

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
CÂMPUS DE ERECHIM  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RICARDO GABRIEL TOMAZ PEREIRA**

**ESTUDO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INDÚSTRIAS COM GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA**

**ERECHIM – RS**

**2022**

**RICARDO GABRIEL TOMAZ PEREIRA**

**ESTUDO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INDÚSTRIAS COM GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

**Orientador:** Prof. Esp. Fernando Luís Tartati Peres

**ERECHIM - RS**

**2022**


**RICARDO GABRIEL TOMAZ PEREIRA**

**ESTUDO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INDÚSTRIAS COM GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Elétrica como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica,  
Departamento de Engenharias e Ciência da  
Computação da Universidade Regional  
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –  
Câmpus de Erechim.

Erechim, 08 de dezembro de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Esp. Fernando Luis Tartati Peres (Orientador)  
URI Erechim

*Cássio Luciano Baratieri*  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)  
URI Erechim

*Sérgio Bordignon*  
\_\_\_\_\_  
Prof.: Me Sérgio Bordignon (Examinador)  
URI Erechim

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado capacidade e força para desenvolver esse trabalho diante das dificuldades. Agradeço também as três pessoas mais importantes da minha vida, minha mãe, Graziela C. Tomaz, minha esposa Nadine K. Domingues, e principalmente minha filha, Heloísa Pereira pelo apoio e compreensão nesse período, tenho certeza de que sem vocês nada disso seria possível.

Sou grato a Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões e ao corpo docente que fizeram parte da minha formação, principalmente ao meu orientador Prof. Esp. Fernando Luís Tartati Peres que me ajudou a desenvolver e melhorar o presente trabalho.

Aos meus grandes amigos e colegas que conheci durante o curso de graduação pelo apoio e amizade durante todos estes anos e que fizeram parte da minha história. Desse modo, desejo manifestar meu reconhecimento mais sincero a todas as pessoas que colocaram à minha disposição seus conhecimentos, auxílio, sugestões e críticas.

*Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo pensamento que tínhamos quando os criamos.*

(Albert Einstein)

## RESUMO

O trabalho tem o intuito de analisar o fator de potência de uma indústria com geração fotovoltaica, apontando as causas e consequências de um baixo fator de potência à instalação elétrica da unidade consumidora e da concessionária de energia. Tendo em vista, o crescimento exponencial de sistemas fotovoltaicos em ambientes industriais, e as características típicas presentes nesses ambientes, sendo em sua maioria compostas por equipamentos dotados de bobinas, os quais necessitam de potências ativa e reativa para seu funcionamento, procurou-se através do presente trabalho apontar a relação entre um baixo fator de potência e a inserção de um sistema fotovoltaico como uma das fontes de geração de energia elétrica da unidade consumidora. Visto isso, foi realizado um estudo de campo em uma indústria com geração fotovoltaica com a perspectiva de alcançar, através de análises feitas com o auxílio de um analisador de energia da empresa EMBRASUL, RE6000, os resultados esperados afim de comprovar a hipótese proposta, e após a análise dos devidos resultados foi realizado a montagem de uma bancada de estudo para comparação dos resultados obtidos em campo com os resultados obtidos em um ambiente em escala reduzida produzido em laboratório. Por fim, afirma-se que a inserção de um sistema fotovoltaico em um ambiente industrial é de importante valia, mas, no entanto, conclui-se que o impacto negativo no fator de potência deve ser corrigido afim de mitigar os problemas oriundos de um baixo fator de potência.

**Palavras-chave:** Analisador de energia. Fator de potência. Geração Fotovoltaica.

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to analyze the power factor of an industry with photovoltaic generation, pointing out the causes and consequences of a low power factor for the electrical installation of the consumer unit and the energy concessionaire. In view of the exponential growth of photovoltaic systems in industrial environments, and the typical characteristics present in these environments, which are mostly composed of equipment equipped with coils, which were active and reactive power for their operation, worked through the present work point out the relationship between a low power factor and the insertion of a photovoltaic system as one of the sources of electricity generation in the consumer unit. In view of this, a field study was carried out in an industry with photovoltaic generation with the perspective of achieving, through analyzes carried out with the aid of an energy analyzer from the company EMBRASUL, RE6000, the expected results in order to verify the proposed hypothesis, and after analyzing the appropriate results, a study bench was set up to compare the results obtained in the field with the results obtained in a reduced-scale environment produced in the laboratory. Finally, it is stated that the insertion of a photovoltaic system in an industrial environment is of great value, however, it is concluded that the negative impact on the power factor must be corrected in order to mitigate the problems originated from a low power factor.

**Keywords:** Energy analyzer. Power factor. Photovoltaic Generation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Carga consumindo potência ativa (W).....	17
Figura 2 - Triângulo das potências aparente, ativa e reativa .....	20
Figura 3 - Variação da seção de um condutor em função do fator de potência.....	27
Figura 4 - Proteção desconectando o gerador e as cargas .....	30
Figura 5 – Proteção desconectando apenas o gerador .....	30
Figura 6 - Conexão à rede através de um inversor .....	31
Figura 7 - Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência nominal acima de 6kW. ....	33
Figura 8 - Diagrama de ligação do modelo Re6000/N .....	37
Figura 9 - Sistema fotovoltaico, e inversor solar.....	39
Figura 10 - Conexões da bancada de estudo.....	39
Figura 11 - Conjunto de módulos fotovoltaicos .....	41
Figura 12 - Inversor solar, e sistema de proteção .....	41
Figura 13 - Bancada de estudo .....	42
Figura 14 - Diagrama de força, controle e sinalização.....	43
Figura 15 - Conexão do transformador com o quadro geral.....	44
Figura 16 - Potência ativa trifásica para o período do dia 17/05/2022 até 23/05/2022 .....	45
Figura 17 - Potência ativa para o período do dia 23/05/2022 e 24/05/2022.....	46
Figura 18 - Fator de potência para o período do dia 23/05/2022 e 24/05/2022 .....	47
Figura 19 - Potência reativa para o período do dia 23/05/2022 e 24/05/2022.....	48
Figura 20 - Potência ativa procedimento 2 .....	52
Figura 21 - Fator de potência da bancada de estudo.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação da potência do transformador em função do fator de potência.....	26
Tabela 2 - Potências, fator de potência, e kVAr necessário para fator de potência 0,98 .....	48
Tabela 3 - Potências, fator de potência, e kVAr necessário para fator de potência 0,98 capacitivo.....	50
Tabela 4– Dimensionamento do banco automático de capacitores .....	51

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
NBR	Norma Brasileira
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
RGE	Rio Grande Energia
REN	Resolução Normativa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	13
1.2.2 Objetivos específicos .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Energia solar fotovoltaica</b> .....	<b>14</b>
2.1.1 Sistema fotovoltaico <i>Off-Grid</i> .....	14
2.1.2 Sistema fotovoltaico <i>On-Grid</i> .....	15
<b>2.2 Potências e fator de potência</b> .....	<b>16</b>
2.2.1 Potência ativa.....	16
2.2.2 Potência reativa.....	17
2.2.3 Potência aparente .....	19
2.2.4 Fator de potência.....	20
<b>2.3 Causas e consequências de um baixo fator de potência</b> .....	<b>21</b>
2.3.1 Causas de um baixo fator de potência .....	22
2.3.2 Consequências do baixo fator de potência.....	25
<b>2.4 Resoluções e Normas</b> .....	<b>27</b>
2.4.1 Classificação da Micro e Minigeração Distribuída.....	28
2.4.2 Conexão à rede de distribuição .....	29
2.4.3 Conexão à rede de distribuição sem o uso de inversores.....	29
2.4.4 Conexão à rede de distribuição com o uso de inversores .....	30
2.4.5 Reativo excedente e fator de potência .....	31
2.4.6 Fator de potência da GD .....	32
<b>2.5 Trabalhos similares</b> .....	<b>33</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1 Procedimento 1</b> .....	<b>36</b>
3.1.1 Analisador de energia RE6000 .....	37
<b>3.2 Procedimento 2</b> .....	<b>38</b>
3.2.1 Módulo 1.....	39
3.2.2 Módulo 2.....	41
3.2.2.1 Motores de indução trifásicos.....	42
3.2.2.2 Freio de Foucault.....	43
3.2.2.3 Transformador e circuitos existentes.....	44
<b>4 DISCUSSÕES E RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS</b> .....	<b>58</b>
<b>APÊNDICE B – QGBT PROCEDIMENTOS 1 E 2</b> .....	<b>59</b>
<b>ANEXO A – DATASHEET MÓDULO FOTOVOLTAICO DAH SOLAR</b> .....	<b>60</b>
<b>ANEXO B – DATASHEET INVERSOR SOLAR SOFAR SOLAR</b> .....	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A geração fotovoltaica tem se mostrado um importante aliada para suprir a demanda de energia elétrica, tendo em vista o crescimento descontrolado do consumo de energia no mundo como um todo. No Brasil as características territoriais e climáticas favorecem muito a implementação desses sistemas, sendo notável um crescimento exponencial nesse setor, inclusive em indústrias e comércios. Segundo Gasparin (2022), “Já o Brasil, até dezembro de 2020, possuía 2,989 GW de potência instalada em geração centralizada e 4,254 GW de potência instalada em geração distribuída em energia solar fotovoltaica.”

No entanto, a geração fotovoltaica além agregar vantagens e benefícios ao consumidor e a concessionária de energia elétrica, promovem impactos negativos ao sistema elétrico, sendo o fator de potência das unidades consumidoras o mais impactado, principalmente em ambientes industriais, se fazendo necessário algumas análises e medidas para evitar alguns problemas e melhorar a eficiência energética do nosso sistema elétrico de potência.

Visto isso, através desse estudo pretende-se analisar mais especificadamente o fator de potência de indústrias com geração fotovoltaica, tendo em vista que ao inserir um sistema fotovoltaico a indústria tende a estar sujeita a encargos por consumo excessivo de reativos, além de outros problemas atrelados ao baixo fator de potência. Por tanto, sabendo que a geração fotovoltaica é um tema razoavelmente recente e o estudo dos impactos desses sistemas nas indústrias não são muito aprofundados, se faz justificada a importância do respectivo estudo.

Portanto, com esse trabalho pretende-se apontar as principais causas e consequências de um baixo fator de potência, e as relacionar com a presença de um sistema fotovoltaico, principalmente em ambientes industriais que são predominantemente compostos por equipamentos que necessitam de potência ativa e reativa para seu funcionamento.

Com isso, a metodologia utilizada no estudo baseia-se em três etapas, sendo a primeira etapa um levantamento de informações através de uma pesquisa por artigos científicos, revistas e monografias que tratam do assunto em debate, procurando fundamentação teórica para comprovação da existência do impacto negativo no fator de potência em indústrias com geração fotovoltaica.

A segunda etapa diz respeito a um estudo de campo realizado em uma indústria atendida em média tensão, onde as análises foram realizadas com auxílio de um analisador de energia, modelo RE6000 fabricado pela empresa EMBRASUL, a qual possui um sistema fotovoltaico de 136 kWp, conectado à rede de distribuição através de 3 inversores HUAWEI/WEG, com potência nominal de 110 kWp e um alto consumo de potências ativa e reativa.

Por fim, a terceira etapa remete a montagem de uma bancada de estudo, a qual simula em escala reduzida um ambiente industrial com geração fotovoltaica, a fim de comparar as informações adquiridas na pesquisa bibliográfica, os resultados obtidos no estudo de campo e os resultados obtidos em laboratório.

## **1.1 Justificativa**

Tendo em vista a viabilidade econômica de instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição para os consumidores, e a crescente ascensão da modalidade de geração distribuída no setor industrial, se torna de grande legitimidade o estudo do fator de potência em indústrias com geração fotovoltaica, tendo em vista os inúmeros problemas advindos de um baixo fator de potência, tanto para o consumidor final, como para a concessionária de energia elétrica.

Ademais, com aumento desordenados do consumo de energia elétrica no mundo como um todo, se torna justificado qualquer estudo de melhoria da eficiência energética das unidades consumidoras.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O trabalho tem por objetivo apresentar um estudo do fator de potência em indústrias com geração fotovoltaica, sendo realizado dois procedimentos distintos com o intuito de comparar os resultados, sendo esse estudo realizado em campo e em laboratório.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, apresentam-se:

- Pesquisar por assuntos relacionados a geração fotovoltaica;
- Identificar as causas e consequências de um baixo fator de potência;
- Construir uma bancada de estudo;
- Comparar os resultados em ambos os procedimentos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conhecimentos necessários para o entendimento do funcionamento de um sistema fotovoltaico, e dos princípios básicos de funcionamento de alguns dos equipamentos mais utilizados nas indústrias, relacionando a interferência que um sistema fotovoltaico tem em um ambiente industrial referente ao baixo fator de potência.

### 2.1 Energia solar fotovoltaica

O fenômeno de transformar a energia presente na radiação luminosa do sol em energia elétrica é conhecido como efeito fotovoltaico, descoberto através de estudos em materiais semicondutores, ainda no século XIX, esse efeito é o responsável pelo funcionamento das células solares presentes nos sistemas de geração fotovoltaica. O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel, “que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz.” (CÂMARA, 2011, p. 14).

Segundo Barros (2013), o efeito fotovoltaico ocorre quando a luz solar é absorvida, por meio de seus fótons, pela célula fotovoltaica. A energia dos fótons de luz é transferida para os elétrons, que então ganham a capacidade de se mover. O movimento dos elétrons, por sua vez, cria uma corrente elétrica.

O sistema fotovoltaico tem a capacidade de transformar a radiação solar diretamente em corrente elétrica, que por meio de dispositivos controladores e conversores, pode ser armazenada em baterias, consumida instantaneamente, ou ainda conectada diretamente a rede de distribuição. Um sistema fotovoltaico apresenta algumas classificações, sendo os sistemas fotovoltaicos *Off-Grid* e *On-Grid* de maior notoriedade.

#### 2.1.1 Sistema fotovoltaico *Off-Grid*

Os sistemas fotovoltaicos *Off-Grid* podem ser chamados de sistemas isolados, autônomos e híbridos, ou autossuficientes. São sistemas frequentemente usados em locais onde a rede de energia elétrica ainda não foi instalada por inviabilidade financeira ou difícil acesso. De acordo com Alves (2019) mais de 800 milhões de pessoas no mundo não utilizam energia

elétrica. Isso mostra a importância e a necessidade de que toda a população mundial tenha acesso a qualidade de vida.

Tendo em vista que sistemas *Off-Grids* necessitam de um dispositivo para armazenamento de energia, podendo ter a energia elétrica armazenada em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria, a fim de evitar danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda (CÂMARA, 2011). Essa característica proporciona inúmeras aplicações, como acesso remoto a monitoramento, sistemas de sinalização, acesso a recursos básicos em comunidades isoladas ou rurais ainda não atendidas por redes de distribuição de energia elétrica, além de substituir sistemas de energia tradicionais que usam combustíveis fósseis prejudiciais ao meio ambiente. Segundo Alves (2019) a existência de localidades não subsidiadas por energia elétrica se dá porque:

O principal motivo dessa dificuldade está relacionado aos altos custos de distribuição e transmissão, como também à baixa demanda dessas localidades se comparadas aos grandes centros de consumo, uma vez que é necessária uma extensa rede de transmissão em alta tensão para o atendimento desses consumidores. E, portanto, torna-se inviável para as concessionárias de energia por razões econômicas e técnicas. (ALVES, 2019, p. 40).

### 2.1.2 Sistema fotovoltaico *On-Grid*

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) podem ser de grande porte, as chamadas centrais fotovoltaicas ou de pequeno porte, que são as descentralizadas e instaladas em edificações urbanas (CÂMARA, 2011). Uma grande central fotovoltaica produz e fornece uma grande quantidade potência à rede elétrica instantaneamente, por meio de inversores e transformadores, entre tanto, por necessitar de uma grande área para instalação da central fotovoltaica, geralmente, encontram-se afastadas das áreas de maior consumo, se fazendo necessário transportar a energia gerada, resultando em perdas e investimentos financeiros. Já as pequenas centrais encontram-se geralmente em residências e em pequenos comércios, sendo instaladas diretamente nas edificações e assim reduzindo ao máximo as perdas (CÂMARA 2011).

Os sistemas fotovoltaicos *On-Grid*, ou seja, conectados à rede, fornecem toda a energia gerada de forma instantânea para a rede de distribuição que trabalha como se fosse uma carga absorvendo essa energia e distribuindo-a novamente entre seus consumidores conforme a necessidade. Segundo Freitas et al. (2022, p. 176) “nestes sistemas à rede da distribuidora funciona como uma espécie de “bateria” que recebe a energia excedente gerada pelo sistema e a redistribui nos momentos de maior demanda”. Complementa-se que os sistemas de energia

solar *On-Grid* são sistemas conectados à rede de distribuição de energia elétrica que, além de abastecer a própria demanda, são capazes de fornecer à rede elétrica energia, que pode ser utilizada por qualquer consumidor da rede (ALVES, 2019).

Tendo em vista, que no Brasil a maioria das empresas tem o horário de funcionamento proporcional à maior produção dos sistemas fotovoltaicos, podendo assim contribuir para a capacidade máxima de uma rede quando o pico de demanda ocorre no período diurno.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição apresentam algumas vantagens, tanto ao consumidor, como para a concessionária de energia elétrica. Para o consumidor a economia nos gastos com energia elétrica pode chegar a 95%. Para a concessionária, considera-se a diminuição das perdas, junto com o aporte a demanda de energia a principal vantagem.

## **2.2 Potências e fator de potência**

Segundo Boylestad (2011), o termo potência é aplicado para fornecer uma indicação da quantidade de trabalho (conversão de energia) que pode ser realizado em um determinado período, isto é, a potência é a velocidade com que um trabalho é executado.

