



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – CAMPUS TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOSÉ ANTONIO GONÇALVES DE MORAES

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ESTIMADA DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL/MONOFÁSICA ATRAVÉS
DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFCR) DE
BAIXA TENSÃO**

TUCURUÍ-PA

2022

JOSÉ ANTONIO GONÇALVES DE MORAES

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ESTIMADA DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL/MONOFÁSICA ATRAVÉS
DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFCR) DE
BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Esp. Leandro Franco de Sá
Coorientador: Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen.

TUCURUÍ-PA

2022

JOSÉ ANTONIO GONÇALVES DE MORAES

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ESTIMADA DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL/MONOFÁSICA ATRAVÉS
DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFCR) DE
BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de apresentação: _____/_____/2022

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Leandro Franco de Sá
(Orientador – IFPA Campus Tucuruí)

Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
(Coorientador – UFPA Campus Tucuruí)

Eng. Esp. Bruno Gonçalves de Oliveira
(Membro convidado – Tesla Solar)

Dedico este trabalho a minha família e amigos, mas em especial à minha mãe (Julia Gonçalves de Moraes) e minha esposa (Taís Sanches) que me fizeram acreditar que todo sonho pode, sim, tornar-se real.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me dar saúde e força para jamais desistir dos meus objetivos, pois sem ele nada disto seria possível, em seguida, ao professor Esp. Leandro Franco de Sá do IFPA que aceitou me orientar, apoiar e ajudar a solucionar diversos problemas no decorrer desse trabalho, além do professor Dr. Ewerton Ramos Granhen da UFPA que me amparou e ficou como meu coorientador nessa reta final do curso. Também sou muito grato ao Engenheiro Esp. Bruno Gonçalves de Oliveira da empresa Tesla Solar pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus familiares, em especial à minha mãe, Julia Gonçalves de Moraes, que sempre esteve ao meu lado me apoiando em toda a minha trajetória estudantil. Era ela quem tirava o dinheiro da merenda da tarde para eu poder pagar a passagem de ônibus para poder estudar, além de todos os inúmeros sacrifícios que ela fez por mim, pois foi graças a sua dedicação que pude chegar até aqui.

À minha esposa Taís Sanches que acompanhou a minha trajetória estudantil desde o cursinho pré-vestibular, onde sempre me apoiou, cuidou e incentivou a correr atrás de todos os meus sonhos e objetivos.

Aos meus amigos/irmãos que a faculdade me proporcionou, Fabricio Melo de Sousa e Yan Victor Vilhena Rodrigues, pois, desde o início do curso dividimos diversos momentos de dificuldade e alegrias.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos do antigo projeto social Escolinha de Futsal Celtic que, independentemente de qualquer coisa, sempre torceram e entendiam os treinos adiados devido às dificuldades passadas na faculdade.

E por último, mas não menos importante, ao meu pai José Antonio Soares de Moraes e à minha avó Margarida Mendes Gonçalves que, infelizmente, não me verão tornar Engenheiro Eletricista, pois vieram a óbito em julho de 2021 e janeiro de 2022, respectivamente.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

(Albert Einstein)

RESUMO

No presente trabalho, foi realizado um estudo de caso para o dimensionamento e análise estimada da geração de energia elétrica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) de baixa tensão de uma residência no município de Tucuruí-PA, até então, monofásica de 127 V, porém, será solicitado o aumento de carga à concessionária local para 220 V, ou seja, alterando para bifásica a fim atender as especificações elétricas do inversor. Considera-se também a previsão de custo do investimento estimado de R\$ 19.661,40 para a instalação desse sistema baseado em tecnologias (módulos fotovoltaicos e inversor) e mão de obra disponíveis no mercado, além da redução da energia elétrica para o retorno total desse investimento na forma de economia nos próximos 6 (seis) anos, sendo que, somente no primeiro ano (2022), essa economia foi estimada em R\$ 2.520,63, podendo aumentar nos anos seguintes com o aumento da tarifa de energia elétrica, correspondendo a uma economia anual de 76,92% em relação ao ano anterior (2021) que teve uma despesa de R\$ 3.277,09. Em relação à economia, em kWh, na produção de energia do SFCR, no primeiro ano de geração, estima-se gerar 3.589,956 kWh, quase a mesma quantidade consumida em 2021 (3.747,87 kWh), ou seja, o arranjo fotovoltaico irá gerar energia suficiente para economizar, aproximadamente, 95,79% da energia que seria consumida da rede de distribuição.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR). Aumento de carga. Inversor. Módulos fotovoltaicos. Investimento. Economia. Tarifa de energia.

ABSTRACT

In the present work, a case study was carried out for the sizing and estimated analysis of the electricity generation of a low voltage Photovoltaic System Connected to the Grid (PSCG) of a residence in the municipality of Tucuruí-PA, until then, single-phase of 127 V, was carried out, however, it will be requested to increase the load to the local concessionaire to 220 V, that is, changing to biphasic in order to meet the electrical specifications of the inverter. It is also considered the estimated cost of investment of R\$ 19.661,40 for the installation of this system based on technologies (photovoltaic modules and inverter) and labor available in the market, in addition to the reduction of electric energy for the total return of this investment in the form of savings in the next 6 (six) years, and in the first year (2022) alone, this savings was estimated at R\$ 2.520,63 and may increase in the following years with the increase in the electricity tariff, that is, this annual savings reaches 76,92% compared to the previous year (2021) which had an expense of R\$ 3.277,09. Regarding the savings, in kWh, in the production of energy from the PSCG, in the first year of generation, it is estimated to generate 3.589,956 kWh, almost the same amount consumed in 2021 (3.747,87 kWh), that is, the photovoltaic arrangement will generate enough energy to save approximately 95,79% of the energy that would be consumed from the distribution network.

