

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PATRYK HENRIQUE DA FONSECA**

**ANÁLISE DO IMPACTO NA QUALIDADE DE ENERGIA CAUSADO  
PELA CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA DE  
ATÉ 50kW**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2019**

**PATRYK HENRIQUE DA FONSECA**

**ANÁLISE DO IMPACTO NA QUALIDADE DE ENERGIA CAUSADO  
PELA CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA DE  
ATÉ 50kW**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen  
Coorientador: Me. Zeno L. I. Nadal (Copel)

**CURITIBA**

**2019**

PATRYK HENRIQUE DA FONSECA

Análise do impacto na qualidade de energia causado pela conexão de geração distribuída fotovoltaica de até 50kW

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 02 de Julho de 2019.

---

Prof Antônio Carlos Pinho ,Dr  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna,Dra  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

**ORIENTAÇÃO**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Paulo Cícero Fritzen, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Paulo Cícero Fritzen, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Zeno Luiz Iensen Nadal, Me  
Copel Distribuição S.A.  
Coorientador

---

Zeno Luiz Iensen Nadal, Me  
Copel Distribuição S.A.  
Coorientador

---

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jair Urbanetz Junior, Dr  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

## **AGRADECIMENTOS**

Para a elaboração deste projeto houveram diversas pessoas envolvidas, as quais a minha gratidão necessita ser expressada. O apoio veio de diversas formas, através de um auxílio, uma conversa, ideias e também de gente que me ajudou na prática com relação aos testes que precisaram ser realizados. Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Cícero Fritzen por aceitar minha ideia, me incentivar e também auxiliar durante todo o processo. Agradeço também ao meu colega Copeliano e Coorientador, Zeno Luiz lensen Nadal pela ajuda dada com as informações que foram necessários para que esta pesquisa pudesse acontecer, estando sempre disposto em ajudar e dispondo de seu tempo mesmo em meio à rotina frenética de seu trabalho. E não posso deixar de reconhecer à Copel pelo incentivo e fornecimento de dados que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a minha família, por seu total apoio, dando críticas, sugestões e ideias, bem como fornecendo toda a base que necessitava para desenvolver este trabalho. Um especial agradecimento também à minha grande companheira e apoiadora esposa, que deu suporte quando muitas vezes precisei levar o trabalho para casa, compreendendo que este momento era para estudo desta causa, me apoiando e incentivando durante todo o processo.

Entretanto, o agradecimento principal vai ao meu Deus, que em todo momento me deu forças para seguir em frente, e quando algo não deu certo, sua mão me consolou, me acalmando e me dando novo ânimo, direcionando cada momento da elaboração deste trabalho.

## RESUMO

DA FONSECA, Patryk Henrique. **ANÁLISE DO IMPACTO NA QUALIDADE DE ENERGIA CAUSADO PELA CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA DE ATÉ 50kW**. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O presente trabalho visa fornecer informações sobre o estado atual da geração distribuída no Brasil, tanto no quesito de normatização, quanto em número de conexões, bem como apresenta à concessionária o resultado de medições realizadas através de analisador de qualidade de energia, em uma instalação comercial que possui um sistema fotovoltaico conectado à rede, tendo o foco nos parâmetros de qualidade de energia definidos em normas, com o intuito de identificar se no ponto de conexão os parâmetros estão conformes. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre quais os possíveis impactos que a GD pode ter em um sistema de distribuição radial que é o mais comum hoje no Brasil. Verificou-se através dos resultados e gráficos compilados que no ponto de conexão existiu um pequeno aumento na tensão e não houveram grandes alterações nas distorções harmônicas de tensão.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída. Fotovoltaico. SFCR. Qualidade de Energia.

## ABSTRACT

DA FONSECA, Patryk Henrique. **IMPACT ANALYSIS ON ENERGY QUALITY CAUSED BY THE CONNECTION OF PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION UP TO 50kW**. 2019. 61p. Final paper in Electrical Engineering - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2019.

The present work aims to provide information on the current state of distributed generation in Brazil, both in terms of standardization and number of connections, as well as presenting to the energy distributor the results of measurements performed through an energy quality analyzer in a commercial facility which has a photovoltaic system connected to the grid, focusing on the energy quality parameters defined in standards, in order to identify whether the parameters are in connection point. A bibliographical research was carried out on the possible impacts that DG can have on a radial distribution system that is the most common in Brazil today. It was verified through the results and graphs compiled that at the point of connection there was a small increase in voltage profile and not many changes in voltage harmonic distortion.

**Keywords:** Distributed Generation. Photovoltaic. DG-PV. Power Quality.

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

A	Ampère
BT	Baixa Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
GWh	Giga-watt-hora
Hz	Hertz
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt ampère
kVAr	Quilovolt ampère-reactivo
kW	Quilowatt
kWh/m <sup>2</sup> *dia	Quilowatt-hora por metro quadrado-dia
MW	Megawatt
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
ReN	Resolução Normativa
THD	Taxa de Distorção Harmônica Total
TWh	Tera-watt-hora
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
V	Volt
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado
Wh/m <sup>2</sup>	Watt-Hora por metro quadrado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração distribuída vs. Geração Centralizada .....	17
Figura 2 – Geração de energia no Brasil e fontes empregadas. ....	18
Figura 3 – Comparação de Irradiação do Paraná com Alemanha .....	23
Figura 4 – Curva de irradiância diária.....	26
Figura 5 – Componentes do módulo fotovoltaico .....	27
Figura 6 – Curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico.....	28
Figura 7 – Curva $P \times V$ de um módulo fotovoltaico .....	29
Figura 8 – Curva característica de um sistema fotovoltaico .....	29
Figura 9 – Influência da radiação solar sob um módulo fotovoltaico .....	30
Figura 10 – Influência da temperatura sob um módulo fotovoltaico .....	30
Figura 11 – Classificação dos sistemas fotovoltaicos.....	31
Figura 12 – Autoconsumo .....	32
Figura 13 – Excedente de energia .....	33
Figura 14 – Energia fornecida pela Concessionária .....	33
Figura 15 – Componentes de um SFCR .....	34
Figura 16 – Posição do Consumidor. ....	36
Figura 17 - Topologia de Medição.....	37
Figura 18 – Comportamento da tensão ao longo do alimentador.....	50
Figura 19 – Sistema Genérico .....	50



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Projeção da potência instalada de GD-FV até 2024 .....	11
Gráfico 2 – Perfil de tensão na distribuição .....	12
Gráfico 3 – Aumento da Tensão ao conectar GD.....	12
Gráfico 4 – Evolução de número de conexões de GD Fotovoltaica no Brasil 2007- Junho 2019 .....	21
Gráfico 5 – Potência instalada por tipo de fonte .....	21
Gráfico 6 – Número de Conexões de GD por estado .....	22
Gráfico 7 – Potência de GD instalada por estado .....	22
Gráfico 8 – Curva de demanda da Instalação .....	38
Gráfico 9 – Detalhe de demanda e geração no dia 05/05/2019 .....	39
Gráfico 10 – Perfil de Tensões do dia 05/05/2019 .....	39
Gráfico 11 – Tensão nominal média por fase .....	40
Gráfico 12 – Perfil de Tensão da Fase A.....	41
Gráfico 13 – Perfil de Tensão da Fase B.....	41
Gráfico 14 – Perfil de Tensão Fase C .....	42
Gráfico 15 – Registros de tensão do inversor .....	44
Gráfico 16 – Distorção harmônica total por registro .....	46
Gráfico 17 – Relação da Tensão com a Potência Ativa .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Registros por faixa .....	43
Tabela 2 - Registros mínimos e máximos de tensão .....	44
Tabela 3 - Demais parâmetros no dia 28 as 07h50 .....	45
Tabela 4 - Distorção harmônica .....	45
Tabela 5 - Limites de tensão em p.u.....	51
Tabela 6 - Resposta às condições anormais de tensão .....	52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 TEMA.....	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	13
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	13
1.4 OBJETIVOS.....	14
1.4.1 Objetivo geral.....	14
1.4.2 Objetivos específicos .....	14
1.5 JUSTIFICATIVA.....	14
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	15
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2. CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b> .....	<b>17</b>
2.1 DEFINIÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	17
2.2 GD NO BRASIL .....	18
2.3 GD NO PARANÁ .....	22
<b>3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>25</b>
3.1 ENERGIA SOLAR .....	25
3.1.1 Radiação Solar .....	25
3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	26
3.2.1 Arranjos das Conexões .....	27
3.2.2 Curvas Características.....	27
3.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	30
3.3.1 Autoconsumo .....	32
3.3.2 Excedente de Energia .....	32
3.3.3 Consumo pela rede da Concessionária.....	33
3.3.4 Inversores.....	34
<b>4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA</b> .....	<b>36</b>
4.1 COLETA DE DADOS .....	37
4.2 MEDIÇÕES DO NÍVEL DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	39
4.2.1 Registros por Faixa Adequada, Precária e Crítica.....	42
4.2.2 Registros de Máximos e Mínimos .....	43
4.3 MEDIÇÕES DE QUANTIDADE DE HARMÔNICOS NA INSTALAÇÃO .....	45
<b>5. IMPACTOS DE UM SFCR NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	<b>47</b>
5.1 QUALIDADE DO NÍVEL DE TENSÃO.....	49
5.2 QUALIDADE DA QUANTIDADE DE HARMÔNICOS .....	53
5.3 POSSÍVEIS ALTERNATIVAS DE CONTORNO AOS IMPACTOS.....	55
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>57</b>
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	57
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>

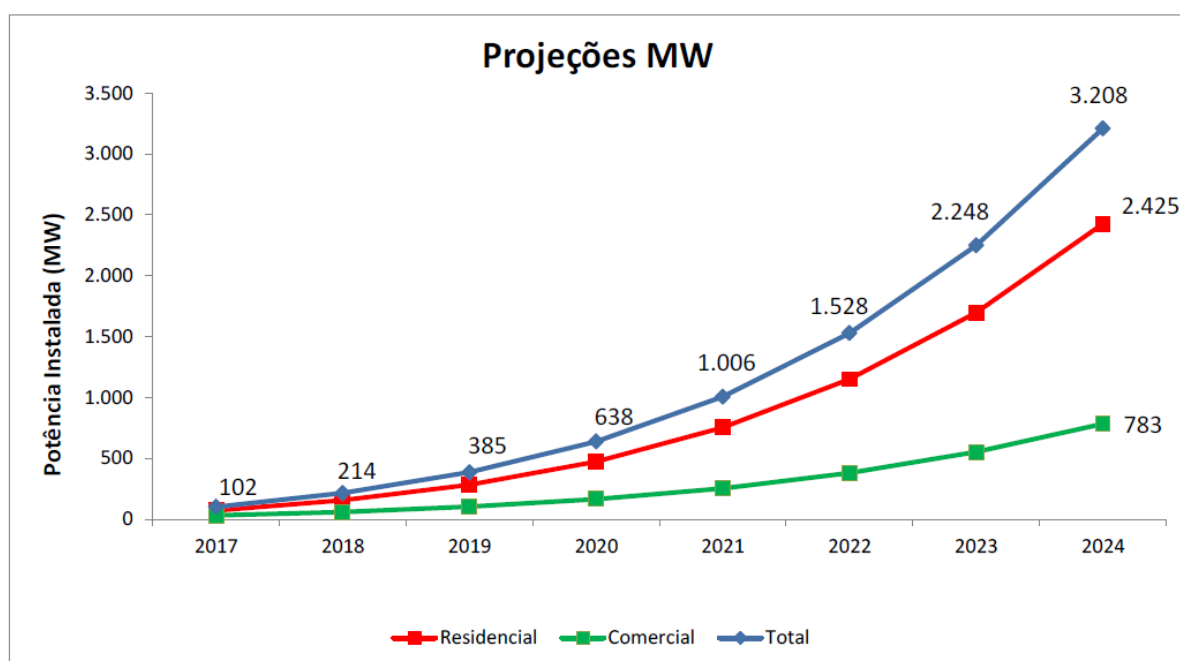
## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica tem crescido largamente com o passar dos anos no Brasil, dados de 2012 mostram um consumo de energia elétrica de 498 TWh enquanto em 2017 obteve-se um consumo de 526 TWh (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Este aumento no consumo pode refletir um aumento na produtividade dos setores industriais, comerciais e de serviços, os quais por sua vez compõe parte da economia brasileira aumentando assim a qualidade de vida da sociedade (PALUDO, 2014).

### 1.1 TEMA

O presente trabalho baseia-se nas projeções de crescimento da microgeração distribuída, sobretudo a fotovoltaica conforme a nota técnica nº056/2017 da ANEEL explicitada no Gráfico 1 (ANEEL, 2017b):

**Gráfico 1 – Projeção da potência instalada de GD-FV até 2024**

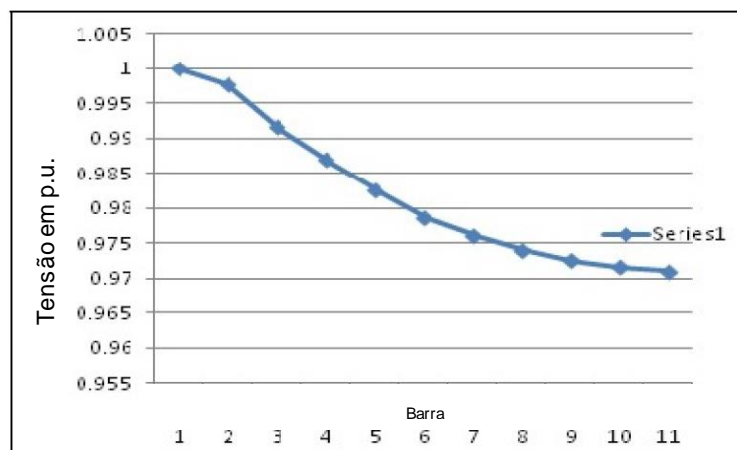


Fonte: ANEEL (2017b)

A alta penetração de Geração Distribuída (GD), impacta os níveis de tensão ao longo de um alimentador, conforme demonstram Patil, Girgaonkar e Musunuri

(2014). O perfil de tensão tende a diminuir ao longo da rede de distribuição radial, conforme Gráfico 2 a seguir, sendo que a conexão de GD faz que esta tensão aumente até próximo a subestação.

**Gráfico 2 – Perfil de tensão na distribuição**



Fonte: Adaptado de PATIL, GIRGAONKAR e MUSUNURI (2014)

Considerando-se um alimentador radial, onde as conexões de GD estejam todas na barra 11, e existindo injeção de potência para a rede, é apresentado o gráfico a seguir:

**Gráfico 3 – Aumento da Tensão ao conectar GD**



Fonte: Adaptado de PATIL, GIRGAONKAR e MUSUNURI (2014)

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O crescimento da geração de energia renovável e com destaque para a energia fotovoltaica na qual teve um grande crescimento em um pequeno intervalo de tempo, conforme a nota técnica nº056/2017 da ANEEL (2017b), sendo este o grande motivador do presente estudo. Este trabalho visa a analisar os impactos da conexão de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) de 45 kW em uma instalação no trecho de baixa tensão.

Neste trabalho será estudado majoritariamente o comportamento da tensão eficaz em regime permanente, e distorção harmônica próximo aos terminais do medidor de energia, onde se encontra a interconexão da rede do cliente com a rede da concessionária na intenção de analisar gráficos que descrevem o comportamento das grandezas elétricas. Estes dados poderão fornecer informações relevantes à concessionária para estudo da qualidade de energia.

## 1.3 PROBLEMAS E PREMISAS

Devido ao caráter intermitente da geração de energia através do sistema fotovoltaico como por exemplo, a geração fotovoltaica de energia elétrica possui grandes variações de geração no período de 24 horas, pois não pode ser gerada no período da noite ou ainda em alguns empreendimentos uma geração excedente nos finais de semana onde o consumo é menor. Dada à esta característica, faz-se necessário saber se esta geração está sendo conforme os limites de qualidade definidos pelos Procedimentos de Distribuição (PRODIST).

Pelo fato de a unidade geradora analisada neste trabalho abastecer uma carga crítica, como o centro de operações da distribuição da COPEL em conjunto com um grupo motor gerador, e possuir uma geração de caráter intermitente, não existe um estudo elaborado quanto ao comportamento da tensão nesta instalação, podendo ocorrer níveis de sobretensão em pontos próximos ao gerador, harmônicos na tensão e corrente que ainda não foram estudadas para o caso específico, bem como seu perfil de carga e tensão.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Analisar em regime permanente o impacto causado no perfil de tensão e distorção harmônica devido à conexão de um sistema gerador fotovoltaico, sem elementos acumuladores, em baixa tensão, no comportamento da interconexão da instalação do consumidor com a rede da concessionária.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho será necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Revisar a bibliografia sobre geração distribuída.
- Levantar características técnicas do SFCR bem como seu perfil de geração, tanto em dias ensolarados quanto encobertos.
- Caracterizar perfil de tensão nos terminais do medidor de energia elétrica.
- Analisar perfil de cargas fora do horário comercial.
- Avaliar possíveis sobretensões e índice de harmônicos nos terminais do medidor.
- Avaliar as relações entre potência gerada, potência consumida e perfil de tensão.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Após a publicação da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL em 2012 ampliou-se o advento da geração distribuída no país, principalmente a fotovoltaica, a grande vantagem desta, é de ser uma energia limpa e renovável (durante seu uso) e ainda ser passível de gerar créditos de energia para a unidade geradora (ANEEL, 2012b).