A maioria das cargas presentes nas unidades consumidoras, residências, comércios e indústrias, consome além da energia ativa a energia reativa indutiva, a qual é a energia necessária utilizada pela maioria dos equipamentos presentes nas unidades consumidoras. Entre esses equipamentos estão os motores, transformadores, reatores para lâmpadas de descargas, fornos de indução, entre outros. Esses equipamentos indutivos necessitam de campo eletromagnético para seu funcionamento, prontamente requerem dois tipos de potência: a potência reativa e potência ativa, denominada, segundo Hart (2012) como potência real ou média, principalmente em circuitos de corrente alternada (CA).

Nesses equipamentos é comum algumas formas de especificações nas plaquinhas de identificação, a quais dizem respeito as características elétricas e mecânicas do equipamento e entre essas especificações está a potência do equipamento. Dependendo do equipamento utilizado, pode-se encontrar essa potência discriminada em potência ativa, reativa e aparente.

### **2.2.1 Potência ativa**

Segundo Nilsson e Riedel (2016), a potência ativa descreve a potência que é convertida de uma forma elétrica para uma não elétrica, sendo a média das potências instantâneas durante

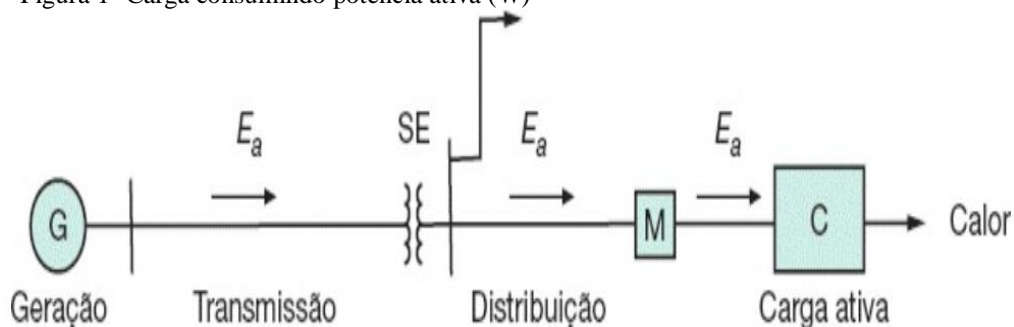
um período. Por tanto, a potência ativa é a potência que efetivamente realiza trabalho nos aparelhos, em outras palavras é a grandeza elétrica que é transformada em energia luminosa, térmica ou cinética. Pode ainda ser entendida como a responsável em transformar energia elétrica em uma força mecânica, no eixo dos motores por exemplo. Assim a potência ativa, é a potência que realmente é consumida. Ademais, para Cotrim (2008):

Energia ativa, medida em kWh, transformada em energia mecânica, em calor ou em outra modalidade. A relação entre a energia ativa consumida em um intervalo de tempo e esse próprio período é definida como a demanda média, ou simplesmente a demanda de energia ativa, ou, ainda, a potência ativa desse intervalo (medida em kW). A potência ativa ou demanda costuma ser representada pela letra P. (COTRIM, 2008, p. 420).

Pode-se ainda desenvolver melhor entendimento sobre a potência ativa quando analisada em circuitos puramente resistivos, assim a tensão e corrente senoidal estarão em fase, ou seja, o ângulo de fase da tensão e o ângulo de fase da corrente senoidal são iguais, logo em um circuito puramente resistivo típico toda a energia elétrica é dissipada sob a forma de energia térmica.

Segundo Cotrim (2008), a parcela de potência ativa é sempre fornecida da fonte para a carga, e absorvida por esta. A Figura 1 apresenta a potência média, ou ativa, em Watts (W), em um circuito puramente resistivo, aonde apenas a potência média, ou ativa é necessária para produzir trabalho e a corrente elétrica e a tensão estão em fase, ou seja, as senoides da tensão e da corrente passam pelos pontos máximo, zero e mínimo simultaneamente.

Figura 1- Carga consumindo potência ativa (W)



Fonte: Mamede Filho (2002).

### 2.2.2 Potência reativa

De acordo com Cotrim (2008, p. 1) “a potência reativa, analogamente, a demanda de energia ativa, que é obtida pela relação entre a energia reativa e o período em que foi consumida, define a demanda de energia reativa, ou potência reativa média do intervalo, medida em kVAr”.

A potência reativa pode ser reativa indutiva, ou ainda reativa capacitiva dependendo da característica construtiva do equipamento. A potência reativa indutiva é consumida por

aparelhos normalmente dotados de bobinas, tais como motores de indução, reatores, transformadores etc., ou que operam com formação de arco elétrico, como os fornos a arco (MAMEDE FILHO, 2002).

Ainda segundo Mamede Filho (2002) em uma instalação industrial, os equipamentos são, em sua maioria, consumidores parciais de energia reativa indutiva, e não produzem nenhum trabalho útil. A energia reativa indutiva apenas é responsável pela formação do campo magnético dos referidos aparelhos.

Desse modo, a potência reativa é utilizada para a criação e manutenção dos campos eletromagnéticos das cargas indutivas, sendo assim, a potência reativa não produz efetivamente trabalho, no entanto, circula entre a fonte e carga ocupando espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais potência ativa e mais trabalho (MONTEIRO, 2009).

Nessas cargas indutivas, as formas de onda da tensão e corrente senoidais passam pelos pontos máximo, zero e mínimo em momentos distintos, devido no instante que “[...], a corrente alternada circula em uma bobina, provoca o chamado fenômeno da autoindução, ou seja, a bobina, ao ser energizada, induz tensão em si mesma. A tensão autoinduzida retarda a circulação da corrente elétrica.” (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2020, p. 32). Esse fenômeno denominado reatância indutiva ( $X_l$ ), constituído pela resistência à circulação da corrente, cuja unidade de medida é o ohm ( $\Omega$ ), está mostrada na equação 1.

$$X_l = \omega L \quad (1)$$

Tendo em vista, que  $\omega = 2\pi f$ , em que  $f$  é a frequência em hertz (Hz),  $\omega$  é a frequência angular em radianos por segundo (rad/s), e  $L$  é indutância da bobina ou condutor em henry (H).

Por outro lado, a potência reativa capacitiva pode ser gerada por motores síncronos superexcitados (compensadores síncronos) ou por capacitores. Neste caso, estas cargas apresentam fator de potência dito reativo capacitivo. De acordo com Nilsson e Riedel (2016, p. 420) “[...], os engenheiros eletricitas afirmam, usualmente, que indutores absorvem energia reativa, e capacitores fornecem energia reativa”.

Tendo isso em vista, é comum usar capacitores para compensar o consumo de reativos desses equipamentos, sendo os capacitores responsáveis por fornecer os reativos necessários.

Os capacitores, um dos responsáveis por fornecer energia reativa capacitiva, são “[...], componentes do circuito que acumulam eletricidade ao longo do tempo e impõem resistência à circulação da corrente alternada. Esse fenômeno recebe o nome de reatância capacitiva”

(BARROS; BORELLI; GEDRA, 2020, p. 32), cuja unidade de medida é o ohm ( $\Omega$ ), e está representada na equação 2.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

Tendo em vista, que  $\omega = 2\pi f$ , em que  $f$  é a frequência em hertz (Hz),  $\omega$  é a frequência angular em radianos por segundo (rad/s), e  $C$  é capacitância em Farad (F).

Portanto, não tem como evitar a potência reativa devido a necessidade de funcionamento de alguns equipamentos, principalmente em empresas de médio e grande porte, mas, pode-se e deve-se controlar seu uso tendo em vista que tanto a potência reativa indutiva como a potência reativa capacitiva são prejudiciais a indústria e ao sistema elétrico nacional, acarretando diversos problemas ao mesmo.

### 2.2.3 Potência aparente

“Em geral, a potência dos equipamentos é especificada em volts-ampères (VA) ou quilovolts ampères (kVA), não em watts. Conhecendo as especificações de potência, em volts-ampères, e de tensão de um equipamento, é fácil calcular a corrente *máxima* especificada” (BOYLESTD, 2011, p. 703).

Tendo em vista, circuitos com cargas indutivas ou capacitivas, a potência total do circuito, potência aparente, é a soma vetorial das potências ativa e reativa, por tanto, o valor da potência em volts-ampères de um equipamento será igual à potência em watts apenas quando o fator de potência ( $Fp$ ) for 1. Tal condição existe quando a impedância total de um sistema  $Z < \theta$  é tal que  $\theta = 0^\circ$ , ou seja, quando o circuito for puramente resistivo (BOYLESTD, 2011).

A potência aparente é a potência total gerada e transmitida a carga, e, portanto, é a potência base para dimensionamento de condutores e sistemas de proteção das instalações elétricas. A potência aparente é representada pela letra  $s$ , cuja sua unidade de medida é volts-ampères (VA) e expressa pela equação 3.

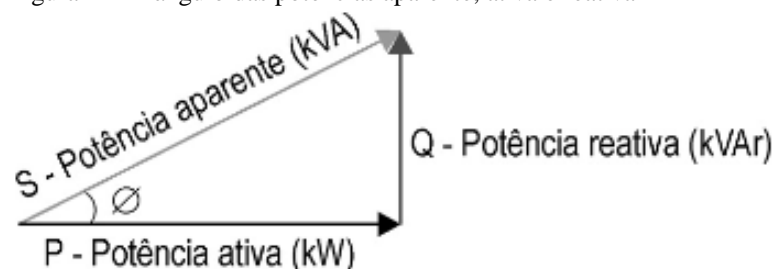
$$S = VI \quad (3)$$

Sendo  $V$  a tensão senoidal em volts (V) e  $I$  a corrente senoidal em ampères (A).

Ademais, a relação entre as potências aparente, ativa e reativa em um sistema pode ser ilustrada pela Figura 2, sendo o triângulo das potências, o qual utiliza a representação vetorial,

a forma geométrica que expressa que a potência aparente é a soma vetorial das potências ativa e reativa (CREDER, 2021).

Figura 2 - Triângulo das potências aparente, ativa e reativa



Fonte: Barros, Borelli e Gedra (2020)

Se um circuito contém elementos capacitivos e indutivos, o componente reativo do triângulo de potências é determinado pela diferença nas potências reativas dadas a esses elementos (BOYLESTAD, 2011).

#### 2.2.4 Fator de potência

O fator de potência pode ser conceituado como a razão entre a potência ativa e a potência aparente (BARROS, 2020). Do ponto de vista da eficiência energética, um alto fator de potência indica uma eficiência alta; ao contrário, um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética. A relação do fator de potência com as potências aparente e ativa estão ilustradas na equação 4.

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Marchi apud Monteiro (2009), reforça que

[...], fator de potência representa a fração da potência total fornecida que é convertida em potência útil. Desta maneira, o fator de potência é um índice de eficiência do uso do sistema ou instalação elétrica. Valores próximos a unidade simbolizam uso eficiente do sistema, enquanto valores próximos a zero demonstram mau aproveitamento deste. (MARCHI apud MONTEIRO, 2009, p. 35).

Portanto,

Quanto menos cargas reativas estiverem presentes na instalação, menor será o ângulo  $\varphi$ , [...]. Caso a potência reativa seja muito pequena, o ângulo  $\varphi$  tenderá a  $0^\circ$ . O cosseno de  $0^\circ$  é 1, portanto, quanto menos cargas reativas, mais próximo a 1 será o fator de potência. Considerando a situação contrária, em que é grande a concentração de cargas reativas na instalação, o ângulo  $\varphi$  aumenta, tendendo até um valor máximo de  $90^\circ$ , [...]. O cosseno de  $90^\circ$  é 0, portanto quanto mais cargas reativas estiverem presentes

na instalação, mais baixo será o fator de potência, podendo chegar até valores próximos de 0 (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2020, p. 33).

Pode-se ainda equacionar o fator de potência como o cosseno do ângulo formado pelas potências aparente e ativa da instalação, resultando na equação 5.

$$F_p = \cos\phi \quad (5)$$

Ademais, se o triângulo de potências da Figura 2 for analisado em relação ao fator de potência, interpreta-se que utilizando algumas identidades trigonométricas encontra-se a equação 6, que ao ser multiplicada pelo tempo, têm-se a energia, que é medida em kWh no caso da energia ativa e kVAh para a energia reativa, obtendo assim o fator de potência (BARROS, 2020) Na sequência as equações 6 e 7.

$$F_p = \frac{kW}{kVA} = \cos\phi = \cos\left(\arctg \frac{kVA_r}{kW}\right) \quad (6)$$

$$F_p = \frac{kW}{\sqrt{kWh^2 + kVA_r h^2}} \quad (7)$$

Segundo Mamede Filho (2002, p. 411), “O fator de potência, sendo a relação entre as duas quantidades representadas pela mesma unidade de potência, é um número adimensional”, compreendido entre zero e um. Ainda segundo Mamede Filho (2002, p. 412),

Para ondas perfeitamente senoidais, o fator de potência representa o cosseno do ângulo de defasagem entre a onda senoidal da tensão e a onda senoidal da corrente. Quando a onda de corrente está atrasada em relação à onda de tensão, o fator de potência é dito indutivo. Caso contrário, diz-se que o fator de potência é capacitivo. Quando as ondas da tensão e corrente passam pelo mesmo ponto ( $\psi = 0$ ), o fator de potência é unitário (MAMEDE FILHO, 2002, p. 412).

### 2.3 Causas e consequências de um baixo fator de potência

Tendo em vista o panorama industrial, aonde a maioria das cargas são não lineares, motores de diversos tipos e potências, máquinas de solda e máquinas específicas, sendo muitas dessas indústrias atendidas por transformadores, também de diversos tipos e potência, o baixo fator de potência parece ser algo inevitável na maioria dessas indústrias, se fazendo necessária algumas medidas para solucionar esse problema.

Segundo Marchi (2019, p. 38), “um baixo fator de potência decorre de uma potência ativa de pequena magnitude perante determinada potência aparente, [...], pode-se analogamente afirmar que um baixo fator de potência decorre de uma alta demanda de potência reativa perante uma pequena demanda de potência ativa. ”, assim se torna notável que as demandas de potência de um sistema são dependentes das características das cargas presentes nas instalações.

### 2.3.1 Causas de um baixo fator de potência

Conforme literatura, os principais fatores que resultam no baixo fator de potência são:

- a) **Motores de indução operando a vazio:** Os motores de indução demandam uma potência reativa, praticamente igual quando estão a vazio ou a plena carga, sendo essa potência reativa necessária aos campos eletromagnéticos das cargas indutivas. No entanto, a potência ativa é diretamente proporcional à carga mecânica aplicada ao eixo do motor, assim, quanto menor é a carga mecânica, menor é a demanda de potência ativa e menor é o fator de potência, sendo possível constatar que a energia ativa é quem realmente produz trabalho nos motores, logo o aumento da carga acarreta um grande aumento da potência ativa e um pequeno aumento na potência reativa, assim reduzindo o fator de potência. Ainda para Creder (2021, p. 235), “para motores operando com cargas abaixo de 50% de sua potência nominal, o fator de potência cai bruscamente. Nesses casos, deve-se verificar a possibilidade, por exemplo, de que se substituam os motores por outros de menor potência, com torque de partida mais elevado e mais eficiente. ”
- b) **Motores de indução operando superdimensionados:** Uma prática muito comum de ser vista na hora do dimensionamento de motores a determinadas aplicações, de maneira errada, é o superdimensionamento, ou seja, a determinação da potência de um motor muito maior do que a carga a ser atendida realmente necessita. Quando um motor está superdimensionado seu funcionamento é parecido com os motores operando a vazio. Com isso, um motor com potência nominal muito superior à carga mecânica acoplada demandará uma potência ativa pequena perante a demanda reativa, resultando em um baixo fator de potência.
- c) **Grande quantidade de motores de indução de pequeno porte:** Existem algumas aplicações industriais que fazem o uso de grande quantidade de motores de pequena potência, que muitas vezes parte inúmeras vezes no mesmo dia, por exemplo indústrias

têxteis. Esses motores podem apresentar dificuldades para seu correto dimensionamento em função da carga acoplada, e acabam sendo na maioria das vezes superdimensionados para atender ao torque de partida elevado de determinadas cargas. Ainda, em alguns casos, devido as suas características de construção, estes motores não apresentam uma alta eficiência, ou ainda, o conjunto desses motores acarreta um baixo fator de potência.