Keywords: Photovoltaic System Connected to the Grid (PSCG). Increase the load. Inverter. Photovoltaic modules. Investment. Economy. Energy tariff.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutor, (b) semicondutor e (c) isolante...	24
Figura 2 - Nível de energia em materiais semicondutores tipo p e n ; E_c – Nível de energia correspondente ao fundo da banda de condução; E_v – Nível de energia correspondente ao topo da banda de valência.	26
Figura 3 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino.....	28
Figura 4 - Módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.....	28
Figura 5 – Associações em série e em paralelo das células fotovoltaicas.	29
Figura 6 - Instalação típica de um SFCR de baixa tensão.	31
Figura 7 - Inversor do modelo MIN1500tl-x, monofásico de 220V da Growatt.	34
Figura 8 - <i>String box</i>	35
Figura 9 - SFCR com o medidor bidirecional.	36
Figura 10 - Coordenadas geográficas, de latitude e longitude, e localização da residência.....	49
Figura 11 - Coordenadas geográficas inseridas na plataforma digital SunData.....	50
Figura 12 - Dados da irradiação solar diária média anual mais próximo da residência.	50
Figura 13 - Módulo fotovoltaico de m-Si, modelo TSM-DE09, da Trina Solar.....	52
Figura 14 - Inversor do modelo MIN2500tl-x, monofásico de 220V da Growatt.	54
Figura 15 - Autotransformador conversor 500Va de 127V/220V ou 220V/127V.	58

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico escolhido, sob STC.....	53
Tabela 2 - Especificações elétricas do inversor escolhido.....	55
Tabela 3 - Investimento para a instalação do SFCR.	61
Tabela 4 - Média mensal da tarifa de energia nos últimos anos.	62
Tabela 5 – Variação da tarifa de energia de um ano para o outro.....	62
Tabela 6 - <i>PayBack</i> para um período de 15 (quinze) anos.	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Histórico do faturamento e consumo de energia elétrica da residência entre os meses de novembro de 2020 e outubro de 2021.	51
Gráfico 2 - Desenvolvimento do <i>PayBack</i>	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

a-Si:H – Silício amorfo hidrogenado

B – Boro

β – Coeficiente de temperatura do módulo fotovoltaico

C_{dm} – Custo de Disponibilidade Mínima de energia

CdTe – Telureto de cádmio

CIGS – Disseleneto de Cobre Índio e Gálio

C_{mm} – Consumo Médio Mensal de energia

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

cSi – Silício cristalino

DSP – Dispositivos de Proteção contra Sobretensão

E – Geração de Energia Diária Média Anual

E_a – Nível de energia nos elétrons não emparelhados tipo p

E_c – Nível de energia correspondente ao fundo da banda de condução

Eco_{anual} – Economia anual de energia elétrica da residência

Eco_{mensal} – Economia mensal de energia elétrica da residência

E_d – Nível de energia dos elétrons faltantes tipo n

E_f – Nível de energia do fóton

E_{fe} – Nível de energia Fermi

E_g – Nível de energia do gap ou banda proibida

EUA – Estados Unidos da América

E_v – Nível de energia correspondente ao topo da banda de valência

f_{ca} – Frequência nominal ou da rede

FDI – Fator de Dimensionamento de Inversores

FV – Fotovoltaico (a)

G – Irradiância solar diária média anual incidente no local

$G_{mês}$ – Média estimada da geração energética mensal do SFCR

HSP_{MA} – Média Diária Anual das Horas de Sol Pleno incidente no plano do módulo fotovoltaico

I_{ca} – Corrente máxima de saída do inversor

$I_{i_{máx}}$ – Corrente máxima c.c. admitida na entrada do inversor

I_{mp} – Corrente de máxima potência do módulo fotovoltaico

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

$Invest$ – Investimento total

I_{SC} – Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico

LDR – *Light Dependent Resistor* (Resistor Dependente de Luz)

Lim_{anual} – Gasto com a limpeza anual dos módulos fotovoltaicos

m-Si – Silício monocristalino

N_a - Concentração de dopante tipo p

N_d – Concentração de dopante tipo n

n_i – Concentração de portadores intrínsecos

n° de módulos_{FV} – Quantidade de módulos fotovoltaicos

N° módulo_{série} – Quantidade de módulos fotovoltaicos conectados em série

N° série_{FV_paralelo} - Número de fileiras conectadas em paralelo

μc-Si – Silício microcristalino

P – Fósforo

$P_{i_{máx}}$ – Potência Máxima da entrada c.c. do inversor

P_{FV} – Potência Nominal (ou de Pico) teórica do arranjo fotovoltaico

$P_{FV_{máx}}$ – Máxima Potência Gerada pelo arranjo fotovoltaico

P_{Nca} – Potência nominal c.a do inversor

P_{mp} – Potência máxima do módulo fotovoltaico

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

p-Si – Silício policristalino

RN – Resolução Normativa

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Si – Silício

Si-fitas – Silício crescido em fitas

SPPM – Seguidor de Ponto de Potência Máxima ou MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

STC – *Standard Test Conditions* (Condições-padrão de ensaio)

$tarifa_{ener}$ – Tarifa de energia elétrica

UC – Unidade Consumidora

V_{ca} – Tensão nominal de saída do inversor

$V_{i_{máx}}$ – Tensão máxima c.c. suportada na entrada do inversor

$V_{i_{SPPMmáx}}$ – Máxima tensão c.c. de operação do SPPM do inversor

$V_{i_{SPPMmín}}$ – Mínima tensão c.c. de operação do SPPM do inversor

V_{mp} – Tensão de máxima potência do módulo fotovoltaico

$V_{mpTmáx}$ – Tensão de máxima potência do módulo fotovoltaico para altas temperaturas de operação prevista

$V_{mpTmín}$ – Tensão de máxima potência do módulo fotovoltaico para baixas temperaturas de operação prevista

V_{mpSTC} – Tensão de máxima potência do módulo fotovoltaico para STC

V_{oc} – Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico

V_{ocSTC} – Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico para STC

$V_{ocTmáx}$ – Tensões de circuito aberto para altas temperaturas de inverno

$V_{ocTmín}$ – Tensões de circuito aberto para baixas temperaturas de inverno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos.....	18
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivo específico.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO	20
2.2	HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	21
2.3	CARACTERÍSTICA SOLAR E SUA IMPORTÂNCIA NO PLANETA TERRA..	22
2.4	CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	23
2.4.1	Funcionamento da célula fotovoltaica de silício cristalino.....	23
2.4.2	Células e módulos fotovoltaicos de silício cristalino.....	27
2.4.3	Associações série e paralelo de células e módulos fotovoltaicos.....	28
2.4.4	Limitação da eficiência de conversão da célula fotovoltaica	30
2.4.5	Influência da irradiância solar (G) e temperatura (T).....	30
2.5	CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE (SFCR)	31
2.5.1	Características elétricas do módulo fotovoltaico.....	32
2.5.2	Efeito de sombreamento	32
2.5.3	Características elétricas do inversor.....	33
2.5.4	<i>String box</i> (caixa de junção)	34
2.5.5	Medição bidirecional e simultânea de energia elétrica	35
2.6	NORMAS DA ANEEL PARA SFCR.....	36
2.7	LOCALIZAÇÃO RESIDENCIAL E GEOGRÁFICA PARA O DIMENSIONAMENTO DO SFCR.....	39
2.8	IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL NO MUNICÍPIO EM TUCURUÍ-PA.....	39