Conforme dados da ANEEL (2019), verificou-se um aumento na quantidade de conexões de GD's Fotovoltaicas ao sistema elétrico Brasileiro, saindo de aproximadamente 1,8 mil em 2015 para mais de 83 mil em 2019, esta evolução pode ser verificada no Gráfico 4 da página 21. Em termos de potência destas conexões, dados de junho de 2019 demonstram um total de 880,5 MW de potência instalada de Geração distribuída fotovoltaica.

Com este crescimento de mini e micro geradores tanto no âmbito nacional quanto estadual, na concessionária Copel Distribuição S.A. verificou-se a necessidade de conhecer quais as características que este tipo de geração incide sobre as instalações de baixa tensão, para que se possa estimar de forma mais precisa estudos com maiores penetrações, principalmente para geradores alimentando cargas críticas em meio urbano.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em um primeiro momento foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o conceito de geração distribuída e principalmente a geração fotovoltaica. Uma vez concluída foram coletados dados e informações a partir do Coorientador dentro da concessionária Copel Distribuição S.A. através da instalação de um medidor de qualidade de energia na fronteira da interligação da rede consumidora com a rede da concessionária de Energia bem como através de softwares próprios desta. Em seguida, foi realizada uma análise crítica destes dados, contrastando com parâmetros mínimos de qualidade do perfil de tensão e harmônicos na instalação. Em paralelo com as atividades anteriores foram sendo feitas a redação do texto com resultados e posteriormente sua compilação. A análise dos dados foi feita em conjunto com Orientador e Coorientador da área de *Smart-grid* dentro da mesma concessionária que se disponibilizou para fornecer dados, informações e apoio ao desenvolvimento do presente trabalho.



## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo é apresentada a parte introdutória, como, o tema, a delimitação do tema, objetivo geral, problemática, justificativa e metodologia. O objetivo geral foi detalhado em objetivos específicos.

No segundo capítulo é apresentada uma parte introdutória sobre o tema de geração distribuída, evolução ao longo do tempo, normatização no Brasil e no Paraná.

No terceiro capítulo é apresentado o SFCR, suas características e critérios de qualidade em energia elétrica.

No quarto capítulo é apresentado os dados do objeto de estudo e das medições colhidos com a concessionária.

No quinto capítulo é exposto os limites estabelecidos por normas e discussão dos resultados, bem como efeitos e impactos decorrentes da instalação de geração distribuída em redes de baixa tensão.

No sexto capítulo é apresentado considerações finais, análises conclusivas e recomendação para futuros trabalhos.

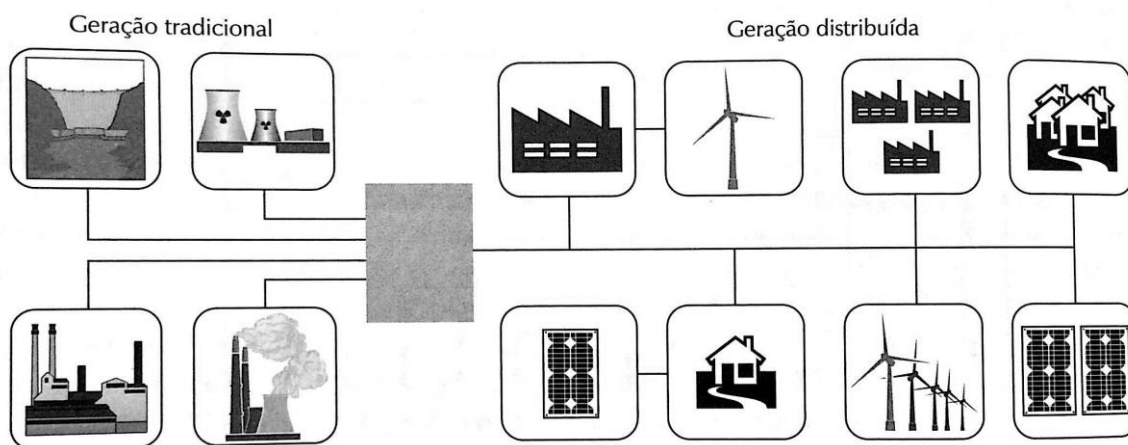
## 2. CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

### 2.1 DEFINIÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Por muito tempo a estrutura do setor elétrico Brasileiro, foi baseado na centralização da geração de energia elétrica e no fluxo de potência unidirecional para sistemas de distribuição, sendo necessário sistemas de grande porte para transmissão desta energia até os centros de consumo de carga, tendo como objetivo economia, segurança, confiabilidade e qualidade do suprimento através deste despacho central (LUIZ, 2012). A Figura 1 ajuda a ilustrar a atual topologia e a diferença entre geração centralizada para geração distribuída.

Geração distribuída (GD) caracteriza-se como a conversão de energia nas mais variadas formas para energia elétrica, de forma descentralizada, instalada próxima aos locais de consumo, possibilitando o brasileiro a gerar a própria energia que consome, ou gerar créditos que podem ser abatidos de sua fatura de energia elétrica (ANEEL, 2016). Embora o termo GD não delimite o valor da potência gerada, são utilizados no geral, geradores de pequeno porte e baixa potência, a partir de fontes renováveis, tais como, solar, biomassa, eólica, entre outras.

**Figura 1 – Geração distribuída vs. Geração Centralizada**



Fonte: VILLALVA e GAZOLI (2012)

Conforme Villalva e Gazoli (2012, p.30) , a geração distribuída inclui também parques de geração construídos em campos abertos, geradores em regiões urbanas e largamente povoadas, podendo ser instalados nos telhados das residências,

indústrias, escolas ou centro comerciais, constituindo então os minis e microgeradores conectados ao sistema de distribuição.

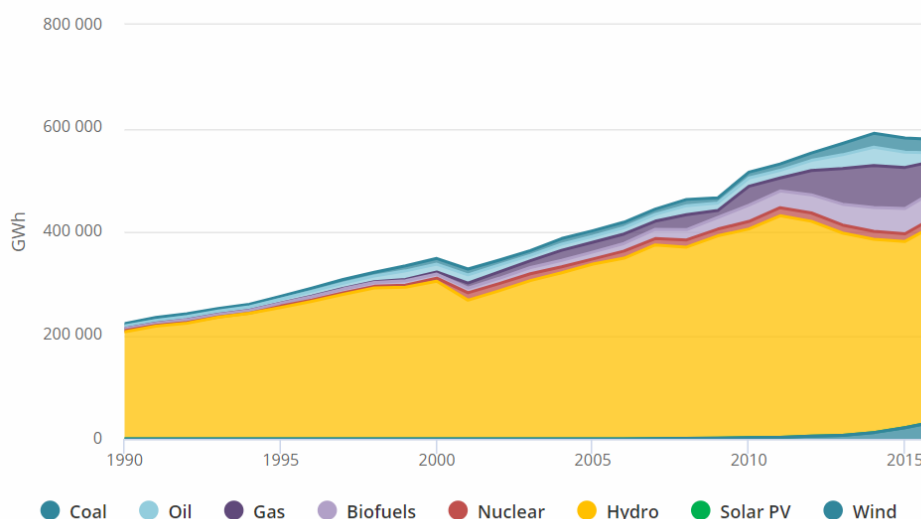
A interconexão dos geradores com o sistema de distribuição se dá em baixa tensão, sem necessidade de transformador elevador próprio a este empreendimento, ou construção de linhas de transmissão que transportem a energia gerada até um centro de carga próximo, vale ressaltar que estes geradores não evitam as perdas em transmissão de energia, e sim podem contribuir para que estas diminuam, se a alocação e potência no trecho da rede for ótima.

Neste presente trabalho será dado o enfoque na conversão de energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico com o objeto de estudo para geração distribuída.

## 2.2 GD NO BRASIL

De acordo com os gráficos da Agência Internacional de Energia (2017), visto na Figura 2, é possível verificar que o Brasil possui em sua matriz energética uma grande porção de energia renovável. Por este motivo a pressão por busca de geração de energia através de fontes limpas não foi tão grande no Brasil.

**Figura 2 – Geração de energia no Brasil e fontes empregadas.**



**Fonte: IEA (2017)**

Conforme o relatório síntese de 2018 do Balanço Energético, a energia solar fotovoltaica, incluindo a geração distribuída fotovoltaica no Brasil, sofreu aumento de

85 GWh para 832 GWh, representando um aumento de 875,6 % no ano de 2017 em relação ao ano anterior, destes o Paraná foi responsável por 10 GWh (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018, p.113).

Conforme VILLALVA e GAZOLI (2012), no ano de 2009 o Brasil possuía capacidade de Geração de energia de 105 GW, porém isto representa em um panorama mundial apenas 10 % da capacidade de geração de outros países mais desenvolvidos. Para que o Brasil possa manter seu ritmo de crescimento e aproximar-se de grandes potências, será necessário o incentivo de novas fontes de geração de energia elétrica, dentre estas a fontes eólica e solar fotovoltaica terão um papel fundamental

No Brasil as discussões sobre regulamentação da geração distribuída de energia começaram a ser discutidas a partir da Nota Técnica nº 0043/2010 – SRD/ANEEL da consulta pública nº 15/2010, disponibilizada pela ANEEL. Esta discussão dizia respeito à conexão de geradores distribuídos à rede de distribuição envolvendo agentes da área, desde geradoras, representantes de concessionárias e até consumidores. A consulta pública acima teve parte crucial no desenvolvimento das propostas da audiência pública nº 42/2011 da ANEEL onde culminou-se nas resoluções normativas apresentadas a seguir (PALUDO, 2014).

A publicação da Resolução normativa nº 481/2012, que altera a ReN 77/2004, estabelece que empreendimentos de GD a partir de fonte solar que fossem construídos até o final do ano de 2017 teriam desconto de 80 % nas tarifas do uso do sistema de distribuição e na tarifa de uso do sistema de transmissão durante os dez primeiros anos de operação (ANEEL, 2012a).

Já a regulamentação da GD no Brasil foi realizada através da Resolução Normativa (ReN) nº 482/2012 da ANEEL no ano de 2012 que até o momento foi revisada pela ReN nº 687/2015 (ANEEL, 2015) e pela ReN nº 786/2017 (ANEEL, 2017c). A delimitação de potência de GD começou a ser estabelecida pela ReN citada acima, foram criados os termos Microgeração e Minigeração Distribuída, determinando que Microgeração Distribuída delimita-se a centrais geradoras de energia fotovoltaica com potência instalada de até 75 kW, e Minigeração Distribuída centrais geradoras de energia fotovoltaicas que possuem potência instalada superior a 75 kW até 5MW conforme a ANEEL, (2012b). Esta regulamentação estabelece que cada cidadão brasileiro ou empresa poderá produzir energia elétrica em sua propriedade a partir de fontes renováveis, principalmente a fotovoltaica, seja para

consumo próprio ou para exportação através do sistema de créditos com a concessionária. Em suma, a resolução estabelece condições mínimas de acesso de pequenas centrais geradoras de energia elétrica aos sistemas de distribuição (VILLVALVA e GAZOLI, 2012).

No quesito que se trata de qualidade de energia, a ReN nº 482/2012 da ANEEL (2012b) Art.12 define:

Art.12. Aplica-se o estabelecido no art. 170 da Resolução Normativa nº 414, de 2010, no caso de o consumidor gerar energia elétrica na sua unidade consumidora sem observar as normas e padrões da distribuidora local. (ANEEL, 2012b, p.11)

O Artigo 170 da ReN nº414 citado acima define que fica a cargo da distribuidora suspender imediatamente o fornecimento caso seja constatada deficiência técnica ou risco iminente de danos a pessoas ou ao sistema elétrico (ANEEL, 2010a).

Na ReN nº 414 que foi revisada pela ReN nº 479/2012 da ANEEL (2012c) Art. 108 define:

Art. 108. Quando o consumidor utilizar em sua unidade consumidora, à revelia da distribuidora, carga ou geração susceptível de provocar distúrbios ou danos ao sistema elétrico de distribuição, ou ainda a instalações e equipamentos elétricos de outros consumidores, a distribuidora deve exigir o cumprimento das seguintes medidas:

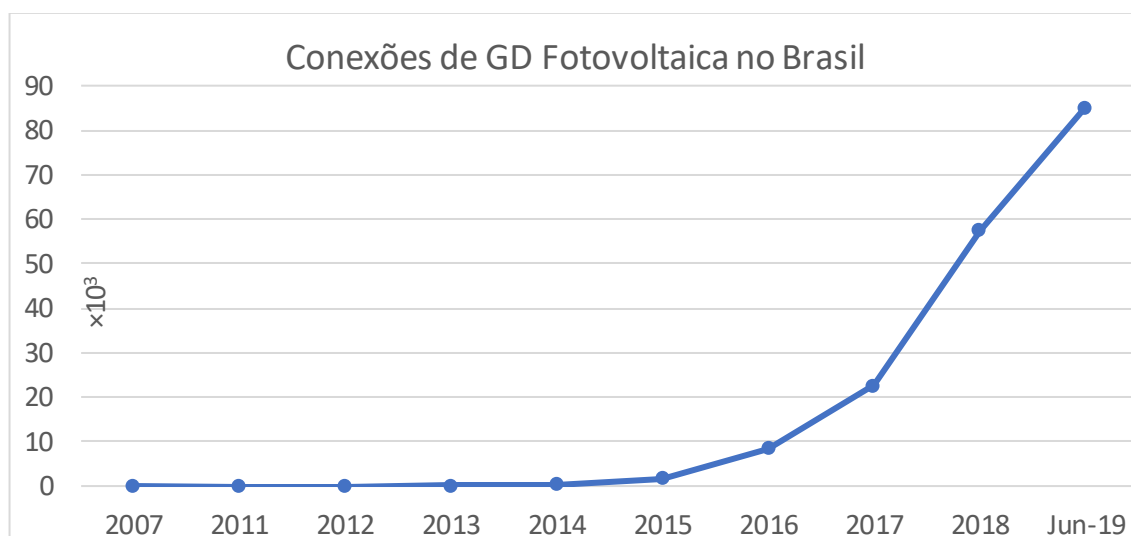
I – Instalação de equipamentos corretivos na unidade consumidora, no prazo informado pela distribuidora, ou o pagamento do valor das obras necessárias no sistema elétrico, destinadas à correção dos efeitos desses distúrbios;

II – Ressarcimento à distribuidora de indenizações por danos a equipamentos elétricos acarretados a outros consumidores, que, comprovadamente, tenham decorrido do uso da carga ou geração provocadora dos distúrbios. (ANEEL, 2012c, p.45)

No Brasil, mesmo antes da regulamentação, houve a conexão de uma GD Fotovoltaica ao sistema de distribuição da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) no ano de 2007 de acordo com base de dados da ANEEL (2019), após a publicação da ReN nº 482/2012 houve um salto para 12 unidades geradoras com potência total

instalada de 44,93 kW. A evolução das conexões de GD pode ser verificada de acordo com o Gráfico 4 (ANEEL, 2019).