- d) **Transformadores operando a vazio, ou operando superdimensionados:** O uso de transformadores superdimensionados, com pouca carga, ou até mesmo à vazio, torna-se uma prática teoricamente comum nas indústrias, tendo em vista que a maioria das empresas não trabalham as 24 horas do dia, deixando o transformador com pouquíssima carga, ou praticamente a vazio, fora do expediente de trabalho, ou ainda transformadores superdimensionados esperando um futuro crescimento da indústria, entre outros aspectos que levam os transformadores trabalharem com pouca eficiência. No entanto, do mesmo modo que os motores de indução, os transformadores demandam uma potência reativa relativamente constante para manutenção dos seus campos magnéticos, portanto, em situações de pequeno carregamento, nas quais a potência ativa no secundário é pequena, a potência reativa torna-se relativamente grande, ocasionando um fator de potência baixo.
- e) **Lâmpadas de descarga:** As lâmpadas de descargas, ou seja, lâmpadas vapor de mercúrio, vapor de sódio e fluorescentes, necessitam para seu funcionamento de um reator, o qual é um dispositivo eletromagnético dotado de bobinas que demandam energia reativa, causando um baixo fator de potência. Portanto a verificação do fator de potência dos reatores ao se adquirir esses equipamentos, se torna indispensável, tendo em vista que em indústrias dificilmente essas lâmpadas são empregadas em pequenas quantidades. Nas instalações elétricas que possuem um sistema de iluminação razoavelmente grande, constituído por reatores eletromagnéticos, há uma significativa contribuição para o baixo fator de potência
- f) **Nível de tensão acima do nominal:** Ao aplicar uma tensão em um condutor, cuja construção física tem uma impedância que vai dificultar a circulação da corrente elétrica, perdas por efeito Joule ocorrem no circuito, assim formando quedas de tensão pelo trajeto que a corrente precisa circular para chegar até a carga. Visto isso, o nível de tensão acima do nominal origina uma corrente elétrica maior, aumentando a perda de energia elétrica, sendo essa energia dissipada em forma de calor. O nível de tensão acima do nominal pode ocorrer por uma prática comum para a correção do nível de tensão abaixo do permitido, que segundo a NBR 5410-Instalações Elétricas de Baixa

Tensão, a queda de tensão máxima é de 4% para instalações alimentadas diretamente pela rede de distribuição pública de baixa tensão, e 7% para as instalações que contam com subestação ou geração própria, ademais, a queda de tensão máxima em circuitos terminais é de 4%. Por isso a prática de regular do nível de tensão através dos tapes dos transformadores surgem como uma solução rápida e sem muito investimento, assim aumentando o nível de tensão acima do nominal em pontos próximos ao transformador. Outro aspecto considerável é quando ocorre, em uma determinada área, uma grande quantidade de geração distribuída injetando tensão na rede de distribuição durante uma parte do dia que não tem muito consumo, assim também elevando os níveis de tensão acima do nominal. Entre tanto, o nível de tensão acima do nominal tem influência negativa sobre o fator de potência das instalações, devido, a potência reativa consumida ser aproximadamente proporcional ao quadrado da tensão. Assim, no caso dos motores, que são responsáveis por mais de 50 % do consumo de energia elétrica na indústria, a potência ativa só depende da carga dele solicitada, e quanto maior for a tensão aplicada nos seus terminais, maior será a quantidade de reativos absorvida e, conseqüentemente, menor o fator de potência da instalação.

- g) **Cargas não lineares:** De modo geral, o comportamento do fator de potência nas instalações elétricas varia conforme a atividade e o tipo de cargas presentes. No Brasil a tendência na indústria é aumentar a parcela indutiva das 06 às 24 horas, devido ao acionamento de motores e equipamentos indutivos, e das 24 às 06 horas a situação se inverte, tendendo a um fator de potência capacitivo, em virtude da iluminação, principalmente por lâmpadas de descarga, ou capacitores ligados à rede. Cotrim (2008), complementa que:

Nas indústrias, a situação não é diferente. Há alto consumo de energia reativa pelas cargas típicas industriais, como as injetoras, extrusoras, fornos de indução ou a arco, sistemas de solda, prensas, guindastes, monta-cargas e ponte rolantes, bombas, compressores, ventiladores, tornos, retíficas, sistemas de galvanoplastia e eletrólise, entre tantos outros (COTRIM, 2008, p. 436).

Portanto, além das cargas não lineares contribuírem para o surgimento de correntes harmônicas, indesejavelmente, um baixo fator de potência pode ser causado por excesso de cargas indutivas ou capacitivas.

- a) **Cargas especiais com consumo de reativo:** Algumas cargas presentes em ambientes industriais apresentam elevado consumo de potência reativa, contribuindo para a diminuição do fator de potência, entre elas, fornos a arco,

fornos de indução eletromagnético, máquinas de solda a transformador, e equipamentos eletrônicos. Máquinas de solda a arco, fornos a arco, e os equipamentos eletrônicos, ou equipamento da eletrônica de potência, tal como retificadores, inversores e fontes chaveadas, devido aos seus princípios de operação são máquinas geradoras de distorção harmônica, uma vez que a tensão e correntes dos arcos elétricos (que são o princípio de funcionamento destas máquinas) possuem características não lineares, estas distorções harmônicas implicam em um baixo fator de potência. Já os fornos de indução eletromagnéticos, possuem características indutivas e demandam energia reativa indutiva.

### 2.3.2 Consequências do baixo fator de potência

O baixo fator de potência acarreta inúmeras consequências técnicas e financeiras, interferindo diretamente na qualidade de energia e despesas com energia elétrica, além de estar sobrecarregando os sistemas de proteção da instalação. A necessidade de potência reativa em um sistema elétrico resulta no aumento da potência total, ou seja, potência aparente, e conseqüentemente induz ao um aumento na magnitude da corrente elétrica que circula nos condutores das unidades consumidoras.

Dessa forma, o baixo fator de potência, além de causar aumento da corrente elétrica, prejudicando o sistema elétrico como um todo, está impedindo de se aproveitar a instalação elétrica para transportar uma parcela maior de corrente elétrica destinada a gerar trabalho, caracterizada pela potência ativa.

Ademais, o baixo fator de potência também provoca o aumento das quedas de tensão decorrentes das perdas atribuídas ao efeito Joule, proporcionais ao quadrado da corrente total que circula nos alimentadores, sendo essa corrente expressa pela equação 8.

$$P_{perdas} = ZI^2 \quad (8)$$

Onde,  $P_{perdas}$  representa a perda por efeito Joule, cuja unidade de medida é o watt (W),  $Z$  representa a impedância do condutor elétrico, medida em Ohms por metro ( $\Omega/m$ ), e  $I$  a corrente elétrica total do circuito em ampères (A).

Pode-se ainda listar outras consequências decorrentes do baixo fator de potência presente nas instalações elétricas que utilização potência reativa, entre elas: subutilização da capacidade instalada, ou seja, a limitação da capacidade dos transformadores e condutores, sendo essa capacidade reduzida pela potência reativa que ao sobrecarregar a instalação elétrica, inviabiliza sua plena utilização. Por exemplo, ao se dimensionar uma subestação para uma indústria, o transformador deve atender à potência total dos equipamentos utilizados, entre tanto, a presença de potência reativa na instalação precisa ser considerada e sua capacidade deve ser calculada com base na potência aparente das instalações.

A Tabela 1 apresenta a potência necessária ao transformador, para atender uma carga útil de 800 kW para fatores de potência crescentes.

Tabela 1 - Variação da potência do transformador em função do fator de potência

<b>Potência útil absorvida - kW</b>	<b>Fator de potência</b>	<b>Potência do Trafo - kVA</b>
800	0,50	1.600
	0,80	1.100
	1,00	800

Fonte: WEG (2009).

Outro aspecto importante ao se projetar uma subestação, são os investimentos para construção das instalações, estando relacionados principalmente aos transformadores, proteções, e condutores necessários. Também o custo dos sistemas de comando, proteção e controle dos equipamentos cresce com o aumento da energia reativa. Da mesma forma, para transportar a mesma potência ativa sem o aumento de perdas, a seção dos condutores deve aumentar à medida em que o fator de potência diminui (WEG, 2009).

Conforme afirmação, se faz necessário um aumento da seção transversal dos condutores e, conseqüentemente, da capacidade dos equipamentos de manobra e de proteção, devido ao acréscimo de corrente consumida. A Figura 3 exemplifica a variação da seção de um condutor em função do fator de potência.

Figura 3 - Variação da seção de um condutor em função do fator de potência

Seção relativa	Fator de Potência
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
4,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

Fonte: WEG (2009).

Aumento dos custos com energia elétrica em função da energia reativa excedente faturada pela concessionária, considerando o fator de potência mínimo estabelecido pela legislação vigente, e os custos com energia ativa, decorrente do aumento da potência total, a qual consequentemente aumenta o consumo de energia, ou seja, devido as perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor, efeito Joule, e ainda serem proporcionais ao quadrado da corrente total. Quanto maior for a potência aparente, maior vai ser o consumo de potência ativa na instalação, geralmente provocando também o aumento do aquecimento de condutores e equipamentos. Capelli (2013), afirma ser necessário manter o fator de potência o mais unitário possível, devido a não se conseguir diminuir a energia útil sem comprometer a produção, a alternativa é diminuir a energia reativa.

## 2.4 Resoluções e Normas

As normas e resoluções estabelecem as regras que regem o sistema elétrico brasileiro, assim ao ser instalado um sistema fotovoltaico, se faz necessário o cumprimento dessas normas

para que o sistema fotovoltaico esteja dentro dos padrões estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), assim como os limites mínimos e máximo estabelecido para o fator de potência indutivo ou capacitivo de uma instalação elétrica.

Ademais, existem as normas técnicas específicas para cada concessionária, as quais devem seguir as normativas da ANEEL, mas são independentes para determinar qual o melhor padrão que se enquadra na sua rede de distribuição, juntamente com os métodos de conexões mais apropriados.

#### 2.4.1 Classificação da Micro e Minigeração Distribuída

O conceito da geração distribuída se refere à produção de energia no local de consumo ou em suas proximidades, diferindo-se da geração centralizada, em que grandes usinas geram energia longe dos centros de carga, dependendo das linhas de transmissão para o transporte dessa energia (CREDER, 2021).

A ANEEL, através da Resolução Normativa (REN ANEEL 687, de 24.11.2015), na qual é a atualização da REN (482/2012), estabelece os parâmetros para Micro e Minigeração distribuída (MMGD). Conforme o artigo 2º da Resolução Normativa (REN ANEEL 687/2015) a MMGD está definida em (ANEEL, 2015):

- I. Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- II. Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

Onde, a cogeração qualificada, segundo Olivera (2017, p.15), é determinada por “Processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária”.

#### 2.4.2 Conexão à rede de distribuição

A conexão da Micro e Minigeração distribuída à rede de distribuição deve seguir a Resolução Normativa REN ANEEL 687/2015, o qual dispõe que todos os critérios a serem considerados estão dispostos no Módulo 3 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

Ademais, os valores de referência a serem adotados para os indicadores de tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência devem ser os estabelecidos no módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST.

A solicitação de conexão deve ser feita através de formulário de solicitação de acesso, sendo estes presentes nos anexos 3.A, 3.B e 3.C do módulo 3 do PRODIST, conforme potência instalada da geração.

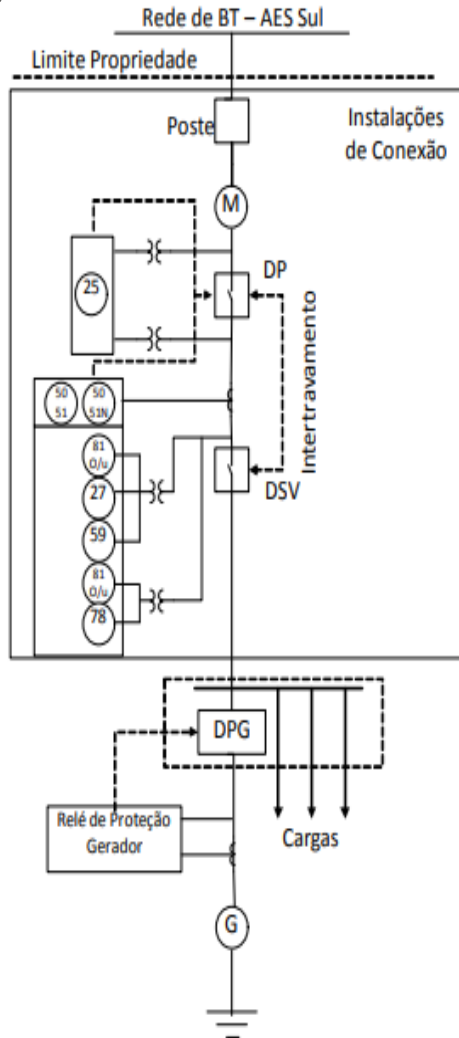
Alguns critérios técnicos como a quantidade de fases, nível de tensão de conexão e proteção da central geradora são definidos pela distribuidora local. Portanto, o módulo 3 do PRODIST, disponibiliza requisitos mínimos para o ponto de conexão com a rede de distribuição, por tanto, os parâmetros provenientes da concessionária de distribuição local, são baseados nas informações disponibilizadas pela Concessionária Rio Grande Energia (RGE Sul), concessionária local.

#### 2.4.3 Conexão à rede de distribuição sem o uso de inversores

Para a conexão do sistema de Micro e Minigeração da unidade consumidora com a rede de distribuição sem o uso de inversores, alguns aspectos para um sistema de proteção mínimo devem ser atendidos, contemplando características técnicas compatíveis com os relés utilizados pela distribuidora. Os esquemas das Figuras 4 e 5 ilustram duas opções para um sistema mínimo de proteção necessário para conexão ao sistema de distribuição da RGE Sul, sendo que esse sistema contempla elemento de desconexão, interrupção, proteção de sub e sobretensão, proteção de sub e sobre frequência, relé de sincronismo, e anti-ilhamento.

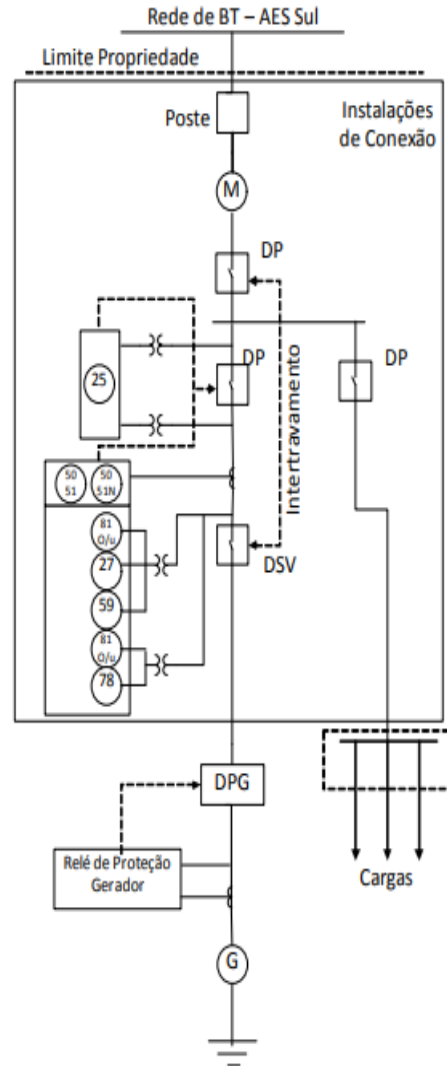
Sendo as funções, 50/51 – 50/51N proteções contra sobrecorrente de fase e de neutro, instantâneas e temporizadas, 59 Sobretensão, 27 Subtensão, 81 Sobre e Sub frequência, ou Relé Derivada de frequência  $df/dt$ , 25 Relé Check de Sincronismo, 78 Relé Anti-ilhamento.

Figura 4 - Proteção desconectando o gerador e as cargas



Fonte: RGE Sul (2022).

Figura 5 – Proteção desconectando apenas o gerador



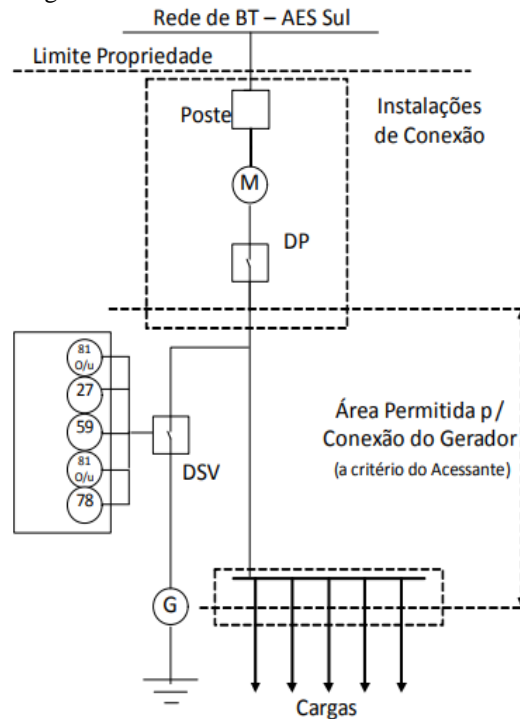
Fonte: RGE Sul (2022).

#### 2.4.4 Conexão à rede de distribuição com o uso de inversores

Para a conexão do sistema de Micro e Minigeração da unidade consumidora com a rede de distribuição através de inversores, também se faz necessário um sistema mínimo de proteção, no qual a maioria das funções necessária já estão atendidas pelo próprio inversor, de tal modo que esses equipamentos sejam certificados conforme normas técnicas brasileiras ou normas internacionais, ou no registro da concessão do Inmetro. As funções para as conexões com ou sem o uso de inversor se repetem, assim sendo a redundância de proteções desnecessária no caso do inversor.

Para os acessantes que utilizam inversor de potência para a conexão à rede, a forma de interligação deve seguir o esquema disposto na Figura 6.

Figura 6 - Conexão à rede através de um inversor



Fonte: RGE Sul (2022).

#### 2.4.5 Reativo excedente e fator de potência

A legislação atual estabelece as condições para medição e faturamento de energia reativa excedente, com a intenção de através da cobrança de encargos, atender a necessidade de liberação da capacidade do sistema elétrico nacional, redução do consumo de energia reativa indutiva pelas indústrias, o qual provoca sobrecarga no sistema das distribuidoras, redução do consumo de energia capacitiva, o qual provoca elevação de tensão no sistema de suprimento, e ainda como bônus a promoção de uso racional de energia e distribuição dos custos de expansão de forma mais justa. (MAMEDE FILHO, 2002).

Conforme a Resolução 569 de 23/07/2013, que altera a Resolução 414 de 9/10/2010, a qual é a resolução que define os limites do fator de potência, como a cobrança pelo excedente de energia reativa indutiva e capacitiva, os intervalos a serem considerados são:

- a) O período de 6 (seis) horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre as 23h30min e as 6h30min, apenas para os fatores de potência inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de uma hora.
- b) O período diário complementar ao definido anteriormente, ou seja, entre as 6h30min e as 23h30min, apenas para os fatores de potência inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de uma hora (MAMEDE FILHO, 2002, p. 416).