2.9	ANÁLISE DE SOMBREAMENTO	39
2.10	MÉDIA DO FATURAMENTO E CONSUMO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA DA RESIDÊNCIA	40
2.11	DIMENSIONAMENTO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO PARA ESCOLHA E QUANTIDADE DOS MÓDULOS	40
2.11.1	Potência nominal (ou de pico) teórica do arranjo fotovoltaico (P_{FV}).....	40
2.11.2	Modelo do módulo fotovoltaico	41
2.11.3	Quantidade de módulos fotovoltaicos (n° de módulos $_{FV}$)	41
2.11.4	Máxima Potência gerada pelo arranjo fotovoltaico ($P_{FVmáx}$)	42
2.12	DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DO INVERSOR	42
2.12.1	Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM)	42
2.12.2	Modelo do inversor	42
2.12.3	Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI)	43
2.12.4	Tensão do módulo fotovoltaico diferente da nominal ($V_{oc}(T)$)	44
2.12.5	Tensão de entrada do inversor	44
2.12.6	Faixa de tensão de operação do Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM) do inversor.....	45
2.12.7	Corrente máxima c.c. do inversor	45
2.13	MÉDIA DA GERAÇÃO ENERGÉTICA MENSAL E ECONOMIA ESTIMADA	46
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	DADOS DA LOCALIZAÇÃO RESIDENCIAL E GEOGRÁFICA	48
3.2	DADOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL MAIS PRÓXIMO DA RESIDÊNCIA	49
3.3	DADOS DO FATURAMENTO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA RESIDÊNCIA	50
3.4	CÁLCULOS E DADOS NECESSÁRIOS PARA O ARRANJO FV	51
3.5	CÁLCULOS E DADOS NECESSÁRIOS PARA O INVERSOR.....	54
3.6	CORREÇÃO DO SFCR PARA UM AUMENTO DE CARGA (220V)	57

3.6.1	Novos cálculos para o arranjo fotovoltaico	59
3.6.2	Novos cálculos para o inversor.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	GERAÇÃO ENERGÉTICA ESTIMADA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	60
4.2	GASTOS E POSSÍVEL RETORNO DO INVESTIMENTO.....	60
5	CONCLUSÕES.....	66
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A – FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA	72
	ANEXO B – FOLHA DE DADOS TÉCNICO DO MÓDULO (PÁGINA 1)	73
	ANEXO C – FOLHA DE DADOS TÉCNICO DO MÓDULO (PÁGINA 2)	74
	ANEXO D – FOLHA DE DADOS TÉCNICO DO INVERSOR.....	75

1 INTRODUÇÃO

Devidos aos atuais inúmeros fatores climáticos, o conceito e prática de energia renovável vêm aumentando no decorrer dos últimos anos principalmente nos países subdesenvolvidos. Segundo a Bloomberg (2015) “as nações em desenvolvimento ultrapassaram os países mais ricos do mundo em 2014, atraindo mais investimentos em energia limpa e expandindo mais do que nunca a geração de energia eólica, solar e outras fontes de energia renovável”.

No Brasil, a energia solar proveniente do sistema fotovoltaico vem aumentando devido aos incentivos governamentais para a geração da própria energia elétrica, além da circulação de capital e geração de empregos (diretos e/ou indiretos) para a instalação desse sistema.

A Resolução Normativa N° 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), como forma de compensação, permite ao consumidor uma troca de energia elétrica com a distribuidora local, sendo que a unidade consumidora passa a ter um crédito de energia ativa a ser utilizada em um prazo de 60 (sessenta) meses caso a geração do sistema FV seja maior do que o consumo de energia da rede no período de um mês, reduzindo, assim, o valor da fatura de energia elétrica (ANEEL, 2012).

Geralmente a garantia de um sistema FV é de 25 (vinte e cinco) a 40 (quarenta) anos, dependendo dos cuidados, além de poder reduzir a tarifa de energia elétrica em até 95% (PORTAL SOLAR, 2015), ou seja, todo o dinheiro investido na instalação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) será retornado na forma de economia após alguns anos de geração.

Desse modo, o presente trabalho encontra-se dividido em 5 (cinco) capítulos. Capítulo 1: Introdução. O capítulo 2: Revisão bibliográfica. O capítulo 3: Metodologia. Capítulo 4: Resultados e discussões. Capítulo 5: Conclusões.

1.1 OBJETIVOS

Nessa seção serão vistos os objetivos geral e específicos desse trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Dimensionar um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) para uma residência localizada no município de Tucuruí/PA.

1.1.2 Objetivo específico

- Obter dados acerca da irradiância solar diária média anual incidente no município de Tucuruí/PA;
- Estimar a geração média mensal e anual de energia elétrica do SFCR dimensionado;
- Estimar tempo de retorno do investimento (*PayBack*) do SFCR dimensionado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO

Em 1839, Alexandre Edmond Becquerel¹ descobriu o efeito fotovoltaico ao iluminar uma solução ácida, dessa forma, surgia uma diferença de potencial nos eletrodos submersos a está solução, ou seja, certos semicondutores têm a capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. Em 1873, Willoughby Smith descobre a fotocondutividade no selênio sólido e em 1876, Adams e Day percebem que uma junção de selênio e platina desenvolve o efeito fotovoltaico quando exposta à luz solar (ZILLES, et al., 2012).

As primeiras células solares ou fotovoltaicas foram fabricadas em selênio e desenvolvimento por C. E. Frits em 1883 (PINHO; GALDINO, 2014).

No decorrer do século XX, a tecnologia em semicondutores foi sendo cada vez mais desenvolvida fazendo com que houvesse o crescimento da indústria fotovoltaica, passando a ser utilizada em aplicações aeroespaciais, militares e, posteriormente para a geração de eletricidade distribuída e em grandes centrais (ZILLES, et al., 2012).

Em 1954, devido à corrida espacial, nos EUA (Estados Unidos da América) foram desenvolvidas as primeiras células fotovoltaicas de silício (Si) com características semelhantes às de hoje, no qual, foram fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (cSi) e atingiram, para a época, uma elevada eficiência de conversão de energia solar em elétrica, de, aproximadamente, 6%, com potência de 5 mW e área de 2 cm² (PINHO; GALDINO, 2014).

