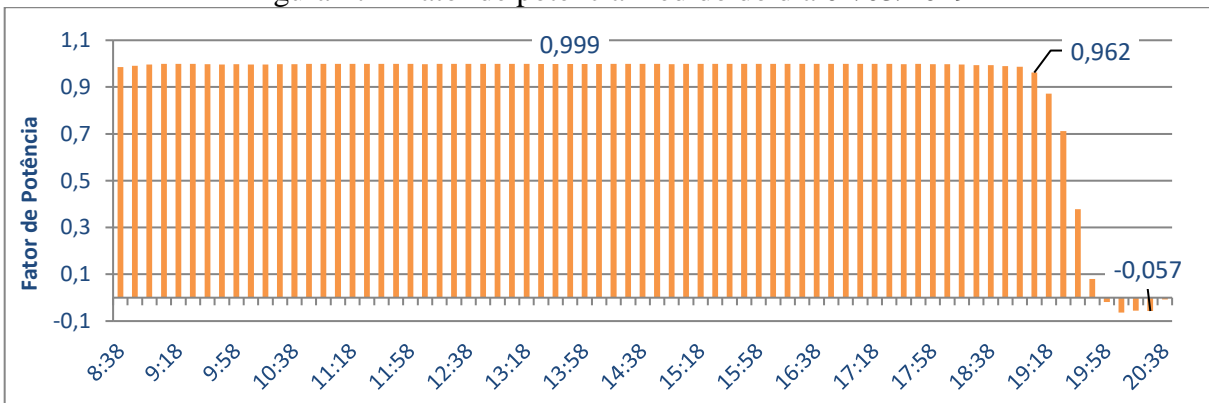
Diante disso, estes dias foram escolhidos para verificação do fator de potência. Seguem gráficos de FP de ambos os dias: 16 de fevereiro (Figura 16) e 04 de março (Figura 17).

Figura 16 – Fator de potência medido do dia 16/02/2019



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Fator de potência medido do dia 04/03/2019

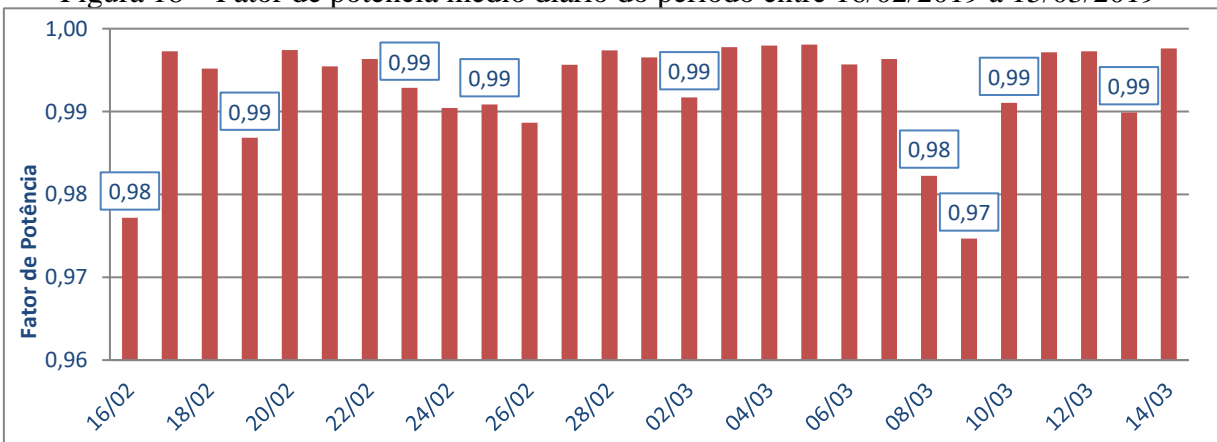


Fonte: Elaborado pela autora.

O fator de potência do dia com maior geração se manteve praticamente constante e acima de 0,90, porém, em ambos os dias, no início da noite, o fator de potência caiu drasticamente e, inclusive, apresentou aspecto negativo (capacitivo).

O fator de potência médio diário considerando-se os dias completos no intervalo de coleta dos dados (28 dias) na saída do inversor 2 está apresentado na Figura 18, onde é possível perceber que o fator de potência permaneceu acima de 0,96 durante todos os dias.