Ainda segundo Mamede Filho (2002), o fator de potência precisa permanecer dentro dos limites de 0,92 indutivo e 0,92 capacitivo, a fim de evitar encargos na fatura com excedentes

reativos, sendo que durante as 24 horas do dia, um intervalo de tempo de 18 horas consecutivas considera o período de ponta, e no intervalo de tempo complementar 6 horas considero o período fora de ponta. Assim como tanto a energia reativa indutiva, consumida pela instalação, como a energia reativa capacitiva, fornecida a rede da concessionária de energia elétrica, são medidas e faturadas justifica-se a correção do fator de potência evitando um valor adicional na fatura de energia elétrica.

No entanto, a avaliação do fator de potência poderá ser feita através da avaliação horária, cujas energias ativa e reativa são medidas a cada intervalo de uma hora, e faturados no final de um ciclo de faturamento, ou através da avaliação mensal, caracterizada pela medição apenas da energia reativa indutiva em um período de 30 dias.

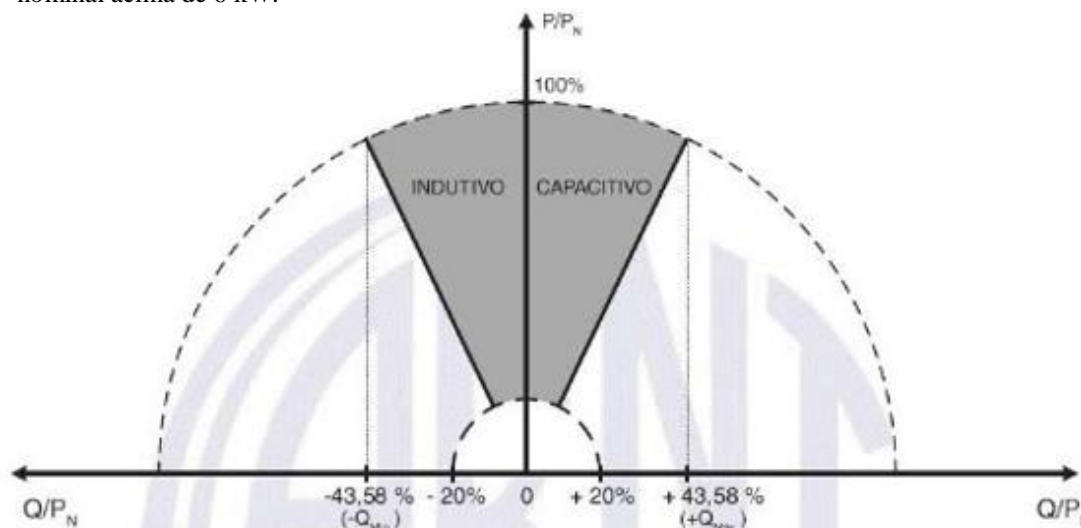
#### 2.4.6 Fator de potência da GD

De acordo com a ABNT NBR 16149: Sistemas fotovoltaicos (FV) – características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, os limites operacionais do fator de potência são dados de acordo com a potência da geração distribuída. Quando a potência injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do inversor, no máximo em 10 segundos, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente, para corresponder ao fator de potência predefinido.

Quanto a potência da geração distribuída, pode ser classificada como, potência nominal menor ou igual a 3 kW, potência nominal maior que 3 kW e menor ou igual a 6 kW, e potência nominal maior que 6 kW. Indiferente de qual potência o sistema se enquadra, o fator de potência deve ser unitário, ajustado de fábrica com tolerância de trabalho na faixa de 0.98 indutivo até 0.98 capacitivo, no entanto, para potência nominal maior que 3 kW e menor ou igual a 6 kW, e maior que 6kW, se faz necessário ao inversor, a possibilidade de ajustar a tolerância do fator de potência, respectivamente, em 0.95 indutivo e capacitivo, e 0.90 indutivo e capacitivo.

A Figura 7 apresenta de forma ilustrativa o ajuste necessário ao inversor, quando a potência nominal for maior que 6 kW.

Figura 7 - Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência nominal acima de 6 kW.



Ademais, para os sistemas de geração distribuída que não fazem o uso de inversores como interface de conexão, os valores de referência para os indicadores de qualidade da energia devem seguir o que é disposto na seção 8.1 do Módulo 8 do PRODIST.

## 2.5 Trabalhos similares

Tendo em vista a importância do respectivo assunto, algumas pesquisas referentes ao estudo em questão foram realizadas por outros autores, desse modo, procurou-se analisar as metodologias e os resultados alcançados pelos mesmos, procurando um embasamento para sequência do trabalho.

Com isso, em 2018 um trabalho foi desenvolvido intitulado de “Análise dos efeitos da utilização de um sistema fotovoltaico no fator de potência de uma empresa agroindustrial”, com o intuito de analisar os efeitos da utilização de um sistema fotovoltaico no fator de potência de uma empresa agroindustrial, onde os autores optaram por uma metodologia semelhante ao presente trabalho. Essa pesquisa, teve por objetivo, realizar um estudo de caso voltada principalmente a análise dos impactos na cobrança de energia reativa, ou seja, cobrança por consumo excessivo de reativos, com e sem a utilização de um SFCR instalado em uma empresa de processamento, beneficiamento e comercialização de café localizada em Viçosa, MG (GUSMAN et al., 2018).

Desse modo, na metodologia desse trabalho, os dados foram coletados em um intervalo de 15 minutos durante o mês de abril de 2017, onde esses dados foram analisados para verificação do fator de potência. A produção diária do SFCR foi simulada por meio de um

software computacional em intervalos de 5 minutos no mesmo local com uma radiação incidente de 4,9 kWh/m<sup>2</sup>dia (GUSMAN et al., 2018).

Portanto, os autores concluíram que o impacto do sistema fotovoltaico em relação às potências reativas foi expressivo, assim ocorrendo um aumento na fatura de energia e por fim afirmam que é de grande importância o estudo e análise do assunto tratado, tendo em vistas as desvantagens apresentadas por eles. Ademais, concluíram que bancos automáticos de capacitores são uma ótima solução para o problema em questão (GUSMAN et al., 2018).

Outro trabalho semelhante é um estudo realizado em 2020, chamado de “Análise do fator de potência medido em ambiente industrial contendo geração distribuída” o qual analisa o fator de potência medido em ambiente industrial contendo geração distribuída. O presente estudo tem como principal objetivo demonstrar através de simulações o impacto de uma geração distribuída em um ambiente industrial (hipotético), sendo que o autor em um primeiro momento realizou uma análise matemática da variação do fator de potência e posteriormente realizou simulações de três indústrias hipotéticas (OLIVEIRA, 2017).

Visto isso, a metodologia escolhida parte de um experimento laboratorial, onde os ensaios foram feitos com a presença de geração distribuída, e sem a presença da geração distribuída, dessa forma possibilitando a percepção do real impacto que geração distribuída causa a uma instalação elétrica quando conectada aos circuitos existentes, de tal modo que se fez possível comparar o antes e depois dessa inserção (OLIVEIRA, 2017).

Portanto, Oliveira (2017) identificou que sem a presença da geração distribuída o complexo industrial trabalha dentro dos limites pré-estabelecidos pela legislação vigente, mas, no entanto, quando inserido a geração distribuída os limites foram extrapolados, sendo que o fator de potência em questão chegou a 0,6 indutivo, deixando o fator de potência muito abaixo do permitido pela legislação vigente.

No entanto, uma terceira metodologia foi aplicada em um trabalho realizado, intitulado como “Estudo da correção do fator de potência de um sistema fotovoltaico conectado à rede” sendo que no respectivo trabalho os autores fizeram uso de um software para a simulação do fator de potência de um sistema fotovoltaico, e conseqüentemente simular a correção de um possível baixo fator de potência. Com isso, foram realizadas simulações de três configurações diferentes de rede, através do software SIMULINK® (SILVA; VIEIRA; GUERRA, 2018).

O software permitiu aos autores a simulação de três situações distintas, sendo uma simulação sem a presença do sistema fotovoltaico, outra com a presença do sistema fotovoltaico e a terceira com a presença de um banco de capacitores (SILVA; VIEIRA; GUERRA, 2018).

Por fim, através dos dados de tensões e correntes obtidos foi possível analisar o fluxo de potência do sistema e o fator de potência em diferentes simulações, de tal modo, que os autores afirmam um impacto negativo, após a entrada da geração fotovoltaica, no fator de potência e nos parâmetros medidos pelo software (SILVA; VIEIRA; GUERRA, 2018).

Dessa forma, percebe-se que indiferentemente da metodologia adotada, os resultados tendem a chegar em um mesmo ponto, o qual aponta a geração fotovoltaica como fonte de um baixo fator de potência, quando inserida em um ambiente industrial.

### **3 METODOLOGIA**

Esse trabalho é constituído por três etapas, a primeira etapa é composta por uma pesquisa bibliográfica exploratória referente a assuntos necessários à compreensão de um sistema fotovoltaico, e os impactos que uma unidade consumidora está sujeita quando adere a essa tecnologia como uma de suas fontes de geração de energia elétrica. Nessa pesquisa também são aprofundados alguns conhecimentos sobre equipamentos tradicionalmente industriais e seus princípios de funcionamentos correlacionados com a existência de um sistema fotovoltaico em ambientes industriais.

A segunda e terceira etapa dizem respeito a dois procedimentos distintos, um realizado em campo e o outro realizado em laboratório denominados procedimento 1 e procedimento 2, respectivamente.

#### **3.1 Procedimento 1**

O procedimento 1 trata-se de um estudo de caso realizado em campo procurando a validação do referencial teórico, através de uma aplicação real. O respectivo estudo de caso foi realizado através de um analisador de energia, modelo RE6000, fabricado pela empresa EMBRASUL.

Por tanto através do analisador de energia RE6000, foram realizadas análises em relação a potência ativa gerada pelo sistema fotovoltaico, e as potências ativa e reativa consumida pela unidade consumidora, sempre as relacionando com o fator de potência da mesma.

O presente estudo de caso foi realizado em uma indústria, localizada na cidade de Getúlio Vargas-RS, onde a empresa produz inúmeros produtos relacionados a caixas e embalagens de papelão. O horário de funcionamento é de segunda a sexta-feira, das 07:30 às 18:00 horas, com intervalo entre 12:00 e 13:30 horas.

A indústria em questão apresenta inúmeros equipamentos elétricos, em conjunto com máquinas e motores de diversos tamanhos e potência, adicionados a iluminação desse ambiente, que somados acarretam um alto consumo de potências ativa e reativa. Outro equipamento que também contribui para o consumo elevado de energia reativa é o transformador particular da subestação da empresa.

O fornecimento de energia elétrica é realizado pela concessionária RGE SUL, pertencente a CPFL Energia, em tensão nominal de 13,8 kV. Portanto, a unidade consumidora

é enquadrada no Grupo A. A análise foi realizada no período do dia 17/05/2022, das 15:40 horas, até o dia 26/05/2022, as 14:03 horas.

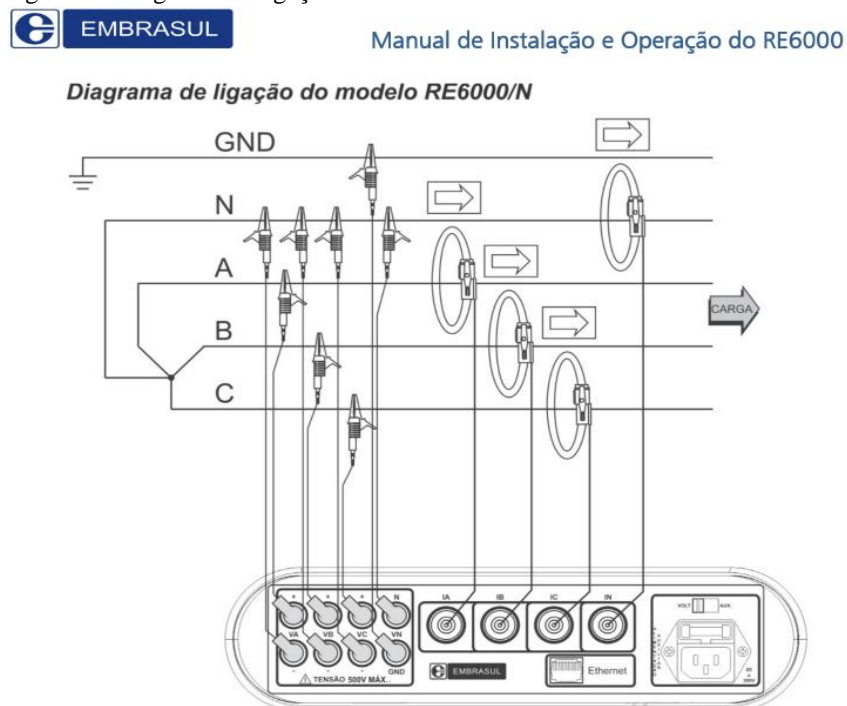
O sistema fotovoltaico presente nessa indústria é composto por 400 módulos fotovoltaicos da marca ATRONERGY, com potência nominal por módulo de 340 Wp, gerando uma potência instalada de 136 kWp, conectados à rede através de 02 inversores HUAWEI/WEG 40 kW, e 01 inversores HUAWEI/WEG 30 kW.

### 3.1.1 Analisador de energia RE6000

O analisador de energia da empresa EMBRASUL, modelo RE6000 é um equipamento que detém importantes funções, as quais o permitem realizar de maneira satisfatória a análise de grandezas elétrica fundamentais para o entendimento do impacto da energia solar fotovoltaica em ambientes industriais.

O RE6000 é um equipamento que está habilitado a medir tensão, corrente, potências, frequências, DHT de tensão e corrente com uma taxa de amostragem a partir de 100 milissegundos. Ao ser instalado em ambos os procedimentos, o RE6000 foi instalado no módulo de ligação N, o qual permite a medição de corrente e tensão do neutro. A Figura 8 apresenta o diagrama de ligação utilizado nos dois procedimentos.

Figura 8 - Diagrama de ligação do modelo Re6000/N



Fonte: EMBRASUL (2022)

O analisador de energia apresenta oito garras jacaré e quatro TC para medição de tensão e corrente do neutro, fases e terra. Esses acessórios, em ambos os procedimentos, foram conectados diretamente no QGBT de cada procedimento, utilizando os condutores que alimentavam esses quadros para medir corrente e os barramento dos quadros para medir a tensão. Essas conexões podem ser visualizadas no Apêndice A.

### **3.2 Procedimento 2**

O procedimento 2, ou seja, a terceira etapa, diz respeito a montagem de uma bancada de estudo, com o intuito de simular de forma hipotética um ambiente industrial em escala reduzida.

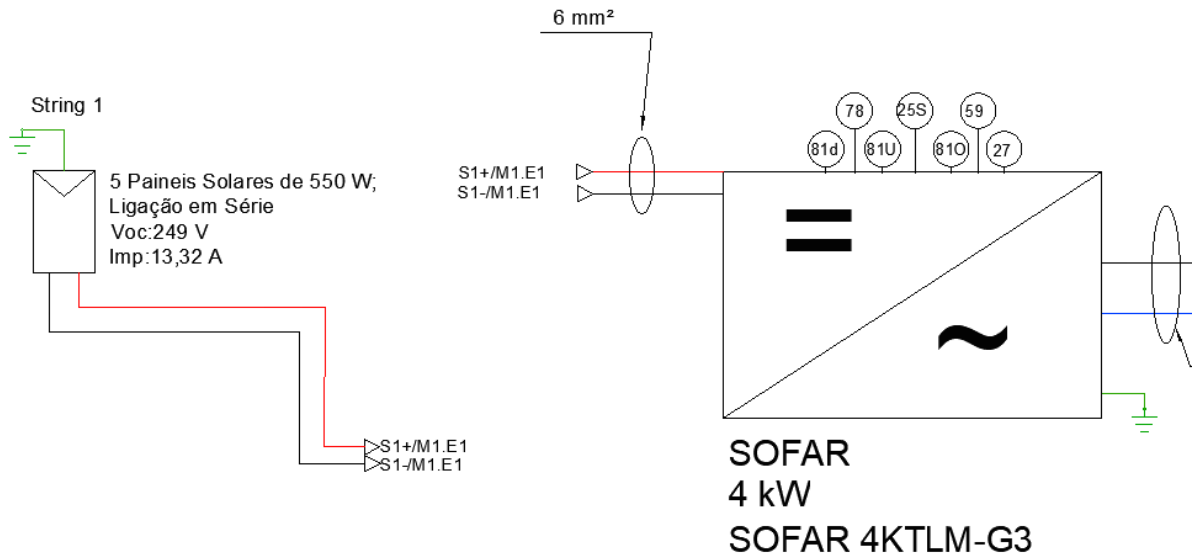
A bancada é denominada em módulo 1 e módulo 2, aonde o primeiro módulo é o sistema de alimentação que fornece a energia necessária ao segundo módulo. Esse módulo é constituído por um pequeno sistema fotovoltaico conectado ao quadro geral de distribuição do laboratório de engenharia elétrica da universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões-URI através de um inversor solar monofásico, em paralelo com a rede trifásica da concessionária de energia elétrica.

O segundo módulo simula cargas industriais, sendo compostos por dois motores indutivos trifásicos acoplados em dois freios de Foucault, o qual simula uma carga no eixo desses motores, e um transformador de 6,0 kVA trabalhando a vazio, juntamente com a iluminação e tomadas de uso geral do laboratório, os circuitos de internet e os equipamentos eletrônicos em Stand-by que, de forma indireta, complementam a bancada de estudo tendo em vista que contribuem com o consumo de energia no laboratório.