Em 1998, a produção mundial de células FV atingiu a marca de 150 MWp², sendo o silício quase que unânime dentre os materiais utilizados. Devido à grande produção de células fotovoltaicas no mundo, a China rapidamente voltou seus olhos para esse mercado, tanto que, em 2003, a Ásia nem estava nem entre os maiores fabricantes de módulos fotovoltaicos no mundo, porém, em 2009, tornou-se líder nesse mercado (PINHO; GALDINO, 2014).

¹ Alexandre Edmond Becquerel: Físico francês que estudava o espectro solar, magnetismo, eletricidade e óptica.

² Watt-pico: Unidade de potência de saída das células e, conseqüentemente, módulos e arranjos fotovoltaicos.

Com o passar dos anos, o crescimento energético devido à produção de células fotovoltaicas no mundo veio aumentando cada vez mais. Segundo Pinho e Galdino (2014, p. 54), “em 2012, a produção mundial de células fotovoltaicas foi cerca de 36,2 GWp. Esta potência equivale a mais de duas vezes a potência da usina de Itaipu (14 GW), a maior central de produção de energia elétrica do Brasil”.

2.2 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Na década de 1970, duas fábricas de módulos fotovoltaicos de cSi foram criadas no Brasil, porém, nos anos de 1980, devido à falta de incentivos, as fábricas reduziram a sua produção significativamente ou foram extintas. Na década de 1990, através de programas governamentais, os sistemas mais comuns eram os off-grid³, localizados em comunidades isoladas. O Brasil demorou a ingressar nesse mercado, tanto que no início do século XXI ficou para trás com relação ao crescimento exponencial da produção de energia fotovoltaica nos países como, Estados Unidos, China e Alemanha (PINHO; GALDINO, 2014).

Apenas em 2011 o Brasil instalava sua primeira usina solar fotovoltaica localizada no município de Tauá-CE, tendo 4.680 painéis (módulos) fotovoltaicos, gerando 1 MW de potência, suficiente para fornecer energia para mais de 1,5 mil famílias (ARCE, 2015).

Somente após a criação da RN (Regulamentação Normativa) N° 482/2012 (explicada na seção 2.6) que o Brasil iniciou sua real atividade com energia FV, crescendo principalmente a partir de 2014.

Atualmente, no Brasil há laboratórios e equipes de especialistas em universidades públicas e privadas, centros de pesquisa e empresas, atuando no desenvolvimento de tecnologia de purificação de silício, células e módulos fotovoltaicos, inversores e controladores de carga, bem como estudo de aplicações dessas tecnologias. Porém, ainda não foi atingido o nível de aperfeiçoamento tecnológico dos países desenvolvidos nesta área e, portanto, esforços devem ainda ser realizados por todos os atores do setor (PINHO; GALDINO, 2014, p. 60).

A energia solar FV no Brasil vem crescendo de forma significativa, sendo que, em 2017, o país ocupava a 27ª posição no ranking dos países líderes em energia solar FV

³ Off-grid: Sistema fotovoltaico que não é interligado à rede elétrica, ou seja, isolado ou autônomo.

instalada. Em 2018, passou para a 21ª e, em 2020, ocupou a 16ª posição. Até então o ranking é liderado por China, Japão, Estados Unidos, Alemanha e Índia (CANAL ENERGIA, 2020).

De acordo com a Forbes (2022), “o Brasil ultrapassou a marca de 1 milhão de unidades consumidoras com geração própria de energia a partir da fonte solar, segundo levantamento realizado pela ABSOLAR” (Associação Brasileira de Energia Solar).

Em 2022, o Brasil atingiu 8,6 GW de potência instalada proveniente da energia solar, sendo que 76,6% estão conectados em residências e o restante está dividido em comércios e serviços (13,4%), produtores rurais (7,6%), indústrias (2,1%), poder público (0,3%), serviços públicos (0,03%) e iluminação pública (0,01%). A previsão é que em 2022 a capacidade instalada de energia solar no Brasil dobre com relação a 2021, sendo adicionados 11,9 GW de potência em pequenos e grandes empreendimentos, podendo chegar a 13 GW. A geração própria de energia solar já rendeu ao país cerca de R\$ 44 bilhões em investimentos e 260 mil empregos desde 2012. Por mais que esse crescimento seja surpreendente, o país ainda é considerado atrasado, pois, dos mais de 89 milhões de pessoas que usufruem da energia elétrica, apenas 1,1% utilizam a energia solar (FORBES, 2022).

A geração de energia solar FV no Brasil pode melhorar ainda mais, pois, de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (1ª ed., 2006), publicado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais):

Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha, França e Espanha, onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

2.3 CARACTERÍSTICA SOLAR E SUA IMPORTÂNCIA NO PLANETA TERRA

O Sol é uma estrela anã amarela mais próxima da Terra, situada no centro do nosso sistema solar e responsável por manter a interação gravitacional desse sistema. Tem, aproximadamente, 150 milhões de km (quilômetros) de distância do nosso planeta e cerca de 4,6 bilhões de anos. É composto por 74% de hidrogênio, 24% de hélio e o restante é formado principalmente por oxigênio, carbono, ferro, enxofre, neônio, nitrogênio, silício e magnésio.

Em sua superfície, a temperatura chega a, aproximadamente, 5.778 K (5.504 °C). Ele converte energia na forma de ondas eletromagnéticas (chegando parcialmente na terra) através de reações de fusão do hidrogênio em hélio. Na superfície terrestre, a intensidade da radiação solar chega a 1.366 kW/m² e sua luz demora cerca de oito minutos para chegar na Terra, viajando a uma velocidade de 300.000 km/s. Sua massa é cerca de 300 mil vezes maior do que a do planeta Terra e de, aproximadamente, 99,8% da massa do sistema solar (SOHO, 2020).

Sem essa estrela não seria possível a sobrevivência de várias espécies na Terra, pois, além de ser indispensável para a saúde humana, através da absorção do organismo em vitamina D, ela é responsável pela temperatura, evaporação, aquecimento e por muitos processos biológicos que ocorrem em animais e plantas como, por exemplo, a fotossíntese.

2.4 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Desde os últimos 60 anos, a tecnologia no desenvolvimento de células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâmina de cSi vem crescendo cada vez mais e chegando em 2011 a 87% deste mercado. Outras tecnologias utilizadas para sistemas fotovoltaicos que estão presentes no mercado são as de filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino (μ c-Si) e silício crescido em fitas (Si-fitas) (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4.1 Funcionamento da célula fotovoltaica de silício cristalino

Existem na natureza três tipos de classificações dos materiais quando se trata de elementos com propriedades elétricas, são eles, os condutores, semicondutores e isolantes. Para o estudo de energia solar FV desse trabalho, será enfatizado os semicondutores de cSi, onde são materiais caracterizados por não serem condutores nem isolantes, dependendo da temperatura do material.