Figura 18 – Fator de potência médio diário do período entre 16/02/2019 a 15/03/2019

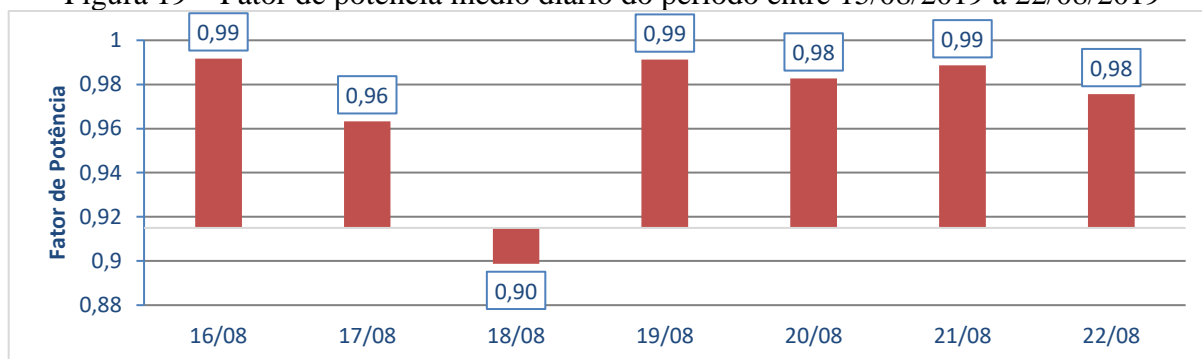


Fonte: Elaborado pela autora.

Diferentemente da coleta de dados do inversor 2, a coleta do inversor 5 compreendeu apenas 8 dias. Na Figura 19, o gráfico mostra o fator de potência médio diário deste período,

considerando apenas os dias completos coletados (período de geração), percebe-se que o fator de potência só esteve abaixo de 0,92 no dia 18 de agosto.

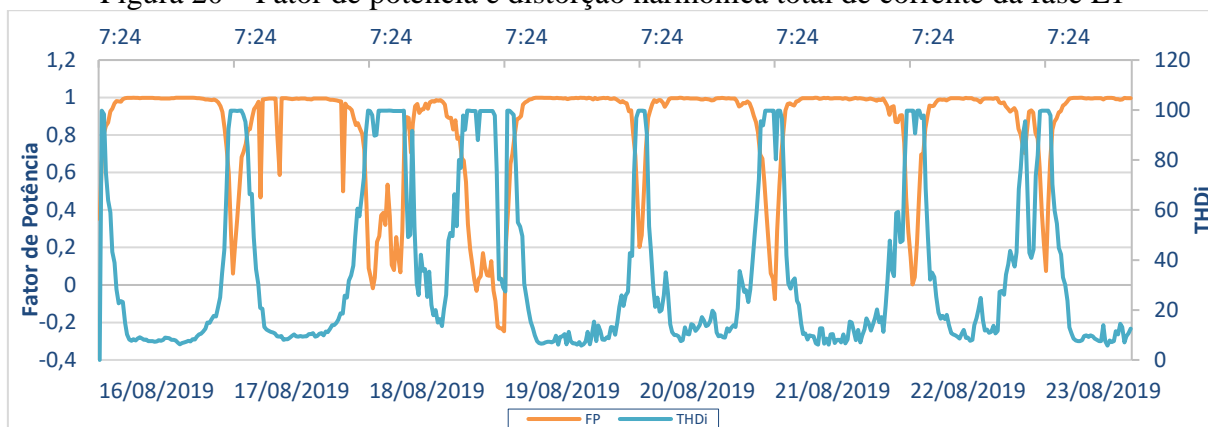
Figura 19 – Fator de potência médio diário do período entre 15/08/2019 a 22/08/2019



Fonte: Elaborado pela autora.

Como dito anteriormente, o Fator de Potência tem relação com o conteúdo de harmônicas e pode ser alterado pelo surgimento de distorções. No gráfico abaixo (Figura 20), é possível perceber que ao longo do dia o Fator de Potência se mantém alto, enquanto que o THDi se mantém baixo, demonstrando a relação destes dois indicadores de qualidade de energia com o período de geração do sistema. Ambos indicadores, FP e THDi se referem à fase L1.