Por fim, a análise dos resultados foi realizada através do analisador de energia RE6000, juntamente com alicates amperímetros, multímetros, e alicates wattímetros.

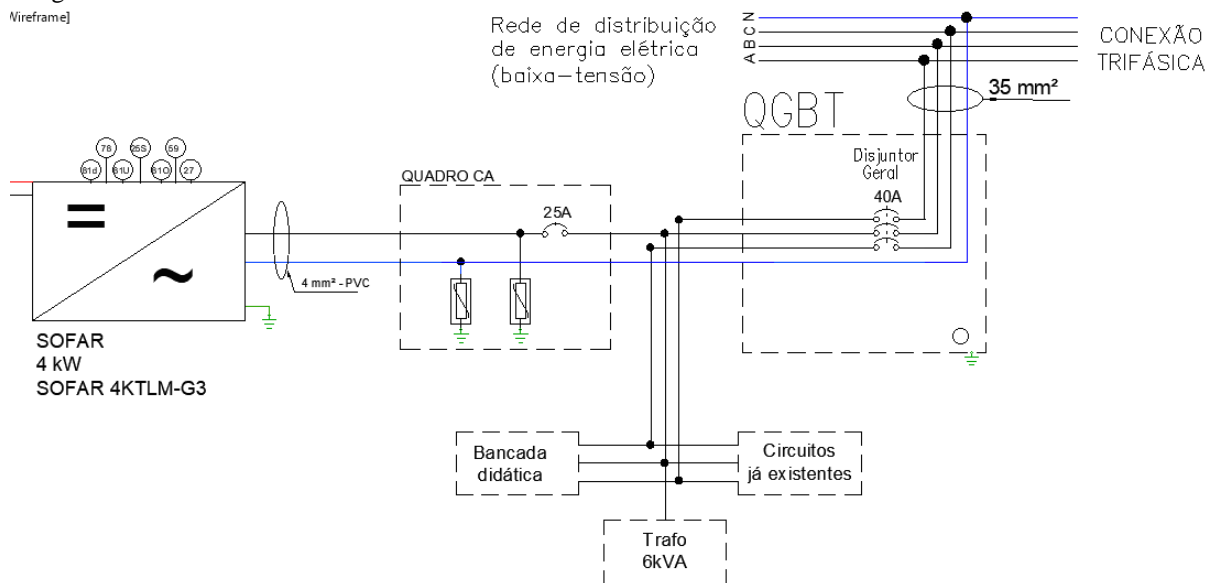
O diagrama de ligação do procedimento 2 está ilustrado na Figura 9 e na Figura 10, as quais representam um diagrama multifilar detalhado, projetado em AUTOCAD, a fim de exemplificar as ligações executadas em cada módulo desse procedimento.

Figura 9 - Sistema fotovoltaico, e inversor solar.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 10 - Conexões da bancada de estudo



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.1 Módulo 1

O módulo 1, é constituído por um pequeno Sistema fotovoltaico montado por um conjunto de 5 módulos fotovoltaicos da marca DAH SOLAR, modelo DHM-72X10/BF, com uma potência nominal de 550 W, entregando uma potência de 2,75 kWp quando submetidos a uma irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>. No Anexo A é possível encontrar demais características técnicas desse módulo.

Esse sistema é conectado a um inversor solar Grid-Tied, da marca SOFAR SOLAR, modelo SOFAR 4KTLM-G3 com potência nominal de saída de 4 kWp, o qual tem a função de

transformar a corrente contínua vinda dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada e entregar essa energia ao quadro geral de distribuição do laboratório de engenharia elétrica da universidade. As demais características técnicas desse inversor solar podem ser encontradas no Anexo B.

O inversor solar tem em sua construção dispositivos de proteção contra polaridade reversa DC, Anti-ilhamento, RCMU, monitoramento de falta à terra, sobretensão e proteção contra surtos. No entanto, antes da conexão do inversor solar ao quadro de distribuição do laboratório, foi realizado os cálculos necessários para o dimensionamento dos condutores e das proteções, assim conforme a ABNT NBR 5410 - instalações elétricas de baixa tensão o condutor isolado de PVC, com área transversal de  $4 \text{ mm}^2$ , instalado em eletroduto aparente de seção circular sobre a parede, tem a capacidade de condução de corrente elétrica máxima para o método de referência de 32 ampères, assim atendendo a corrente máxima de saída entregue pelo inversor.

Portanto, para a proteção desse circuito foi dimensionado um disjuntor de 25 ampères, assim protegendo o condutor de uma eventual sobrecarga e dois dispositivos de proteção contra surtos (DPS) para eventuais surtos que possam vir a surgirem no circuito, por tanto, existindo uma redundância de proteção na conexão do sistema fotovoltaico ao quadro geral.

A principal fonte de energia do laboratório é através da energia proveniente da rede de distribuição de energia elétrica trifásica 13,8/0,380 kV, complementada pelo sistema fotovoltaico, formando assim um ponto em paralelo entre essas duas fontes de energia.

Tendo em vista o inversor solar monofásico, e o seu princípio de funcionamento, a rede de distribuição se torna indispensável para a alimentação do laboratório, principalmente na alimentação dos motores indutivos trifásicos, os quais necessitam das três fases para seu funcionamento e ainda visto que a potência do sistema fotovoltaico não é o suficiente para alimentar sozinho a bancada de estudo.

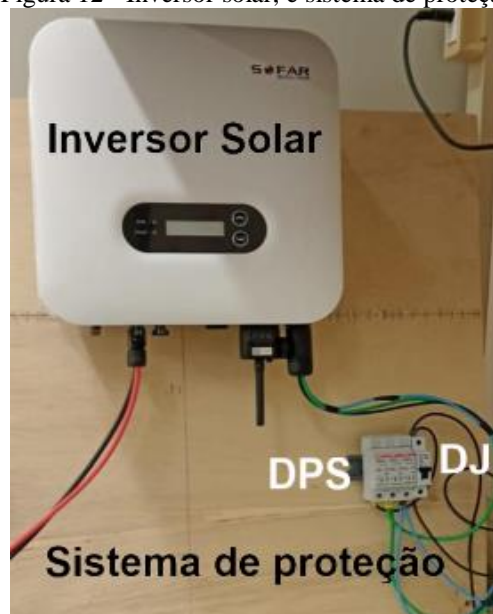
A Figura 11 apresenta o conjunto de módulos fotovoltaicos, fixado em base de madeira no estacionamento da universidade com orientação norte e angulação aproximada de 30 grau e a Figura 12 apresenta o inversor solar juntamente com os dispositivos de proteção responsáveis pela conexão do sistema fotovoltaico ao quadro de distribuição do laboratório.

Figura 11 - Conjunto de módulos fotovoltaicos



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 12 - Inversor solar, e sistema de proteção



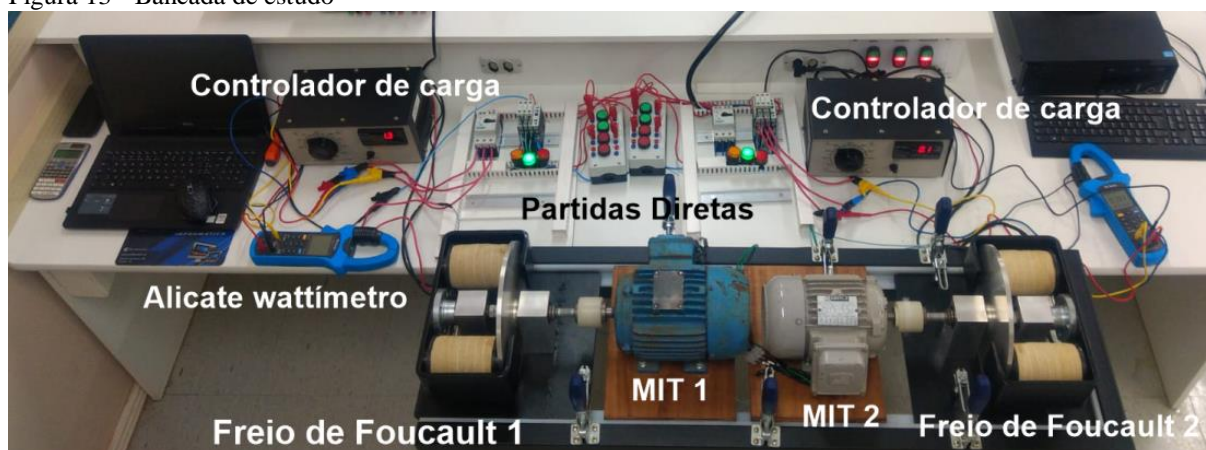
Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.2 Módulo 2

O módulo 2 consiste e uma bancada de estudo, a qual tem como principal função o consumo de potência ativa e reativa entregue pelo sistema fotovoltaico e pela rede de distribuição, a fim de simular um ambiente industrial em escala reduzida.

A bancada de estudo é composta por dois motores trifásicos, cuja especificações técnicas constam no Apêndice B, acoplados em dois freios de Foucault que através de seu princípio de funcionamento podem ser considerados como uma carga linear, ajustada através de um controlador de carga, acoplado no eixo desses motores, somados a um transformador trabalhando a vazio conectado diretamente no barramento da fase B do quadro geral de distribuição do laboratório somados aos circuitos existentes no laboratório. A Figura 13 apresenta o módulo 2, com as devidas descrições.

Figura 13 - Bancada de estudo



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.2.1 Motores de indução trifásicos

Os motores trifásicos trabalharam em um primeiro momento com cargas variáveis, entre 0%, 50% e 100% da capacidade nominal dos motores, assim podendo se obter uma ideia do consumo desses motores quando submetidos a variações de cargas, através do freio de Foucault acoplado ao eixo do motor, obtendo-se uma simulação próxima a real em um ambiente industrial, o qual tem uma variação de cargas e potência utilizadas durante o dia.

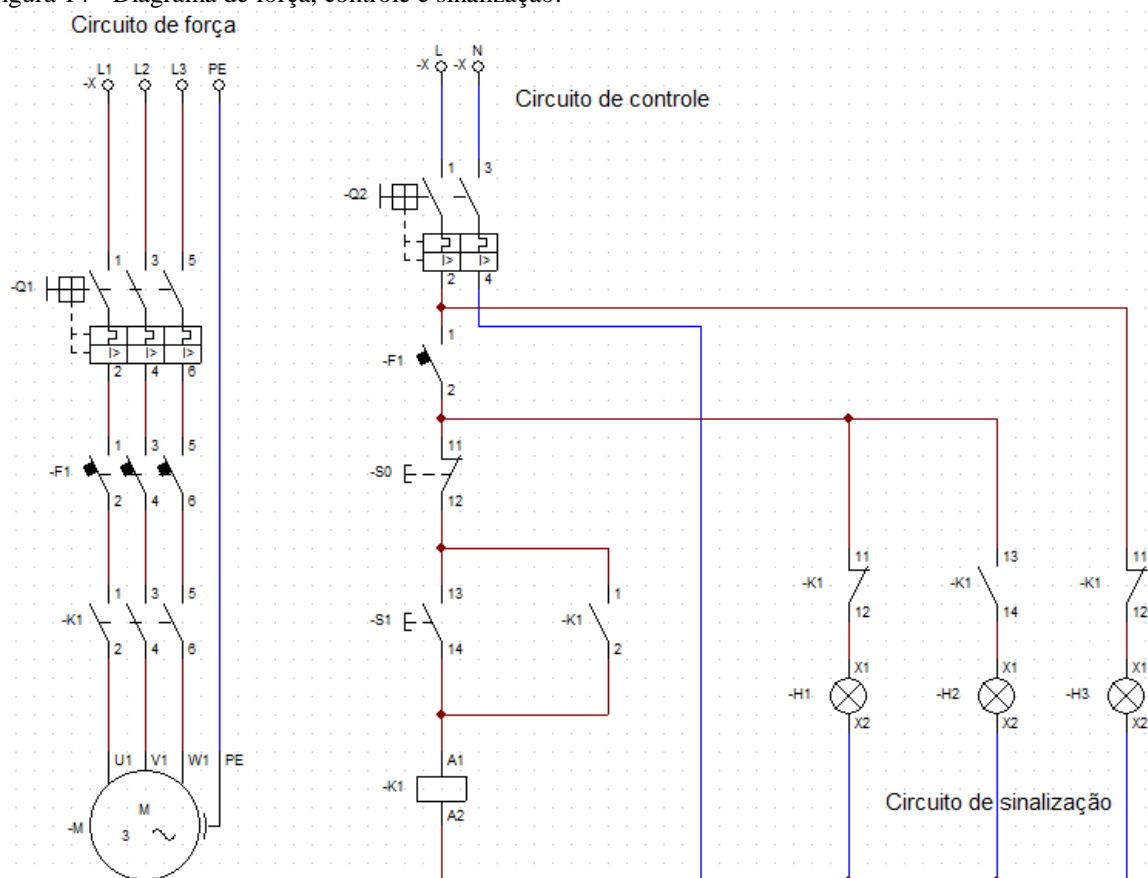
Em um segundo momento os motores trabalham a plena carga, com o intuito de consumir a maior potência possível, e tornar o cenário de ensaio pouco variável, e assim através do consumo da bancada houve-se uma equivalência com a potência ativa injeta pelo sistema fotovoltaico, assim apenas a potência reativa necessária para alimentar os campos magnéticos dos motores e do transformador fossem advindas da rede de distribuição da RGE, logo, causando um baixo fator de potência aos olhos da concessionária.

Esses motores são acionados por duas partidas diretas iguais, mas que controlam os motores separadamente, tendo em sua composição disjuntor-motor e rele térmico ajustado para

a corrente nominal do motor, juntamente com uma contatora e um sistema de sinalização, através de botoeiras, para a proteção, acionamento e indicação do status do motor ao operador, respectivamente.

A Figura 14 apresenta um diagrama de ligação das partidas diretas, projetadas no software CADSIMU, a fim de ilustrar os circuitos de força, controle e sinalização das partidas dos dois motores de indução trifásicos.

Figura 14 - Diagrama de força, controle e sinalização.



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.2.2 Freio de Foucault

O Freio de Foucault nada mais é que um dispositivo que emula uma carga indutiva e constante, através de um disco metálico que ao ser submetido a um campo magnético produzido por um eletroímã, provoca uma variação no fluxo magnético que gera a indução de correntes parasitas nesta área freando esse disco metálico que ao ser acoplado ao eixo do motor trabalha como uma carga linear, fazendo-se possível, através do controlador de carga, a aplicação de uma carga variável ao eixo do motor. Dessa forma foi realizada a variação de carga no eixo dos motores como já supracitado.

### 3.2.2.3 Transformador e circuitos existentes

Um transformador com potência nominal de 6 kVA está ligado diretamente no barramento da fase B, trabalhando a vazio, com o intuito de consumir potência reativa. Esse transformador juntamente com os circuitos existentes do laboratório, computadores em Stand-By, circuitos de internet, tomadas de uso geral e a iluminação do laboratório, contribuem no consumo de potência ativa e reativa do laboratório. A figura 13 apresenta a conexão do transformador ao quadro geral do laboratório.

Figura 15 - Conexão do transformador com o quadro geral.



Fonte: Autoria própria (2022).

Por fim, o procedimento 2 foi realizado no período de 14 dias alternados, sendo a análise dos resultados apresentados no intervalo do dia 17/11/2022 até o dia 18/11/2022, tendo em vista que foi o período com maior irradiação solar. As amostras foram tiradas no intervalo das 14:00 às 18:00 horas, sendo compatível com o horário disponível do campus.

## 4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

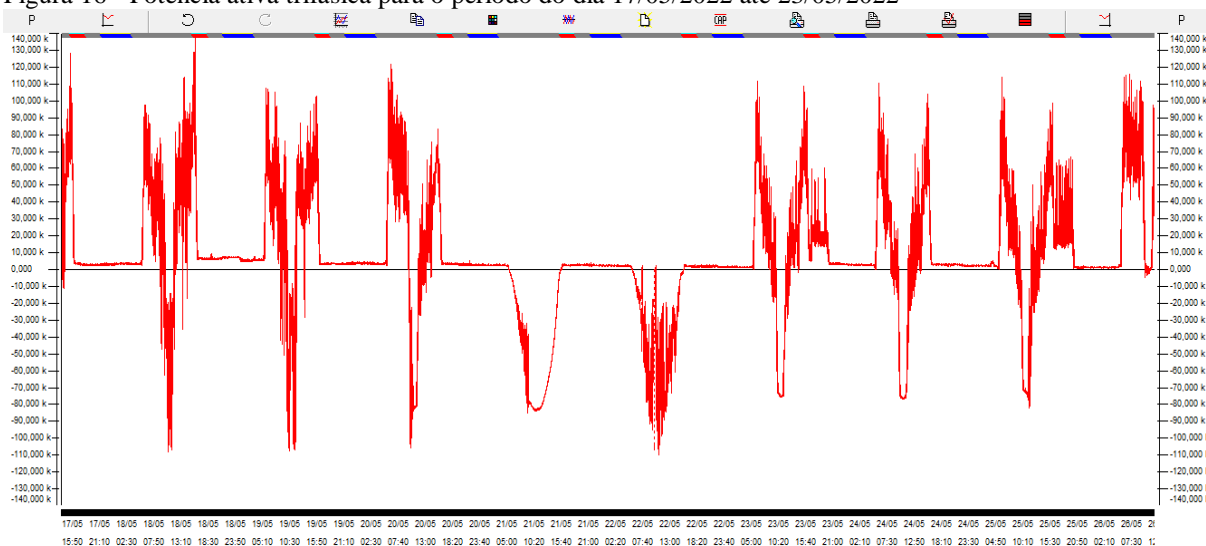
As análises dos procedimentos baseiam-se em dados coletados através do analisador de energia RE6000, no entanto, no procedimento dois, esses dados foram comparados com outros instrumentos de medidas entre eles multímetros, alicates amperímetros e alicates wattímetros.