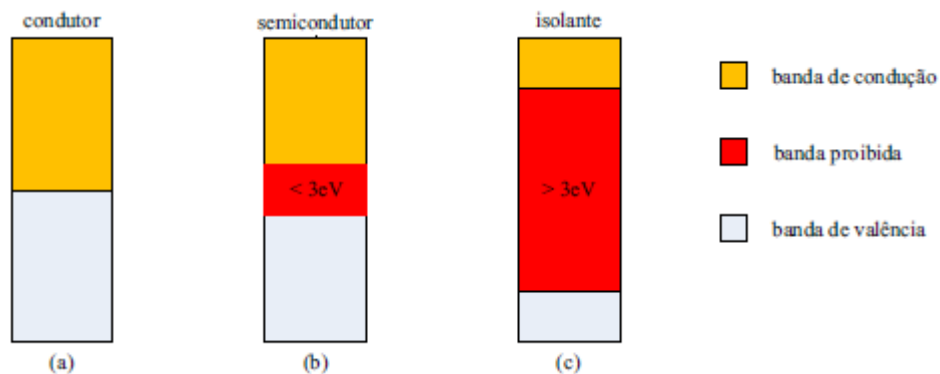
Em zero absoluto (0 K), os semicondutores possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução sem elétrons (“vazia”), ou seja,

nessa temperatura, eles se comportam como isolantes. Com o aumento da temperatura e devido a existência das bandas de energia, há o aumento da condutividade através da excitação térmica de elétrons da banda de valência para a banda de condução, nesse momento são deixados na banda de valência as lacunas (PINHO; GALDINO, 2014).

As quais constituem portadores de cargas positivas, cuja mobilidade, todavia, é cerca de um terço da dos elétrons na banda de condução, assim, para temperaturas superiores a 0 K, há sempre no semicondutor certo número de elétrons ocupando a banda de condução e o mesmo número de lacunas na banda de valência, denominados portadores intrínsecos (PINHO; GALDINO, 2014, p. 105).

Assim como nos isolantes, os semicondutores possuem uma banda proibida (separação entre as bandas de valência e de condução), ilustrada na Figura 1, denominada de *gap* (E_g). Nos semicondutores, o *gap* é inferior a 3 eV (elétron-volt), enquanto nos isolantes é superior a este valor. No cSi, por exemplo, o valor do *gap*, em temperatura de 300 K (26,85 °C), é de 1,2 eV e a concentração de portadores intrínsecos (n_i) é de $1,45 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 1 - Estrutura de bandas de energia em (a) condutor, (b) semicondutor e (c) isolante.



Fonte: PINHO; GALDINO (2014).

Os elétrons e lacunas se comportam de maneiras diferentes nos níveis de energia, os elétrons, por exemplo, se acumulam a partir do fundo da banda de condução para cima, já as lacunas, a partir do topo da banda de valência para baixo.

A geração de portadores também pode ocorrer através da ionização por impacto, onde a energia cinética de partículas atinge o material, dessa forma, com a energia superior à do *gap*, também é possível gerar pares de elétrons-lacunas através da fóton-incidência no semicondutor. Segundo Pinho e Galdino (2014, p. 107), “estes elétrons e lacunas foto-gerados

podem mover-se dentro do material aumentando sua condutividade elétrica, o que é denominado de efeito fotocondutivo” (utilizado na fabricação de resistores LDRs – do inglês *Light Dependent Resistor*), onde a resistência elétrica depende da luminosidade incidente. Entretanto, através da junção pn^4 (construída por meio da dopagem de pequenas quantidades de outros elementos, denominados impurezas, no semiconductor) aplicar-se um campo elétrico para separar os portadores visando, dessa forma, o aproveitamento de corrente e tensão elétrica.

O átomo de cSi é caracterizado por ser tetravalente, ou seja, possui quatro elétrons em sua camada de valência, resultando em uma rede cristalina com oito elétrons compartilhados por cada átomo.

Precisa ser feita uma série de processo físico-químico no material para que possa se transformar em dispositivos fotovoltaicos capazes de gerar eletricidade de forma mais eficiente (ZILLES, et al., 2012). A dopagem do silício cristalino para o aproveitamento da corrente e tensão elétrica, pode ser feita através da introdução controlada de impurezas, como fósforo (P) e boro (B), onde são dopantes do tipo n e p , respectivamente (outras impurezas também podem ser utilizadas) (PINHO; GALDINO, 2014).

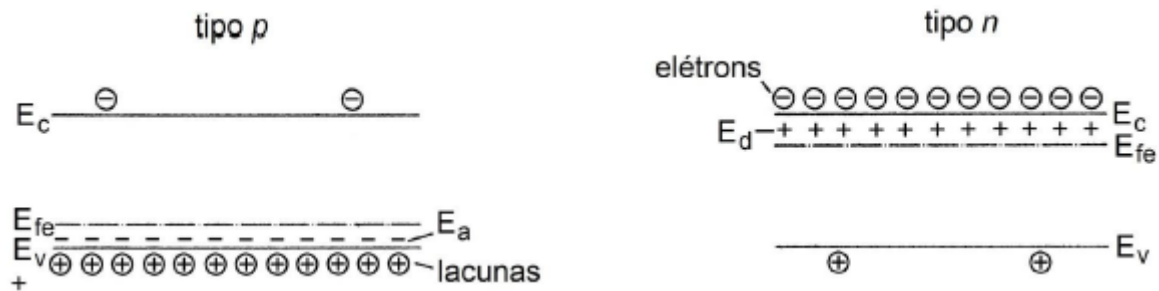
O fósforo é um átomo pentavalente, ou seja, há um elétron fracamente ligado em sua camada de valência. Ao ser introduzido no átomo de silício, o nível de energia dos “elétrons faltantes” (E_d) será de, aproximadamente, 0,044 eV, estando localizado no interior do *gap*, abaixo do limite inferior da banda de condução. Em temperatura ambiente (25 °C), a energia térmica é suficiente para libertar esse elétron fazendo com que salte para a banda de condução, deixando seu átomo de origem como uma carga fixa positiva (PINHO; GALDINO, 2014).