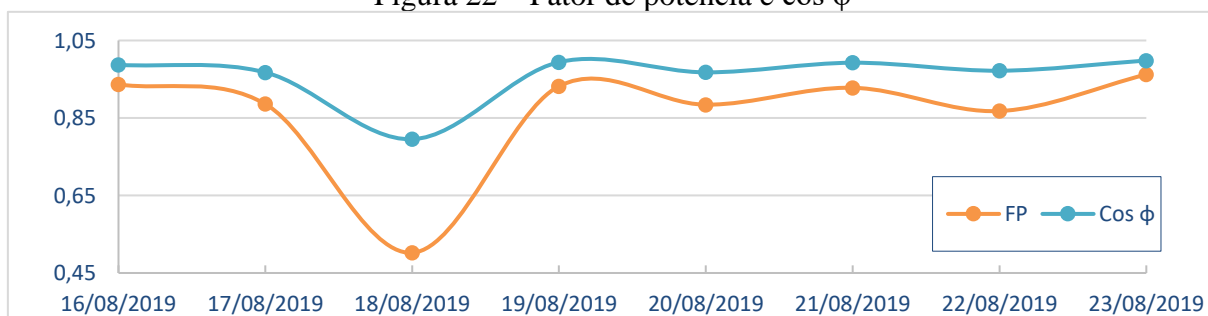
Figura 20 – Fator de potência e distorção harmônica total de corrente da fase L1



Fonte: Elaborado pela autora.

O analisador também calcula o valor de $\cos \phi$, através da relação entre potência ativa e aparente, nesta última desconsiderando a potência de distorção. O cálculo do FP no entanto, utiliza a potência aparente global. No gráfico abaixo (Figura 22), é possível ver que estes valores são bem distintos ao longo do tempo, provando a relação entre FP e harmônicas.

Figura 22 – Fator de potência e $\cos \phi$

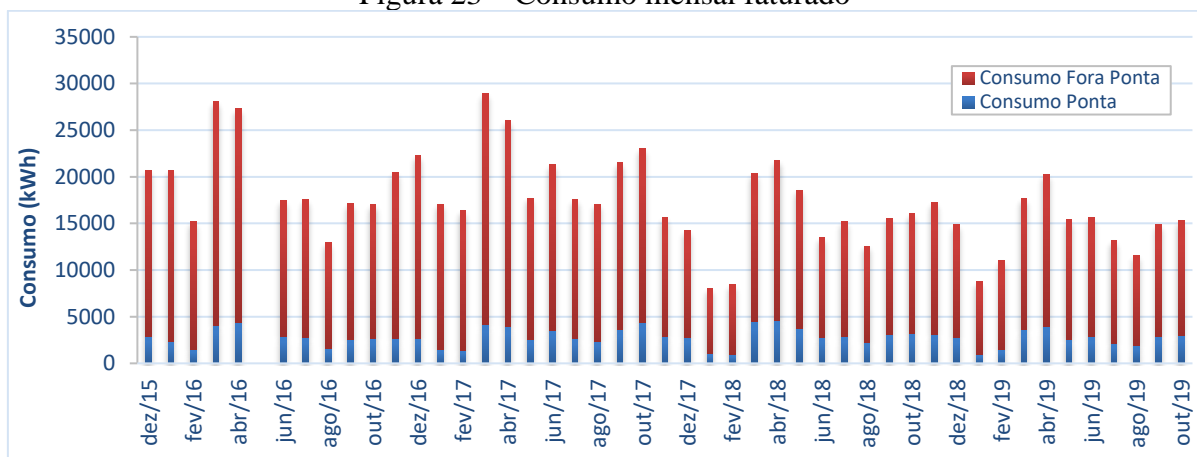


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 ANÁLISE DE FATURAS DE ENERGIA

O IFSC Criciúma possui demanda contratada de 140 kW por mês no regime tarifário horo-sazonal verde, ou seja, possui uma tarifa única para a demanda contratada e tarifas de consumo diferentes entre horário de ponta e fora de ponta (ANEEL: RN 479, 2012). No caso da Celesc, o horário de ponta é das 18h30min às 21h30min em dias úteis. Na Figura 23, é possível conferir o consumo mensal faturado referente à medição de cada mês, tanto no horário de ponta quanto no horário fora ponta.