Tendo em vista o procedimento 1, o qual trata de um estudo de campo, os resultados obtidos retratam com clareza o verdadeiro impacto da energia solar fotovoltaica em um ambiente industrial, quando relacionado ao fator de potência dessa indústria.

Ao se adquirir um sistema fotovoltaico alguns aspectos importantes são deixados de lado, considerando como maior valia o intuito de economizar com a diminuição de gastos com energia elétrica, sendo assim, na maioria das vezes, a qualidade de energia e o fator de potência dessas unidades consumidoras não são consideradas no dimensionamento desses sistemas. Esse fato acarreta alguns problemas que poderiam ser evitados se no momento do dimensionamento do sistema fotovoltaico as características da indústria fossem consideradas.

Portanto, ao ser analisado o impacto que um sistema fotovoltaico tem em uma indústria, tendo em vista que esse sistema injeta apenas energia ativa na instalação elétrica, obteve-se o entendimento da relação do sistema fotovoltaico com o baixo fator de potência da indústria em estudo. Com isso, a Figura 16, a qual apresenta a potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico à rede de distribuição, e a potência ativa consumida pela indústria, percebe-se que a geração do sistema fotovoltaico se sobressai ao consumo da empresa, assim se justificando a porcentagem de potência excedente injetada na rede de distribuição.

Figura 16 - Potência ativa trifásica para o período do dia 17/05/2022 até 23/05/2022



Fonte: Autoria própria (2022).

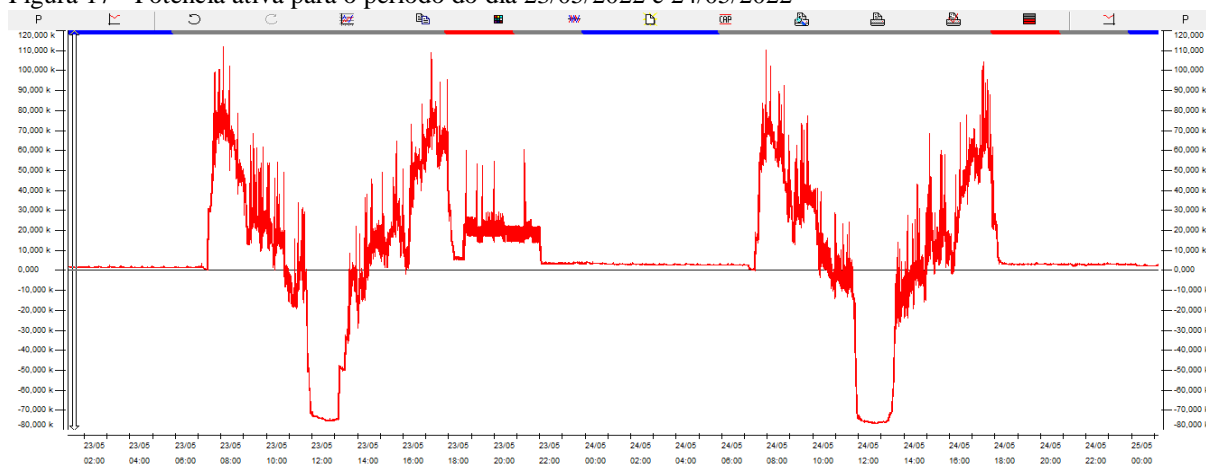
Essa análise pode ser feita levando em consideração a linha de referência fixada em zero na Figura 16, sendo que toda parcela acima dessa linha representa a potência ativa consumida do sistema fotovoltaico e da rede de distribuição de energia, e abaixo dessa linha a potência ativa excedente fornecida a rede pelo sistema fotovoltaico.

Essa convenção se dá, devido ao sentido da corrente que circula na instalação elétrica, que consequentemente circula no analisador de energia, instalado nos condutores de fases e neutro que alimentam o disjuntor geral do QGBT. Portanto, quando o sistema fotovoltaico injeta corrente elétrica na instalação elétrica, no sentido instalação elétrica à rede de distribuição, o analisador de energia interpreta a corrente elétrica como negativa, assim plotando o gráfico no plano inferior do gráfico. Por outro lado, quando a potência ativa consumida pela indústria passa pelo analisador, no sentido rede de distribuição à instalação elétrica, o analisador considera corrente elétrica positiva plotando o gráfico no plano superior do gráfico.

Ainda percebe-se que nos dias 21/05/2022 e 22/05/2022, sábado e domingo, não houve um consumo considerável de potência ativa, tendo em vista o período de funcionamento da indústria, logo é notável que apenas ocorreu injeção de potência ativa à rede, devido ao consumo da empresa ser mínimo nos finais de semana e a geração fotovoltaica continuar só dependendo da irradiação solar. Além disso, no decorrer dos dias úteis de serviço, de segunda a sexta-feira, o consumo da empresa e a magnitude da potência ativa injetada à rede não variam muito, sendo praticamente uniforme.

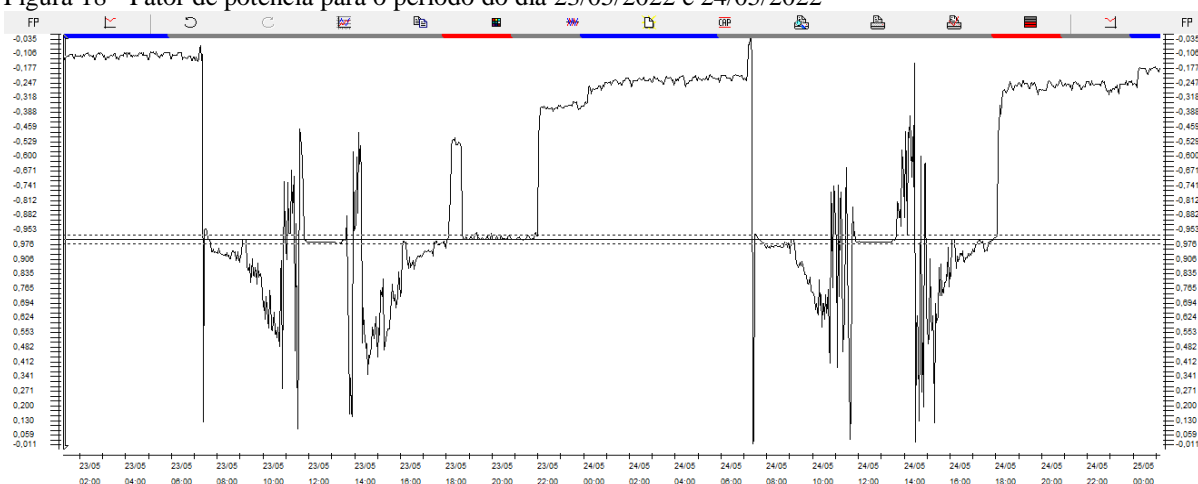
Para uma análise mais detalhada a Figura 17 apresenta a potência ativa para os dias 23 e 24, e a Figura 18 o fator de potência para o mesmo período, assim sendo possível verificar a relação entre a geração distribuída e o baixo fator de potência da unidade consumidora.

Figura 17 - Potência ativa para o período do dia 23/05/2022 e 24/05/2022



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18 - Fator de potência para o período do dia 23/05/2022 e 24/05/2022



Fonte: Autoria própria (2022).

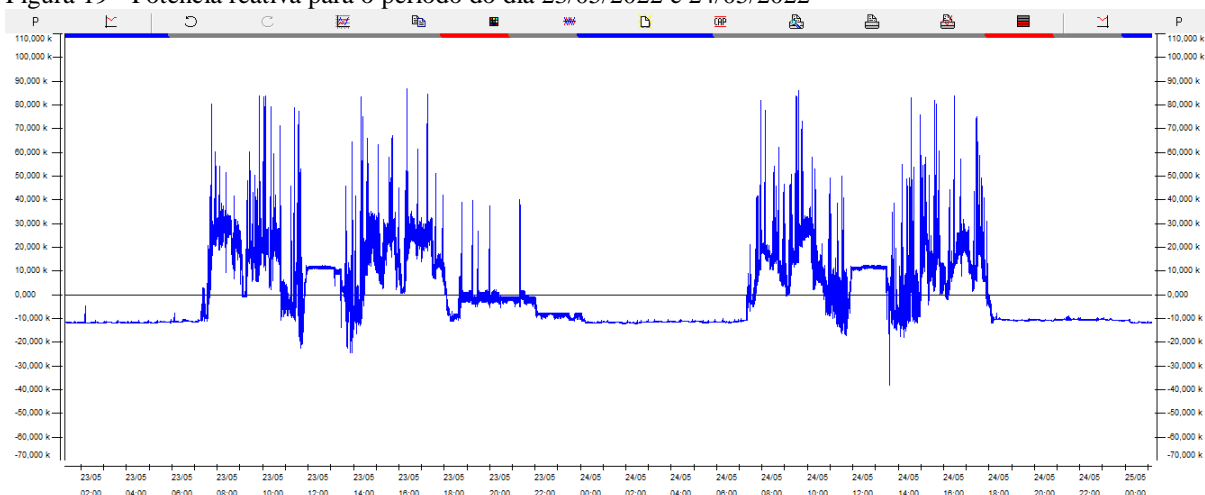
Contudo, quando analisado o fator de potência da unidade consumidora, percebe-se que em torno do período das 07:30 até as 18:00 horas, o fator de potência tende a diminuir, chegando a pontos críticos próximos a zero e, conseqüentemente, no mesmo horário a geração fotovoltaica está com uma geração de potência ativa suficiente para suprir a demanda da indústria e ainda injetar a potência excedente na rede de distribuição.

Isso acontece, devido toda a potência reativa consumida pela indústria ser fornecida pela concessionária de energia e a potência ativa ser fornecida pelo sistema fotovoltaico, tendo em vista que os inversores vem configurados de fábrica com fator de potência unitário, e apesar de existir um ajuste do inversor para que o mesmo gere potência reativa, essa opção não é vantajosa financeiramente, sendo que o sistema fotovoltaico necessitaria ser superdimensionado para entregar a mesma potência ativa a indústria, assim não sendo a melhor escolha para tal correção do fator de potência.

Ademais, através da Figura 18 também é possível verificar que após o horário de funcionamento da empresa, e no horário do almoço, o fator de potência passa a ser capacitivo.

A Figura 18 ilustra a potência reativa para o mesmo período, a qual tem relação direta com o baixo fator de potência capacitivo. Da mesma forma que a potência ativa, toda a parcela acima da linha de referência representa a potência reativa consumida, e abaixo dessa linha a potência reativa injetada à rede de distribuição. É possível observar que a indústria apresenta, aproximadamente, 11 kVAr de capacitores fixos conectados à instalação elétrica, e essas células capacitivas são responsáveis por injetar essa potência reativa na rede após o horário de funcionamento da indústria, gerando um baixo fator de potência capacitivo, assim deixando a empresa sujeita a pagar por consumo excessivo de reativos capacitivos que, conforme a legislação vigente, deve ser faturada pela concessionária das 00:00 até as 06:00 horas.

Figura 19 - Potência reativa para o período do dia 23/05/2022 e 24/05/2022



Fonte: Autoria própria (2022)

Tendo em vista, que existe inúmeras maneiras de corrigir o fator de potência, juntamente com o método de cálculo adequado a ser usado para tal correção, a Tabela 2 apresenta a quantidade de potência reativa fornecida por capacitores necessária para corrigir o fator de potência em kVAr, sendo o fator de potência desejado 0,98 capacitivo e indutivo.

Tabela 2 - Potências, fator de potência, e kVAr necessário para fator de potência 0,98

Potências, fator de potência, e kVAr necessário para fator de potência 0,98						
P (kW)	Q (kVAr)	S (VA)	FP3f	kVAr (0,98)	DATA	HORA
5,14	-8,93	10,31	-0,50	-9,98	23/05/2022	07:30:00
60,10	13,76	61,66	0,98	1,56	23/05/2022	08:00:00
71,79	28,12	77,11	0,93	13,54	23/05/2022	08:30:00
51,34	22,27	55,97	0,92	11,85	23/05/2022	09:00:00
25,44	9,38	27,12	0,94	4,21	23/05/2022	09:30:00
21,74	14,94	26,38	0,82	10,53	23/05/2022	10:00:00
14,76	18,81	23,91	0,62	15,81	23/05/2022	10:30:00
8,53	8,30	11,90	0,72	6,57	23/05/2022	11:00:00
-8,22	2,17	8,51	0,97	3,84	23/05/2022	11:30:00
-57,75	-9,84	58,58	-0,99	0,00	23/05/2022	13:30:00
-14,42	1,58	14,51	0,99	0,00	23/05/2022	14:00:00
-4,33	3,59	5,62	0,77	4,47	23/05/2022	14:30:00
14,09	24,35	28,13	0,50	21,49	23/05/2022	15:00:00
13,68	17,64	22,32	0,61	14,86	23/05/2022	15:30:00
21,93	21,71	30,86	0,71	17,26	23/05/2022	16:00:00
23,48	12,27	26,49	0,89	7,50	23/05/2022	16:30:00
55,04	25,07	60,48	0,91	13,90	23/05/2022	17:00:00
70,38	24,24	74,43	0,95	9,95	23/05/2022	17:30:00
58,72	11,55	59,85	0,98	0,00	23/05/2022	18:00:00

Fonte: Autoria própria (2022).

As respectivas informações são referentes ao dia 23/05/2022, no horário de funcionamento da indústria, retiradas do analisador de energia, sabendo que a variação do consumo da empresa não varia muito conforme mostrado na Figura 16, pode-se considerar esses valores para todos os dias.

Percebe-se que durante o horário de funcionamento da empresa, o consumo de potência ativa e reativa aumenta, devido ao consumo das máquinas e equipamentos presentes na empresa estarem funcionando, e assim consumindo o total de potência aparente para os determinados horários do dia. Como pode ser observado o valor de potência reativa fornecida por capacitores para correção do fator de potência em 0,98 indutivo ou capacitivo, varia bastante chegando ao maior valor próximo 21 kVAr, e o menor próximo 1,5 kVAr, sendo um valor médio de 10,25 kVAr.

Esses respectivos valores são apresentados acompanhados do prefixo mais (+), o qual significa que é necessário acrescentar o determinado valor de kVAr para se obter um fator de potência de 0,98 indutivo. No entanto, os valores com o prefixo menos (-), significam que é necessário retirar determinado valor de kVAr para se obter um fator de potência de 0,98 capacitivo, ou seja, como existe um banco de capacitor fixo de aproximadamente 10 kVAr conectado à instalação, nos momentos em que a indústria não está em funcionamento, geralmente depois das 18:00 horas e no horário do almoço, esse banco de capacitores fornece potência reativa à instalação sem existir o consumo da mesma, logo seria necessário o consumo de reativos correspondente a quantidade a ser retirada de KVAR.

A Tabela 3 apresenta a quantidade de potência reativa capacitiva a ser consumida pela indústria para alcançar o fator de potência desejado. Essa correção se faz necessária tendo em vista que quando não consumida essa potência reativa capacitiva, a mesma passará a ser injetada na rede de distribuição, onde a empresa estará sujeita a pagar por excedentes reativos, além de causar outros problemas supracitados.

Pode ser observado o valor máximo próximo a 12 kVAr, e mínimo próximo de 0 kVAr, sendo o valor médio próximo a 11,8 kVAr. Por tanto, ao analisarmos os valores médios de potência reativa, percebe-se que sem a geração fotovoltaica presente na empresa, o banco de capacitores fixo existente na empresa seria o suficiente para a correção do fator de potência durante o horário de funcionamento da empresa, mas, no entanto, a partir do fim do expediente de serviço a rede de distribuição continuaria recebendo aproximadamente 11 kVAr capacitivo, e ainda estaria sujeita a cobrança por excessivos reativos.