Já átomo de boro é trivalente, possuindo uma lacuna (buraco), ou seja, faltará um elétron para completar a ligação com o átomo de Si. Ao ser introduzido no átomo de Si, o nível de energia nos “elétrons não emparelhados” (E_a) será de, aproximadamente, 0,045 eV, estando, também, localizado no interior do *gap*, porém, acima do limite superior da banda de valência. Em temperatura ambiente, a energia térmica de um elétron de uma ligação vizinha é suficiente para fazê-lo passar a esta posição, correspondendo ao movimento da lacuna no

⁴ Junção pn : Contato ou ligação produzida nos semicondutores através da dopagem com impurezas de polaridades opostas.

sentido inverso, tornando o átomo uma carga fixa negativa (PINHO; GALDINO, 2014). Tanto os níveis de energia E_d e E_a , quanto os níveis de Fermi⁵ (E_{fe}) dos materiais tipo n e p , respectivamente, são identificados na Figura 2.

Figura 2 - Nível de energia em materiais semicondutores tipo p e n ; E_c – Nível de energia correspondente ao fundo da banda de condução; E_v – Nível de energia correspondente ao topo da banda de valência.



Fonte: PINHO; GALDINO (2014).

Em temperatura ambiente existe energia térmica suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso dos átomos de fósforo estejam livres, bem como para que todas as lacunas criadas pelos átomos de boro possam se deslocar (PINHO; GALDINO, 2014). Dessa forma, percebe-se que ao inserir somente um dos dopantes, seja ele tipo n ou p , não é suficiente para gerar corrente e tensão elétrica.

No silício inicialmente puro e em temperatura ambiente, ao ser introduzido, de cada lado, as concentrações de dopantes N_d (fósforo) e N_a (boro), será formada a junção pn , ou seja, criará regiões com predominância de cargas livres negativas (elétrons) e positivas (lacunas), denominadas, respectivamente, tipo n e tipo p , portanto, na região n , os elétrons são portadores majoritários, enquanto que na região p as lacunas são portadores majoritários (PINHO; GALDINO, 2014).

O excesso de elétrons da região n tende a se deslocar para a região p , formando, na região n , cargas elétricas positivas e fixa (íons P^+), pois os átomos de fósforo perderão um elétron. Esses elétrons que se deslocaram para a região p , encontrarão as lacunas, fazendo com que essa região fique cheia de elétrons e conseqüentemente com cargas negativas fixas (íons B^-), pois os átomos de boro receberão um elétron. Esse processo é chamado de “correntes de difusão de portadores de cargas”, onde não continuam de forma indefinidamente devido ao campo elétrico e a barreira de potencial produzido pelo excesso de cargas positivas

⁵ Níveis de Fermi: Nível médio de energia dos portadores no material (localizado no meio do gap).

e negativas nas junções das regiões n e p que impedem a passagem de elétrons (da região n para p) e lacunas (da região p para n). Dessa forma é estabelecido o equilíbrio, formando-se uma zona de cargas espacial ou zona de depleção, sem portadores n ou p (PINHO; GALDINO, 2014).

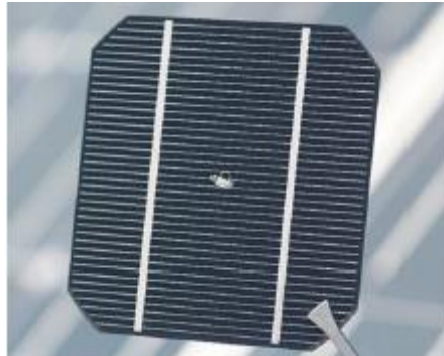
Para ocorrer a foto-geração de pares elétron-lacuna da mesma forma como no material intrínseco, basta expor esse silício, dotado de junção pn , a fótons com energia maior que a do *gap* ($E_f > E_g$). Segundo Pinho e Galdino (2014, p. 113), “se tais portadores de carga forem gerados no interior da região de carga espacial, então serão separados pelo campo elétrico, sendo elétrons acelerados para o lado n e as lacunas para o lado p , gerando assim uma corrente elétrica através da junção no sentido da região n para a região p ”.

Esta separação dos portadores de carga pela junção pn dá origem ao efeito fotovoltaico, que é a conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial. Este efeito na verdade ocorre em qualquer diodo semicondutor que for exposto a radiação, portanto, as células fotovoltaicas podem ser entendidas essencialmente como diodos de grande área otimizados para o aproveitamento do efeito fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014, p. 114).

2.4.2 Células e módulos fotovoltaicos de silício cristalino

Para a fabricação de células fotovoltaicas podem ser utilizados, por exemplo, silícios monocristalino (m-Si) ou policristalino (p-Si), com área entre 50 cm² e 150 cm² e espessura entre 0,2 mm e 0,3 mm, respectivamente. Nas Condições-Padrão de Ensaio (STC – do inglês *Standard Test Conditions*), sobre irradiância solar incidente de $G = 1.000 \text{ W/m}^2$ e temperatura de células de 25 °C, essas células fotovoltaicas de m-Si e p-Si são capazes de gerar uma corrente elétrica na ordem de 32 mA/cm², ou seja, cada uma pode gerar uma corrente entre 1,5A (com área de 50 cm²) e 4,5A (com área de 150 cm²) numa tensão entre 0,46V e 0,48V, respectivamente. As cargas elétricas geradas são coletadas pelas raias (material condutor) de coloração cinza presentes na parte superior da célula FV quando as mesmas são expostas a luz solar. A Figura 3 ilustra uma célula FV de m-Si (ZILLES, et al., 2012).

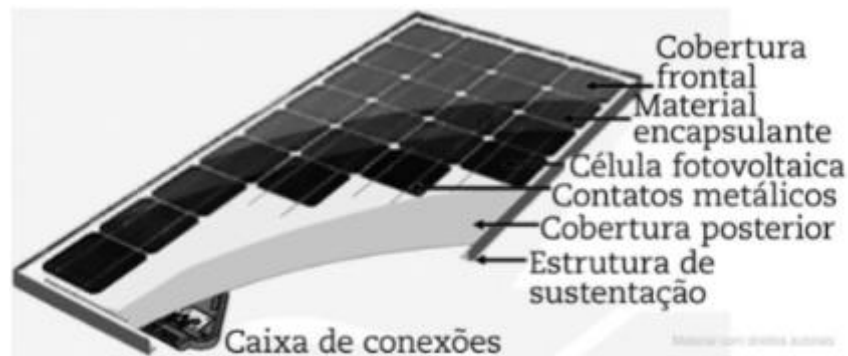
Figura 3 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino.