Figura 23 – Consumo mensal faturado

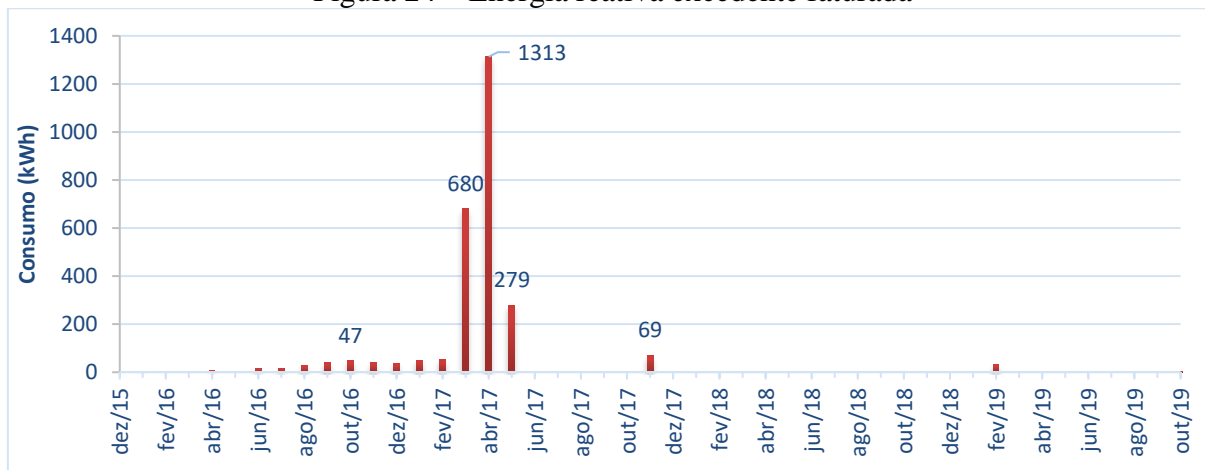


Fonte: Elaborado pela autora.

O perfil de consumo da unidade está diretamente ligado ao ano letivo. Nas faturas de janeiro, o consumo fica abaixo da média anual, por conta das férias escolares, já nas faturas de março o consumo aumenta com o início das aulas. Percebe-se que a energia fornecida pela concessionária diminuiu desde o início da operação do sistema (novembro de 2017), isso acontece porque parte da energia gerada pelo sistema é consumida na instalação antes de ser injetada na rede.

No gráfico (Figura 24), é possível verificar que a energia reativa da unidade se mantém sempre baixa (com exceção dos picos nos meses de abril, maio e junho de 2017). O sistema de geração distribuída foi interligado na rede no mês de novembro de 2017 e a energia reativa a partir de dezembro de 2017 manteve-se dentro do esperado.

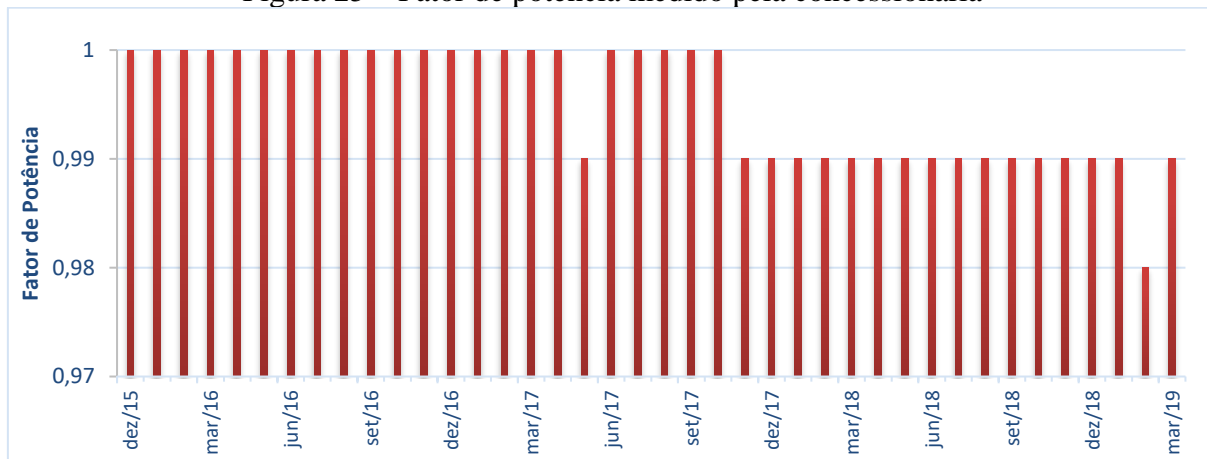
Figura 24 – Energia reativa excedente faturada



Fonte: Elaborado pela autora.