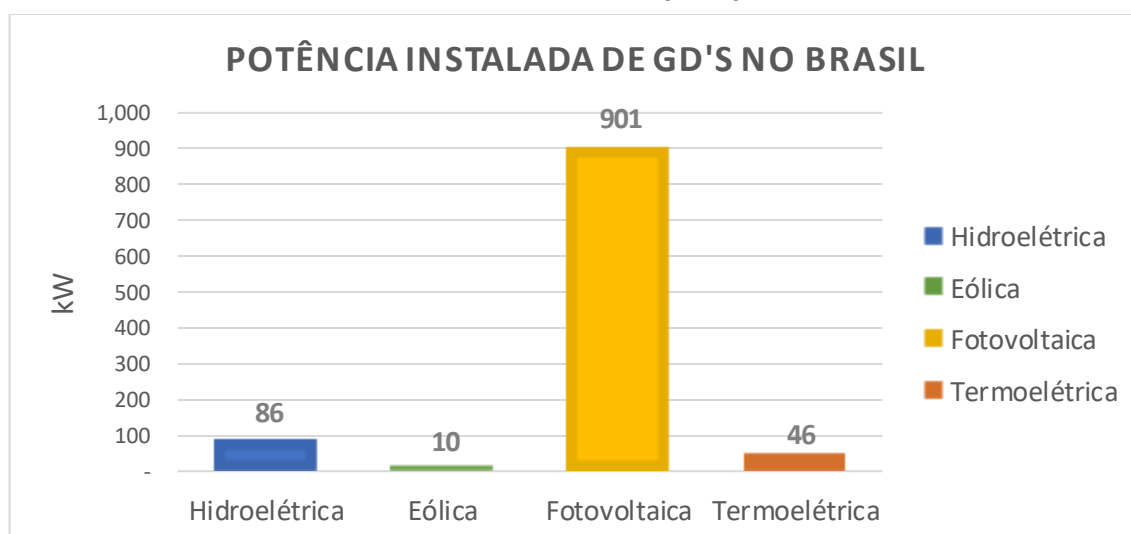
**Gráfico 4 – Evolução de número de conexões de GD Fotovoltaica no Brasil 2007- Junho 2019**



Fonte: Adaptado de ANEEL (2019)

Verificou-se no endereço eletrônico da ANEEL que em junho de 2019 existem 85.076 unidades conectadas, enquanto dados de 2018 demonstram que existiam 57.553 unidades de GD Fotovoltaica com potência total de 900,89 MW, onde se destaca dentre as demais fontes conforme demonstrado no Gráfico 5 (ANEEL, 2019).

**Gráfico 5 – Potência instalada por tipo de fonte**

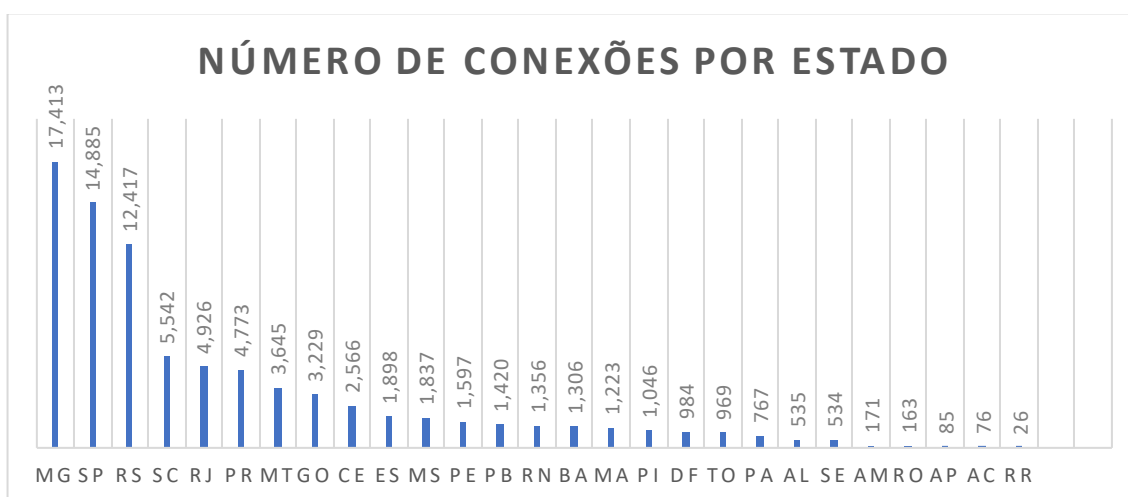


Fonte: Adaptado de ANEEL (2019)

## 2.3 GD NO PARANÁ

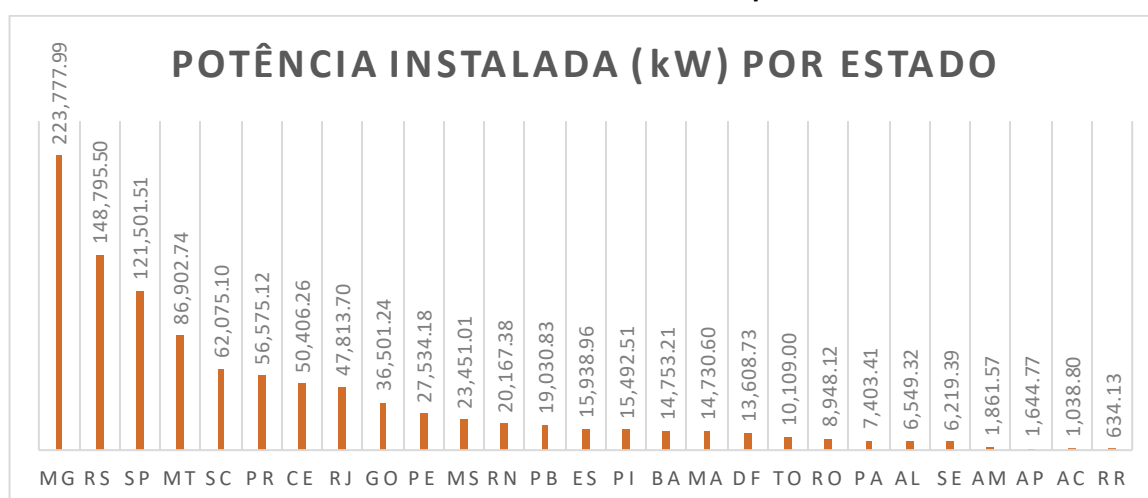
O Estado do Paraná encontra-se entre os primeiros estados do Brasil em número de conexões de GD e potência destas, sendo a Copel Distribuição S.A. a concessionária de energia que atende quase toda a área do estado. Em um Ranking nacional de conexão de GD por estado, o Paraná situa-se na 6º posição com 4.773 conexões (Gráfico 6), e quanto as potências de GD, o Paraná também tem a 6º posição (Gráfico 7) em Junho de 2019.

**Gráfico 6 – Número de Conexões de GD por estado**



Fonte: Adaptado de ANEEL (2019)

**Gráfico 7 – Potência de GD instalada por estado**



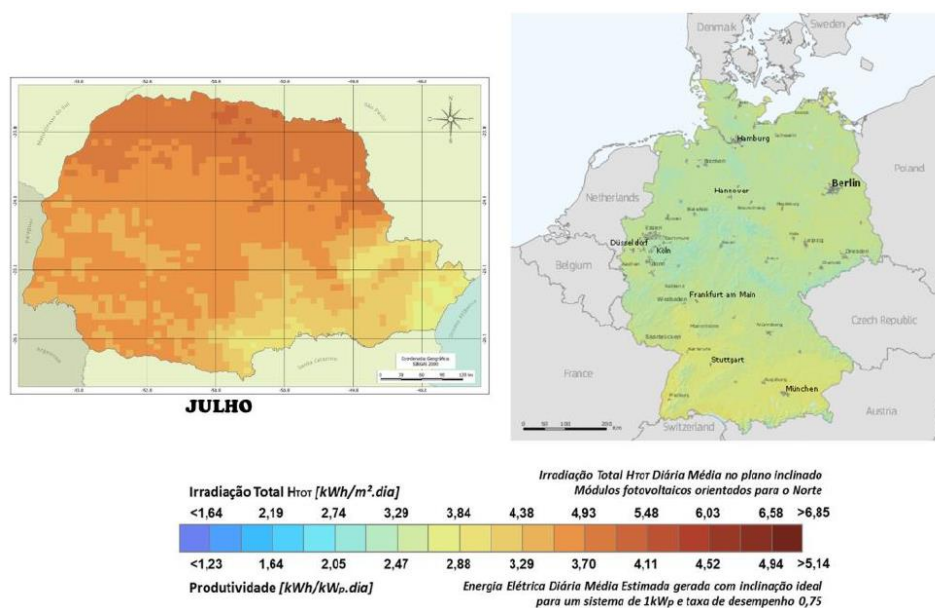
Fonte: Adaptado de ANEEL (2019)

Quando se compara o potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos no Paraná em relação a outros países da Europa, verifica-se

que o Paraná possui uma grande irradiação solar que ainda pode ser explorada. Conforme Tiepolo, *et al.*, (2016a) o menor valor de irradiação solar no estado ocorre no mês de julho, sendo de 3,61 kWh/m<sup>2</sup>\*dia, enquanto o maior valor acontece em janeiro de 6,46 kWh/m<sup>2</sup>\*dia. Em termos de médias mensais, verifica-se que o Paraná possui a menor média de irradiação em julho, sendo de 4,66 kWh/m<sup>2</sup>\*dia enquanto a maior ocorre em março com 5,95 kWh/m<sup>2</sup>\*dia.

Em países da Europa, especificamente da Alemanha que possuía em 2016 uma potência instalada Solar de 41,2 GW, os valores de irradiação solar estão muito abaixo dos obtidos para o Paraná (MME, 2017). De acordo com Šúri, *et al.*, (2007) a Alemanha possui uma irradiação média anual de 3,43 kWh/m<sup>2</sup>\*dia, logo a menor irradiação que acontece em julho no Paraná, ainda é superior à média da irradiação solar na Alemanha conforme Tiepolo, *et al.*, (2016b).

**Figura 3 – Comparação de Irradiação do Paraná com Alemanha**



**Fonte: TIEPOLO, URBANETZ JUNIOR, *et al.* (2016b)**

A regulamentação de GD no Paraná é feita pela concessionária Copel Distribuição S. A. através da Norma Técnica Copel NTC 905100 (Acesso de geração distribuída com comercialização de energia) e NTC 905200 (Acesso de micro e minigeração distribuída com sistema de compensação de energia). Como o foco deste trabalho é de Microgeração distribuída de até 75kW, será dado o foco na NTC 905200 definida pela Copel (COPEL DISTRIBUIÇÃO, 2018).



Com a norma citada anteriormente, a concessionária fornece os requisitos mínimos para conexão de microgeração GD com inversores, fornece quais os procedimentos de acesso a serem realizados pelo acessante, requisitos básicos da ReN nº482/2012 com pequenos detalhes aplicado à esta concessionária. Trata também de requisitos técnicos para conexão ao sistema de distribuição onde especifica que:

- Caso a conexão não seja realizada por inversores, é necessário um elemento de proteção visível e acessível pela distribuidora.
- Os inversores devem ser certificados pelo Inmetro.
- Conter proteção anti-ilhamento.
- Controle de frequência e Fator de Potência.

Esta norma estabelece também que para potências de até 75kW, a conexão poderá ser realizada em BT (Baixa Tensão), assim como é o objeto de estudo neste trabalho. No item 5.1.2 da Norma, esta estabelece os Requisitos de conexão, que são:

- Funcionamento adequado da proteção anti-ilhamento em casos de falha por parte da Concessionária.
- O acessante não pode reduzir a flexibilidade da recomposição da rede.
- A entrada de serviço deve ser compatível com a máxima corrente gerada/consumida.
- Prever funções de supervisão das condições de sincronismo.
- Geradores podem ser assíncronos para potências até 300kW
- Fator de potência mínima em 0,92 indutivo ou capacitivo.
- A Copel não se responsabiliza por acidentes.

Quanto aos requisitos de qualidade de energia elétrica a norma estabelece em seu item 5.3 que a Copel possui o direito de realizar medidas no ponto de conexão para averiguar se os parâmetros de qualidade estão em conformidade com o Módulo 8 do PRODIST, sendo necessária a atuação do acessante caso não estejam.

Demais itens da norma tratam questões de projetos e documentação de integração com a concessionária, bem como requisitos de proteção, não sendo o foco do estudo deste trabalho.

### 3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

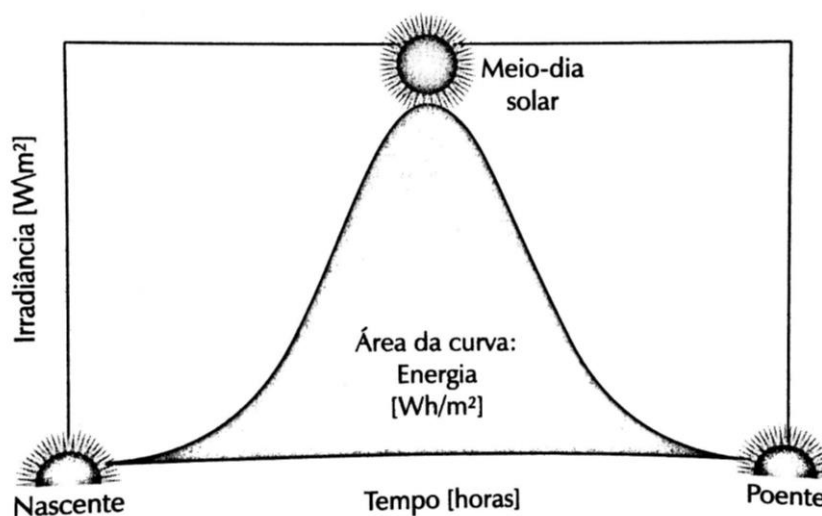
#### 3.1 ENERGIA SOLAR

De acordo com o Cepel (2014) a Terra recebe uma potência 94 mil TWh de energia solar, sendo um período de 2 horas o suficiente para abastecer o consumo mundial no ano de 2011 caso toda esta energia fosse aproveitada. Desta forma entende-se que o Sol além de prover condições necessárias para o funcionamento da vida, é também uma fonte inesgotável de energia.

##### 3.1.1 Radiação Solar

A grandeza utilizada para quantificar a radiação emitida pelo sol é a irradiância, podendo ser chamada também de radiação. Esta unidade é expressa em  $W/m^2$ , como a própria unidade demonstra, é quantidade de potência recebida em uma área, em nosso caso, a energia é a solar. Ao se realizar a medida da medida radiação ao longo do dia encontra-se a irradiação, que expressa a densidade de energia por área, expressa em  $Wh/m^2$ . A radiação solar pode ser medida através de um medidor de radiação. Ao se medir a radiação solar ao longo do dia, é possível perceber que esta possui uma variação durante o período diário, onde existe irradiação durante o dia, porém esta não é presente durante a noite conforme apresentado pela Figura 4 na página 26. A irradiação medida ao longo do dia em uma superfície também sofre variações devido às obstruções da passagem à Luz (sombras) que acontecem pelas mais variadas causas, seja por construções próximas ou por nuvens, o que torna esta fonte de energia com uma característica intermitente (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Figura 4 – Curva de irradiância diária



Fonte: VILLALVA E GAZOLI (2012)

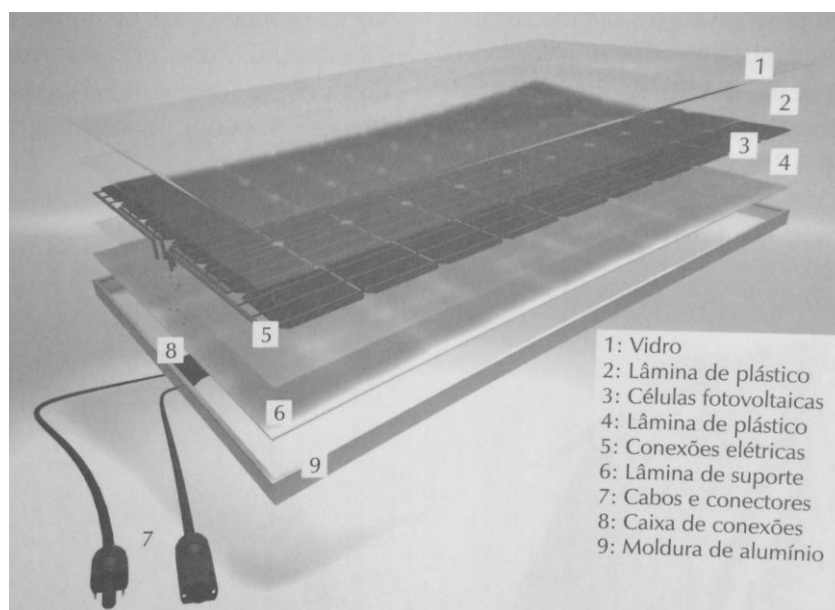
### 3.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A conversão desta energia solar só se faz possível através do uso de painéis fotovoltaicos, onde nestes, ocorre o efeito fotovoltaico, assim gerando uma diferença de tensão nos terminais das células fotovoltaicas ao se incidir luz solar sobre estes. Estas células são compostas por circuitos opto eletrônicos de silício semicondutores, ao se combinar várias células fotovoltaicas e outros componentes é possível obter-se um módulo fotovoltaico que pode ser observado na Figura 5 da página 27. Combinando vários módulos fotovoltaicos é possível ter-se um arranjo fotovoltaico, ou um sistema fotovoltaico de acordo com o nível de tensão desejado. (VILLALVA e GAZOLI, 2012)

A grande vantagem de se utilizar energia fotovoltaica se dá pelo fato desta tecnologia ser modular e total ausência de emissões e poluentes ou ruídos, aliado também de um plano de manutenção simples e ocupação de espaço reduzido (LORA e HADDAD, 2006).

