



Universidade Federal  
de Campina Grande

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EDUARDO SILVA FERNANDES**

**IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR FOTOVOLTAICA SOBRE A**  
**REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**

**CAMPINA GRANDE**

**2021**

EDUARDO SILVA FERNANDES

**IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA SOLAR FOTOVOLTAICA SOBRE A  
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Geração Distribuída fotovoltaica

**Orientador:** Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas

**CAMPINA GRANDE  
2021**

EDUARDO SILVA FERNANDES

IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA SOLAR FOTOVOLTAICA SOBRE A REDE  
DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Geração Distribuída  
fotovoltaica

Aprovado em        /        /

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Pablo Bezerra Vilar**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

**Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Josinaldo e Luciene, as minhas irmãs, Larissa e Vanessa, e à minha namorada Tainá, também aos meus amigos que sempre me apoiaram de várias formas nesta longa e difícil caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ser um milagre do senhor, por ter me dado uma família maravilhosa que sempre me apoiou e me deu forças para lutar e alcançar meus objetivos, por não ter me deixado cair em tentações e ter me livrado de todo mal.

Agradeço à minha mãe, Luciene, por ter se empenhado a vida inteira em dar uma educação cristã em nosso lar, fazendo de mim um ser mais humano, o que me tornou uma pessoa centrada, forte e humilde. Agradeço ao meu pai por ser meu maior exemplo de homem, com sua fibra moral e caráter íntegro, me fez herdar a honestidade e a sensatez que um pai, um filho, um cristão, que um líder deve ter. Agradeço a minha irmã Vanessa, pelo ser maravilhoso que ela é, e foi com ela que aprendi a correr atrás dos meus sonhos, a tratar todo mundo bem, a estar sempre de bem com a vida, não importa o que aconteça. Agradeço a minha irmã Larissa, pois com ela aprendi a ser centrado, a observar antes de falar, a saber renunciar por um bem maior, a saber estar presente mesmo em silêncio, a perseverar no caminho do senhor. Por último e não menos importante, gostaria de agradecer a minha futura esposa, Tainá, por ser meu maior exemplo de esforço e perseverança, sempre com muita sensatez, amor, humildade e cumplicidade, que me ensinou a ouvir e perdoar. Hoje eu concluo esta nova etapa, com uma bagagem acadêmica enorme graças aos meus professores e ao nosso departamento de engenharia elétrica e a todo meu empenho e vontade de querer aprender mais, mas hoje eu me sinto um homem, preparado para a vida cristã, para o comércio, para seguir, seja como for, seja como Deus quiser e aqui me vejo concluindo uma fase e começando uma nova jornada.

Agradeço aos meus amigos, que de forma fundamental me ajudaram neste curso, seja com estudos, várias madrugadas, mas também com bons momentos de descontração, festas, sem eles seria muito mais difícil essa caminhada para concluir o curso.

Agradeço ao meu professor e orientador Karcus Marcelus Colaço Dantas por ter aceitado meu convite e me orientado da melhor forma possível.

Enfim, agradeço a todos meus familiares e as pessoas que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou atualmente, e para a realização deste trabalho.

*“Grandes conquistas exigem grandes responsabilidades,  
Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários”  
C.S Lewis*

## RESUMO

Este trabalho consiste em mostrar os princípios básicos de funcionamento dos sistemas solares conectados à rede elétrica da concessionária local e familiarizar a todos sob a geração de energia elétrica, enfatizando a tecnologia de geração solar fotovoltaica para a microgeração de energia. Com uma linguagem simples, deseja-se abordar como é gerada a energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos, dando ênfase à sua estrutura, aos tipos de sistemas existentes e as devidas especificações técnicas para escolha do sistema. Será abordado de forma concisa o que é necessário para fazer a instalação do sistema de geração de energia solar que se enquadra na microgeração estabelecida pela resolução normativa REN 482/2012 ANEEL, tais como equipamentos, direcionamento e inclinação dos módulos fotovoltaicos, influência da incidência solar para o planejamento do projeto e os efeitos indesejáveis que os sistemas solares fotovoltaicos mal dimensionados poderão ocasionar na rede elétrica da concessionária de baixa tensão, podendo chegar ao comprometimento do bom funcionamento da rede elétrica local, ou até mesmo do sistema solar em questão. Por fim, será mostrado como identificar e proceder para solucionar tais efeitos indesejáveis.

**Palavras-chave:** Energia solar. Sistema solar fotovoltaico. ABSolar

## **ABSTRACT**

This work consists of showing the basic principles of operation of the solar systems connected to the electric grid of the local concessionaire and familiarizing everyone with the generation of electric energy, emphasizing the technology of photovoltaic solar generation for the micro generation of energy. With a simple language, we want to address how electrical energy is generated through photovoltaic modules, emphasizing its structure, the types of existing systems and the appropriate technical specifications for choosing the system. to install the solar energy generation system that fits the microgeneration established by normative resolution REN 482/2012 ANEEL, such as equipment, direction and inclination of photovoltaic modules, influence of solar incidence for project planning and undesirable effects that poorly dimensioned photovoltaic solar systems may cause the electrical network of the low voltage concessionaire, which may compromise the proper functioning of the local electrical network, or even the solar system in question. Finally, it will be shown how to identify and proceed to solve such undesirable effects.

**Keywords:** Solar energy. Photovoltaic solar system. ABsolar



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Linha do zênite e o ângulo zenital. ....	15
<b>Figura 2</b> - Gráfico da Irradiância em função do tempo em uma localidade sem nuvens. ....	16
<b>Figura 3</b> – Gráfico da Irradiância em função do tempo em uma localidade com poucas nuvens. ....	17
<b>Figura 4</b> - Média diária da irradiação solar para cada mês .....	18
<b>Figura 5</b> - Correção da declinação magnética .....	19
<b>Figura 6</b> - Célula fotovoltaica recebendo irradiação e convertendo em eletricidade. ....	20
<b>Figura 7</b> - Modelo elétrico da célula fotovoltaica.....	20
<b>Figura 8</b> - Fluxo de corrente em um sistema solar fotovoltaico com geração maior que consumo.....	22
<b>Figura 9</b> - Fluxo de corrente em um sistema solar fotovoltaico com geração menor que o consumo .....	23
<b>Figura 10</b> - Fluxo de corrente elétrica quando não há geração fotovoltaica .....	23
<b>Figura 11</b> - Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico com proteções DC e AC.....	25
<b>Figura 12</b> - Curva I xV de um módulo fotovoltaico.....	25
<b>Figura 13</b> - Curva I x V para diferentes níveis de irradiância .....	28
<b>Figura 14</b> - Curva I x V para diferentes temperaturas de células.....	29
<b>Figura 15</b> - Modelo ideal de um cabo elétrico sobe uma rede AC .....	30
<b>Figura 16</b> - Termografia de uma conexão inapropriada .....	31
<b>Figura 17</b> - Inversor Sungrow desconectando por sobretensão apresentando erro 002 no <i>display</i> .....	34
<b>Figura 18</b> - Efeito da queda de tensão na instalação elétrica. ....	35
<b>Figura 19</b> - Efeito da queda de tensão na instalação elétrica com fluxo invertido. ....	36
<b>Figura 20</b> - Quando o consumo interno é inferior à geração solar .....	37
<b>Figura 21</b> - Circuito equivalente de um transformador real.....	38
<b>Figura 22</b> - Circuito equivalente de uma fonte em plena carga. ....	38
<b>Figura 23</b> - Limite de queda de tensão, NBR5410 - Norma de instalações elétricas de baixa tensão.....	40
<b>Figura 24</b> - Limites de tensão de inversores conectados à rede, NBR16149.....	41
<b>Figura 25</b> - Caso extremo de desligamento por elevação de tensão. ....	42
<b>Figura 26</b> - Desligamento por elevação de tensão do inversor. ....	42
<b>Figura 27</b> - Comportamento de geração de um inversor configurado erroneamente.....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
Ah	Ampere-hora
DPS	Disjuntor de Proteção Contra Surtos
DTM	Disjuntor Termomagnético
G	Irradiância
H	Radiância
H	Horas
K	Quilo
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
mm <sup>2</sup>	Milímetro quadrado
MPPT	Maximum Power Point Tracking
V	Volt
T	Temperatura.
t	Tempo.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
	<b>1.1 Motivação .....</b>	<b>13</b>
	<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
	<b>2. 1 Conceitos Básicos da Energia Solar.....</b>	<b>14</b>
	2.1.1 Irradiância.....	16
	2.1.2 Insolação .....	17
	2.1.4 Modelo Elétrico de Célula Fotovoltaica .....	19
<b>3</b>	<b>FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA</b>	<b>22</b>
	<b>3.1 Inversores conectados à rede Elétrica .....</b>	<b>24</b>
	<b>3.2 Dispositivos de Proteção Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos.....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS .....</b>	<b>25</b>
	<b>4.1 Curva Característica I x V .....</b>	<b>25</b>
	<b>4.2 Fatores de Influência na Geração FV.....</b>	<b>27</b>
	<b>4.3 Influência da Radiação Solar .....</b>	<b>27</b>
	<b>4.4 Influência da Temperatura .....</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>PATOLOGIAS DO SISTEMA SOLAR FV.....</b>	<b>31</b>
	<b>5.1 Desligamento do inversor .....</b>	<b>31</b>
	5.1.1 Subfrequência .....	32
	5.1.2 Sobrefrequência.....	32
	<b>5.2 Causas do desligamento .....</b>	<b>34</b>
	5.2.1 Impedância de Rede .....	35
<b>6</b>	<b>PROCEDIMENTOS DESENVOLVIDOS.....</b>	<b>40</b>
	6.1 Impedância Interna .....	43
	6.2 Impedância Externa.....	44
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>44</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com a atualização das resoluções normativas nacionais referentes à geração distribuída, os sistemas de micro e minigeração solar fotovoltaica tomaram força no Brasil. Utilizando principalmente das mídias digitais, empresários, engenheiros e economistas difundiram a informação técnica e econômica a respeito desta tecnologia. Embora seja utilizada desde os anos 2000 através da rede elétrica, a energia solar fotovoltaica se tornou acessível através das linhas de financiamento desenvolvidas pelos gestores dos bancos nacionais que avaliaram, com base na garantia e vida útil do sistema, ser um investimento rentável, com baixo risco e baixa taxa de inadimplência. Desta forma, a geração distribuída fotovoltaica no Brasil atingiu no ano de 2021 a marca de 12,562 GW de potência instalada, com base na projeção feita pela ABSOLAR. O fato é que a geração distribuída no Brasil em 2021 atingirá cerca de 1,87% de nossa matriz energética, estando ainda entre os menores percentuais da composição conforme visto em [1]. Apesar disso, os sistemas solares fotovoltaicos estão sob análise pelos órgãos governamentais, pois, embora seja um percentual pequeno, a previsão da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSolar) é que o país atinja em 2021 cerca de 175 mil sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica instalados (0,21% das unidades consumidoras de acordo com [2]). O que faz da energia solar fotovoltaica uma grande tendência para o novo ano.