Fonte: PINHO; GALDINO (2014).

O módulo fotovoltaico é um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas eletricamente em série e/ou paralelo para a obtenção de tensão, corrente e potência elétrica de acordo com a aplicação que o módulo é destinado. As células são soldadas em tiras e encapsuladas com vidro temperado de alta transparência adequado para a radiação ultravioleta. Já o gerador ou arranjo FV é constituído por um conjunto de módulos fotovoltaicos conectados em série e/ou paralelo. A Figura 4 ilustra um módulo FV e seus componentes (ZILLES, et al., 2012).

Figura 4 - Módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.



Fonte: ZILLES (2012).

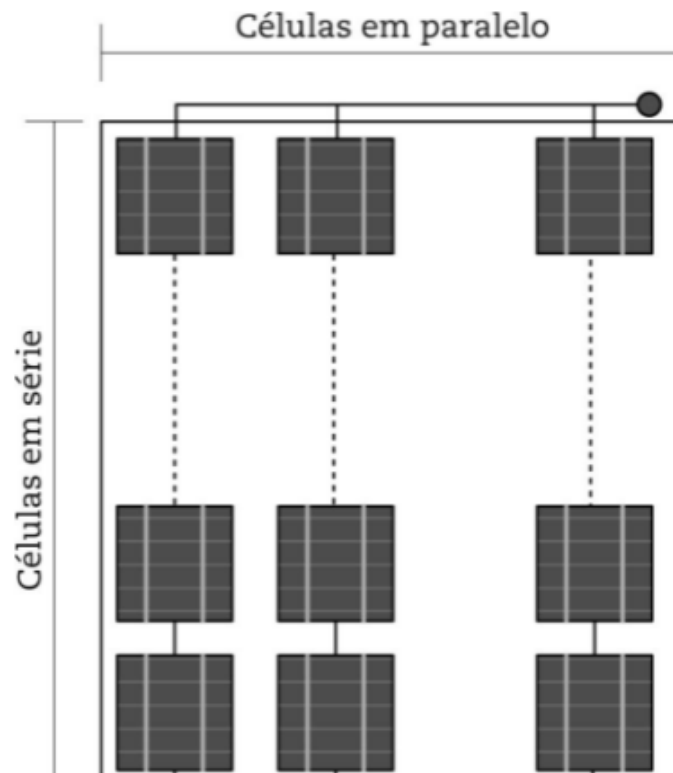
2.4.3 Associações série e paralelo de células e módulos fotovoltaicos

O conceito de associação série e/ou paralelo é análogo para células e módulos fotovoltaicos a fim de obter os níveis de corrente e tensão elétrica desejada, através de dispositivos iguais e sob as mesmas condições de irradiação. Dessa forma, na associação em série (terminal positivo conectado ao terminal negativo) as tensões são somadas e a corrente

elétrica permanece a mesma. Já na associação em paralelo (terminais positivos interligados entre si, assim como os terminais negativo) as correntes elétricas são somadas e a tensão permanece inalterada.

Em qualquer tipo de associação, se os dispositivos não forem idênticos nem sob as mesmas condições de irradiação, os níveis de tensão e/ou corrente serão afetados, podendo causar superaquecimento nos dispositivos. A Figura 5 ilustra as associações em série e em paralelo das células fotovoltaicas, o que também é válido para os módulos.

Figura 5 – Associações em série e em paralelo das células fotovoltaicas.



Fonte: ZILLES (2012).

Normalmente para montar um arranjo FV, associam-se, primeiramente, os módulos em série até obter a tensão desejada, e depois em paralelo as várias associações em série, até alcançar o nível de corrente pretendido (ZILLES, et al., 2012).

2.4.4 Limitação da eficiência de conversão da célula fotovoltaica

Alguns fatores, citados por Pinho e Galdino (2014, p. 114), que limitam a eficiência de conversão da célula fotovoltaica, são:

1) Reflexão na superfície frontal; 2) sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal; 3) absorção nula de fótons de energia menor do que o *gap* ($E_f < E_g$); 4) baixa probabilidade de coleta, pela junção *pn*, dos portadores de carga gerados fora da zona de carga espacial (zona de depleção); 5) recombinação dos portadores de carga, isto é, “reencontro” dos elétrons e lacunas em impurezas e defeitos do material e 6) resistência elétrica no dispositivo e nos contatos metal-semicondutor, bem como possíveis caminhos de fuga da corrente elétrica (resistência em paralelo).

2.4.5 Influência da irradiância solar (G) e temperatura (T)

A variação de irradiância solar (intensidade luminosa) e temperatura durante o dia afetam diretamente a eficiência das células fotovoltaicas de Si, sendo que, é gerada uma corrente elétrica que aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente no plano do módulo.

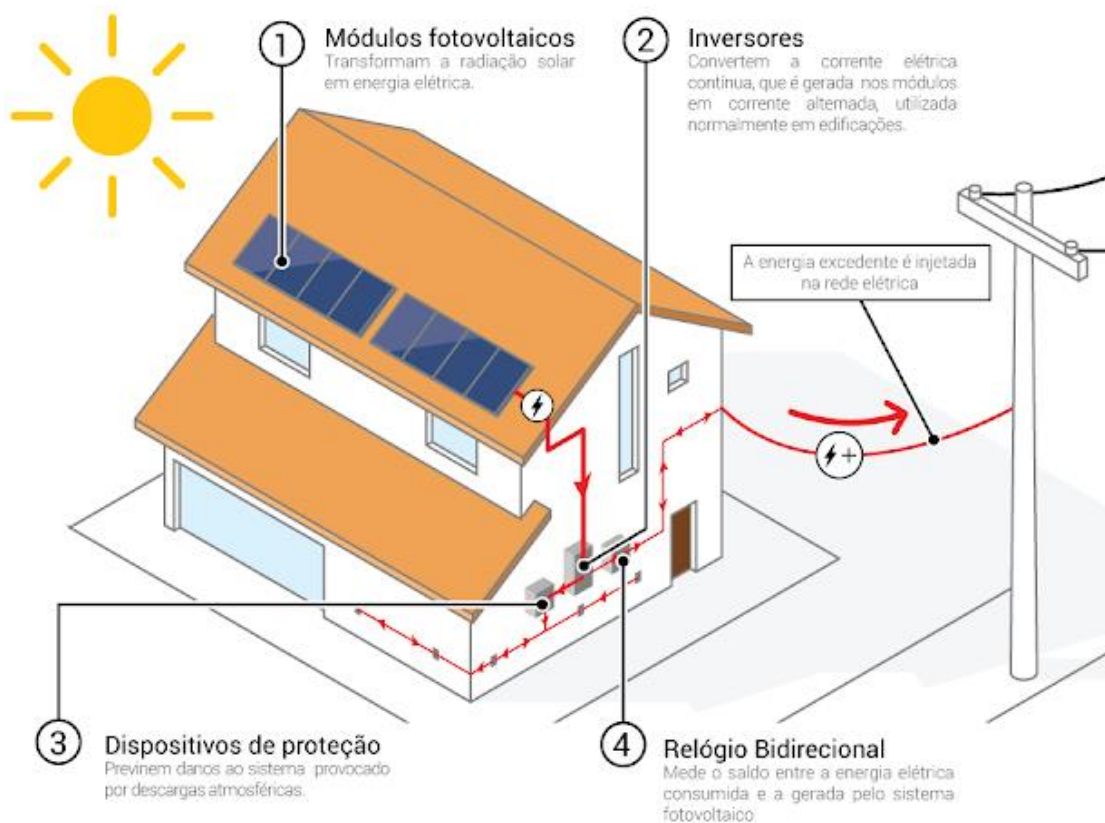
O aumento da irradiância solar incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento na temperatura das células e, conseqüentemente, tende a reduzir a eficiência do módulo FV. Isto se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto sua corrente sofre uma pequena elevação, quase desprezível (PINHO; GALDINO, 2014). Dessa forma, percebe-se que, mesmo com o aumento da irradiância e a partir de um determinado valor elevado de temperatura na célula, a tensão do módulo FV começa a diminuir.