Os materiais semicondutores que constituem as células fotovoltaicas de uso mais comum no mercado são: silício (Si) cristalino (c-Si), multicristalino (m-Si), amorfo (a-Si) e microcristalino ( $\mu$ -Si); telúrio (Te); cádmio (Cd); cobre (Cu); índio (I); gálio (Ga); selênio (Se), entre outros. Em 2010 a eficiência destas células estavam em torno de 14 a 19% para silícios cristalino e multicristalino enquanto os de filme fino apresentavam eficiência na faixa de 6 a 18% (URBANETZ JR, 2010).

**Figura 5 – Componentes do módulo fotovoltaico**



Fonte: VILLALVA E GAZOLI (2012)

### 3.2.1 Arranjos das Conexões

Cada célula fotovoltaica possui a capacidade de fornecer uma tensão elétrica em torno de 0,6 V, e para que o módulo possua a tensão de 36, 54 ou 60 V em sua saída, e também uma corrente típica de 2 a 8 A, estas células são combinadas em série. A corrente elétrica é diretamente proporcional à área de cada célula, pois quanto maior a luz recebida, maior a intensidade de corrente gerada.

Ainda é possível combinar os dois modos de conexão para que se possa obter um Sistema Fotovoltaico, de forma a obter-se a potência desejada, situação na qual mais é utilizado.

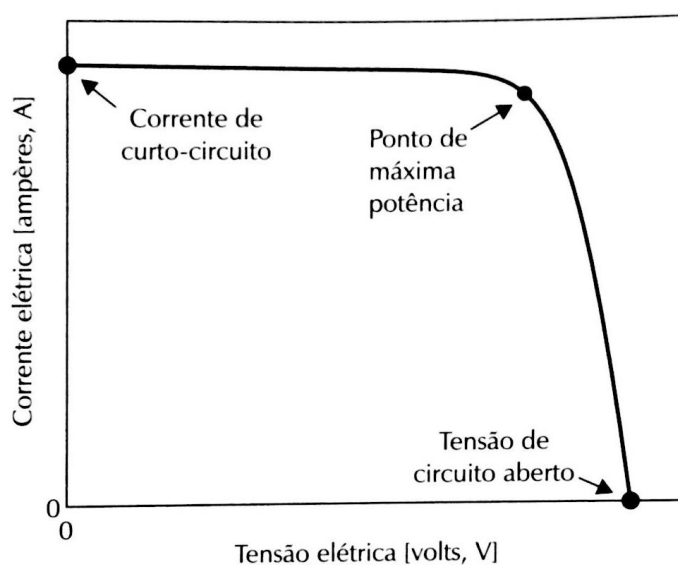
### 3.2.2 Curvas Características

Nas folhas de dados dos módulos fotovoltaicos percebe-se dois termos que são muito utilizados para dimensionar ou projetar um sistema fotovoltaico, que são: tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito. A tensão de circuito aberto refere-se à tensão de saída do módulo quando este não possui carga conectada, ou seja, será a sua maior capacidade de fornecimento de tensão para as cargas,

enquanto a corrente de curto-circuito expressa a maior capacidade de entrega de corrente do módulo para as cargas (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A característica do módulo não se trata de tensão ou corrente constante, como estudado em fontes convencionais, existe variação da tensão do módulo conforme a corrente é drenada deste. Quanto mais próxima da corrente de curto-circuito, menor a tensão de saída do módulo, e quanto mais próxima a tensão de circuito aberto, menor a corrente fornecida pelo módulo. A característica desta saída é demonstrada na Figura 6 a seguir.

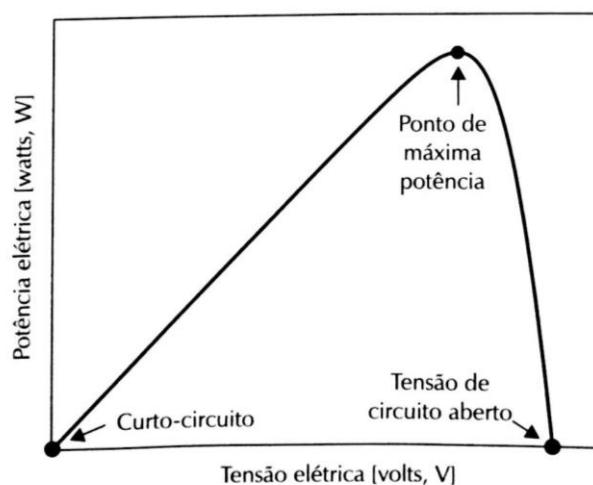
**Figura 6 – Curva I x V de um módulo fotovoltaico**



**Fonte: VILLAVA e GAZOLI (2012)**

Em relação à potência de saída do módulo, a partir da Figura 7 pode-se verificar que existe um ponto ótimo, onde a maior potência será extraída do módulo, fica evidente esta questão na próxima figura.

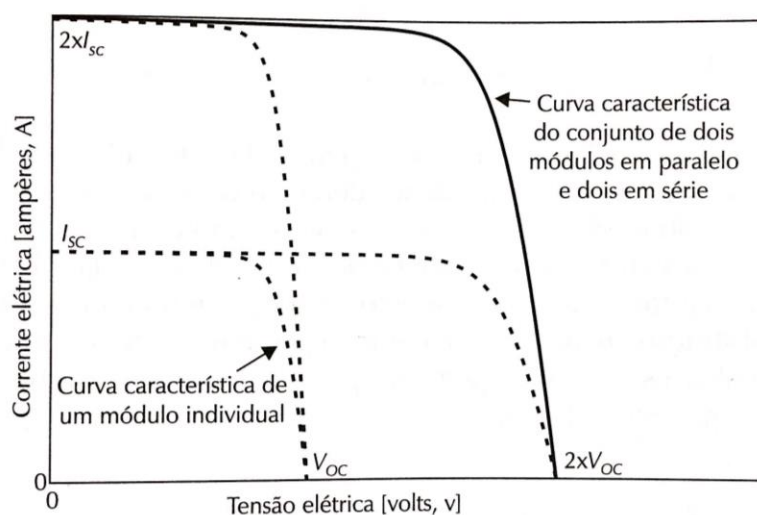
**Figura 7 – Curva P x V de um módulo fotovoltaico**



**Fonte: VILLAVA e GAZOLI (2012)**

Ao se combinar os módulos fotovoltaicos a fim de ser criado um sistema fotovoltaico, as correntes do painel somando-se, bem como as tensões, será criado uma nova curva característica do painel como um todo, onde as correntes e tensões dependerão da quantidade de módulos conectados no sistema, esta nova curva pode ser vista na Figura 8.

**Figura 8 – Curva característica de um sistema fotovoltaico**

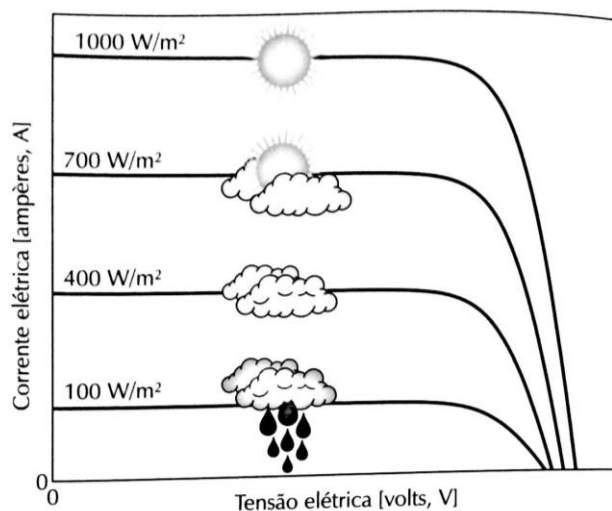


**Fonte: VILLAVA e GAZOLI (2012)**

Esta potência de saída do módulo, sofre influências também da temperatura de operação do módulo, e também da irradiância solar incidente neste, logo verifica-se que em um clima nublado ou chuvoso, onde se tem uma baixa incidência solar,

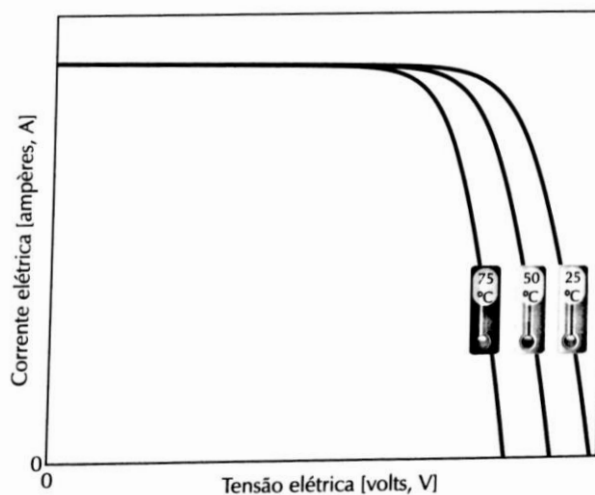
espera-se também uma baixa potência de saída do módulo, estas influências são exemplificadas na Figura 9 e Figura 10 a seguir.

**Figura 9 – Influência da radiação solar sob um módulo fotovoltaico**



Fonte: VILLAVA e GAZOLI (2012)

**Figura 10 – Influência da temperatura sob um módulo fotovoltaico**



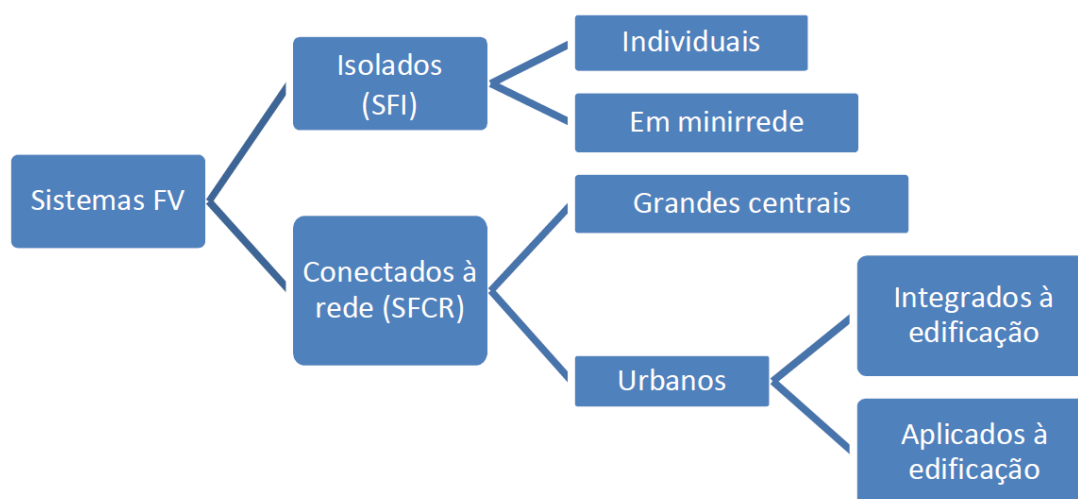
Fonte: VILLAVA e GAZOLI (2012)

### 3.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos isolados (ou autônomos) são utilizados para alimentação de instalações elétricas em locais que não possuem acesso à energia elétrica provida por uma concessionária local, e fazem uso de um acumulador de energia (baterias) para que esta instalação continue sendo suprida mesmo na

ausência de luz solar. Já os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) são sistemas integrados à rede elétrica da concessionária onde em baixa ou média tensão, injetam potência na rede da concessionária. Visto que existem diferentes tipos de sistemas, pode-se classificar então conforme diagrama a seguir (URBANETZ JR, 2010).

**Figura 11 – Classificação dos sistemas fotovoltaicos**



**Fonte: URBANETZ JR (2010)**

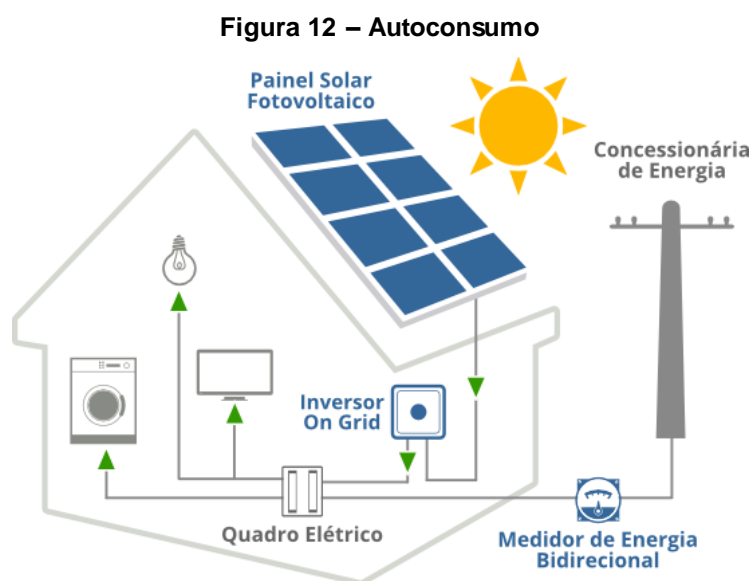
Os SFCR operam em paralelismo com a rede elétrica da concessionária, e para isto, o Sistema precisa obedecer alguns requisitos, tais como: mesma frequência, no caso do Brasil 60Hz (Hertz); possuir mesmos níveis de tensão eficaz, 127V ou 220V e; estar em fase com a rede (URBANETZ JR, 2010).

Este paralelismo com a rede da concessionária traz flexibilidade quanto ao uso de energia por parte do consumidor sendo possível gerar eletricidade para o consumo no próprio local, de forma a eliminar ou reduzir o uso de energia da rede da concessionária, ou até gerar excedente de energia sendo possível o despacho desta energia para a rede, de forma a gerar créditos para o consumidor conforme o sistema de compensação de energia previsto na ReN nº482/2012 (VILLALVA e GAZOLI, 2012).



### 3.3.1 Autoconsumo

No caso de consumo no local, toda a energia produzida pelo SFCR é consumida na própria instalação conectada a este, caso a energia demandada seja a mesma que a energia gerada, sem excedentes. Este fluxo de energia é demonstrado na Figura 12.

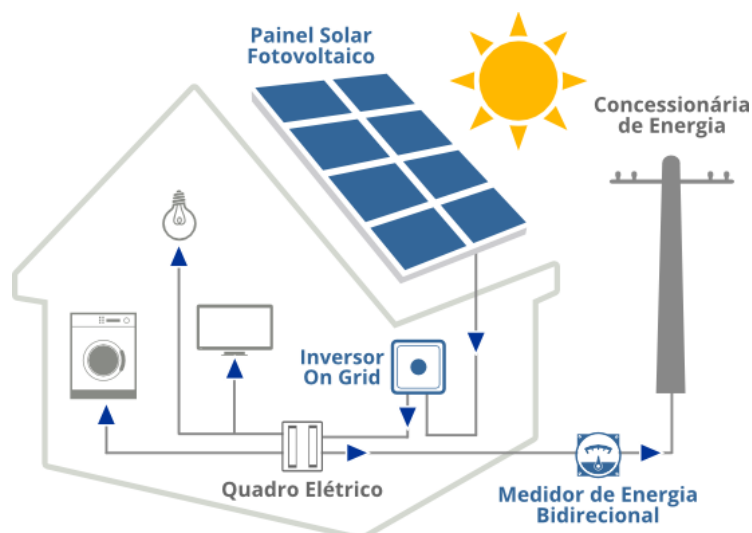


Fonte: SOLAR ENERGY DO BRASIL (2018)

### 3.3.2 Excedente de Energia

No caso de a geração ser maior que o consumo local, a energia excedente é enviada à concessionária, desta forma gerando créditos através do sistema de compensação citado em normas no item 2.2 deste trabalho. O Fluxo desta energia é demonstrado na Figura 13.

**Figura 13 – Excedente de energia**

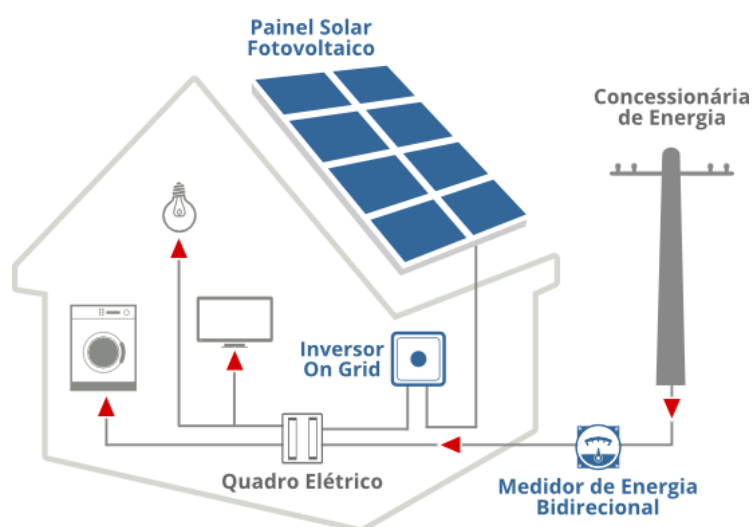


Fonte: SOLAR ENERGY DO BRASIL (2018)

### 3.3.3 Consumo pela rede da Concessionária

Em períodos onde a geração é insuficiente para suprir a demanda da carga, ou até não é gerado energia, no caso de ausência do sol, a concessionária de energia entra como fonte principal de suprimento de energia, desta forma abastecendo a instalação por completo, tal exemplo é demonstrado na Figura 14.