## 1.1 Motivação

Em virtude da alta procura por sistemas fotovoltaicos, estão sendo implementados cada vez mais sistemas de geração distribuída conectados à rede da concessionária local. Contudo, em virtudes e vantagens, o sistema solar fotovoltaico afeta e altera a composição e qualidade da energia elétrica na rede de baixa tensão, já que nosso sistema elétrico nacional é interligado.

## 1.2 Objetivos

Com o desenvolvimento de sistemas solares fotovoltaicos foi constatado que problemas de impedância de rede tornava-se cada vez mais frequente. Deste modo, este trabalho busca relatar, identificar e avaliar os efeitos indesejáveis da geração distribuída solar fotovoltaica sobre a rede elétrica. Através de um método de inspeção desenvolvido, é possível identificar pontualmente tais efeitos e buscar as soluções com base em técnicas de medições e análise de circuitos elétricos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico, para que sejam melhor entendidos os conceitos sobre os sistemas solares fotovoltaicos, serão revisados os conceitos básicos fundamentais presentes no estudo em questão. Iniciando-se por tipos de sistemas solares fotovoltaicos, veremos os conceitos sobre tensão contínua, dando ênfase às formas de associações e tensão alternada, explicitando os principais parâmetros de um sinal elétrico de baixa tensão padrão da rede elétrica local. De posse de tais informações, será visto ainda em forma de fundamentos os conceitos sobre efeito fotoelétrico e radiação solar, irradiância e os principais elementos de um sistema conectado à rede elétrica da concessionária local (*on grid tie*) como: painel solar fotovoltaico, quadros de proteção DC, quadro de proteção AC, inversores, e o medidor bidirecional.

### 2.1 Conceitos Básicos da Energia Solar

O sol é a principal fonte de energia do planeta terra. Essa energia chega ao nosso planeta em forma de ondas eletromagnéticas de diferentes frequências e comprimentos de onda. Quanto maior a frequência da onda, maior é a energia transmitida por ela. Podemos notar a relação entre frequência e energia através da equação de Planck logo abaixo:

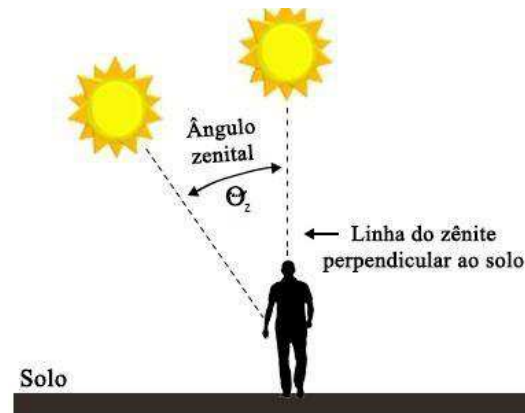
$$E = h \cdot f \quad (1)$$

Onde:

- $E$  – Energia da onda (dada em Joules [J] ou elétrons-volt[eV]);
- $f$  - Frequência da onda (dada em hertz [Hz]);
- $h$  - Constante de proporcionalidade que vale aproximadamente  $6,636 \cdot 10^{-34}$  [J.s]

Até chegar à superfície da terra, a radiação solar sofre algumas alterações devido a massa de ar na qual ela atravessa. Partículas de poeira e vapor de água são fatores que podem afetar as características da radiação solar devido aos efeitos de espalhamento e absorção. Além disso, a espessura da massa de ar no qual a radiação solar atravessa depende do comprimento da trajetória dela até o solo. Tal trajetória é função do ângulo de inclinação do sol em relação à uma linha imaginária perpendicular ao solo, como ilustrado na Figura 1. A essa linha imaginária dá-se o nome de linha do zênite.

**Figura 1** - Linha do zênite e o ângulo zenital.



Fonte: Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

A Massa de Ar (AM, do inglês Air Mass) é a denominação dada ao comprimento relativo que a radiação solar direta percorre até atingir a superfície da terra. Para um ângulo zenital entre 0 e 70° o AM pode ser definido pela equação abaixo:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2)$$

Para um ângulo zenital maior que 70° a equação acima já não é mais válida pois devem ser levados em consideração os efeitos gerados pela curvatura da terra. Quando o sol se encontra no zênite temos a massa de ar igual a 1, para esse caso dá-se o nome de AM1. Denomina-se AM2 quando o ângulo zenital é de 60° e AM0 quando não há massa de ar no percurso da radiação solar.

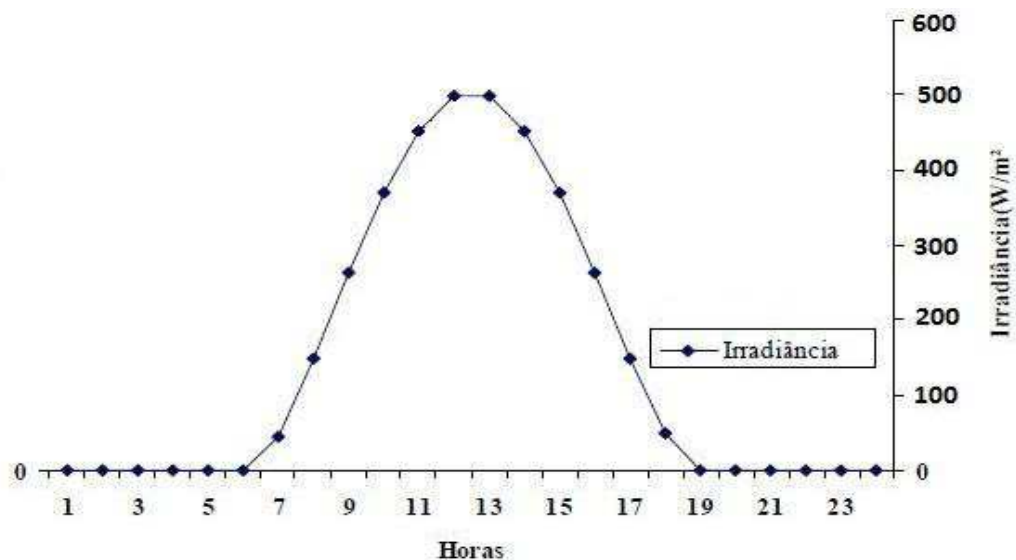
No entanto o AM1,5 é o que é mais utilizado em situações práticas, pois considera a radiação solar atravessando uma espessura de atmosfera 50% maior que quando o sol se encontra no zênite. Além do mais, AM1,5 é o valor padrão de teste em laboratório para caracterização dos módulos fotovoltaicos comerciais.

### 2.1.1 Irradiância

O termo irradiância é utilizado quando se trata da potência solar irradiada em uma área de  $1\text{m}^2$ . Sua unidade de medida é expressa em watt por metro quadrado [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] e tem como principal instrumento de medição o piranômetro (instrumento capaz de receber radiação em um ângulo de até  $180^\circ$  e as direcionam em um sensor localizado em seu centro).

O perfil de irradiância diária de um local pode ser traçado ao registrar os valores de irradiância nessa localidade a um intervalo de tempo determinado. O gráfico da Figura 2 representa um dia ideal, onde não há ocorrência de nuvens durante o dia.

**Figura 2** - Gráfico da Irradiância em função do tempo em uma localidade sem nuvens.



Fonte: Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

Se tratando de uma situação real, onde há ocorrência de nuvens gerando sombreamento no local, o perfil de irradiância já pode ser bem diferente do caso ideal. Apesar de indesejado, o efeito abaixo é comum e na prática o que ocorre são as formações de pequenos vales na curva de irradiância causados por sombreamentos durante o dia, diminuindo assim o nível de irradiância naquele local e, conseqüentemente, diminuindo a produção de energia. O gráfico abaixo foi retirado do aplicativo de monitoramento iSolarCloud da planta de um usuário com acesso restrito.

**Figura 3** – Gráfico da Irradiância em função do tempo em uma localidade com poucas nuvens.



**Fonte:** Próprio autor.

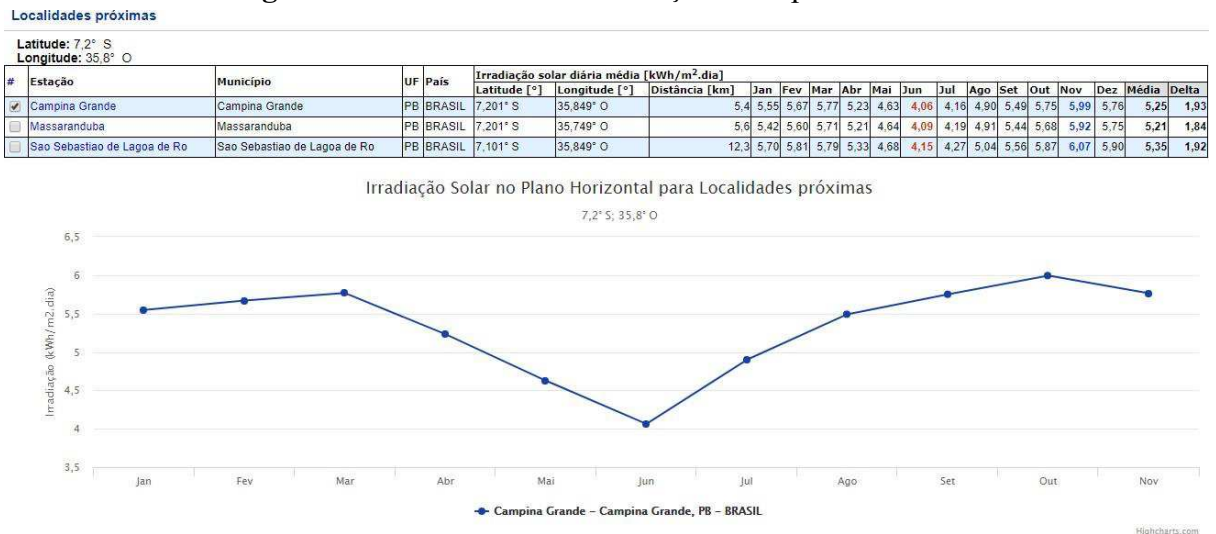
### 2.1.2 Insolação

Ao realizar o cálculo da área sob a curva de irradiância podemos obter a quantidade de energia irradiada por  $m^2$ . Tal grandeza é medida em watt hora por metro quadrado [ $wh/m^2$ ], sendo assim denominado insolação. A insolação é uma das principais grandezas para realização do dimensionamento de sistemas de energia solar, seja ele fotovoltaico ou de aquecimento.

Os dados de insolação diária podem ser obtidos de diversas formas, tanto através de mapas solarimétricos (onde a resolução dos dados é baixa) ou através de bancos de dados meteorológicos espalhados pelo país. Muitos *softwares* utilizam desses bancos de dados e através de métodos numéricos conseguem estimar valores aproximados de insolação de localidades em que não há estações meteorológicas.