Tabela 3 - Potências, fator de potência, e kVAr necessário para fator de potência 0,98 capacitivo

<b>Potências, fator de potência, e kVAr necessário para fator de potência 0,98</b>						
<b>P3f</b>	<b>Q3f</b>	<b>S3f</b>	<b>FP3f</b>	<b>kVAr (0,980)</b>	<b>DATA</b>	<b>HORA</b>
2,07	-9,48	9,70	-0,21	-9,90	23/05/2022	00:00:00
1,66	-11,01	11,13	-0,15	-11,34	23/05/2022	00:30:00
1,44	-11,58	11,67	-0,12	-11,88	23/05/2022	01:00:00
1,39	-11,61	11,69	-0,12	-11,89	23/05/2022	01:30:00
1,38	-11,69	11,77	-0,12	-11,97	23/05/2022	02:00:00
1,37	-11,70	11,78	-0,12	-11,98	23/05/2022	02:30:00
1,36	-11,70	11,78	-0,12	-11,98	23/05/2022	03:00:00
1,42	-11,56	11,65	-0,12	-11,85	23/05/2022	03:30:00
1,38	-11,57	11,65	-0,12	-11,85	23/05/2022	04:00:00
1,37	-11,64	11,72	-0,12	-11,92	23/05/2022	04:30:00
1,34	-11,70	11,78	-0,11	-11,97	23/05/2022	05:00:00
1,28	-11,52	11,59	-0,11	-11,78	23/05/2022	05:30:00
1,25	-11,40	11,47	-0,11	-11,65	23/05/2022	06:00:00
1,24	-11,20	11,27	-0,11	-11,45	23/05/2022	06:30:00
1,42	-11,08	11,17	-0,13	-11,37	23/05/2022	07:00:00
-31,31	1,44	31,35	1,00	0,00	23/05/2022	12:00:00
-73,60	-11,75	74,53	-0,99	0,00	23/05/2022	12:30:00
-75,15	-11,69	76,05	-0,99	0,00	23/05/2022	13:00:00
3,54	-9,34	9,99	-0,36	-10,06	24/05/2022	00:00:00
3,51	-11,20	11,74	-0,30	-11,92	24/05/2022	00:30:00
3,19	-11,62	12,05	-0,27	-12,27	24/05/2022	01:00:00
2,87	-11,56	11,92	-0,24	-12,15	24/05/2022	01:30:00
2,85	-11,70	12,04	-0,24	-12,28	24/05/2022	02:00:00
2,86	-11,71	12,05	-0,24	-12,29	24/05/2022	02:30:00
2,79	-11,57	11,90	-0,23	-12,13	24/05/2022	03:00:00
2,71	-11,26	11,58	-0,23	-11,81	24/05/2022	03:30:00
2,66	-11,19	11,50	-0,23	-11,73	24/05/2022	04:00:00
2,67	-11,21	11,52	-0,23	-11,75	24/05/2022	04:30:00
2,68	-11,19	11,51	-0,23	-11,74	24/05/2022	05:00:00
2,63	-11,27	11,57	-0,23	-11,80	24/05/2022	05:30:00
2,61	-11,40	11,69	-0,22	-11,93	24/05/2022	06:00:00
2,59	-11,34	11,63	-0,22	-11,86	24/05/2022	06:30:00
2,48	-11,36	11,62	-0,21	-11,86	24/05/2022	07:00:00
-25,00	-0,91	25,01	-1,00	0,00	24/05/2022	12:00:00
-75,32	-11,41	76,18	-0,99	0,00	24/05/2022	12:30:00
-76,34	-11,74	77,24	-0,99	0,00	24/05/2022	13:00:00

Fonte: Autoria própria (2022).

Por fim, conclui-se que a geração fotovoltaica é a grande responsável pelo baixo fator de potência indutivo, tendo em consideração, que quando a indústria está consumindo potência

ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico, apenas potência reativa é fornecida pela concessionária, resultando no baixo fator de potência.

Portanto, se algumas medidas fossem tomadas o problema poderia ser solucionado. A melhor alternativa para esse caso seria a instalação de um banco automático de capacitores no QGBT da empresa, para fornecer a quantidade necessária de potência reativa solicitada pelos equipamentos, assim não importando o instante e quantidade necessária de potência reativa, o banco de capacitores automático fará a correção de forma precisa e otimizada. Desse modo, evitando que a potência reativa necessária seja entregue pela concessionária de energia elétrica.

Os bancos automáticos são muito usados nas indústrias, pois seu funcionamento se enquadra na maioria dos casos e seu custo não é muito elevado. A empresa WEG tem em seu catálogo de equipamentos, o banco automático de capacitores BCWA, desenvolvido para aplicações em instalações com geração fotovoltaica, com 6 ou 12 saídas, sendo essas saídas responsáveis por acionar as células capacitivas para correção do fator de potência.

A Tabela 4 apresenta as células capacitivas adequadas para a correção do fator de potência da indústria analisada. Ainda é importante avaliar se for possível e as condições dos capacitores presente na indústria permitirem, a utilização desses capacitores para correção do fator de potência, apenas complementando a potência reativa que falta, e em vez de serem fixos, passarem a ser acionados pelo controlador automático, desse modo, solucionando o baixo fator de potência capacitivo e indutivo.

Tabela 4– Dimensionamento do banco automático de capacitores

Tensão (V)	Potência reativa em kVAr	Capacitores (uF) ligação delta	Corrente nominal (A)
380	1	5,1 x 3	1,52
	1,5	9,2 x 3	2,26
	2,5	15,3 x 3	6
	5	30,6 x 3	16
	5	30,6 x 3	16
	7,5	45,9 x 3	7,6

Fonte: Adaptado de WEG (2009).

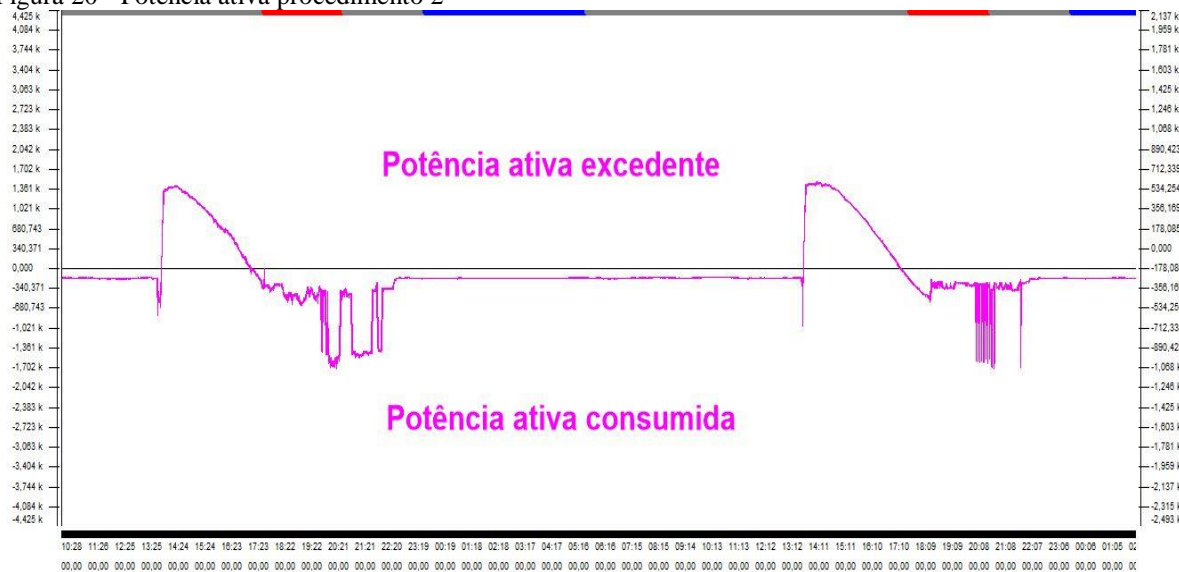
Por outro lado, o procedimento 2 retrata um experimento em escala reduzida, em um ambiente de laboratório, com o intuito de reforçar a tese que um sistema fotovoltaico tem um impacto negativo no fator de potência das indústrias em geral.

Tendo em vista que o inversor solar é de natureza monofásica as análises foram realizadas em relação a fase B, a qual está conectado os condutores responsáveis por entregar a

potência ativa gerada pelo sistema fotovoltaico e o transformador responsável por parte do consumo reativo da bancada.

Dessa forma, a Figura 20 apresenta a potência ativa para o período dos dias 17 e 18 de novembro. Essa figura pode ser analisada levando em consideração a linha de referência posta em zero, sabendo que toda parcela acima da linha de referência representa a potência ativa excedente do sistema fotovoltaico presente no módulo 1, ou seja, ao ser injetado uma quantidade de potência ativa no quadro geral de distribuição, a mesma potência é o suficiente para suprir o consumo da bancada e ainda exceder potência a rede de distribuição, e a parcela abaixo da linha de referência representa a potência consumida pela bancada nos momentos que não houve geração através do sistema fotovoltaico.

Figura 20 - Potência ativa procedimento 2



Fonte: Autoria própria (2022)

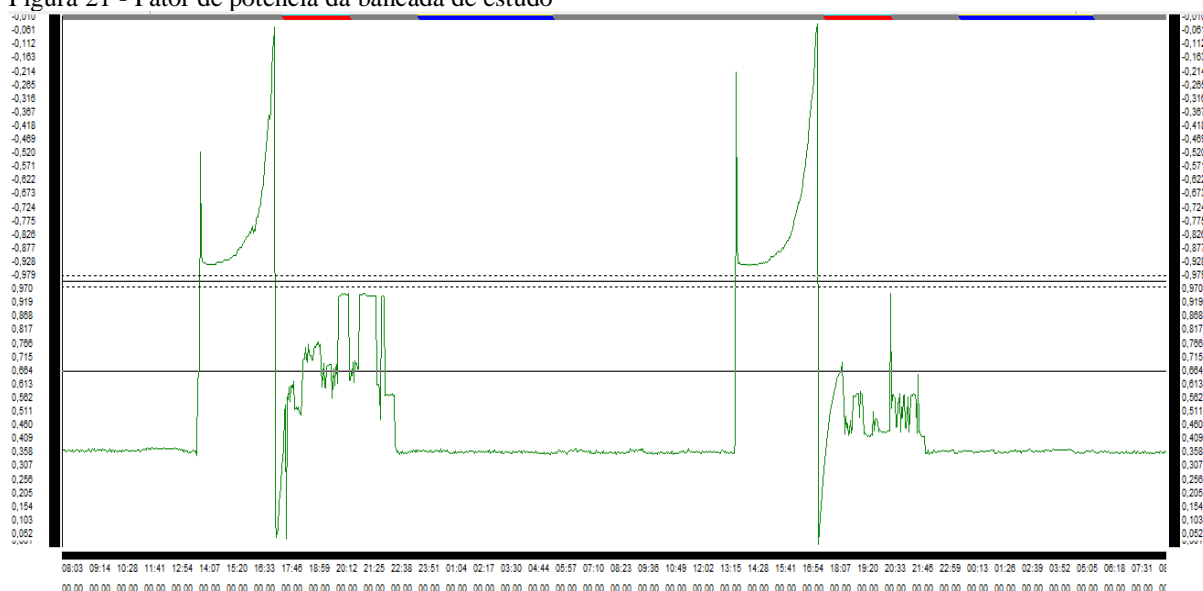
Com isso, percebe-se que a geração fotovoltaica está suprimindo a necessidade de potência ativa imposta pela bancada, de tal modo que, acaba não necessitando da participação da rede de distribuição. No entanto, devido a bancada ter em sua composição equipamentos que utilizam potência reativa e o inversor solar entregar apenas potência ativa, a parcela reativa obrigatoriamente é suprida pela rede. Desse modo, para a concessionária, ocorre um baixo fator de potência.

O baixo fator de potência decorrente da potência ativa injeta pelo sistema fotovoltaico, pode ser melhor interpretado se levado em consideração a Figura 2, relacionando o triângulo das potências antes da participação do sistema fotovoltaico, onde as potências ativa e reativa são supridas unicamente pela rede de distribuição e o ângulo entre essas potências é pequeno,

e após a entrada do sistema fotovoltaico, onde a rede de energia passa a mandar apenas potência reativa, assim aumentando o ângulo entre as potências e, conseqüentemente, diminuindo o fator de potência, fica entendido a relação do impacto negativo de um sistema fotovoltaico em um ambiente industrial.

Portanto, a Figura 21 apresenta o fator de potência para o mesmo período dos dias 17 e 18 de novembro.

Figura 21 - Fator de potência da bancada de estudo



Fonte: Autoria própria

É possível perceber que anterior ao horário das 14 horas o fator de potência se mantém praticamente constante, em 0,35 capacitivo, no entanto, após esse horário esse fator de potência sofre uma mudança brusca, chegando a valores críticos de, aproximadamente, 0 indutivo, e, conseqüentemente, nesse horário o sistema fotovoltaico está ligado.

O fator de potência capacitivo diz respeito ao transformador que está conectado no período integral dos ensaios diretamente no barramento da fase B. Por outro lado, a mudança brusca no fator de potência está relacionada com o acionamento do restante da bancada em paralelo com a ligação do sistema fotovoltaico.

Ainda pode-se afirmar que no período aproximado das 18:00 até as 22:30 horas a instabilidade do fator de potência é gerada pelo consumo variável da bancada sem a injeção de energia fotovoltaica no laboratório, afirmando também que alguns equipamentos elétricos presentes na bancada contribuem para um baixo fator de potência total na instalação.

Visto isso, ao comparar os dois procedimentos, percebe-se que em ambos ao ser injetado a potência ativa advinda do sistema fotovoltaico é inevitável a diminuição do fator de potência,

por tanto, após as devidas simulações e análises feitas nesses procedimentos, pode-se afirmar que em um ambiente industrial ao ser inserido um sistema fotovoltaico, sem os devidos cuidados, esse ambiente tende a ter um impacto negativo no fator de potência assim acarretando inúmeros problemas relacionados a qualidade da energia elétrica para a instalação elétrica da unidade consumidora e para a rede de distribuição de energia elétrica.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Micro e Minigeração distribuída tem um papel fundamental na busca por soluções sustentáveis na demanda energética do Brasil e do mundo, logo a geração solar fotovoltaica surge como uma alternativa de complemento ao sistema elétrico de potência em locais já atendidos pelo sistema elétrico convencional.

No entanto, a geração fotovoltaica, quando inserida em indústrias, tem um impacto negativo no fator de potência, causando alguns problemas na instalação elétrica, além de deixar a indústria sujeita a cobranças por consumo excessivo de reativo, conforme legislação vigente.

Visto isso, quando se iniciou o estudo procurou-se analisar quais os reais problemas causados por um baixo fator de potência, e qual o impacto da geração fotovoltaica no fator de potência das indústrias, observando-se que muitas vezes esse é um tema não muito tratado, por falta de conhecimento ou interesse por parte dos fornecedores desses sistemas.

Com tudo, após as devidas análises e conclusões percebe-se que esse fato é algo que deve ser estudado para que gradativamente alguns problemas relacionados com a qualidade de energia, eficiência energética e economia com energia elétrica possam ser superados, apresentando vantagens ao consumidor final e a distribuidora de energia elétrica da região.

Visto isso, é importante salientar que existem várias maneiras de corrigir esse baixo fator de potência, onde pode-se destacar a correção do fator de potência através de capacitores, sendo possível instalar e controlar esses capacitores de diversas maneiras. Deste modo, se torna indispensável analisar cada caso em específico para que possa ser identificado o melhor método, sendo que não existe forma padronizada para tal correção.

A montagem da bancada de estudo teve o intuito de agregar argumentos para a hipótese que foi proposta no respectivo estudo, assim analisando um cenário em escala reduzida, sendo possível executar as devidas análises em laboratório e, por fim, comparar os dois procedimentos para a validação de resultados.

Portanto, após o estudo de caso real e as simulações em laboratório, as análises foram apresentaram a real influência exercida e os impactos causados na indústria analisada.

Ademais, após as análises, comprovou-se que sistemas fotovoltaicos quando instalados em indústrias, tem um impacto negativo no fator de potência, assim, faz-se necessário a adequação, com o intuito de amenizar e/ou zerar os problemas causados por um baixo fator de potência, onde a melhor alternativa para indústria analisada é a implementação de um banco automático de capacitores de aproximadamente 21 kVAr, para correção precisa e otimizada desse problema.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa n. 687**, 2015.
- ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid***. 75 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019.
- BARROS, Benjamim Ferreira D.; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo L. **Gerenciamento de Energia: ações administrativas**. Rio de Janeiro: Editora Saraiva, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536533063/>. Acesso em: 28 mai. 2022.
- BARROS, Leonardo Lehmann. **Requisitos para fornecimento de energia elétrica para recarga de veículo elétrico em Curitiba através de sistemas fotovoltaicos e concessionária de energia**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- BOYLESTD, Robert L. **Introdução a análise de circuitos**. 12 ed. São Paulo, Pearson Universidades, 2011.
- CAPELLI, Alexandre. **Energia Elétrica: Qualidade e Eficiência para Aplicações Industriais**. Rio de Janeiro: Editora Saraiva, 2013. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518534/>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- COTRIM, Ademaro. **Instalações elétricas**. 5 ed. São Paulo, Pearson, 2008.
- CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. São Paulo: Grupo GEN, 2021. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637936/>. Acesso em: 28 mai. 2022.
- EMBRASUL. **Manual de Instalação e operação RE6000**. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/1M5sBzsWHxLx0Ua5Zf5\\_uFngTClutbTca/view](https://drive.google.com/file/d/1M5sBzsWHxLx0Ua5Zf5_uFngTClutbTca/view). Acesso em: mai. 2022.
- FREITAS, Taise Roberto de; SANTIN, Maria Carolina Yoshida; NASCIMENTO, José Gustavo Mateus; MARQUES, Claudia Scoton Antônio; PINTO, Bruno Henrique. O Sistema Fotovoltaico como Solução Alternativa na Produção de Energia Elétrica no Brasil. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental São Bernardo do Campo/SP, **Anais...** Disponível em <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/X-009.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2022.
- GASPARIN, Fernanda Bach. A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, 2022.
- GOLÇALVES, Livia Larissa de Carvalho. **Energia Solar: Oportunidades e Ameaças para a Geração de Energia Elétrica no Brasil**. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2019.
- GUSMAN, Lucas Soares et al. Análise dos efeitos da utilização de um sistema fotovoltaico no fator de potência de uma empresa agroindustrial. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2018, **Anais...**, Gramado, RS, 2018.

MARCHI, Diego. **Projeto e estudo de viabilidade técnica e financeira da correção do fator de potência em indústria têxtil utilizando bancos de capacitores**. 146p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2019.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. São Paulo: Editora ITC, 2022.

MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe. **Eficiência dos sistemas elétricos industriais com aplicação de capacitores**. Palestra, XI Semana de Engenharia, VI Seminário Fluminense de Engenharia, 2009. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/308689791\\_EFICIENCIA\\_D](https://www.researchgate.net/publication/308689791_EFICIENCIA_D)

[OS\\_SISTEMAS\\_ELETRICOS\\_INDUSTRIAIS\\_COM\\_APLICACAO\\_DE\\_CAPACITORE](#).

Acesso em: 05 mai. 2022.

OLIVEIRA, João Paulo Silva. **Análise do fator de potência medido em ambiente industrial contendo geração distribuída**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2017.

RGE Sul. **NTD 014-Norma de acesso de geração distribuída**, 2022.