**Figura 14 – Energia fornecida pela Concessionária**

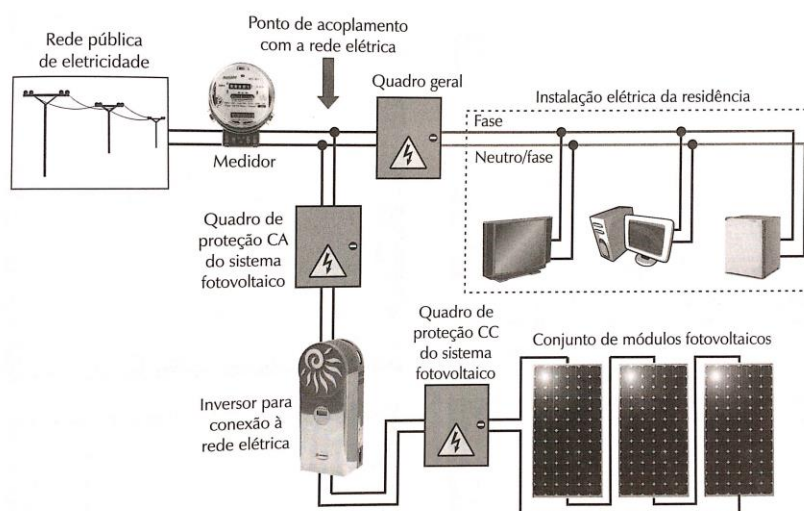


Fonte: SOLAR ENERGY DO BRASIL (2018)

Um SFCR possui poucos componentes, são necessários somente módulos fotovoltaicos para a geração de energia e um Conversor CC-CA, também chamado

de inversor para realizar a integração dos módulos com a rede elétrica. O diagrama de montagem deste sistema é demonstrado na Figura 15.

**Figura 15 – Componentes de um SFCR**



**Fonte: VILLALVA e GAZOLI (2012)**

### 3.3.4 Inversores

O inversor é um equipamento eletroeletrônico responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) gerada pelo conjunto de módulos fotovoltaicos para energia em corrente alternada (CA). Como citado anteriormente, os inversores são os componentes que integram a rede da concessionária com a instalação elétrica, para realizar tal integração os inversores utilizam-se da forma de onda da concessionária como referência para gerar a sua própria onda senoidal. Quando montado em uma topologia de inversor isolado para cada painel, estes são capazes de encontrar o ponto de Máxima potência do painel, aumentando a eficiência energética destes (URBANETZ JR, 2010).

Um critério de proteção necessário para os inversores é a proteção anti-ilhamento, citado na NTC 905200 da Copel, assim enquanto os inversores possuem referência senoidal, estes estão injetando energia para a rede, ao perder a referência o inversor obrigatoriamente necessita ser desligado para não energizar o lado de baixa tensão da concessionária, de forma a proteger o sistema e os eletricitistas que estarão em contato no trecho (CAAMAÑO-MARTÍN, *et al.*, 2007).

Em alguns países é necessário que o elo Corrente Contínua dos inversores seja aterrado por questões de segurança, no Brasil isto ainda não é obrigatório, porém o inversor deve possuir um ponto de terra para que seja feita a proteção adequada (CAAMAÑO-MARTÍN, *et al.*, 2007). Em casos onde os inversores se utilizam de Transformadores, estes são responsáveis pela isolação galvânica entre o elo CC do CA, desta forma estes permitem que o inversor seja aterrado quando necessário (URBANETZ JR, 2010).

De acordo com Caamaño-Martín, *et al.*,(2007), os inversores possuem capacidade quanto ao controle da qualidade da potência ativa, regulação automática do FP de saída no caso de o inversor possuir um pequeno armazenamento de energia (capacitor), controle de reativos e de nível de tensão, bem como controle dinâmico de simetria das correntes, mesmo que a referência esteja assimétrica.

#### 4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O objeto deste estudo é a integração da instalação de baixa tensão com a rede da concessionária do mais novo prédio da COPEL, o Centro Integrado da Distribuição, onde funciona o centro de operações da distribuição de todo o Paraná em somente um local, em conjunto com a gestão de equipes de campo e operação da equipe do setor da medição.

Figura 16 – Posição do Consumidor.



Fonte: COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

O prédio possui ao todo 232 painéis fotovoltaicos dispostos em sua cobertura, arranjados e divididos em 3 strings CC por inversor. O sistema FV é composto por três inversores da marca Fronius, com capacidade individual nominal de 15kW (22,5 kW/pico) totalizando 45kWp de potência da instalação fotovoltaica, com tensão nominal de saída de 220V possuindo faixa de frequência de saída de 45 a 65Hz, e fator de distorção de 1,5%. A potência instalada pico de 3 strings CC está em 19,5kW, sendo que o inversor suporta até 22,5kW de pico (COPEL DISTRIBUIÇÃO, 2019).

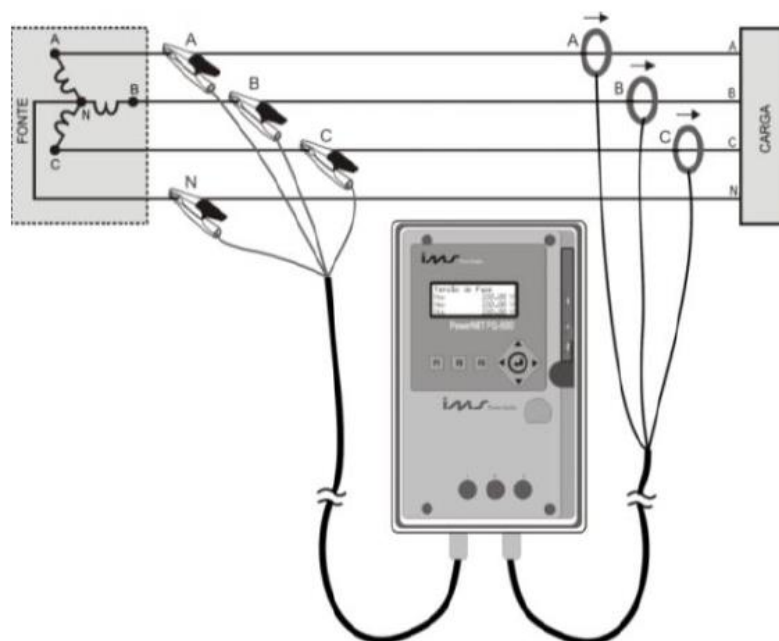
#### 4.1 COLETA DE DADOS

A coleta dos dados foi realizada através de um medidor de qualidade de energia da empresa IMS, cujo modelo é PowerNet PQ-600 G4. Desenvolvido para atender o módulo 8 do PRODIST, é utilizado para realizar medições em instalações elétricas e também redes de distribuição, registra os valores instantâneos, médios, mínimos, máximos e estatísticos das principais grandezas elétricas relacionadas à qualidade de energia (IMS, 2019).

O período de coleta compreendeu os dias 24 de abril de 2019 das 16:10 horas até dia 10 de maio de 2019 as 08:37 horas. Neste período a maior parte dos dias foi de pouco sol entre nuvens.

A instalação do analisador de qualidade foi feita através da equipe de medição da Copel-DIS, utilizando a topologia da Figura 17. Foi conectado o analisador de qualidade na entrada de energia da instalação elétrica, logo após o medidor, desta forma a medição foi feita em estrela, tendo como tensão de referência 127V.

**Figura 17 - Topologia de Medição**



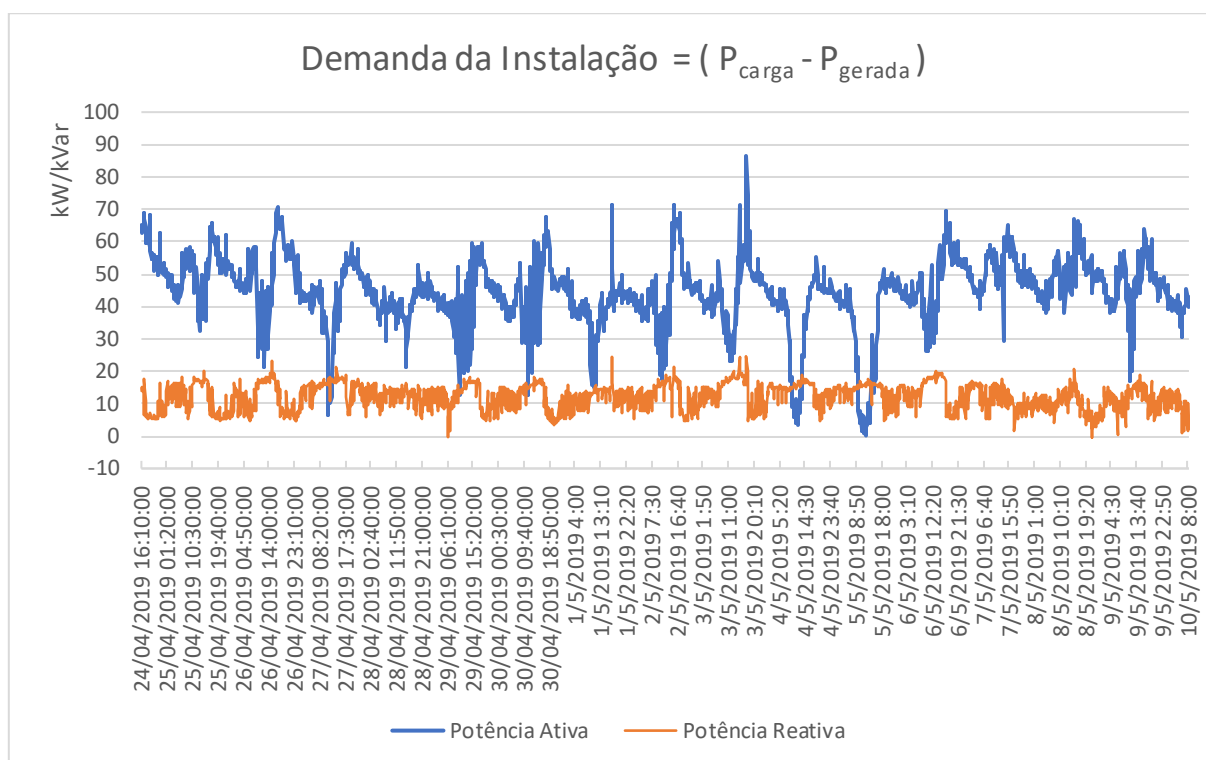
Fonte: IMS (2019)

Além dos dados de tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e distorção harmônica de tensão obtidos pelo analisador de rede, foi possível coletar os

dados de tensão, corrente, potência dos inversores Fronius instalados no local através de gerência remota via interface web pelo site [www.solarweb.com](http://www.solarweb.com).

Como base para todas as análises, segue a curva de demanda da instalação no período analisado.

**Gráfico 8 – Curva de demanda da Instalação**



**Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)**

Conforme a curva demonstrada no gráfico acima, pode-se verificar que a instalação demandou da rede elétrica da concessionária uma potência menor nos dias 27/04, 04/05 e 05/05, onde a incidência solar sobre os painéis fotovoltaicos foi mais favorável para a geração de energia. Verifica-se também que o consumo de reativos pela instalação a partir da concessionária é praticamente constante, diferentemente da potência ativa, na qual ocorrem muitas variações, tendo esta um pico de demanda de 86kW às 17h40 horas do dia 03/05.

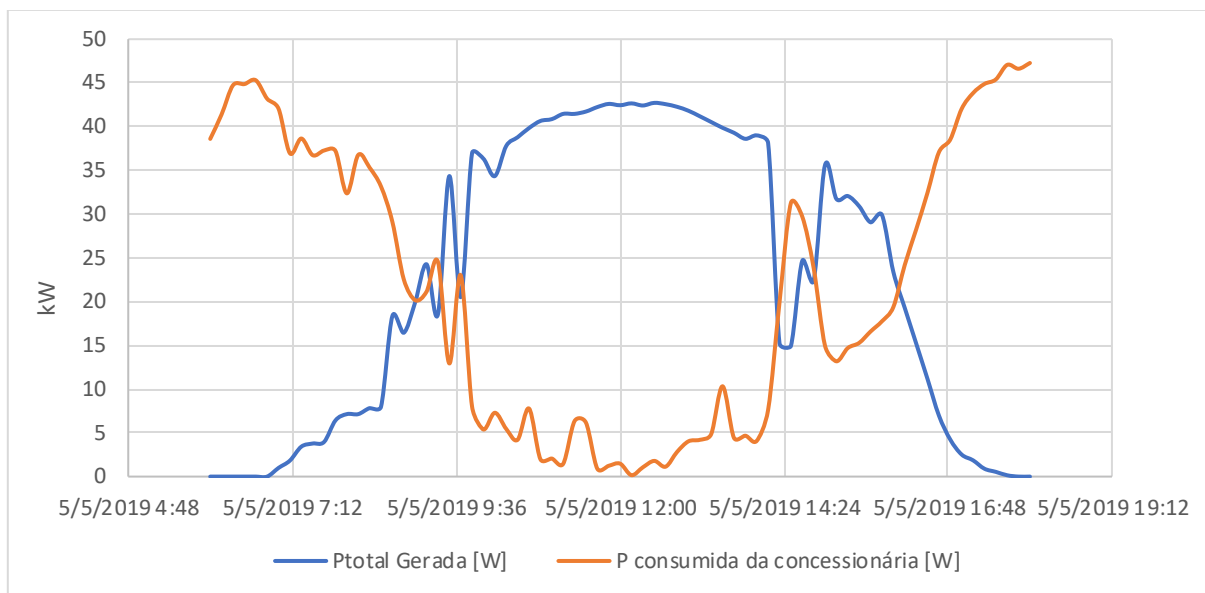
Já no fluxo contrário, verifica-se pelas medições que é injetado pouca potência ativa na rede da concessionária pela instalação, em dias onde a geração solar é favorável, e nenhuma potência reativa é injetada.

Nos Gráfico 9 e Gráfico 10, as potências do sistema bem como as tensões do dia 05/05/2019 foram expostas em detalhe para que sirva de base para próximas



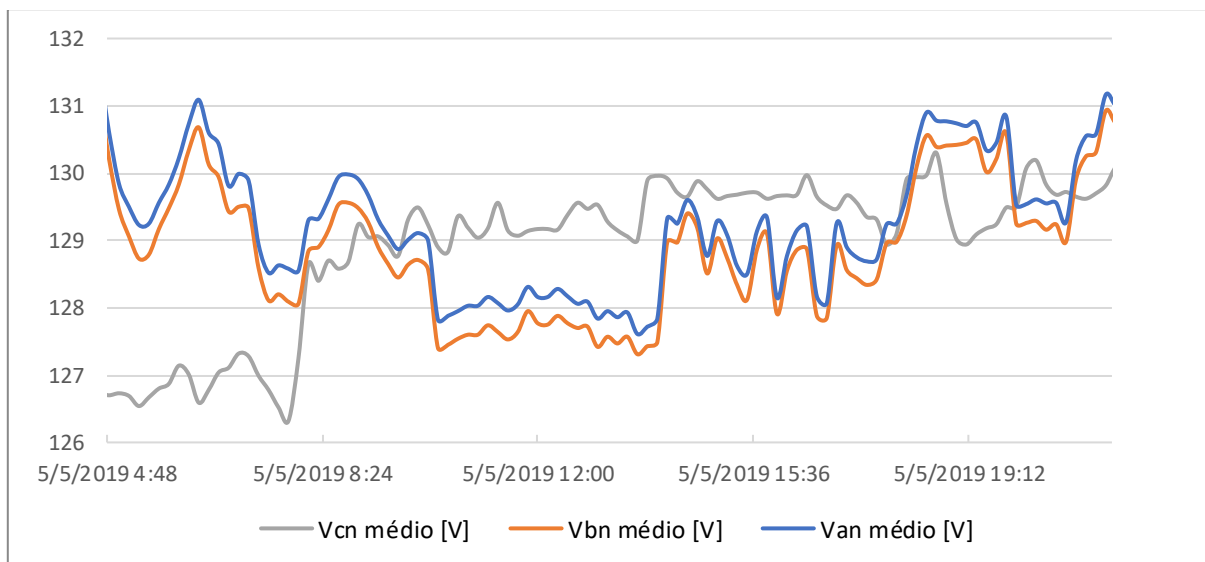
análises realizadas neste dia, novamente, este foi um período onde houve uma geração considerável, com pouca injeção para a rede somente na Fase A.