Uma ferramenta gratuita que é bastante utilizada para estimar valores de insolação em uma localidade é o SUNDATA desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), o mesmo pode ser acessado através da página do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (Cresesb) disponibilizado em [4]. Outra ferramenta gratuita é o software RADIASOL 2 desenvolvido por pesquisadores do LABSOL da UFRGS. O software pode ser encontrado para download em [5]. A Figura 4 mostra a média de Irradiação diária para cada mês para a cidade de Campina Grande no estado da Paraíba. O gráfico foi gerado pelo software SUNDATA disponível em [4].



**Figura 4 - Média diária da irradiação solar para cada mês.**

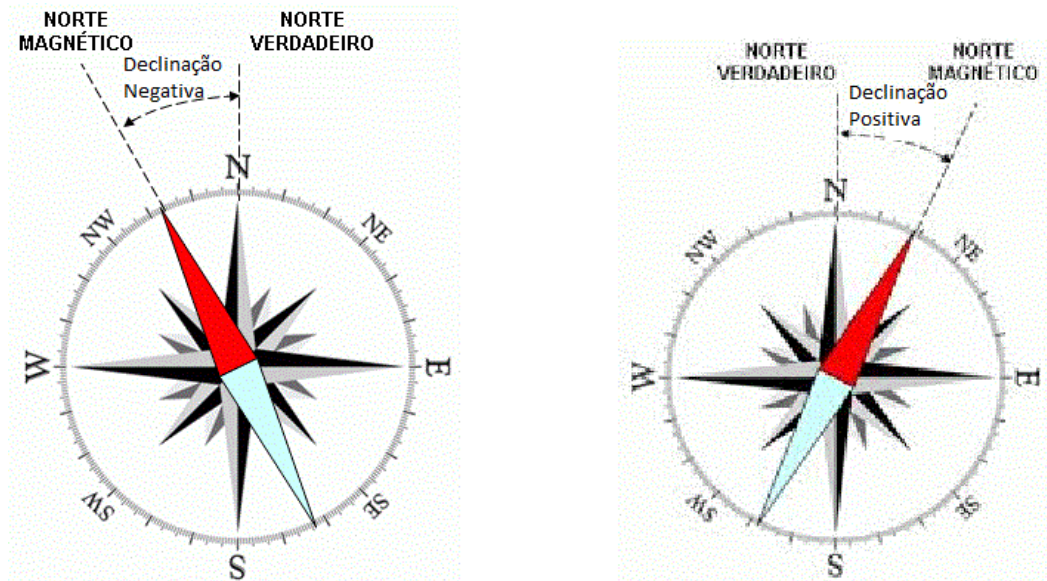
Fonte: Potência solar - sundata v 3.0. [4].

### 2.1.3 Posicionamento dos Módulos

Para o posicionamento correto dos módulos, existem diversos fatores além dos mencionados acima que são cruciais para o bom rendimento e o bom funcionamento do sistema solar fotovoltaico. Contudo, muitas vezes analisar tais fatores se torna impossível já que a maioria dos locais que serão instalados os sistemas solares fotovoltaicos não nos dão liberdade para direcionar os módulos para garantir o máximo de rendimento devido aos telhados estarem instalados sem o posicionamento correto. Desta forma, vamos apenas mencioná-los aqui com a finalidade do conhecimento inicial da existência de tais fatores que são: Movimentos de rotação e translação da terra; declinação magnética, insolação e inclinação. Tais fatores afetam o rendimento do sistema solar no que diz respeito a captação da radiação solar fotovoltaica.

Desta forma, em nossa região, podemos considerar que o posicionamento mais adequado para os painéis solares seja para o norte geográfico com uma declinação magnética de aproximadamente 18 graus e uma inclinação de 15 graus. Desta forma, garante-se que o sistema solar, no que diz respeito a captação de radiação, funcione de maneira adequada. A figura 5 mostra para onde devemos direcionar os módulos em um sistema ideal.

**Figura 5** - Correção da declinação magnética



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

#### 2.1.4 Modelo Elétrico de Célula Fotovoltaica

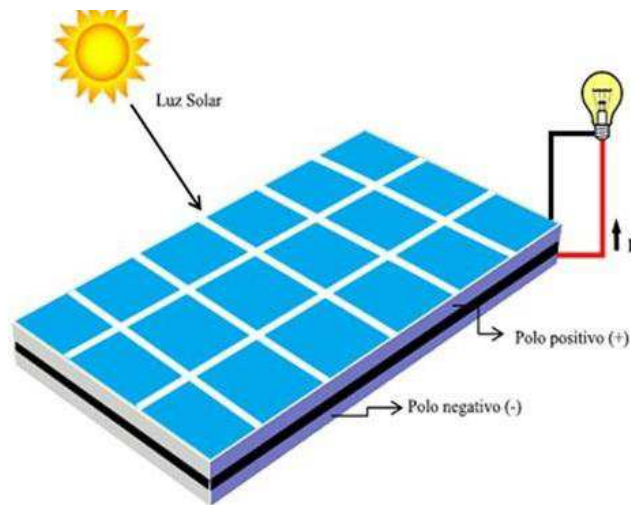
A célula fotovoltaica é o elemento principal na geração de eletricidade a partir da energia solar. Quando uma célula fotovoltaica é exposta a luz surge uma tensão em seus terminais e assim a capacidade de gerar corrente elétrica. A palavra fotovoltaica vem de “phos”, que possui sua raiz na língua grega que significa ‘luz’ e Voltaica, da unidade de medida de tensão elétrica volt.

As células fotovoltaicas são feitas de materiais semicondutores, onde o material que é mais utilizado para a fabricação delas é o silício. No entanto, o silício por si só não é capaz de gerar muita eletricidade quando exposto à luz. Para gerar eletricidade o silício é misturado com outros materiais (a exemplo do fósforo e boro).

A mistura desses materiais com o silício faz com que a célula fotovoltaica gere corrente elétrica em apenas um sentido, em outras palavras, as células fotovoltaicas geram corrente contínua.

Veja na Figura 6 uma célula fotovoltaica recebendo radiação solar e convertendo em eletricidade para alimentar uma carga.

**Figura 6** - Célula fotovoltaica recebendo irradiação e convertendo em eletricidade.

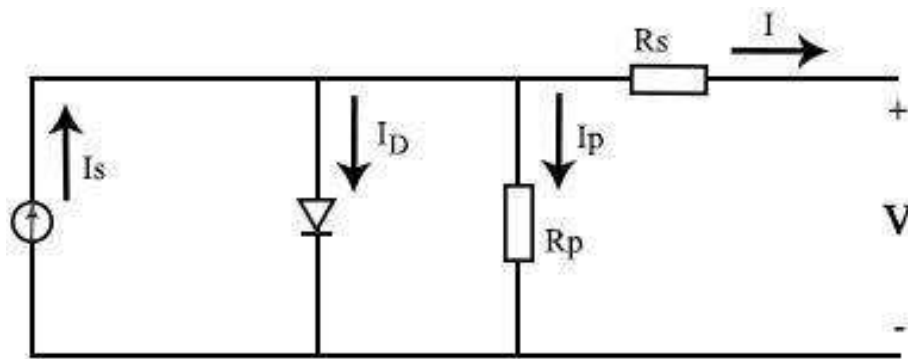


**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

Se expusermos uma célula fotovoltaica ao sol e ligarmos uma carga formando um circuito elétrico fechado podemos medir com um amperímetro a corrente gerada e com um voltímetro a tensão da célula aplicada a essa carga.

A célula fotovoltaica pode ser modelada eletricamente e representada por um circuito equivalente composto de uma fonte de corrente [6], um diodo e resistências.

**Figura 7** - Modelo elétrico da célula fotovoltaica.



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

Onde:

$R_p$  = Resistência em paralelo que representa as perdas por correntes parasitas que circulam na célula devido às imperfeições na estrutura do material, sendo também relacionadas a perdas ôhmicas por efeito *joule*;

$R_S$  = Resistência em série que representa as perdas ôhmicas por efeito *joule* devido às resistências dos contatos elétricos das células;

$I_S$  = Corrente elétrica gerada pela célula;

$I_D$  = Corrente que passa no diodo;

$I_P$  = Corrente que passa na resistência paralela;

$I$  = Corrente fornecida à carga;

$V$  = Tensão de saída da célula fotovoltaica;

Sendo a corrente do diodo calculada pela equação:

$$I_D = I_0 * \left( e^{\frac{V}{m * V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Onde  $I_0$  é a corrente de saturação do diodo,  $m$  o fator de idealidade que pode ter seu valor entre 1 e 2 e  $V_T$  é a tensão térmica calculada por:

$$V_T = \frac{k * t}{q} \quad (4)$$

Nessa equação,  $k$  é a constante de Boltzmann e vale  $1,38 * 10^{-23}$ ,  $t$  é a temperatura da célula medida em kelvin (°K) e  $q$  é a carga do elétron que vale  $1,6 * 10^{-19}$  Coulomb.

Ao aplicarmos a Lei de Kirchhoff das correntes no circuito do modelo elétrico da célula fotovoltaica, teremos:

$$I = I_S - I_D - I_P \quad (5)$$

$$I = I_S - I_0 * \left( e^{\frac{V}{m * V_T}} - 1 \right) - I_P \quad (6)$$

$$I = I_S - I_0 * \left( e^{\frac{V}{m * V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S * I}{R_P} \quad (7)$$

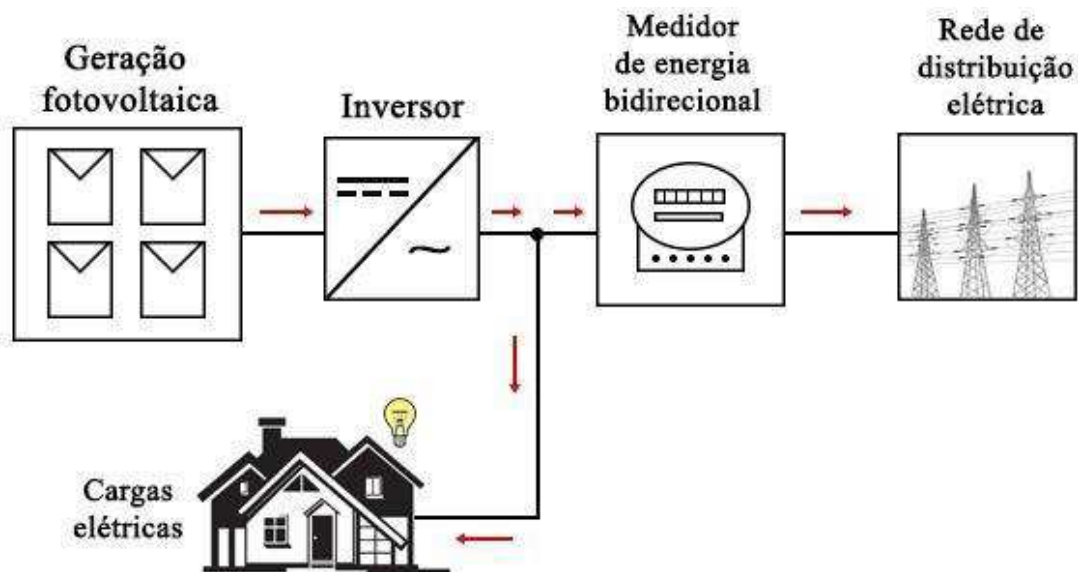
Da equação acima podemos notar que as resistências  $R_S$  e  $R_P$  interferem no funcionamento da célula e influenciam no fator de forma da curva característica dela. Tendo  $R_S$  valor muito elevado e  $R_P$  Valor muito baixo a corrente de curto-circuito da célula é reduzida e assim sua potência também é reduzida. O ideal é que  $R_S$  tenha valores muito baixos, da ordem

de 0,001 ohm reduzindo a perda por efeito joule e  $R_p$  apresente valores elevados, da ordem de 500 ohms minimizando as perdas por correntes parasitas.