O descumprimento do fator de potência mínimo de 0,92 é cobrado nas faturas através da medição de energia reativa excedente (kWh). Segue gráfico do fator de potência de cada mês informado nas faturas (Figura 25). Nota-se que o FP se manteve sempre acima de 0,97, não gerando multas para a unidade desde dezembro de 2015:

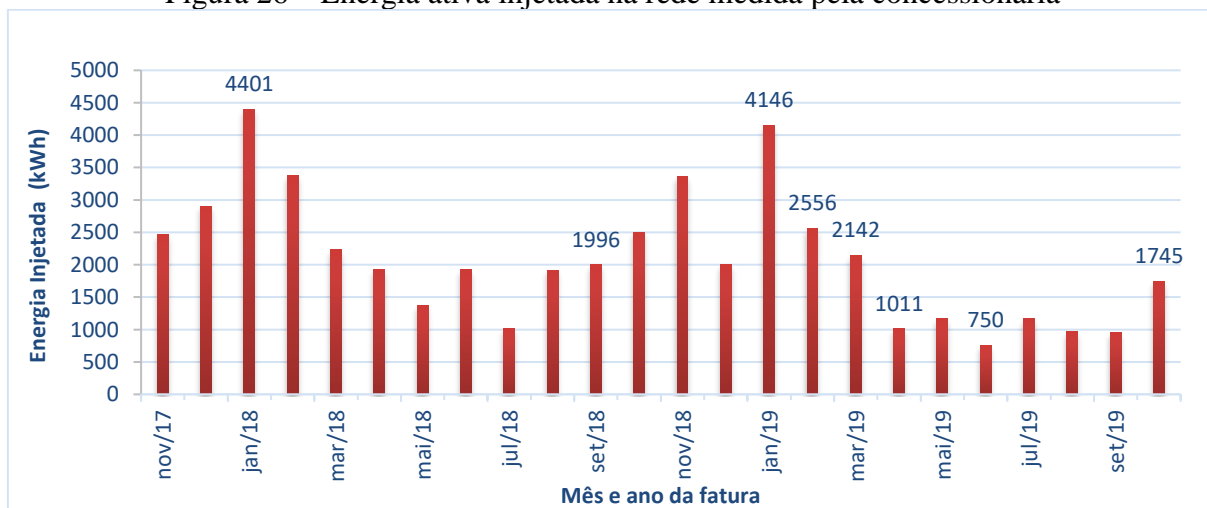
Figura 25 – Fator de potência medido pela concessionária



Fonte: Elaborado pela autora.

Através das faturas também foi possível verificar o potencial de economia que o sistema de microgeração trouxe à unidade consumidora. O valor total médio das faturas desde dezembro de 2015 até a instalação do sistema é 1.593,36 reais mais caro que o valor médio das faturas até o presente momento. No gráfico a seguir estão plotados os valores de energia injetada na rede de distribuição, medidos pela concessionária, desde o início do sistema. Na Figura 26 é possível perceber que os maiores picos acontecem em Janeiro, mês com alta irradiância solar e baixo consumo de energia devido ao recesso escolar.

Figura 26 – Energia ativa injetada na rede medida pela concessionária



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados apresentados, é possível concluir que o fator de potência e outros parâmetros de qualidade de energia devem ser monitorados. No estudo de caso, percebeu-se que o fator de potência está diretamente relacionado com a eficiência do SFCR,

uma vez que, em dias com maior irradiância e, por consequência, maior geração de energia, o fator de potência mantém-se mais alto do que em dias com menor geração.

É importante lembrar que o fator de potência da instituição e todos os demais parâmetros de rede também tem influência sobre o SFCR e por vezes, o SFCR pode estar sofrendo alterações vindas da rede que têm grande influência na qualidade de energia global.

Este estudo mostra que a análise de qualidade de energia em sistemas fotovoltaicos é relevante, principalmente em grandes consumidores. Nas indústrias, por exemplo, que são passíveis de cobrança por descumprimento do fator de potência mínimo e somando-se a problemática dos motores de indução que consomem excedente reativo da rede, recomenda-se a constante análise de qualidade de energia. Caso o consumidor considere a implantação de um sistema fotovoltaico é indicado verificar a necessidade de atualizações nos métodos de correção de fator potência.

Além do mais, através da presença de harmônicas nesta análise, foi possível perceber a influência das distorções no fator de potência, demonstrando que uma análise de qualidade de energia deve ser completa e com maior número de indicadores possíveis. A presença de potência de distorção nas análises deste trabalho foi de suma importância para assimilação do conceito mais abrangente de fator de potência.