**Gráfico 9 – Detalhe de demanda e geração no dia 05/05/2019**



Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

**Gráfico 10 – Perfil de Tensões do dia 05/05/2019**



Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

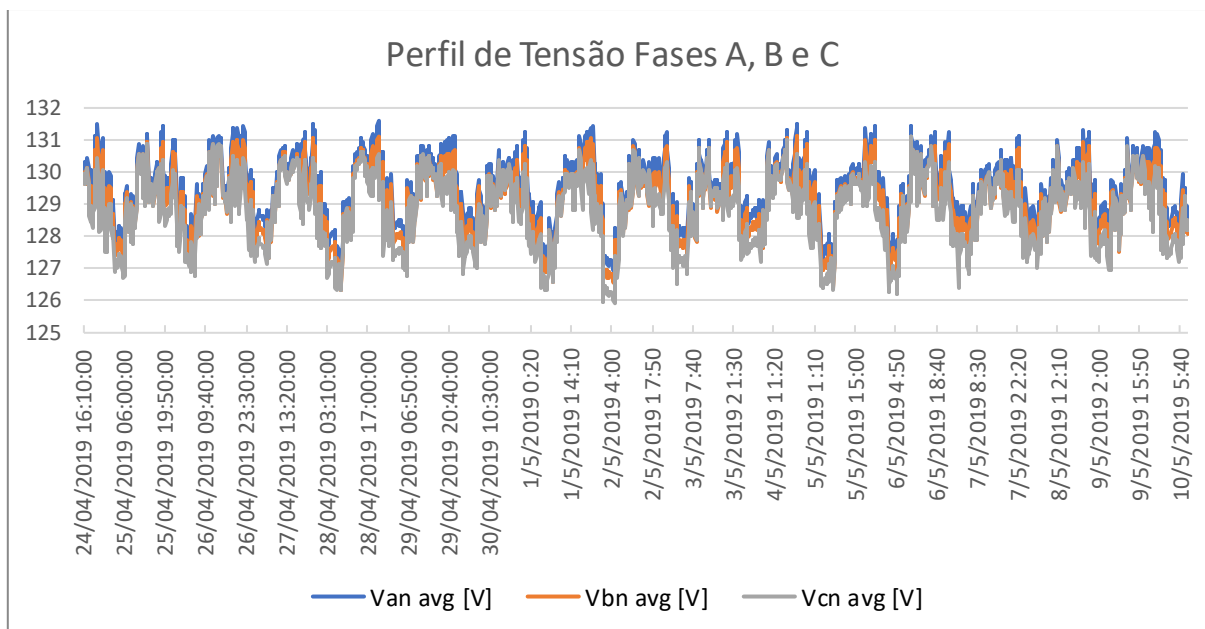
#### 4.2 MEDIÇÕES DO NÍVEL DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Para a análise do perfil de tensão em regime permanente, o analisador PowerNET registrou os dados no período de 24 de abril ao dia 10 de maio de 2019.



O intervalo dos registros foi de 600 segundos totalizando 1008 registros válidos de tensão. Segue no Gráfico 11 os valores de todas as medidas registradas pelo analisador.

**Gráfico 11 – Tensão nominal média por fase**



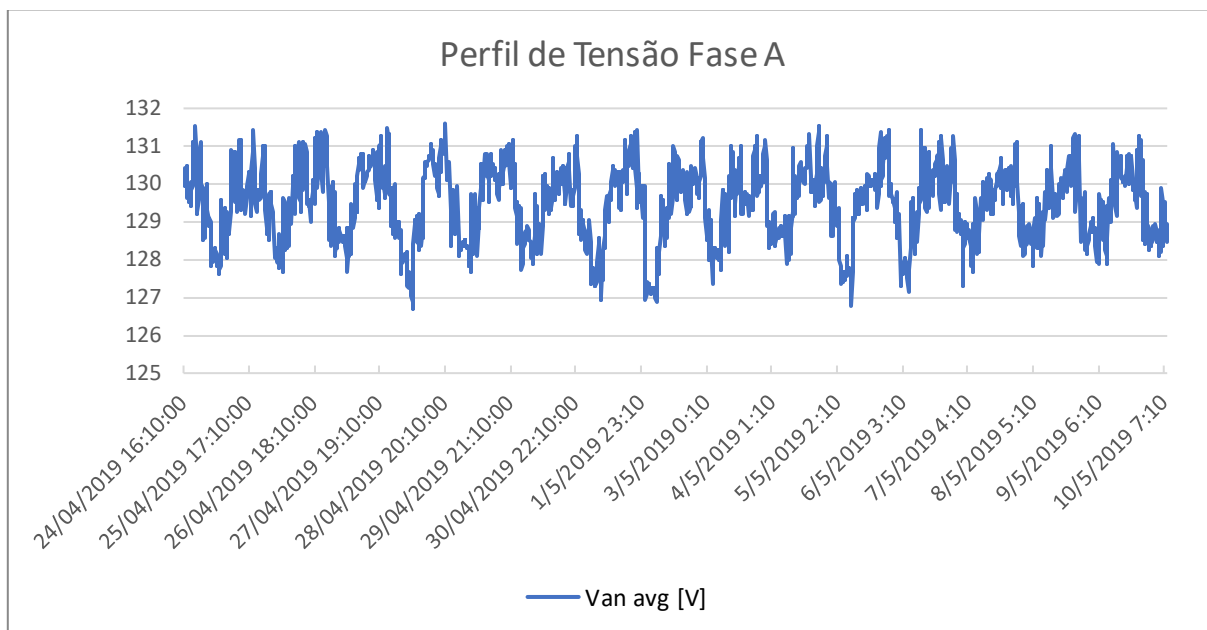
**Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)**

Foram gerados também gráficos para cada fase individualmente, conforme demonstrados nos Gráficos 12, 13 e 14.

Através destes gráficos, é possível verificar que em média o nível de tensão está levemente acima de 127V, esta característica se dá, pelo fato de este consumidor estar próximo à uma subestação, sendo o primeiro consumidor do ramal alimentador de média tensão deste trecho. A fase C é a que mais possui o perfil de tensão mais baixo, pois é a que está mais sobrecarregada.

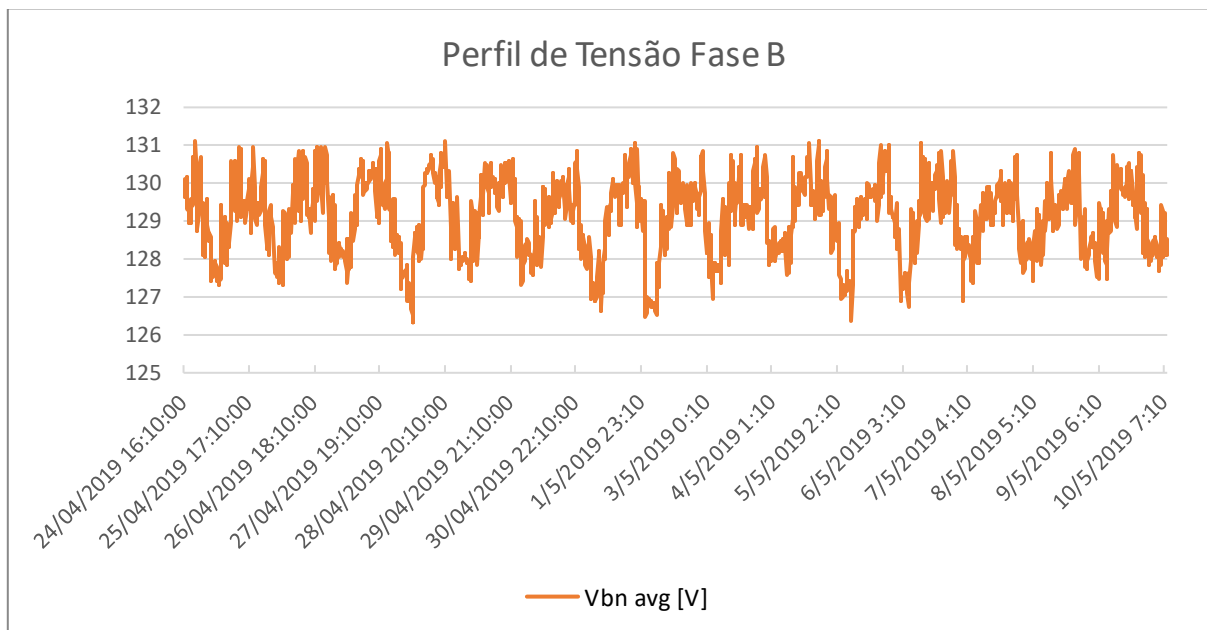
Verifica-se também que não houveram momentos onde ocorreu falta de energia neste consumidor ou alguma anomalia, pois não ocorreram eventos onde a tensão cai a zero. As flutuações de tensão e possíveis picos causados por comutação de chaves ou relés na rede não são coletados pelo analisador, pois este não mede perfil de tensão em regime transitório, somente permanente.

Gráfico 12 – Perfil de Tensão da Fase A



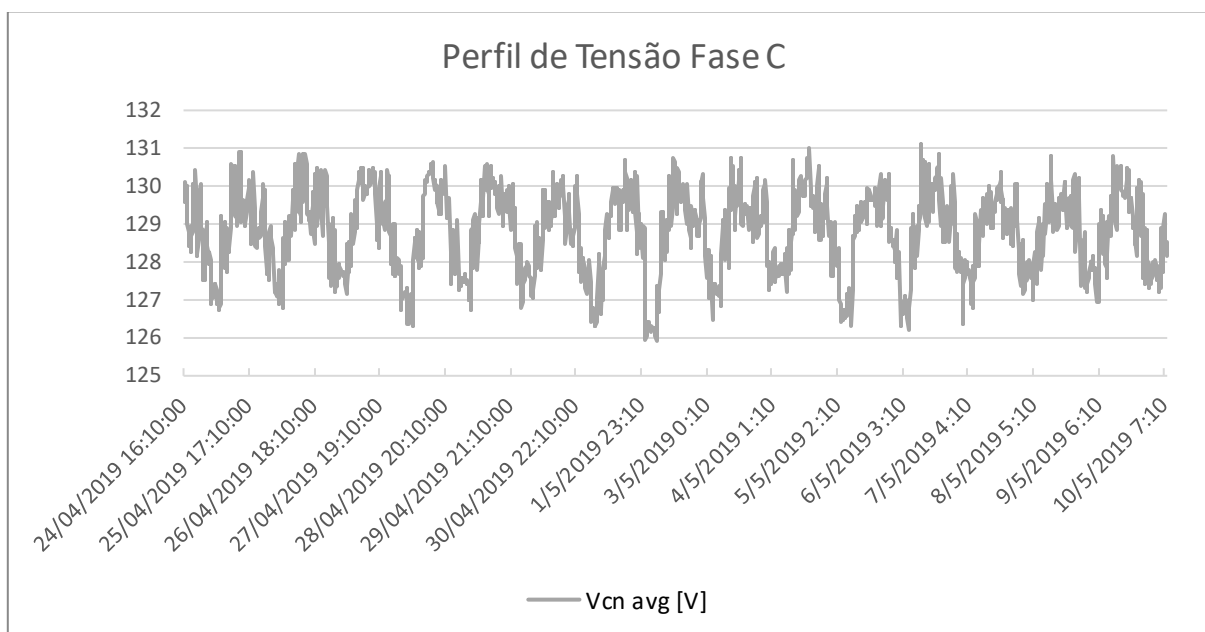
Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

Gráfico 13 – Perfil de Tensão da Fase B



Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

Gráfico 14 – Perfil de Tensão Fase C



Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

#### 4.2.1 Registros por Faixa Adequada, Precária e Crítica.

Os valores de nível adequado de tensão definidos pelo PRODIST são de limite mínimo 117V e máximo 133V para as redes de baixa tensão, conforme mostra a Tabela 5 da página 51. Os indicadores DRP (Duração relativa de transgressão de tensão Precária) e DRC (Duração Relativa de transgressão de tensão crítica) indicam os tempos relativos nos quais os limites de tensão ficaram fora dos valores adequados durante os períodos de coleta, estes indicadores podem ser calculados através das

$$\text{equações } \mathbf{DRP} = \frac{nlp}{1008} \times \mathbf{100\%} \qquad \mathbf{(1DRC} = \frac{nlc}{1008} \times \mathbf{100[\%])}$$

(2.

$$\mathbf{DRP} = \frac{nlp}{1008} \times \mathbf{100[\%]} \qquad (1)$$

$$\mathbf{DRC} = \frac{nlc}{1008} \times \mathbf{100[\%]} \qquad (2)$$

Onde, nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente. (ANEEL, 2017a)

Após analisar 1008 registros, o medidor de qualidade não detectou nenhum registro fora dos limites, ou seja, não houveram sobretensões ou sobtensões durante o período analisado. Seguem os resultados dos registros por faixa na Tabela 1.

**Tabela 1- Registros por faixa**

<b>Registros por faixa</b>			<b>Indicadores</b>			
Fase	Adequado	Precário	Crítico		Valor [%]	Limite [%]
VaN	1008	0	0	DRP	0,00	3,00
VbN	1008	0	0	DRC	0,00	0,50
VcN	1008	0	0			

**Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)**

Esta análise não valida que efetivamente durante este período não houveram valores fora desta faixa, pois esta anomalia pode ter ocorrido rapidamente dentro do intervalo de coleta da medição.

#### 4.2.2 Registros de Máximos e Mínimos

Foram registrados também, os valores mínimos e máximos da tensão de cada fase em relação ao Neutro, bem como os horários de suas ocorrências, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Registros mínimos e máximos de tensão

**Mínimos**

Fase	Valor [V]	Data	Hora
VaN	126,70	28/04/2019	07:50:00
VbN	126,33	28/04/2019	07:50:00
VcN	126,31	28/04/2019	07:50:00

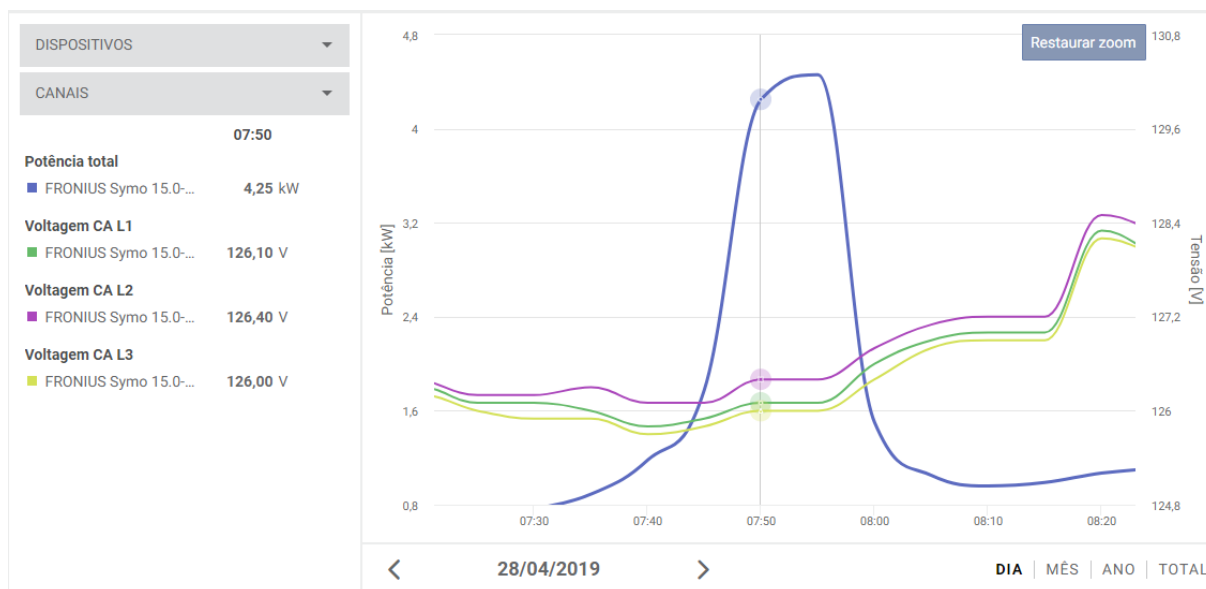
**Máximos**

Fase	Valor [V]	Data	Hora
VaN	131,60	28/04/2019	20:30:00
VbN	131,11	28/04/2019	20:30:00
VcN	130,90	25/04/2019	13:40:00

Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

Percebe-se que todos valores de tensão mínimos registrados ocorreram pela manhã do dia 28 de abril, uma hora após o início da geração de energia pelos painéis fotovoltaicos. Neste período os valores de geração foram conforme Gráfico 15.