### 3 FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Os sistemas conectados à rede elétrica são instalados em paralelo à rede local e seu funcionamento é muito simples. No momento em que o sistema fotovoltaico gera mais energia do que está sendo consumido, o excesso de energia é injetado na rede elétrica e registrada por um medidor do tipo bidirecional.

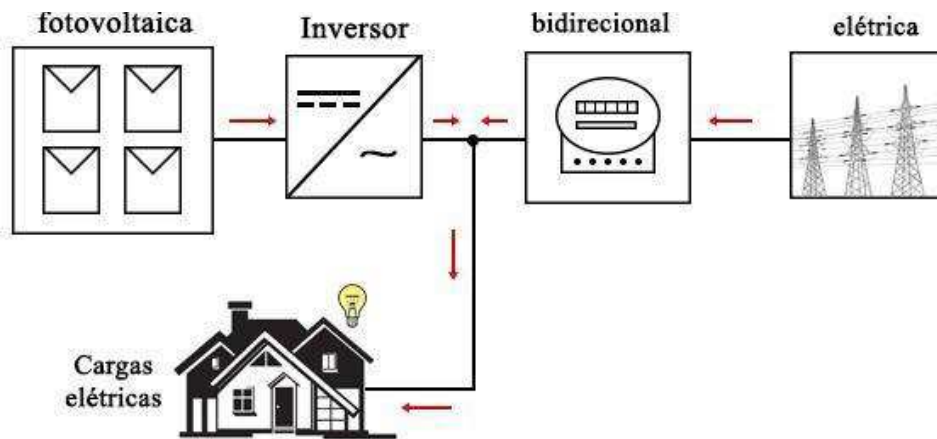
**Figura 8** – Fluxo de corrente em um sistema solar fotovoltaico com geração maior que consumo.



Fonte: Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

No momento em que a geração é menor que o consumo de energia, a rede elétrica passa a fornecer a energia que falta às cargas e o consumo de energia da rede é registrado pelo medidor.

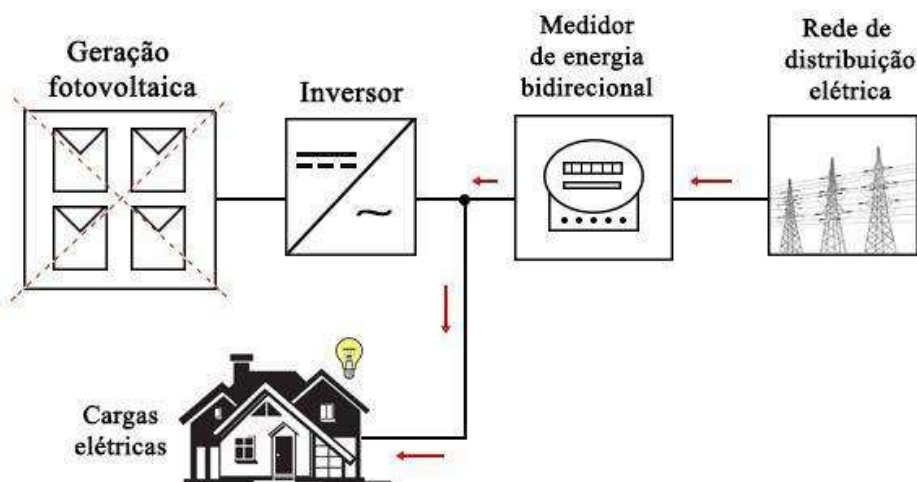
**Figura 9** - Fluxo de corrente em um sistema solar fotovoltaico com geração menor que o consumo



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

Durante a noite, momento em que os módulos fotovoltaicos não geram energia, toda energia consumida pelas cargas é fornecida pela rede elétrica local e todo consumo é também registrado pelo medidor bidirecional de energia elétrica.

**Figura 10** – Fluxo de corrente elétrica quando não há geração fotovoltaica.



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

A fatura de energia elétrica que chega mensalmente ao usuário deve informar a quantidade de energia elétrica injetada na rede e a quantidade de energia elétrica consumida da rede naquele mês. A energia cobrada ao usuário será o valor líquido entre o que foi injetado na rede e o que foi consumido da rede elétrica. Caso o saldo do mês seja positivo para a geração, ou seja, a quantidade de energia injetada na rede tenha sido maior do que a energia consumida da rede naquele mês, será creditada em sua fatura de energia o excedente resultante da geração desse mês que poderá ser utilizado nos meses seguintes. Esse crédito tem validade máxima de 5 anos.

Muito embora o usuário feche o mês com saldo positivo na sua geração, ainda deverá ser cobrado um valor mínimo devido o estabelecido em contrato de prestação de serviços, como por exemplo iluminação pública, entre outros.

### **3.1 Inversores conectados à rede Elétrica**

Diferentemente dos inversores para sistemas isolados, os inversores para sistemas conectados à rede elétrica necessitam da rede para funcionar. Os inversores conectados à rede (também conhecidos como inversores Grid-Tie) realizam a leitura de parâmetros da rede, constantemente para trabalhar em sincronismo com ela. Caso algum desses parâmetros não esteja dentro de valores pré-definidos pelo fabricante ou usuário o inversor é desligado automaticamente e deixa de mandar energia para a rede.

### **3.2 Dispositivos de Proteção Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos**

Pelo que foi visto até agora podemos resumir um sistema fotovoltaico em três partes:

**Geração:** Compreende os módulos fotovoltaicos;

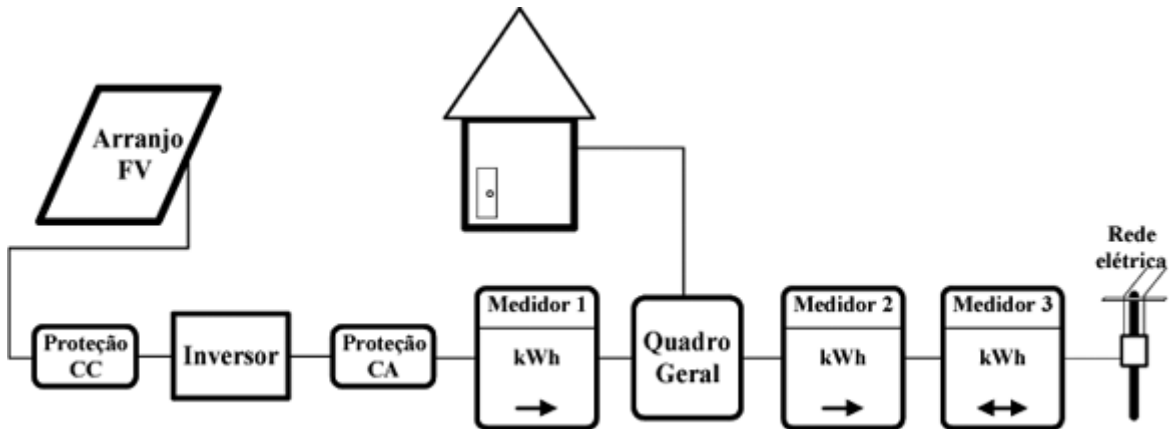
**Condicionamento de potência:** inversores;

**Cargas:** São os equipamentos que vão ser alimentados pelo sistema.

No entanto é muito importante que sejam empregados dispositivos de proteção elétrica no sistema, tanto na parte DC quanto na parte AC.

Vejamos onde devem ser inseridos os dispositivos de proteção nos sistemas fotovoltaicos isolados:

**Figura 11** - Diagrama em blocos de um sistema fotovoltaico com proteções DC e AC.



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

#### 4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Um módulo fotovoltaico pode ser especificado por sua potência elétrica de pico nominal ( $W_p$ ), no entanto, as características de tensão e corrente para módulos de mesma potência e de fabricantes diferentes podem variar um pouco.

A potência nominal ou potência de pico que é informada pelo fabricante é a potência que o módulo pode fornecer levando em consideração as condições de teste padrão realizadas em laboratório (*STC – do inglês Standard Test Conditions*). Após a fabricação de um módulo, o fabricante realiza testes de desempenho elétrico para traçar a curva característica do módulo e extrair alguns parâmetros importantes. Nesse teste, o módulo é colocado em uma câmara que simula níveis de radiação solar, temperatura e massa de ar fixos. A irradiância na qual o módulo é submetido é de  $1000W/m^2$ , a temperatura das células fotovoltaicas controlada em  $25^\circ C$  e a massa de ar (AM) de 1,5.