Nas análises de distorções harmônicas também conclui-se que o conteúdo harmônico é maior no início da manhã e no final de tarde, de qualquer forma, não tem grande influência sobre a qualidade da instituição, pois ocorre quando a potência de geração é baixa ou nula.

A análise das faturas demonstrou que o sistema não ocasionou mudanças no fator de potência geral da instituição de ensino e ainda auxiliou na redução do consumo de energia fornecida pela rede, apresentando vantagens econômicas notórias. O SFCR do IFSC de Criciúma também é utilizado em diversos estudos na academia, excedendo as vantagens econômicas.

Como indicação de trabalhos futuros tem-se a análise do fator de potência também no período de geração nula do sistema (noite) para verificar como o inversor regula o fator de potência nestes casos. Além disso, é possível verificar o comportamento dos indicadores de qualidade de energia em cada fase, a fim de apurar possível desequilíbrio entre fases.

REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia (Org.). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. 2017. Brasília. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia (Org.). **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2018.

BRASIL. **Decreto Lei nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.. . Brasília, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia (Org.). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. 2017. Brasília. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia (Org.). **Balço Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2018.

BRASIL. **Decreto Lei nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.. . Brasília, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.. . Brasília, 2012

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.. . Brasília, 2015

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.. . Brasília, 2010

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel. Ministério de Minas e Energia. **Quantidade Anual de Conexão de Geração Distribuída**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/38AW8y5>>. Acesso em: 10 nov. 2019.

FORTES, Rárisson Roberto Acácio. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: Editora UFSC, 2004. 114 p.

OLIVATI, Clarissa de Almeida; ONMORI, Roberto Koji; DIRANI, Ely Antônio Tadeu; FARIA, Roberto Mendonça. Efeito fotovoltaico e fotocondutividade em dispositivos poliméricos. **Anais..** São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2000.

BRUSCHI, Diogo Lino. **Desenvolvimento de células solares em silício tipo n com emissor formado com boro**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ZAIDI, Beddiaf. Introductory Chapter: Introduction to Photovoltaic Effect. **Solar Panels And Photovoltaic Materials**, [s.l.], v. 1, p.1-7, 11 jul. 2018. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74389>.

TOLMASQUIN, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

BÜHLER, Alexandre José. **Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos a Partir de Ensaios de Curvas Características sem Iluminação**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; GOMES, Julio César Quintão. Deployment Project of Photovoltaic Systems in Degraded Areas and Environmentally Recovered. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.291-305, 2013. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/recen.2013.02.08>.

BERNARDON, Daniel Pinheiro et al. **Sistemas de Distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes: uma abordagem para reconfiguração de redes**. Santa Maria: Agepoc, 2015. 163 p.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em 30 de set. de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Brasília, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16149: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. Brasília, 2013. 12 p.

PADILLA, Julian Villela. Aula Prática: Qualidade de energia elétrica. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p.92-105, mar. 2008.

SILVA, Luiz Carlos Evangelista da. **Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa**. 2008. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/232-dissertacao_luiz_evangelista.pdf>. Acesso em 10 de abr. de 2019.

PHIPPS, J.k.; NELSON, J.p.; SEN, P.k.. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. **Ieee Transactions On Industry Applications**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.476-484, 1994. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/28.287506>.

GARCIA, Flávio Resende. **Harmônicos em sistemas elétricos de potência**. 2008. Disponível em: <http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosepCap.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

AMARAL, Talles. **Qualidade de energia: Correção de fator de potência e harmônicas em instalações elétricas**. 2015. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/3d3c203bebb641bf9118e25555eed056/Artigo_Talles.pdf>. Acesso em: 16 out. 2019.

NISKIER, J.; MACINTYRE, A. J.. **Instalações Elétricas**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 550 p.

NUNES, Renato Vinhal. **Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP**. 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Distorção harmônica: Causas, efeitos, soluções e normas. In: DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. Campinas: Unicamp, 2017. p. 49.

BRASIL. **Decreto Lei nº 479, de 20 de março de 1992**. Altera a redação do art. 7º do Decreto nº 62.724, de 17 de maio de 1968.. Brasília, 1992.

SILVA, Mariana Simões Noel da. **Correção de fator de potência através de inversores multifuncionais em sistemas fotovoltaicos**. 2017. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 792 p.

ALEXADER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O.. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.