Gráfico 15 – Registros de tensão do inversor



Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

No horário das 07:50 é possível perceber que a tensão teve um valor baixo conforme registrado pelo analisador, mas não pelos inversores. Os demais parâmetros registrados pelo analisador de rede neste mesmo horário foram conforme a Tabela 3.

Tabela 3– Demais parâmetros no dia 28 as 07h50

Hora	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	S <sub>consumido</sub> -S <sub>gerado</sub> [VA]
07:30:00	131,33	126,98	134,26	4.8901,77
07:40:00	103,13	102,45	111,82	4.0175,91
07:50:00	92,29	90,82	98,58	3.5420,18
08:00:00	83,35	83,11	90,12	3.1124,86

Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

Ao analisar-se os demais parâmetros da rede no horário especificado, percebe-se que a potência injetada pelo inversor supriu as cargas da instalação, deixando de ser demandada da rede de distribuição.

#### 4.3 MEDIÇÕES DE QUANTIDADE DE HARMÔNICOS NA INSTALAÇÃO

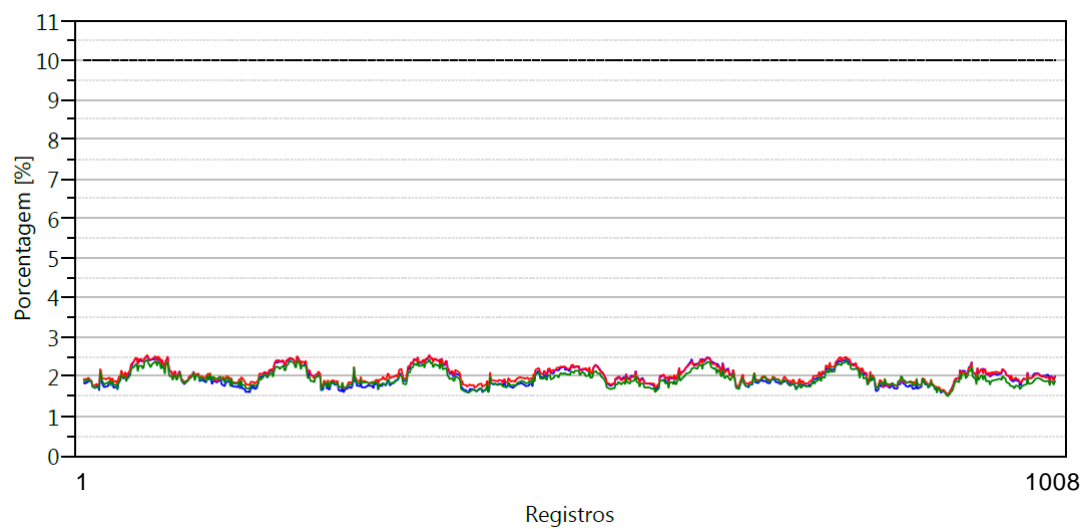
Em relação aos harmônicos medidos na rede, foi analisada a Distorção Harmônica total (THD<sub>v</sub> ou DTT) em porcentagem. O analisador levou em conta o período de 24 de abril a 10 de maio de 2019. Novamente os registros foram feitos a cada 600 segundos e a quantidade de registros válidos foram 1008. Foram analisados os harmônicos de tensão a partir da fundamental até a ordem de número 50. Segue os valores registrados para distorção harmônica total de tensão, pares, ímpares não múltiplas e múltiplas de 3 medidos para cada fase.

Tabela 4 – Distorção harmônica

	Limite [%]	Va [%]	Vb [%]	Vc [%]
<b>DTT95%</b>	10,0	2,42	2,44	2,32
<b>DTTp95%</b>	2,5	0,16	0,16	0,16
<b>DTTi95%</b>	7,5	2,37	2,40	2,26
<b>DTT395%</b>	6,5	0,50	0,43	0,54

Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

Através da Tabela 4 percebe-se que os valores de distorção harmônica total, cujo 5% dos valores superados das 1008 medições ainda estão dentro dos limites estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST.

**Gráfico 16 – Distorção harmônica total por registro**

**Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)**

## 5. IMPACTOS DE UM SFCR NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A geração distribuída oferece várias vantagens tais como confiabilidade, flexibilidade de utilização de energia, redução de custo com compra de energia, aumento de eficiência energética por se utilizar energias limpas e renováveis entre outros conforme Lopes, Hatzargyriou, *et al.*, (2007), porém de acordo com Singh (2009) e Souza (2014) este tipo de geração traz vários desafios que são encontrados em todos os países ao se iniciar a integração da Geração Distribuída em um sistema de Distribuição, tais como:

- **Operação e controle**, o nível de tensão de uma GD pode incrementar o nível de tensão da rede da concessionária no local de instalação, no caso de abertura de uma chave na rede de distribuição, é necessário que a GD não reduza esta flexibilidade de operação e que o trecho a ser desligado não seja energizado pela GD.
- **Localização ótima**, nem sempre uma GD-FV é instalada no melhor local para o sistema de distribuição, mas sim onde se possui um maior espaço para aproveitamento solar.
- **Problemas de projetos**, ao se aumentar o nível de penetração os cálculos de demanda e fluxo de potência do sistema serão alterados, desta forma levando à um remodelamento da rede.
- **Mudança na Capacidade de Curto-circuito**, conforme aumenta a penetração de GD em um local, a capacidade de curto é incrementada, embora em algumas situações isto seja desejável, em outras pode se tornar um problema.
- **Qualidade de energia**, as diferentes fontes de GD, possuem diferentes características de geração, os controles para conversão de CC-CA e adequação de tensão precisam ser bem ajustados de forma a não exceder os parâmetros de qualidade estipulados pela concessionária local.
- **Desafios comerciais**, de forma a manter o mercado de GD, há tendência de criação de novo mercado fora do sistema regulatório para o comércio desta energia produzida pelos pequenos geradores.



- **Problemas regulatórios**, o sucesso da GD em um país depende diretamente de uma política clara e explícita em termos de instrumentos regulatórios para o desenvolvimento desta tecnologia.
- **Novo papel no mercado**, a geração distribuída descentraliza o comércio de energia que está na mão de grandes concessionárias e traz a produção desta para mais perto da população, desta forma trazendo flexibilidade na geração de energia.
- **Desbalanço de tensão**, vários tipos de inversores estão disponíveis no mercado, dependendo do tipo de instalação destas, o desbalanço de tensão será inevitável.

No que tange o escopo deste trabalho, será focado no item da qualidade de energia elétrica, são necessários testes e análises de diversos parâmetros visando garantir a segurança e um fornecimento de energia de qualidade dentro dos padrões nacionais (DE SOUZA, 2009). Durante testes realizados foram verificados por Urbanetz Jr e Rüther (2011) que no ponto de interconexão de GD em baixa tensão existe aumento da tensão eficaz, redução do conteúdo harmônico da tensão, e caso o tipo de carga apresente um comportamento não linear, o conteúdo harmônico da corrente é elevado, ultrapassando os limites de qualidade, o que pode acarretar ao não funcionamento dos inversores SFCR.

Os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), são documentos elaborados pela ANEEL e por outras entidades, com a finalidade de padronizar e normatizar as atividades técnicas relativas ao funcionamento do sistema elétrico de distribuição. Estes são compostos por 8 módulos, nos quais cada um trata de um tema específico que abrangem desde o planejamento do sistema até itens de cálculo de perdas no sistema.

O Módulo 8 do PRODIST estabelece procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica – QEE, onde aborda desde a qualidade do produto como o serviço prestado pelas distribuidoras de energia elétrica. Foi analisado o item de qualidade de produto pelo fato de ser possível determinar os valores de referência da energia elétrica que está sendo injetada na rede pelo sistema fotovoltaico. Este módulo ainda abrange os procedimentos que devem ser observados por consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição (ANEEL, 2017a).

O módulo 8 na seção 1 – Qualidade do produto, trata dos seguintes fenômenos da qualidade em regime permanente, onde será dado enfoque neste trabalho somente nos 3 primeiros itens:

- tensão
- fator de potência
- harmônicos
- desequilíbrio de tensão
- flutuação de tensão
- variação de frequência

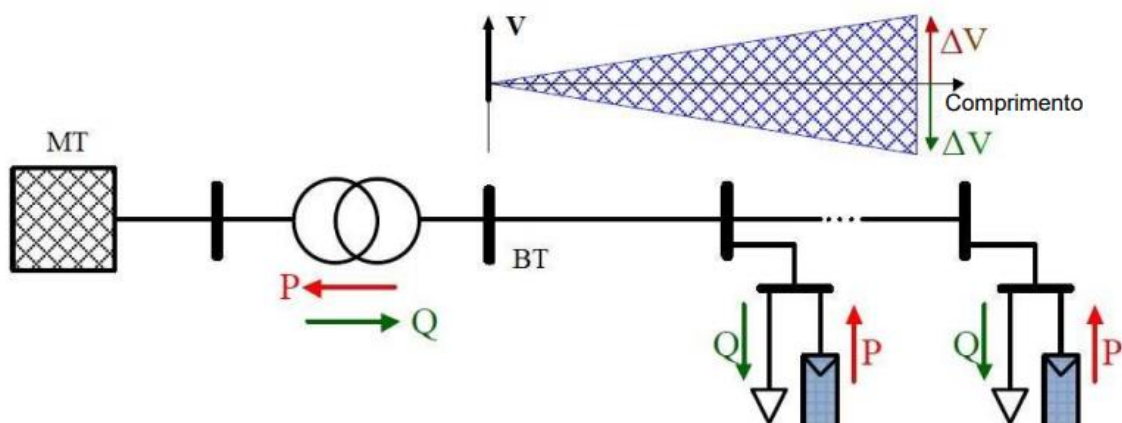
A norma brasileira que rege os princípios de qualidade para a compatibilidade com a rede elétrica é a NBR 16149 de 2013, esta especifica os parâmetros que os inversores e sistemas fotovoltaicos devem cumprir em relação à nível de tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. A norma especifica que caso os valores sejam ultrapassados, é de responsabilidade do inversor identificar o desvio e interromper o fornecimento de energia à rede (ABNT, 2013).

Foram analisados os critérios mínimos que devem ser mantidos referente aos valores em regime permanente de tensão e quantidade de harmônicos presentes, pois são os itens que serão possíveis de serem levantados através dos procedimentos metodológicos de aquisição de dados que fora citado no item 1.6 deste trabalho.

## 5.1 QUALIDADE DO NÍVEL DE TENSÃO

O problema do nível de tensão ocorre com a instalação das GD's ao longo do alimentador da concessionária, e a inversão do fluxo de potência, ao longo que o comprimento da rede é aumentado, a injeção da potência ativa contribuirá para que exista um aumento na tensão, enquanto o consumo de reativos pelo gerador contribuirá para uma diminuição no perfil desta tensão (BORGES, 2014).

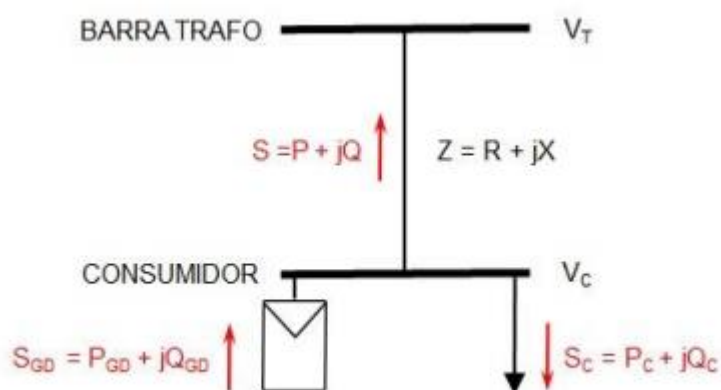
Figura 18 – Comportamento da tensão ao longo do alimentador



Fonte: BORGES (2014)

Em sistemas de distribuição de baixa tensão, onde a relação  $X/R$  possui valor em geral menor que 1,0, ou seja, possui um valor de resistência alto, identifica-se que o sistema possui um forte acoplamento entre as magnitudes e ângulos das tensões. Desta forma para que ocorra a transferência de potência entre duas barras, não é necessário somente abertura angular, mas também uma diferença de magnitude de tensão entre elas (ALVES, 2017) e (BORGES, 2014).

Figura 19 – Sistema Genérico



Fonte: ALVES (2017)

De acordo com a figura 19 e as informações do parágrafo anterior, é possível demonstrar a seguinte ligação entre a variação de tensão ( $\Delta V$ ) e as potências ativas geradas ( $P_{gd}$ ), consumidas ( $P_c$ ), reativas geradas ( $Q_{gd}$ ) e consumidas ( $Q_c$ ) do sistema conforme a Equação 3.

$$\Delta V = \overrightarrow{Vc} - \overrightarrow{Vt} \approx \frac{R(Pgd - Pc) + X(Qgd - Qc)}{Vc} \quad (3)$$

onde,  $\Delta V$  explicita a variação de tensão,  $Vc$  e  $Vt$  são a Tensão no consumidor e do Transformador respectivamente,  $R$  e  $X$  são parâmetros de impedância da rede,  $Pgd$  e  $Pc$  são as potências ativas geradas e consumidas, e  $Qgd$  e  $Qc$  são as potências reativas geradas e consumidas respectivamente.

A partir disto conclui-se que: somente existe elevação de tensão se houver maior geração de potência do que demanda pela carga; quanto menor a potência demandada pela carga, menor a variação de tensão, assim quando se possui uma geração forte e carga fraca a tensão tende a variar muito; a potência ativa representa maior peso na variação de tensão do que a reativa, devido à baixa relação  $X/R$  da rede de distribuição, e a tendência da GD operar com FP unitário, ou seja, potência reativa igual a zero (ALVES, 2017) e (BORGES, 2014).

Em termos de nível de tensão, os inversores em geral não fazem a regulação deste parâmetro, utilizando este somente como critério para atuar na proteção do sistema (ABNT, 2013). O PRODIST determina que no ponto de conexão da distribuidora com o consumidor final, os valores de tensão devem estar de acordo com a Tabela 5. A ANEEL determina valores de níveis de tensão que são adequados, precários e críticos que servem para determinar em qual classe a tensão estava durante a reclamação e também para estabelecer parâmetros de cálculo para a compensação ao consumidor quando excedidos.

**Tabela 5 - Limites de tensão em p.u.**

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Nominal (TN)</b>
Adequada	$0,92TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TL < 0,92TN$ ou $1,05TN < TL \leq 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87TN$ ou $TL > 1,06TN$

Fonte: ANEEL (2017a)

Em termos de segurança do sistema elétrico, pessoal e sistema Fotovoltaico, a NBR 16149 determina os tempos máximos de desligamento ou interrupção do fornecimento de energia dos inversores às condições anormais de tensão fornecidos na Tabela 6 (ABNT, 2013).

Tabela 6 – Resposta às condições anormais de tensão

Tensão no ponto comum de conexão (% em relação à $V_{nominal}$ )	Tempo máximo de desligamento <sup>a</sup>
$V < 80\%$	0,4 s
$80\% \leq V \leq 110\%$	Regime normal de operação
$110\% < V$	0,2 s

<sup>a</sup> O tempo máximo de desligamento refere-se ao tempo entre o evento anormal de tensão e a atuação do sistema fotovoltaico (cessar o fornecimento de energia para a rede). O sistema fotovoltaico deve permanecer conectado à rede, a fim de monitorar os parâmetros da rede e permitir a "reconexão" do sistema quando as condições normais forem restabelecidas.