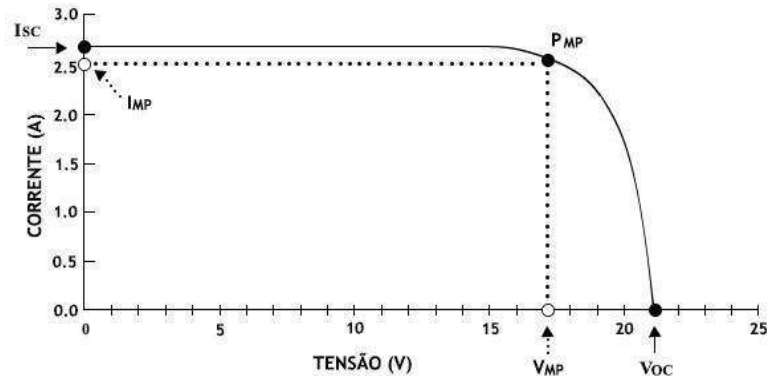
##### 4.1 Curva Característica I x V

O módulo fotovoltaico apresenta uma curva característica diferente das curvas de fontes de tensão convencionais. Mantendo um nível de irradiância fixa sobre o plano frontal do módulo



fotovoltaico, a tensão e a corrente dependem da carga que está conectada em seus terminais. A relação entre a tensão e a corrente de um módulo fotovoltaico é mostrada na figura abaixo:

**Figura 12** - Curva I x V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [16].

O ponto de operação do módulo pode excursionar toda a curva a depender da carga conectada. Podemos notar alguns pontos singulares nesta curva, tais como:

- **Isc – Corrente de Curto-Circuito:** Corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode fornecer. Como o próprio nome diz, ela é obtida a partir de um curto-circuito em seus terminais. Para realizar a medição de ISC basta curto circuitar os terminais do módulo e medir a corrente que flui com um amperímetro. Na curva acima esse valor é de aproximadamente 2,7A.
- **Voc – Tensão de Circuito Aberto:** Máxima tensão entre os terminais de um módulo. É quando ele não está fornecendo corrente elétrica. Pode ser medida com um voltímetro ligado aos terminais do módulo fotovoltaico sem que ele esteja alimentando qualquer carga, ou seja, em circuito aberto. Na curva acima essa tensão é de 21V.
- **Iimp – Corrente de Máxima Potência:** Valor de corrente que corresponde à situação na qual o módulo fornece máxima potência. Na curva essa corrente vale 2,5A.
- **Vmp – Tensão de Máxima Potência:** Valor de tensão que corresponde à situação na qual o módulo fornece máxima potência. Na curva essa tensão é de 17V.

- ***Pmp* – Ponto de Máxima Potência:** Máxima potência que o módulo fotovoltaico pode entregar para um determinado nível de irradiância solar, sendo o produto  $VMP \times IMP$ , portanto, se levarmos em consideração que essa curva foi traçada a partir das condições de teste padrão (STC = irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$  e massa de ar de 1,5).

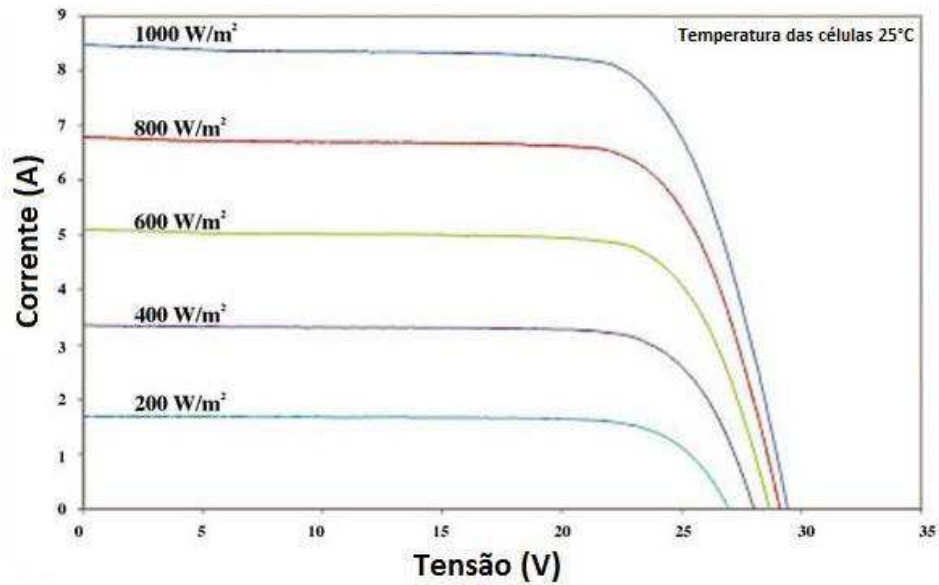
#### 4.2 Fatores de Influência na Geração FV

O sistema solar conectado à rede elétrica sofre influência dos dois pontos de operação. No lado CC, o principal fator que influencia a geração fotovoltaica é o nível de irradiância solar que chega até as células fotovoltaicas, mas existe outro fator que pode também influenciar na geração que é a temperatura das células. Já no lado AC, os principais fatores estão relacionados com a carga que está conectada, que podem vir a fazer o sistema não operar de maneira correta. Esta carga pode alterar os parâmetros necessários para o bom funcionamento do equipamento e levá-lo a operar fora do intervalo permitido de acordo com a REN 482/2012 da Aneel como encontrado em [7].

#### 4.3 Influência da Radiação Solar

A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar que incide sobre as células. Com uma irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em sua etiqueta (sob temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ). Com pouca luz a corrente fornecida pelo módulo é muito pequena e sua capacidade de gerar energia é severamente reduzida. Veja no gráfico da Figura 9 as diferentes curvas  $I \times V$  para diferentes níveis de irradiância.

**Figura 13-** Curva I x V para diferentes níveis de irradiância.



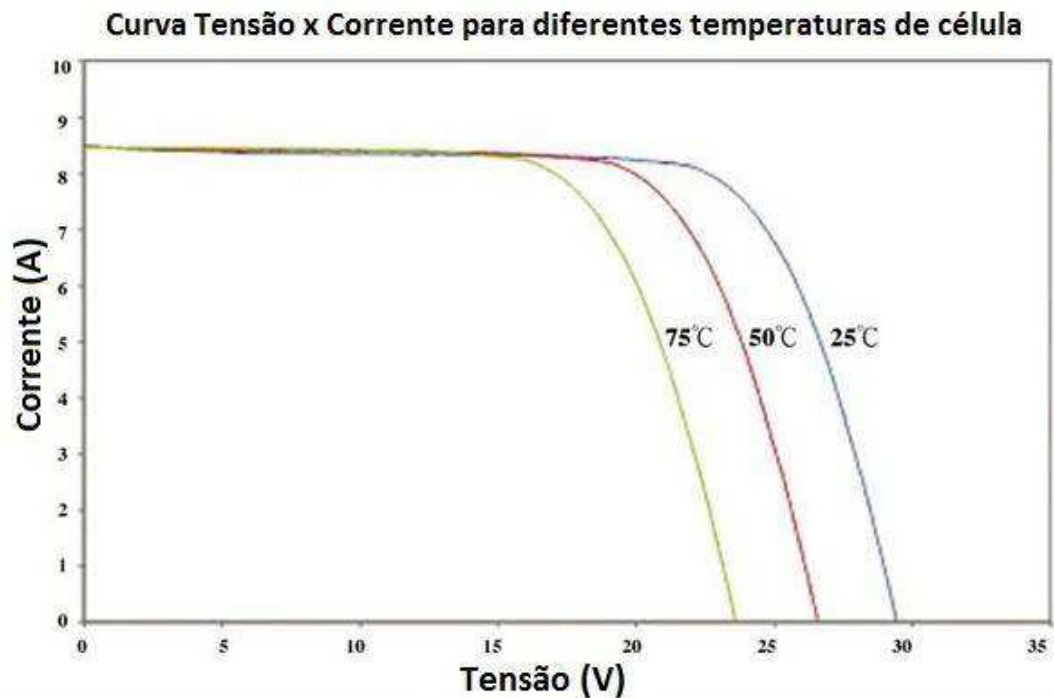
Fonte: Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [16].

Notamos que à medida que a irradiância solar diminui a corrente gerada pelo módulo cai quase que proporcionalmente enquanto a tensão do módulo pouco sofre com esse efeito. Concluimos que quanto menor a irradiância solar incidente no módulo menor será a potência gerada.

#### 4.4 Influência da Temperatura

A temperatura tem influência sobre a tensão que o módulo apresenta em seus terminais e, conseqüentemente, na potência fornecida por ele. Em temperaturas baixas a tensão aumenta e em temperaturas mais altas a tensão diminui como pode ser visto na análise gráfica abaixo:

**Figura 14** - Curva I x V para diferentes temperaturas de células



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [16].

Ao realizar a conexão elétrica do inversor de frequência, o sistema solar fotovoltaico conectado ao lado CC do mesmo, passa a estar interligado indiretamente a rede elétrica através do inversor de frequência. O fato principal é que efeitos do lado CC do inversor influenciam a geração do lado AC do mesmo. Tais efeitos mencionados estão relacionados a parâmetros elétricos que sofrem alterações do lado AC do inversor de frequência em virtude da irradiância do lado CC. Quando a carga do lado AC não está bem dimensionada, tal efeito pode fazer com que o sistema não funcione de maneira devida, prejudicando no que diz respeito a eficiência sobre a geração de energia.

Este efeito pode ser evitado muitas vezes realizando o condicionamento correto dos condutores assim como seu dimensionamento, realizando a ligação elétrica entre terminais adequados em relação ao seu ponto de conexão, minimizando o efeito de impedâncias parasitas sobre o equipamento.

Os condutores comumente utilizados em sistemas solares na parte CC são de alumínio e sobre a parte AC são de cobre. Tais condutores variam sua resistência elétrica de acordo com

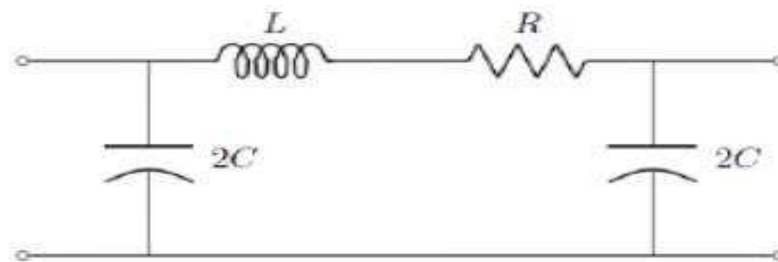
o comprimento do condutor, a área da seção e a resistência interna do material condutor a ser utilizado. Podemos concluir que uma seção mal dimensionada, ou uma distância elevada pode elevar a resistência do condutor, e quando ambos atuam mal dimensionados em conjunto, elevam a resistência de maneira drástica, prejudicando o sistema. Desta forma, a distância elevada associada a um condutor muito fino, dificulta a passagem da corrente elétrica, portanto sua resistência é maior.

Podemos concluir que um modelo de um cabo ideal mais completo relaciona fatores como a resistência, a capacitância e indutância do cabo. A capacitância e a indutância irão influenciar diretamente na tensão entre eles e o meio, e atenuados quando considerado o efeito para longas distâncias.

A impedância é que a somatória dos efeitos da resistência, da capacitância e da indutância, que, em sistemas fotovoltaicos tem sido uma patologia pouco conhecida e abordada nas literaturas.

É importante ressaltar que tal efeito ocorre apenas no lado AC do sistema solar fotovoltaico, embora os cabos do lado CC sejam de alumínio e possuam uma resistência relativa maior que os cabos de cobre, tal efeito não ocorre já que os efeitos capacitivos e indutivos são nulos devido aos efeitos naturais abordados no eletromagnetismo.

**Figura 15** - Modelo ideal de um cabo elétrico sobre uma rede AC.



**Fonte:** Instalação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos [3].

Uma forma de evitar uma alta impedância é evitar emendas e conexões sobre os cabos da rede alternada. Uma boa prática é utilizar terminais de conexões apropriadas a bitolas dos cabos e verificar o aperto das conexões utilizando máquinas de torque de precisão e câmeras térmicas para a identificação de pontos quentes no sistema.