SILVA; Aline Késia Ferreira; VIEIRA, Romênia Gurgel; GUERRA, Maria Izabel da Silva. **Estudo da correção do fator de potência de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró, Fortaleza, 2018.

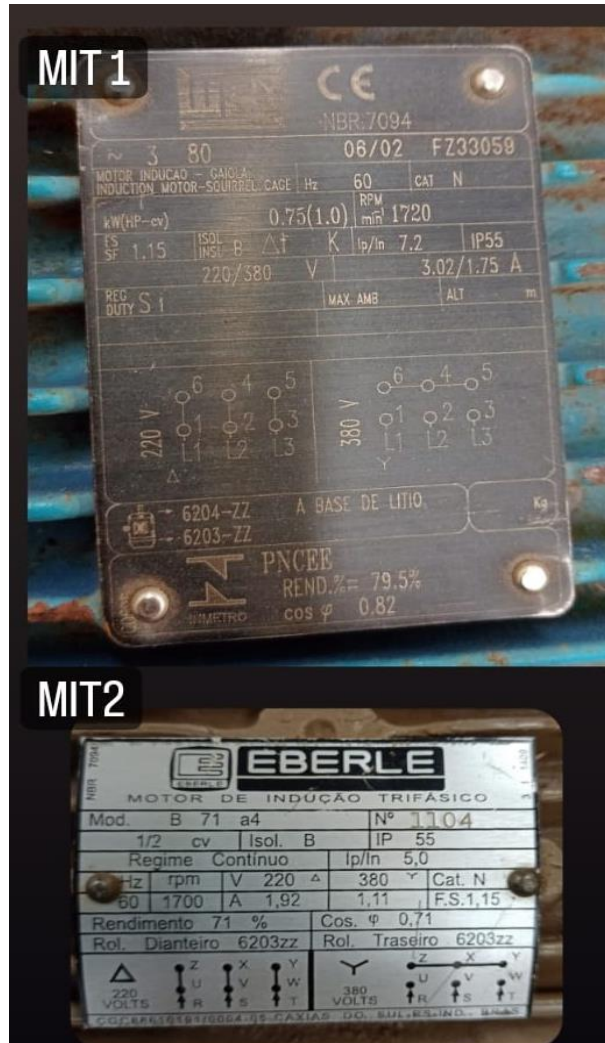
VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Manual para correção do fator de potência**. Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2009. Disponível em:

<http://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-dofator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2022.

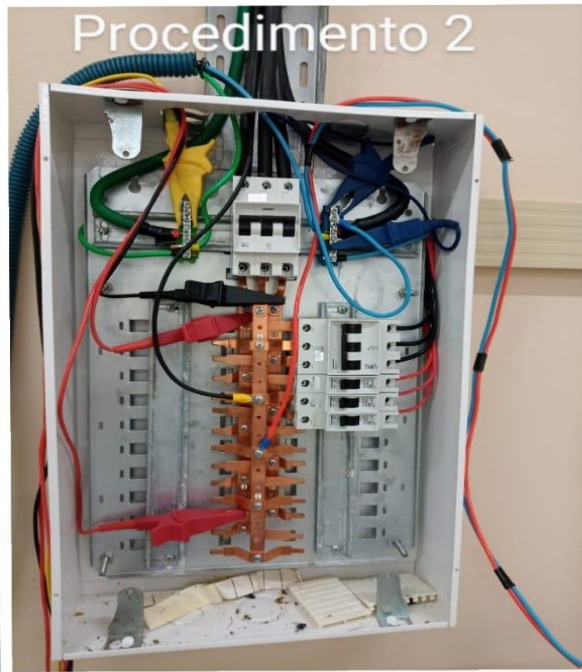
## APÊNDICE A – Características técnicas dos motores de indução trifásicos

As plaquinhas de identificação dos motores de indução trifásicos, tem a função de orientar ao operador as características técnicas do equipamento, assim possibilitando ao operador a correta operação, não colocando o equipamento em situações acima dos seus limites de operação.



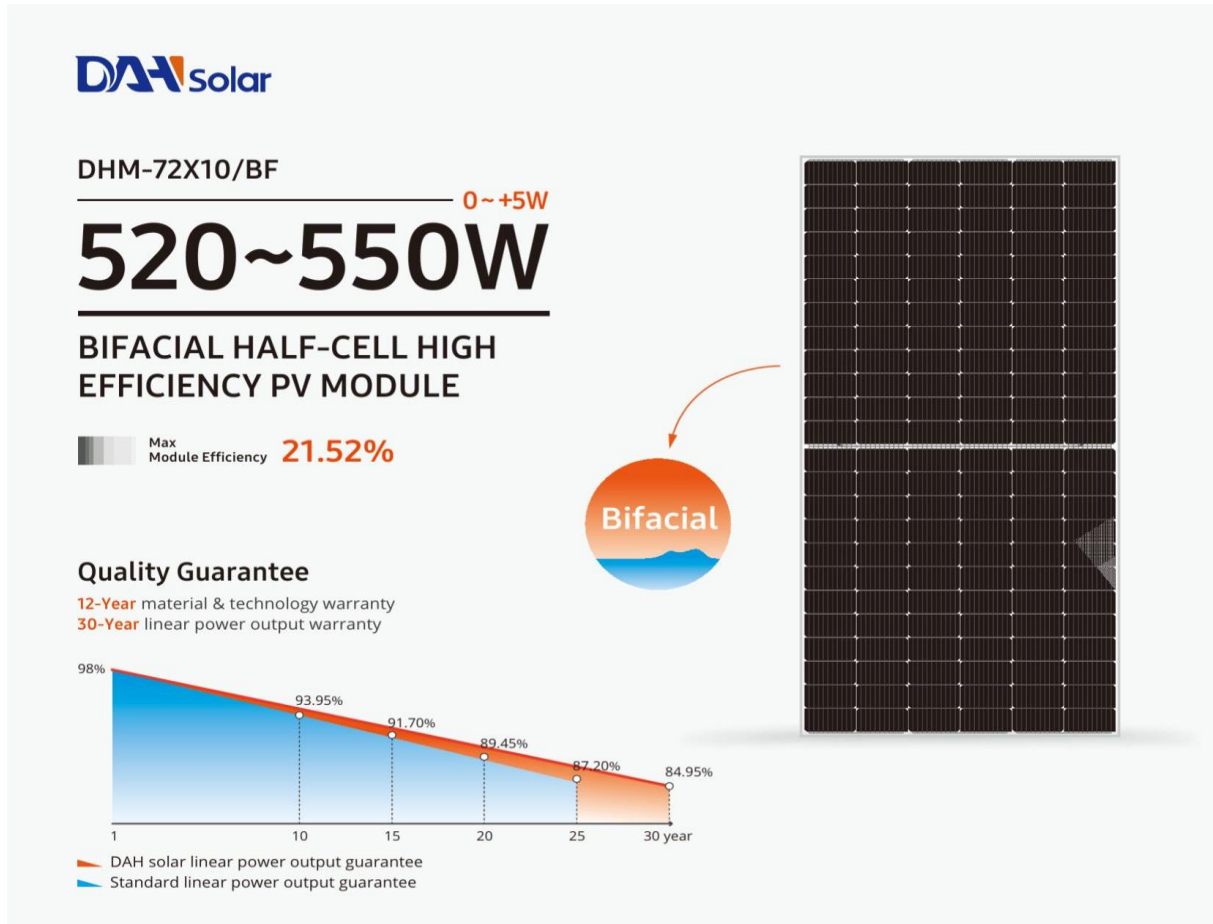
## APÊNDICE B – QGBT procedimentos 1 e 2

O apêndice B apresenta os QGBT dos procedimentos 1 e 2, os quais foram conectados o analisador de energia para as devidas análises. Nos QGBT também são conectados os sistemas fotovoltaicos juntamente com os circuitos da unidade consumidora.



## ANEXO A – Datasheet módulo fotovoltaico DAH SOLAR

O datasheet tem como fundamentação um aglomerado de dados e informações técnicas de um equipamento em específico. Nesse documento é possível encontrar as características elétricas, de eficiência, estruturais e de peso dos módulos fotovoltaico utilizados no procedimento 2.



**Up to 20% generation gain from the rear-side**  
 The grid line transparent back sheet increases the back reflection, and the power generation gain increases with the back light



**More than 25% module weight lighter**  
 Compared with the dual glass module, the weight is reduced by 25%, which is easy to install and save the cost of BOS



**Higher generation efficiency and stability**  
 Low current, low hotspot and better low-irradiance performance, more stable power generation



**Longer power output life span**  
 Anti PID, low acetic acid concentration, ensure the module linear power output for 30 years



**Strong environmental adaptability**  
 Certified by Dust-Sand, Salt-Mist, Ammonia etc. weather resistance tests



**Select Grade A crystalline silicon solar cells**  
 Grade A crystalline silicon solar cells make high-power output with cost-effective

### Comprehensive Products and System Certificates



IEC 61215 / IEC 61730 / CE / INMETRO  
 OHSAS 18001-  
 2007/International standards for occupational health & safety  
 ISO 14001-  
 2015/Standards for environmental management system  
 ISO 9001-  
 2015/Quality management system

# DHM-72X10/BF 520~550W

Design	Mechanical Specification	
	<b>Cells Type</b> <b>Mono 182×91mm</b>	<b>Dimension (L×W×T)</b> <b>2256×1133×35mm</b>
	<b>Weight</b> <b>28.7kg</b>	<b>Packing</b> <b>31pcs/pallet, 620pcs/40HQ</b>
	<b>Output Cable (Including connector)</b> 4.0mm <sup>2</sup> , 300/400mm in length, length can be customized	<b>No. of Cells</b> 144 (6×24)
	<b>Glass</b> 3.2mm High Transmission, Antireflection Coating	<b>Junction box</b> IP68, 3 Bypass Diodes
	<b>Connector</b> MC4 Compatible	
<b>Operating Parameters</b>		
<b>Maximum system voltage</b>		1000V/1500V DC
<b>Operating Temperature</b>		-40 ~ +85°C
<b>Maximum series fuse rating</b>		30A
<b>Snow load, frontside</b>		5400Pa
<b>Wind load, backside</b>		2400Pa
<b>Nominal operating cell temperature</b>		45°C±2°C
<b>Application level</b>		Class A

## Electrical Characteristics

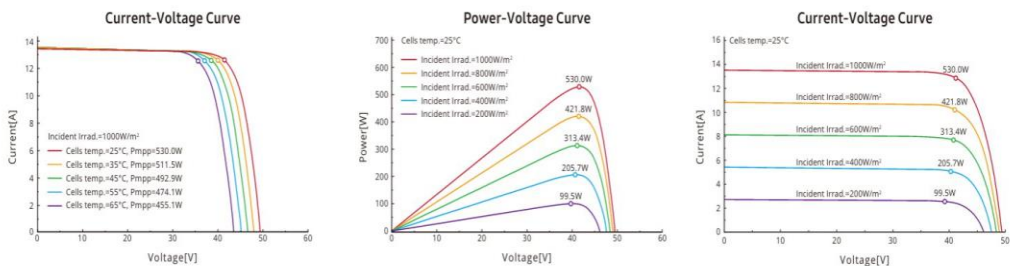
Module Type	DHM-72X10/BF													
	STC	Noct	STC	Noct	STC	Noct	STC	Noct	STC	Noct	STC	Noct	STC	Noct
Maximum Power (Pmax)	520W	387W	525W	391W	530W	394W	535W	398W	540W	402W	545W	405W	550W	409W
Open-circuit Voltage (Voc)	49.00V	45.96V	49.20V	46.15V	49.40V	46.34V	49.60V	46.52V	49.80V	46.71V	50.00V	46.90V	50.20V	47.09V
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.2V	38.65V	41.4V	38.83V	41.6V	39.02V	41.8V	39.21V	42.0V	39.40V	42.2V	39.58V	42.4V	39.77V
Short-circuit Current (Isc)	13.42A	10.84A	13.48A	10.89A	13.54A	10.94A	13.60A	10.99A	13.66A	11.04A	13.72A	11.09A	13.78A	11.13A
Maximum Power Current (Imp)	12.62A	10.01A	12.68A	10.06A	12.74A	10.11A	12.80A	10.15A	12.86A	10.20A	12.91A	10.24A	12.97A	10.29A
Module Efficiency (STC)	20.34%		20.54%		20.74%		20.90%		21.10%		21.32%		21.52%	

STC: Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5  
 NOCT: Standard Test Environment : Irradiance 800W/m<sup>2</sup>, Ambient temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s

Refer Bifacial Factor: 70±5%  
 Temperature Coefficient of Voc: -0.31%/°C  
 Temperature Coefficient of Isc: 0.05%/°C  
 Temperature Coefficient of Pmax: -0.35%/°C

Double-sided power generation parameters (Rear gain)								
5%	Maximum Power (Pmax)	546W	551W	557W	562W	567W	572W	578W
	Module Efficiency (%)	21.36%	21.57%	21.77%	21.98%	22.18%	22.39%	22.59%
15%	Maximum Power (Pmax)	598W	604W	610W	615W	621W	627W	633W
	Module Efficiency (%)	23.40%	23.62%	23.85%	24.07%	24.30%	24.52%	24.75%
25%	Maximum Power (Pmax)	650W	656W	663W	669W	675W	681W	688W
	Module Efficiency (%)	25.43%	25.67%	25.92%	26.16%	26.41%	26.65%	26.90%

## I-V Curve (DHM-72X10/BF-530W)



## ANEXO B – Datasheet inversor solar SOFAR SOLAR

O datasheet tem como fundamentação um aglomerado de dados e informações técnicas de um equipamento em específico. Nesse documento é possível encontrar as características elétricas, de eficiência, estruturais e de peso do inversor solar utilizado no procedimento 2.





**SOFAR**  
**3K~6KTLM-G3**

3000/3600/4000/4600/5000/6000

**Single-Phase**      **Dual-MPPT**

<b>0</b> Built-in zero export function	<b>AFCI</b> Optional AFCI function
<b>Hand</b> Compact design, light in weight	<b>Thermometer</b> Natural cooling, no fans, low noise
<b>98.4%</b> Max. efficiency up to 98.4%	<b>2 MPPT</b> Two MPP trackers with 1.5*DC overload
<b>Wi-Fi</b> Smart monitoring, remote firmware upgrade	

✉ info@sofarsolar.com      🌐 www.sofarsolar.com      [f](#) [t](#) [in](#) [YouTube](#)

Datasheet	SOFAR 3KTLM-G3	SOFAR 3.6KTLM-G3	SOFAR 4KTLM-G3	SOFAR 4.6KTLM-G3	SOFAR 5KTLM-G3	SOFAR 5KTLM-G3-A	SOFAR 6KTLM-G3
<b>Input (DC)</b>							
Recommended Max. PV input power	4500Wp	5400Wp	6000Wp	7000Wp	7500Wp	7500Wp	9000Wp
Max DC power for single MPPT	3500W	3500W	3500W	3500W	3750W	3750W	4500W
Number of MPP trackers				2			
Number of DC inputs				1 for each MPPT			
Max. Input voltage				600V			
Start-up voltage				90V			
Rated input voltage				380V			
MPPT operating voltage range				80V-550V			
Full power MPPT voltage range	200V-500V	200V-500V	200V-500V	200V-500V	210V-500V	210V-500V	260V-500V
Max. Input MPPT current				15A/15A			
Max. input short circuit current per MPPT				22.5A/22.5A			
<b>Output (AC)</b>							
Rated power	3000W	3680W	4000W	4600W	5000W	5000W	6000W
Rated apparent power	3000VA	3680VA	4000VA	4600VA	5000VA	5000VA	6000VA
Max. AC power	3300VA	3680VA	4400VA	4600VA	5500VA	5000VA	6000VA
Nominal output current	13.6A	16A	18.2A	21A	22.7A	21.7A	27.3A
Max. Output current	15A	16A	20A	23A	25A	21.7A	29A
Nominal grid voltage	L/N/PE, 220Vac, 230Vac, 240Vac						
Grid voltage range	180Vac-276Vac (According to local standard)						
Nominal frequency	50Hz/60Hz						
Grid frequency range	45Hz-55Hz/54Hz-66Hz (According to local standard)						
Active power adjustable range	0-100%						
THDi	<3%						
Power factor	1 default (adjustable +/- 0.8)						
<b>Performance</b>							
Max efficiency	98.2%	98.2%	98.2%	98.4%	98.4%	98.4%	98.4%
European efficiency	97.3%	97.3%	97.3%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%
<b>Protection</b>							
DC reverse polarity protection	Yes						
DC switch	Optional						
AFCI protection	Optional						
Protection class/overvoltage category	I/III						
Safety protection	Anti islanding, RCMU, Ground fault monitoring						
SPD	MOV: Type III standard						
<b>Communication</b>							
Standard communication mode	RS485/USB, Optional: WiFi/GPRS/4G						
<b>General Data</b>							
Ambient temperature range	-30°C ~ +60°C						
Self-consumption at night	< 1W						
Topology	Transformerless						
Degree of protection	IP65						
Allowable relative humidity range	0-100%						
Max. Operating altitude	4000m						
Noise	< 25dB						
Weight	9.2kg	9.2kg	9.2kg	10kg	10kg	10kg	10kg
Cooling	Natural						
Dimension	349*344*164mm						
Display	LCD&Bluetooth+APP						
Standard warranty	10 years						
<b>Standard</b>							
EMC	EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12						
Safety standards	IEC62109-1/2, IEC62116, IEC61727, IEC-61683, IEC60068(1,2,14,30)						
Grid standards	VDE-AR-N 4105, VDE V 0126-1-1, V 0124-100, AS/NZS 4777, CEI 0-21, G98/G99, C10/11, EN 50549, RD 1699						