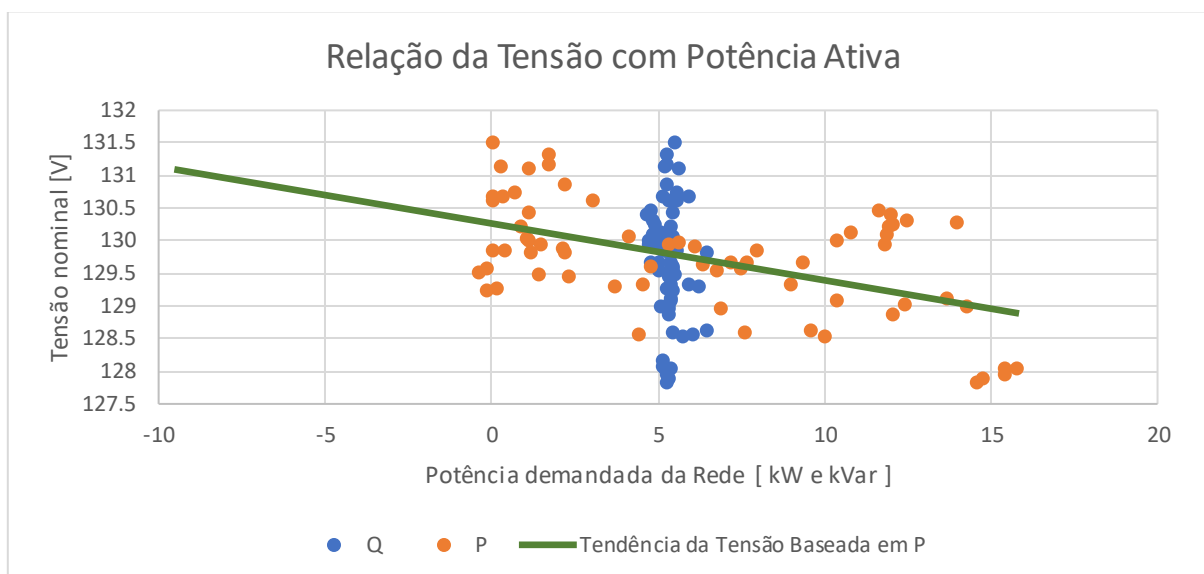
Fonte: ABNT (2013)

A concessionária de distribuição de energia tem a obrigação de manter estes valores de tensão dentro dos valores adequados para que não seja necessário a compensação ao consumidor em caso de reclamação, porém ao se instalar um SFCR, o consumidor deixa de ser somente um usuário consumindo energia de rede, e injeta energia na rede de distribuição novamente, influenciando nos níveis de tensão apresentados no ponto de conexão (URBANETZ JR, 2010).

Por este motivo a COPEL Distribuição S.A. se reserva ao direito de realizar medições no ponto de conexão a fim de quantificar os impactos das operações dos sistemas SFCR e estabelece em sua norma NTC905200 que o inversor do sistema, como forma de proteção, deverá atuar no elemento de interrupção desconectando o sistema de geração do sistema de distribuição caso a tensão ultrapasse os valores em p.u. estabelecidos na Tabela 5 (COPEL, 2014).

Conforme o estudo de caso analisado, é possível verificar que a tensão da instalação depende proporcionalmente da potência ativa gerada pelos inversores, pois quanto maior é esta, menor é o consumo de potência ativa da concessionária, conseqüentemente maior o nível de tensão, conforme demonstrado na  $\Delta V = \vec{V} \vec{c} - \vec{V} \vec{t} \approx R(Pgd - Pc) + X(Qgd - Qc)vc$  (3Erro! Fonte de referência não encontrada. e nos pontos "P" do Gráfico 17 – Relação da Tensão com a Potência Ativa Gráfico 17. Foi levantado um gráfico da curva V/P e V/Q através dos dados medidos pelo inversor para o dia 05/05/2019, onde teve uma geração considerável.

Gráfico 17 – Relação da Tensão com a Potência Ativa



Fonte: Adaptado de COPEL DISTRIBUIÇÃO (2019)

Através do Gráfico 19, percebe-se que conforme demanda-se menos potência ativa da rede (os inversores produzem mais energia), a tensão no ponto de interconexão com a rede se eleva de forma considerável. Foi traçado uma curva de tendência linear, extrapolando para o caso onde se injeta potência ativa na rede, ou seja, quando o fluxo de potência muda seu sentido, considerando que os parâmetros da rede de distribuição não se alterem, que a inércia do SFCR seja maior que da rede, também que a relação de impedância da rede seja maior que da rede dos inversores, tem-se um aumento na tensão da rede do sistema de distribuição.

## 5.2 HARMÔNICOS

São componentes senoidais de tensão ou corrente alternada, compostas da mesma frequência da rede ou múltipla destas. No caso do sistema utilizado no Brasil, temos que a frequência fundamental é de 60 Hz, as ordens das harmônicas são múltiplas desta (BELISKI, SCARAMBELOT e RAMPINELLI, 2018). As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações, ou variações na forma de onda senoidal, seja de corrente ou tensão COPEL DISTRIBUIÇÃO (2018, p. 38). As distorções, harmônicas mais significativas são as de ordem ímpar da fundamental, sendo a de 3°,5°,7° assim por diante, estas surgem ao se conectar cargas não

lineares, ou seja, cargas que demandam corrente de forma pulsada da rede (URBANETZ JR e RÜTHER, 2011) e (URBANETZ JR, 2010).

A taxa de Distorção Harmônica Total (THD) surgiu devido à necessidade de se quantificar numericamente as harmônicas presentes em uma instalação, sejam elas de corrente ou de tensão, é uma grandeza adimensional e caracteriza um sinal deformado por componentes harmônicas. Ela é expressa em porcentagem, e preferencialmente deverá ser a menor possível, além disso existem normas que regem quais os valores máximos possíveis para cada instalação (NASCIMENTO, 2013).

A THD pode ser calculada a partir da Equação 2:

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (2)$$

Onde h são todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{\max}$ , e  $h_{\max}$  é definido conforme a classe de medição do instrumento sendo A ou S;  $V_1$  é o valor eficaz da onda fundamental e  $V_h$  é o valor eficaz da tensão harmônica.

Os limites para a entrega de harmônicos pela rede da concessionária ao consumidor, segue os valores predefinidos pelo PRODIST na tabela a seguir:

**Tabela 7 – Limites das Distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)**

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT <sub>95%</sub>	10,0%	8,0%	5,0%
DTT <sub>P95%</sub>	2,5%	2,0%	1,0%
DTT <sub>95%</sub>	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>395%</sub>	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL, 2014

Já o valor de distorção total da componente de corrente injetada pelo inversor para a instalação deve ser inferior à 5% em relação à corrente fundamental e na potência nominal do inversor. Enquanto as harmônicas individuais devem ser limitadas conforme a Tabela 8

**Tabela 8 – Limites das Distorções harmônicas totais de corrente**

<b>Harmônicas ímpares</b>	<b>Limite de distorção</b>
3° a 9°	< 4,0 %
11° a 15°	< 2,0 %
17° a 21°	< 1,5 %
23° a 33°	< 0,6 %
<b>Harmônicas pares</b>	<b>Limite de distorção</b>
2° a 8°	< 1,0 %
10° a 32°	< 0,5 %

Fonte: ABNT, 2013

Os impactos da injeção de Harmônicos de tensão na rede de distribuição acontecem em sua maioria nas máquinas elétricas, tais como no transformador. Um aumento nas perdas no ferro do transformador é causado pelas harmônicas na tensão, enquanto as de corrente aumentam as perdas em correntes de fuga. O impacto dos harmônicos nos transformadores, ocorre independentemente da quantidade de conexões de GD nas redes de distribuição (PATIL, GIRGAONKAR e MUSUNURI, 2014).

### 5.3 POSSÍVEIS ALTERNATIVAS DE CONTORNO AOS IMPACTOS

De acordo com os trabalhos de simulação realizados em um artigo para o Congresso Brasileiro de Energia solar e também dissertações de mestrado, verificou-se que existe um aumento na tensão da rede com a alta penetração de GD, bem como fluxo reverso de potência. Foram então traçadas algumas possíveis estratégias para o controle da tensão (ALMEIDA e JOTA, 2018) e (BORGES, 2014):

- **Limitação do fornecimento de potência ativa:** Ao se limitar a potência dos geradores fotovoltaicos em 70%, percebeu-se através de simulações que a tensão máxima da rede chegou a 1.05 pu.
- **Compensação de potência reativa pelo consumidor:** Esta estratégia consiste em alterar o fator de potência das unidades geradoras de forma que estas regulem a injeção de reativos no sistema, de tal forma que a curva de injeção de reativos seja a mesma de ativos. Estratégia que não torna financeiramente atrativo, pois desta forma a injeção de potência ativa sofre uma redução (EICHKOFF, MARQUES e MELLO, 2018).



- **Compensação de reativos pela concessionária:** Esta correção se dá pela concessionária através da instalação de bancos de indutores ao longo da linha conforme necessário, ou seja, instalar reguladores de tensão na rede de distribuição e elementos dinâmicos de compensação de reativos.
- **Redução da tensão da subestação da concessionária:** Uma alternativa seria quando em horários de muita injeção de potência na rede, o Centro de Operações de rede de Distribuição comandasse o transformador a baixar sua tensão através do controle de TAP com carga (variar a derivação do enrolamento), reduzindo todas as tensões da rede, porém como as GD's podem ser intermitentes, é possível que a tensão possa cair abaixo do limiar definido pelo PRODIST em alguns momentos.
- **Diminuição da impedância da rede:** Consistiria de a concessionária realizar um aumento nos condutores de rede secundária por outros de maior seção transversal, ou também reestruturar a rede para que os trechos fiquem com uma distância menor do transformador até os consumidores, conseguindo assim uma menor impedância na rede, porém esta solução pode ser apresentar economicamente inviável.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema se mostrou pertinente a ser estudado ao se verificar o aumento na quantidade de conexões nos últimos anos no Brasil, embora seja muito divulgado e bem aceito pelo fato de ser uma energia renovável e limpa, percebe-se que ainda é necessário percorrer um longo caminho de mudanças em termos regulatórios, e de mercado, bem como atualizações em nossos sistemas de distribuição de energia elétrica, realizando ampliações de rede e utilizando tecnologias que garantam maior versatilidade do sistema mesmo em situações de falta, tendo em vista os impactos já identificados no contexto internacional e nacional.

Através das medições realizadas, verificou-se que o nível de tensão para esta GD fotovoltaica com não teve elevação significativa a ponto de exceder os limites máximos de tensão estabelecidos no PRODIST, porém já foi possível perceber que a geração de energia impactou no nível de tensão, possivelmente em períodos onde possa ocorrer injeção de potência ativa na rede da concessionária, será verificado um aumento maior de tensão do que fora percebido neste trabalho.

As componentes harmônicas de tensão não demonstraram variações além das definidas pelo PRODIST também, estando bem abaixo dos limites estabelecidos, desta forma verifica-se que o sistema de distribuição e instalação operam sem harmônicas que podem causar mau funcionamento de equipamentos.

Pelo fato de as tarifações de energia não serem suficientes para abranger todas as variações que temos hoje, a ANEEL iniciou o processo de revisão de tarifação sobre a GD, a partir da Consulta pública nº 010/2018 e Audiência pública nº 001/2019, onde os debates públicos e estudos definiram ao todo 6 possíveis alternativas de cálculos diferentes para tarifação, sendo a perspectiva para vigência destas mudanças para o ano de 2020.

### 6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o fator de potência na fronteira da rede da concessionária com a instalação, avaliar os níveis de tensão ao longo do alimentador através da instalação de analisadores em diferentes trechos do alimentador e/ou avaliar distorções harmônicas de corrente que são injetados na rede da concessionária.

## 7. REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 16149**: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, p. 18. 2013.

ALMEIDA, G. L. S.; JOTA, P. R. D. S. ESTUDO DA ELEVAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 17 a 20 de Abril 2018.

ALVES, M. R. F. **O PAPEL DE GERADORES FOTOVOLTAICOS NA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE BAIXA TENSÃO RESIDENCIAIS: Estudo comparativo de normas e padrões sob a ótica da mitigação da elevação de tensão**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais. [S.l.], p. 106. 2017.

ANEEL. **Resolução normativa nº 414/2010**. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada., 2010a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 414/2010**, 2010b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2019.

ANEEL. **Resolução normativa nº 481/2012**. Altera a resolução nº77 de 18/06/04, 2012a. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012481.pdf>. Acesso em: 13 Março 2018.

ANEEL. **Resolução normativa nº 482/2012**. Acesso de Microgeração e Minigeração distribuída, 2012b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 01 Maio 2018.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 479/2012**. Altera a resolução nº414/2010, 2012c. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012479.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2018.

ANEEL. **Resolução normativa nº 687/2015**. Altera a resolução normativa nº 482/2012, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 14 Maio 2018.

ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica. **Cadernos Temáticos ANEEL**, Brasília, n. 2, p. 41, Maio 2016.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 8 Revisão 10– Qualidade de Energia Elétrica, 2017a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 27 maio 2018.

ANEEL. **Nota Técnica nº0056/2017** . Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024, 2017b. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica\\_0056\\_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9). Acesso em: 14 Maio 2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 786/2017**. Altera a resolução normativa nº 482/2012, 2017c. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2018.

ANEEL. Geração distribuída - Data de conexão ao sistema. **ANEEL**, 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/VerGD.asp>. Acesso em: 26 Junho 2019.

BELISKI, L. M.; SCARAMBELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A. ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM UNIDADES PROSSUMIDORAS RESIDENCIAIS. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 17 a 20 Abril 2018.

BORGES, R. T. **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE SISTÊMICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GERAÇÃO ULTRA-DISPERSA**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas. [S.l.], p. 134. 2014.

CAAMAÑO-MARTÍN, E. et al. **STATE-OF-THE-ART ON DISPERSED PV POWER GENERATION: Publications review on the impacts of PV Distributed Generation and Electricity networks**. Intelligent Energy, Europe. [S.l.], p. 59. 2007.

CEPEL. **Grupo de trabalho de energia solar - Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

COPEL DISTRIBUIÇÃO. **NTC 905200 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da COPEL**, 2014. Disponível em: [www.copel.com/hpcopel/normas/](http://www.copel.com/hpcopel/normas/). Acesso em: 27 maio 2018.

COPEL DISTRIBUIÇÃO. **DESPACHO DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA, P&D-2866-0378/2013**. Projeto P&D ANEEL. Curitiba. 2019.

DE SOUZA, A. R. R. **CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**. Dissertação, (Dissertação em Engenharia Elétrica), UFPR. Curitiba, p. 108. 2009.

EICHKOFF, H. S.; MARQUES, R. C.; MELLO, A. P. C. D. ANÁLISE DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA O CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS MODERNOS DE DISTRIBUIÇÃO. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 17 a 20 de Abril 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético Nacional 2018. **Relatório síntese, ano base 2017**, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em: 22 de Junho 2019.

IMS. **IMS Soluções em Energia LTDA**, 2019. Disponível em: <http://www.ims.ind.br>. Acesso em: 19 Maio 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy statistics. **Electricity generation by fuel - Brazil**, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/stats/WebGraphs/BRAZIL2.pdf>. Acesso em: 28 Maio 2018.

LOPES, J. A. P. et al. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. **Electric Power Systems Research**, 2007. Vol.77 p. 1189-1203.

LORA, E. S.; HADDAD, J. **Geração distribuída: Aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

LUIZ, C. M. **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - UFMG. Belo Horizonte, p. 151. 2012.

MME. ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO - Ano referência 2016, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>. Acesso em: 15 Maio 2018.

NASCIMENTO, M. A. P. **Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica. Dissertação (Mestrado)**. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. Lisboa, p. 106. 2013.

PALUDO, J. A. **Avaliação dos impactos de elevados níveis de penetração da geração fotovoltaica no desempenho de sistemas de distribuição de energia elétrica em regime permanente**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - USP. São Carlos, p. 188. 2014.

PATIL, A.; GIRGAONKAR, R.; MUSUNURI, S. K. Impacts of Increasing Photovoltaic penetration on distribution Grid - Voltage Rise Case Study. **International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE)**, Trivandrum, 17-18 Dezembro 2014.

SINGH, S. N. Distributed Generation in Power Systems: An Overview and Key Issues. **24th Indian Engineering Congress**, Kerala, Dezembro 2009.

SOLAR ENERGY DO BRASIL. **Solar Energy**, 2018. Disponível em: [www.solarenergy.com.br](http://www.solarenergy.com.br). Acesso em: 08 Maio 2018.

SOUZA, M. E. M. D. **INSERÇÃO DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA NAS REDES DE BAIXA TENSÃO: IMPLANTAÇÃO DE TELHADOS SOLARES - ESTUDO DE CASO REAL**. Dissertação (Mestrado).. Programa de Pós-graduação em Engenharia elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 120. 2014.

ŠÚRI, M. et al. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. **Solar Energy** **81**, 2007. p. 1295-1305.

TIEPOLO, G. M. et al. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NO ESTADO DO PARANÁ – RESULTADOS PARCIAIS. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Belo Horizonte, 04 a 07 Abril 2016a. 8.

TIEPOLO, G. M. et al. COMPARAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO ESTADO DO PARANÁ COM OUTROS ESTADOS E EUROPA – RESULTADOS PARCIAIS. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Belo Horizonte, 04 a 07 Abril 2016b. 8.

URBANETZ JR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a redes de Distribuição Urbanas: Sua influencia na Qualidade de energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar sua conectividade**. Tese (Doutorado em Engenharia civil) - UFSC. Florianópolis, p. 189. 2010.

URBANETZ JR, J.; RÜTHER, R. **QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E O FUNCIONAMENTO DE INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. Revista Brasileira de Energia Solar. [S.l.]. 2011.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar fotovoltaica, conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.