Tais pontos com má conexão elétrica, além de ocasionar alta impedância e mal funcionamento dos sistemas solares fotovoltaicos, também causa aquecimento e perda de geração por efeito joule. A figura a seguir mostra o sobreaquecimento de um cabo e de um contato elétrico causado por uma má fixação.

**Figura 16** - Termografia de uma conexão inapropriada.



Fonte: [https://download.schneiderelectric.com/files?p\\_enDocType=Brochure&p\\_File\\_Name=Thermal\\_Monitoring\\_Schneider\\_Electric.pdf&p\\_Doc\\_Ref=BR172020NG00](https://download.schneiderelectric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Name=Thermal_Monitoring_Schneider_Electric.pdf&p_Doc_Ref=BR172020NG00).

## 5 PATOLOGIAS DO SISTEMA SOLAR FV

### 5.1 Desligamento do inversor

Uma patologia recorrente em sistemas solares fotovoltaicos é o desligamento do inversor de frequência repentino, que ocorre pela diferenciação entre a leitura de dados da rede elétrica em que ele está conectado e os parâmetros estabelecidos em sua configuração, estabelecidos pela REN 482/2012 da Aneel como visto em [7] e conforme a NDU013 disponível em [8]. Tais patologias podem ocorrer por sobretensão, subtensão, sobrefrequência, subfrequência e quando estes ocorrem, o sistema solar para de injetar corrente na rede elétrica realizando a desconexão da rede no ponto de conexão. Este efeito é denominado ilhamento.

De forma autônoma, o inversor de frequência continua a realizar leituras dos parâmetros fornecidos pela rede elétrica, e quando eles estão dentro dos valores permissíveis estabelecidos pelo instalador com base na NDU013 disponível em [8], o inversor realizará a reconexão após 180s. Este tempo é um parâmetro estabelecido pela REN482/2012 da Aneel que considera um

tempo seguro para a estabilização do sinal elétrico e o afastamento de um possível técnico da rede elétrica, caso ele esteja realizando uma manutenção próxima ao local.

### 5.1.1 Subfrequência

De acordo com a NDU013 disponível em [8], o sistema solar fotovoltaico deve funcionar dentro de uma faixa de frequência específica. Para redes com frequência nominal de 60 Hz em condições normais, foi estabelecido uma tolerância de subfrequência de operação, permitindo que os inversores de frequência permaneçam conectados até atingir 57,5 Hz. Ao atingir tais valores, o inversor deve realizar leituras de frequências instantâneas e caso ela permaneça em 57,5 Hz por um tempo de 200ms ele deverá interromper a conexão com a rede elétrica. Neste caso, o inversor emite em sua tela ou através de um *login* de acesso envia um informe de erro para a conta do cliente ou para a conta de acesso do instalador. Cada fabricante possui seu código de erro específico e o mesmo pode ser encontrado no manual do equipamento como exemplificado em [9]. A imagem abaixo mostra o momento em que um inversor *Sungrow* se desconecta da rede elétrica devido a subfrequência.

### 5.1.2 Sobrefrequência

De forma análoga ao item anterior, a NDU013 disponível em [8] estabelece que o sistema solar fotovoltaico deve funcionar dentro de uma faixa de frequência específica. Para redes com frequência nominal de 60 Hz em condições normais, foi estabelecido uma tolerância de sobrefrequência de operação, permitindo que os inversores de frequência permaneçam conectados até atingir 62 Hz. Ao atingir tais valores, o inversor deve realizar leituras de frequências instantâneas e caso ela permaneça em 62,0 Hz por um tempo de 200ms ele deverá interromper a conexão com a rede elétrica. Neste caso, será relatado ao usuário ou instalador através do monitoramento presencial (display do equipamento) ou remoto (via aplicativo) o problema em questão. O código disponibilizado pelo fabricante deve ser encontrado no manual do equipamento como exemplificado em [9].

### 5.1.3 Subtensão

Para o critério da parametrização da tensão de operação do inversor de frequência, é previsto pela NDU 013 em regime normal de operação a tensão no ponto de conexão de  $V > 80\%$  (0,8 PU)  $V_n$ . Tais parâmetros estabelecidos permite que o inversor de frequência opere abaixo da tensão nominal, onde a tensão de fase é 220V ou tensão de fase 127V de acordo com cada região. O critério de categorias de atendimento 380/220V e 220/127V é encontrado na NDU001 disponível em [10] e estabelece o fornecimento de energia elétrica a edificações individuais ou agrupadas até 3 unidades consumidoras. Para os locais atendidos pela categoria 220/127V a tensão de fase pode atingir até 101,6V sem que o funcionamento do inversor seja interrompido. Ao atingir este nível de tensão o inversor deverá se desconectar da rede elétrica em até 200ms. O mesmo processo ocorre para categoria de atendimento em 380V/220V, onde a tensão de fase mínima permitida para a geração de energia solar fotovoltaica é de 176V.

### 5.1.4 Sobreensão

Para o critério da parametrização da tensão de operação do inversor de frequência, é previsto pela NDU 013 disponível em regime normal de operação a tensão no ponto de conexão de  $V < 110\%$  (1,1 PU)  $V_n$ . Tais parâmetros estabelecidos permite que o inversor de frequência opere acima da tensão nominal, com tensão de fase de 220V ou 127V de acordo com cada região. O critério de categorias de atendimento 380/220V e 220/127V é encontrado na NDU001 disponível em [10] e estabelece o fornecimento de energia elétrica a edificações individuais ou agrupadas até 3 unidades consumidoras. Para os locais atendidos pela categoria 220/127V a tensão de fase pode atingir até 139,7V sem que o funcionamento do inversor seja interrompido. Ao atingir este nível de tensão o inversor deverá se desconectar da rede elétrica em até 200ms. O mesmo processo ocorre para categoria de atendimento em 380V/220V, onde a tensão de fase máxima permitida para a geração de energia solar fotovoltaica é de 242V.



**Figura 17** - Inversor Sungrow desconectando por sobretensão apresentando erro 002 no *display*.



**Fonte:** Próprio autor.

## 5.2 Causas do desligamento

Em sistemas fotovoltaicos, é necessário ter cuidado na instalação de todos seus componentes. No lado CC, devemos ter bastante atenção aos parâmetros do inversor. Os níveis de tensão e corrente por porta de entrada devem ser sempre respeitados para o bom funcionamento dele. Desta forma, ao realizar a instalação deve-se utilizar cabos solares fotovoltaicos previstos pela ABNT NBR 16612 disponível em [11], ABNT NBR NM 280 disponível em [12], EN 50618 disponível em [13] e TÜV 2 PFG 1169 disponível em [14]. Tais normas preveem a necessidade dos sistemas fotovoltaicos e comprovam sua eficácia através de testes realizados por elas. Contudo, apesar de utilizar equipamentos adequados, deve-se atentar-se para cuidados nas instalações, como as conexões elétricas e evitar ao máximo emendas de condutores, o que pode vir a causar um problema futuro por um rompimento de cabo quando não feito de forma adequada.

Já no lado AC, a energia gerada pelo inversor de frequência deve ser injetada no ponto de conexão sem gerar perturbações à rede, e tais perturbações não devem interferir na rede local e não deve interferir na rede de distribuição da concessionária em questão.

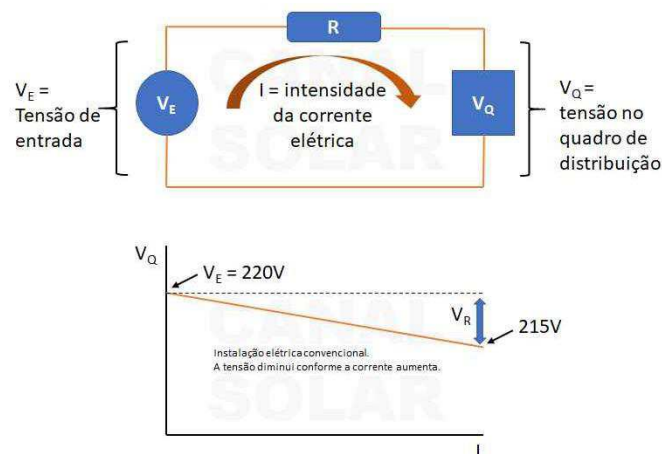
Em sistemas solares fotovoltaicos a perturbação mais comum à rede elétrica é a elevação da tensão. Essa variação de tensão é algo comum neste tipo de sistema, muitas vezes sendo imperceptível ou tão pequena que pode ser desprezada. Contudo, em locais remotos ou com rede elétrica sobrecarregada ou mal dimensionada, esse problema se torna algo relevante e não

deve ser ignorado pelo projetista ou instalador já que pode trazer riscos consideráveis a instalações do local e as pessoas que transitam ou habitam o meio. Deste modo, a variação de tensão pode exceder os limites de tensão e operação programados no inversor, fazendo com que ele se desligue.

### 5.2.1 Impedância de Rede

A capacidade de condução dos condutores elétricos está relacionada ao comprimento, ao material e a sua área de seção. Tais fatores formam uma determinada resistência à passagem de corrente elétrica e quando isso ocorre a resistência ocasiona uma queda de tensão. Devido a este efeito causado pela impedância do condutor, em uma instalação convencional, a tensão obtida no quadro de distribuição será menor do que a tensão entregue pela concessionária no poste de entrada. De acordo com o aumento da carga no local, a queda de tensão vai se intensificando e o valor da tensão elétrica tenderá a cair ainda mais, considerando que os condutores não foram dimensionados com base no critério de queda de tensão conforma NBR 5410 disponível em [15].

**Figura 18** - Efeito da queda de tensão na instalação elétrica.



**Fonte:** desligamento do inversor por variação da tensão [16].

No geral, este tipo de problema já existe nas residências ou comércios em grande parte das instalações elétricas, desse modo, a tensão no ponto de consumo se torna menor que a tensão no ponto de entrada por causa da queda de tensão. Em algumas situações, esse fato se agrava pelo mal dimensionamento dos condutores, relacionando os mesmos a sua capacidade de

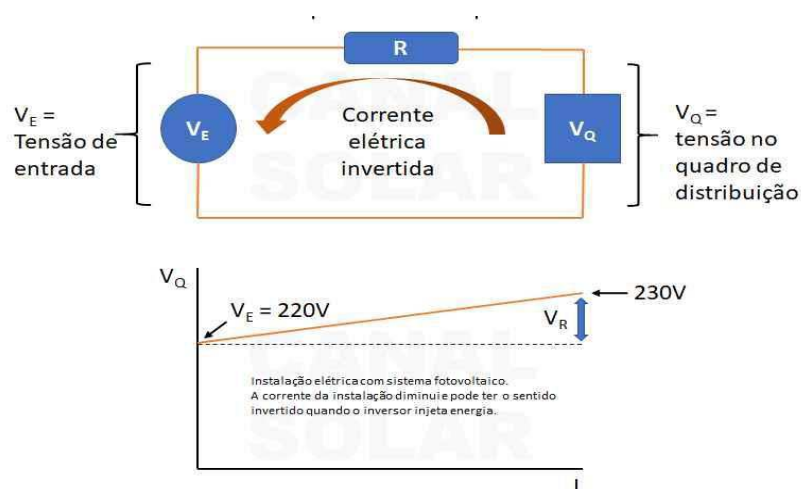
condução e distância entre a carga e o ponto de recebimento de energia elétrica por parte da concessionária de energia, fazendo com que a queda de tensão seja bem mais acentuada.

Em redes elétricas mal dimensionadas, devido ao mal dimensionamento dos condutores a tensão na carga sempre será reduzida quando percorrida por uma corrente elétrica. Quanto mais corrente estiver circulando pelo condutor, maior será a queda de tensão.

Quando um sistema solar fotovoltaico é inserido em uma rede elétrica com tais características, o instalador ou proprietário desconhece tais efeitos indesejáveis tendo em vista que a residência já possuía sua instalação elétrica e já estava em funcionamento aparentemente normal. Desse modo, com a injeção de corrente elétrica pelo inversor no circuito da residência, a corrente elétrica presente no circuito pode diminuir de intensidade ou até mesmo ser zerada (quando a geração solar for igual ao consumo interno). Isso faz com que a queda de tensão diminua causando a elevação da tensão do ponto de conexão do inversor, como pode ser visto da Figura 30.

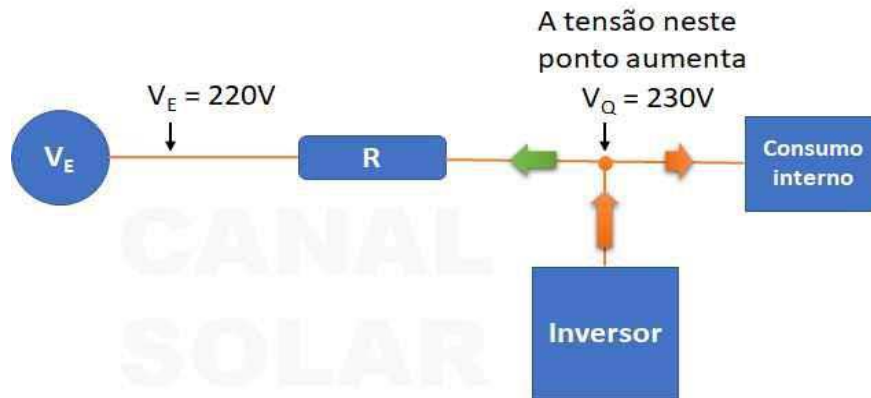
Nos períodos em que o sistema solar fotovoltaico está com geração máxima, ou próximo da sua máxima potência, a quantidade de energia injetada pelo inversor excede na maioria das vezes a corrente consumida no local e origina uma corrente elétrica no sentido inverso, havendo a injeção de corrente elétrica para a rede da concessionária. Desta forma, com o sentido de corrente invertido, o sistema eleva a tensão no ponto de injeção quando comparado ao ponto de entrada, podendo em alguns casos exceder o limite de operação para o qual o inversor está programado e forçar sua desconexão.

**Figura 19** - Efeito da queda de tensão na instalação elétrica com fluxo invertido.



**Fonte:** desligamento do inversor por variação da tensão [16].

**Figura 20-** Quando o consumo interno é inferior à geração solar.

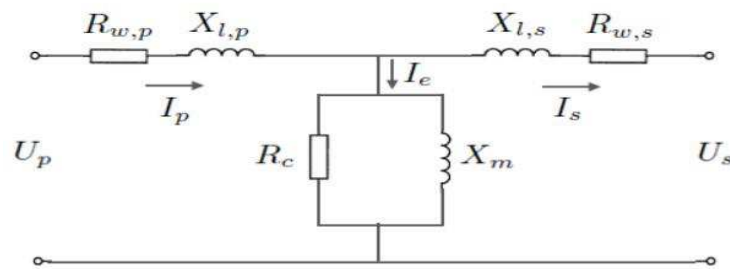


**Fonte:** desligamento do inversor por variação da tensão [16].

### 5.2.2 Impedância de Transformadores

Até o presente momento levamos em consideração que a concessionária de energia está entregando a energia elétrica no padrão de entrada em padrões aceitáveis no que diz respeito a qualidade de energia distribuída. Contudo, redes de distribuição mais antigas, com linhas de transmissão sobrecarregadas ou transformadores com alta impedância podem ocasionar o desligamento do inversor de frequência. Desta forma, precisamos identificar se o problema recorrente está na instalação interna da residência ou sobre a rede elétrica da concessionária. Para tal análise, um procedimento padrão de testes foi desenvolvido e através do mesmo podemos chegar a determinadas conclusões. Pelo modelo elétrico apresentado de um transformador convencional, vemos que ao realizar o acoplamento do sistema solar a rede elétrica da concessionária, ele poderá influenciar na tensão nominal do sistema, elevando-a, já que o transformador possui uma impedância interna que pode causar uma sobretensão do ponto de vista do inversor. O circuito equivalente de um transformador real mostrado na figura abaixo indica as impedâncias internas desse dispositivo.

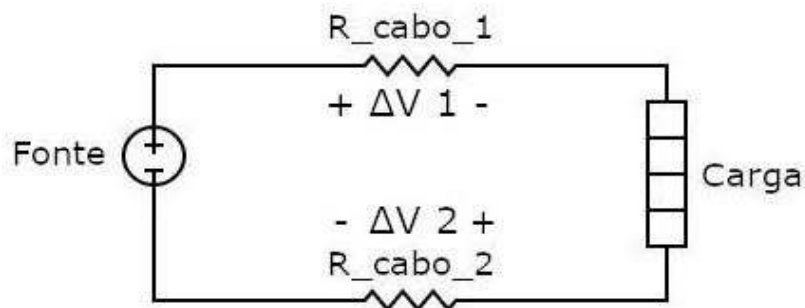
**Figura 21** - Circuito equivalente de um transformador real.



Fonte: [https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_13\\_-\\_Circuitos\\_2\\_-\\_Engenharia](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_13_-_Circuitos_2_-_Engenharia).

Quando a corrente elétrica passa por uma carga, a impedância da mesma causa uma queda de tensão entre seus terminais. Em um circuito real, a impedância é diferente de zero, o que faz com que o condutor possua uma impedância relativa à sua composição de modo que a passagem de corrente elétrica também causará uma queda de tensão entre seus terminais. A queda de tensão em um circuito causada por um cabo real é determinada abaixo:

**Figura 22**- Circuito equivalente de uma fonte em plena carga.



Fonte: desligamento do inversor por variação da tensão [16].

Para um circuito monofásico, devemos levar em consideração a queda de tensão ao longo de ambos os condutores que alimentam a carga. Desse modo, podemos concluir que a queda de tensão acontece tanto no condutor de fase quanto no condutor de neutro do sistema, portanto:

$$V_{cabo\ 1} = R_{cabo\ 1} \cdot I \quad (8)$$

$$V_{cabo\ 1} = \rho \cdot \frac{I \cdot L}{S} \quad (9)$$

$$\Delta V_1 = \frac{V_{cabo\ 1}}{V_{fonte}} \quad (10)$$

$$\Delta V_1 = \rho \cdot \frac{\Sigma(I \cdot L)}{V_{fonte} \cdot S} \quad (11)$$

Podemos concluir da equação acima que a queda de tensão depende do tipo do circuito. Para circuitos monofásicos ou bifásicos devemos considerar a queda em dois condutores, fase e neutro e, portanto, temos  $a=2$ , e em circuitos trifásicos devemos considerar  $a=1,73$ .

$$\Delta V = a \cdot \rho \cdot \frac{\Sigma(I \cdot L)}{V \cdot S} \quad (12)$$

Analisando a equação 12, podemos concluir que para evitar problemas com queda de tensão, o mais comum é que a seção transversal do condutor seja alterada, já que a distância muitas vezes não pode ser alterada por limitações físicas de equipamentos e os materiais condutores comumente usados são apenas cobre ou alumínio. O sistema elétrico, quando dimensionado de acordo com norma de instalações elétricas de baixa tensão - NBR 5410 disponível em [15], reduzirá a queda de tensão a parâmetros estabelecidos considerados admissíveis. A NBR 5410 prevê um limite máximo da queda de tensão em um circuito, como mostrado abaixo.

**Figura 23** - Limite de queda de tensão, NBR 5410 - Norma de instalações elétricas de baixa tensão.

**6.2.7.1** Em qualquer ponto de utilização da instalação, a queda de tensão verificada não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação:

- a) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);
- b) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for aí localizado;
- c) 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- d) 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio.

Fonte: ABNT NBR 5410 [15].

## 6 PROCEDIMENTOS DESENVOLVIDOS

Os modelos de inversores de frequência possuem normalmente tensões nominais de 127/220V ou 220/380V, contudo, a faixa de tensão de operação destes equipamentos variam e suportam tensões de fase de até 275V. Apesar disto, a parametrização do inversor de frequência deve ser realizada de acordo com as normas exigidas pela concessionária local, cumprindo assim os parâmetros e as faixas de operação, e quando não ocorrem pode ocasionar em sobretensão ainda em operação e danificar equipamentos conectados a rede elétrica, ou ainda causar o sobre aquecimento de equipamentos de proteção como disjuntores e ocasionar incêndios.

Desta forma quando conectado à rede elétrica o inversor fotovoltaico recebe em seus terminais a tensão disponível no ponto de conexão. Quando esta conexão é feita diretamente ao padrão de entrada do consumidor, a tensão no ponto de conexão se tornará mais estável, tendo uma menor influência das quedas de tensão existentes no circuito da rede interna, ficando mais susceptível a oscilações da rede de distribuição da concessionária de energia elétrica.

Outra prática comum é realizar a instalação do inversor em um ponto mais próximo interno da rede local. Embora os condutores estejam dimensionados corretamente, o sistema solar fotovoltaico pode ter um comportamento indesejado devido à sobretensão. Este ponto de conexão pode variar de acordo com as quedas de tensão causadas pelas correntes elétricas presentes na instalação interna, além disso o sistema fica susceptível a variações de tensão dependendo da intensidade da corrente injetada pelo próprio inversor.

Ao inverter o fluxo de energia, através da injeção alta de corrente em relação a carga, a tensão do ponto de conexão se tornará maior que a tensão no padrão de entrada do consumidor. A tabela abaixo foi retirada da NBR 16149 disponível em [17] e mostra um limite para operação de tensão.

A tensão do inversor não pode ser menor do que 80% (0.8PU) da tensão nominal de fornecimento da concessionária. A tensão do inversor também não pode ser maior do que 110%(1.1PU) da tensão nominal de fornecimento como já foi mencionado nos itens anteriores.

**Figura 24-** Limites de tensão de inversores conectados à rede, NBR16149.

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
$V > 110\%$		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 NBR 16149 [17].

Portanto o sistema solar fotovoltaico irá ter problemas de sobretensão e consequentemente realizar o ilhamento sempre que o inversor possuir uma alta injeção de corrente elétrica (o que ocorre nos períodos de maior radiação solar) associada a impedâncias significativas na instalação. Desta forma a tensão do ponto de conexão do inversor poderá aumentar e ultrapassar 110% da tensão nominal da rede, causando o ilhamento do lado AC do equipamento. Este problema se torna algo bastante desagradável por ocorrer sempre nos momentos em que o sistema solar fotovoltaico estaria com seu maior desempenho e geração de energia. Por essa razão, o projetista deve escolher bem o ponto de conexão do inversor de frequência e dimensionar todo o sistema de condutores e de proteção de maneira cuidadosa para garantir o bom funcionamento do sistema, sem necessitar violar os limites da norma NBR 16149.

Quando se instala um inversor num circuito de alta impedância, ou seja, cabo com seção transversal inadequada, a tensão do ponto de conexão pode ser fortemente elevada devido à impedância do cabo, que pode ser ocasionada por maus contatos ou pela impedância do transformador.



Se o aumento de tensão for considerável, ultrapassando 110% da tensão nominal da rede (se a parametrização do inversor estiver correta), o inversor vai desligar-se automaticamente. Esse desligamento é uma função de proteção presente nos inversores que em alguns casos causa o desligamento indesejado do equipamento.

O desligamento do inversor pelo mecanismo descrito acima tipicamente ocorre em horários de máxima geração. Esses desligamentos do inversor podem ser identificados nas curvas de geração diária do aparelho afetado, conforme o exemplo abaixo.

**Figura 25-** Caso extremo de desligamento por elevação de tensão.



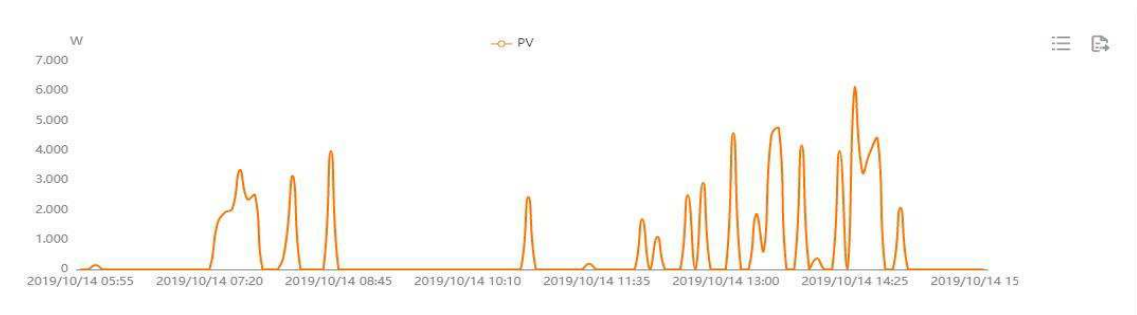
**Fonte:** Próprio autor-App Sungrow.

**Figura 26 -** Desligamento por elevação de tensão do inversor.



**Fonte:** Próprio autor-App Sungrow.

**Figura 27** - Comportamento de geração de um inversor configurado erroneamente.



Fonte: Próprio autor-App Sungrow.

Para identificar a causa do problema da sobretensão, um procedimento padrão foi desenvolvido e relatado abaixo:

- Verificar se a classe de atendimento está de acordo com o projeto e as exigências da NDU 001 disponível em [8].
- Verificar o projeto de acordo com a NBR 5410 disponível em [14] sobre o critério de queda de tensão para o dimensionamento dos condutores.
- Verificar se a tensão configurada no inversor é a mesma tensão de fornecimento da concessionária, pois o inversor somente deve operar dentro dos limites estabelecidos.
- Realizar a conexão no ponto de atendimento do cliente junto a concessionária, reduzindo ao máximo a influência das quedas de tensões da rede interna local.
- Realizar medições de tensão no ponto de acesso do inversor e no ponto de conexão com o padrão de entrada.

### 6.1 Impedância Interna

O termo impedância interna adotado faz referência ao caso em que a tensão no ponto de acesso seja maior que a tensão no ponto de entrada da energia por parte da concessionária. Desta forma, o fluxo de corrente elétrica estará invertido no período de máxima geração, o que nos faz concluir que o problema de impedância de rede é interno.

Quando isso ocorre sabemos que algo de errado está acontecendo com a rede interna do cliente. O primeiro passo é verificar o ponto de conexão do inversor. Caso ele esteja em um ponto interno da rede, o ideal é que seja feita uma nova conexão em um ponto mais externo da rede elétrica do cliente, evitando assim a influência das quedas de tensões internas sob o ponto de conexão do inversor. Caso o problema persista, é indicado que o projetista realize a desconexão dos circuitos de distribuição da residência. Este procedimento deve ser realizado

um a um para a identificação do circuito que está com maior queda de tensão e os mesmos devem ser redimensionados de maneira correta para o bom funcionamento do sistema.

### *6.2 Impedância Externa*

O termo impedância externa faz referência ao caso em que a tensão do ponto de acesso seja menor que a tensão no ponto de entrega por parte da concessionária, no período de máxima geração, conseguimos identificar que a alta impedância do circuito é externo, por parte da concessionária, sendo necessário entrar em contato com a mesma e solicitar uma medição de elevação de tensão para identificar o problema. Dentre os problemas possíveis estará a impedância do transformador, a tensão elevada no trafo, ou condutores do ramal de entrada mal dimensionados, fora da categoria de conexão ou com comprimentos fora dos padrões exigidos pela própria concessionária.

## **7 CONCLUSÃO**

O fenômeno descrito está intimamente relacionado com a impedância que o inversor enxerga do lado CA e, como mostrado anteriormente, as fontes de impedância vistas pelo inversor são: cabos, conexões e transformador.

De acordo com os conhecimentos adquiridos e explanados, criou-se um método para avaliar, identificar e solucionar possíveis influências indesejáveis sobre a rede elétrica. A perícia técnica realizada através do método de avaliação analítica foi desenvolvida e dividida em análise de projetos e documentações, inspeções, medições e testes, concluindo que a instalação elétrica solar fotovoltaica deve ser realizada conforme o projeto aprovado pela concessionária de energia, respeitando os pontos de conexão, proteções e cabeamentos adequados conforme NDU013, NBR5410, NBR16612, sendo periodicamente verificadas para que não existam folgas nos apertos.

Desta forma, é possível reduzir os impactos dos sistemas solares fotovoltaicos sobre a rede elétrica, contudo, caso persistam, as medições e testes relatados neste pode identificar a origem do problema entre a rede elétrica interna ou a rede elétrica da concessionária para que o engenheiro tome as medidas cabíveis. No caso de o problema ser interno, é de obrigação do engenheiro projetista sanar tais efeitos indesejáveis sem desrespeitar o critério de sobretensão de 1.1 PU. Caso seja constatado que o problema é externo, o projetista deverá entrar em contato

com a concessionária de energia elétrica e através de um laudo, solicitar medições de tensão no ponto de entrega da energia elétrica para que as medidas necessárias sejam tomadas por parte da concessionária. Dentre tais medidas, a concessionária irá avaliar o problema em questão e irá encontrar a solução para a melhoria da rede que atende o cliente, podendo realizar ajustes no tap do transformador, melhoria de rede, ou até mesmo a troca da linha de transmissão que atende o cliente caso exista outra linha próxima disponível.

Problemas com sobretensão da rede elétrica da concessionária local vem se tornando cada vez mais comuns o que mostra para nós que nossa rede elétrica não está preparada para receber tais sistemas de microgeração ou minigeração distribuída. Dessa forma, é necessário o bom senso por parte dos projetistas para que não desobedeçam às normas excedendo os limites de tensão o que pode vir a sobrecarregar a rede da concessionária e causar problemas mais graves, como incêndios.

## REFERÊNCIAS

- [1] **EXPANSÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**. Governo do Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt.br/noticias/energia/>>. Acesso em: 22/03/2021.
- [2] QUANTUM, ENERGIA LIMPA E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SÃO TENDÊNCIAS PARA 2021. Quantum, 2021. Disponível em <<https://www.quantumengenharia.net.br/energia-limpa-e-geracao-distribuida-sao-tendencias-para2021/>>. Acesso: 22/05/2021
- [3] Eduardo Silva Fernandes, **INSTALAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**, CAMPINA GRANDE, 2018.
- [4] **POTÊNCIA SOLAR - SUNDATA V 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso: 15/04/2021
- [5] LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR - LABSOL. Disponível em: <[www.solar.ufrgs.br](http://www.solar.ufrgs.br)> Acesso 13/04/2021
- [6] VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar** - Conceitos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL - **Resolução 482/2012, Resolução 414/2010**, PRODIST.
- [8] **CRITÉRIOS PARA A CONEXÃO EM BAIXA TENSÃO DE ACESSANTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO-** ENERGISA/C-GTCD-NRM/Nº074/2018. **NDU013**. Acesso: 17/04/2021.
- [9] **MANUAL DO USUÁRIO: SG36KTL-M. INVERSOR FV CONECTADO À REDE**. Disponível em: <https://loja.l8energy.com/wp-content/uploads/2019/02/SG36KTL-M-Manual-do-Usu%C3%A1rio.pdf>. Acesso em 22/05/2021
- [10] **FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A EDIFICAÇÕES INDIVIDUAIS OU AGRUPADAS ATÉ 3 UNIDADES CONSUMIDORAS** - ENERGISA/C-GTCD-NRM/Nº070/2018 **NDU001**. Acesso: 17/04/2021.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 16612. Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8KV C.C entre condutores – requisito de desempenho.03/2020. Acesso: 13/04/2021
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR NM 280. Condutores de cabos isolados (IEC 60228, MOD). Acesso: 23/05/2021
- [13] CEN CENELEC: EN 50618. Electric cables for photovoltaic systems (BT(DE/NOT)258). Acesso: 23/05/2021
- [14] **LABORATÓRIO DA TÜV RHEINLAND DO BRASIL LTDA: TÜV Rheinland 2 PfG 1169/08.2007**. Acesso: 23/05/2021

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. : NBR-5410. **Instalações elétricas, proteção e segurança.** 2004. Acesso: 13/04/2021

[16] Vinturini, M. 2019. **DESLIGAMENTO DO INVERSOR FOTOVOLTAICO POR VARIACÃO DA TENSÃO.** Disponível em: < <https://canalsolar.com.br/desligamento-do-inversor-fotovoltaico-por-variacao-da-tensao/>>. Acesso: 12/03/2021

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 16149. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.** : NBR16149 de 03/2013. Acesso: 13/04/2021