A capacidade de geração de energia dos módulos fotovoltaicos é diretamente proporcional à luminosidade incidente e inversamente proporcional à temperatura, ou seja, em temperaturas mais baixas as tensões são maiores e em temperaturas mais altas as tensões são menores (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.5 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE (SFCR)

O Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), também chamado de sistema *on-grid*⁶, é constituído principalmente pelo arranjo FV, cabeamento elétrico tanto do lado c.c. (corrente contínua) quanto do lado c.a. (corrente alternada), estrutura de suporte, *string box* (caixa de junção), Seguidor de Ponto de Potência Máxima (SPPM⁷ ou MPPT – do inglês *Maximum Power Point Tracking*), inversor e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 6 apresenta um esquema de uma instalação típica de um SFCR de baixa tensão.

Figura 6 - Instalação típica de um SFCR de baixa tensão.



Fonte: Blumenau vertical (2015).

⁶ *On-grid*: Sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica de distribuição da concessionária.

⁷ Seguidor de Ponto de Potência Máxima (SPPM): Controlador que visa aumentar a eficiência do processo de carga.

2.5.1 Características elétricas do módulo fotovoltaico

Um módulo FV é geralmente identificado pela sua potência elétrica de pico W_p (watt-pico), mas um conjunto de características compatíveis com a aplicação específica deve ser observado. A definição da potência de pico de um módulo FV é feita em STC (PINHO; GALDINO, 2014).

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) do módulo FV é a máxima tensão que ele pode produzir. Essa tensão pode ser medida por voltímetro nos terminais do módulo quando o mesmo está desconectado, ou seja, quando não há corrente elétrica circulando por ele. Já a corrente de curto-circuito (I_{SC}) do módulo FV (máxima corrente obtida pelo módulo) pode ser medida por amperímetro em seus terminais quando a tensão elétrica nesses terminais for igual à zero.

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 147), em STC, a potência máxima do módulo FV (P_{mp}) corresponde “ao produto da tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}). Os valores de P_{mp} , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{SC} são os cinco parâmetros que especificam o módulo sob dadas condições de radiação, temperatura de operação de célula e massa de ar”.

2.5.2 Efeito de sombreamento

Como visto na seção 2.4.3, as células dos módulos fotovoltaicos são conectadas em série e/ou paralelo. Se em qualquer tipo de associação os dispositivos não forem idênticos nem sob as mesmas condições de irradiação solar, os níveis de tensão e/ou corrente serão afetados, podendo causar superaquecimento nos dispositivos e, conseqüentemente, haverá perda de potência, portanto, a corrente elétrica do conjunto será limitada pela corrente elétrica das células que receberem menos radiação solar. Essa corrente poderá tender a zero caso todas as células estejam cobertas. Para Pinho e Galdino (2014, p. 159), “esta redução de radiação incidente pode ocorrer por um sombreamento parcial do módulo, depósito de sujeira sobre o vidro, ou algo que tenha caído sobre o módulo, dentre outras possibilidades”. Dessa forma, a redução de corrente acaba afetando todos os módulos conectados em série.

Além da baixa radiação solar em parte do módulo, uma célula danificada também pode causar o superaquecimento do dispositivo, pois, segundo Pinho e Galdino (2014, p. 159), “a potência elétrica gerada que não está sendo entregue ao consumo é dissipada no módulo afetado, às vezes sobre apenas uma de suas células”, ocorrendo, dessa forma, o chamado ponto quente ou *hotspot*, no qual, produz um intenso calor sobre a célula afetada.

Como medida de proteção para esse problema, são instalados, em grupamento de células, os diodos de *by-pass* permitindo um caminho alternativo para a corrente e limitando a dissipação de energia nas células com baixa radiação solar ou defeituosas (PINHO; GALDINO, 2014).

2.5.3 Características elétricas do inversor

Quando se trata de SFCR, o inversor (ou conversor) é um dispositivo eletrônico, no qual, tem como finalidade converter a potência c.c. fornecida pelo arranjo FV em potência c.a. que será entregue diretamente à rede elétrica com segurança e qualidade.

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 216), “a tensão c.a. de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede”.

Esse dispositivo também tem como função efetuar o Seguimento do Ponto de Potência Máxima (SPPM) do gerador FV, fazendo com que, na entrada do inversor, a máxima potência que o gerador possa suprir, em determinado momento, esteja sempre disponível (ZILLES, et al., 2012).

As principais características elétricas na entrada do inversor (lado c.c.) são exatamente os cinco parâmetros do módulo FV citados anteriormente na seção 2.5.1 (P_{mp} , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc}), justamente pelo fato do inversor ser alimentado pelos módulos fotovoltaicos.

Já na saída do inversor (lado c.a. ou rede elétrica), as principais características elétricas são: Tensão nominal de saída (V_{ca}); potência nominal de saída (P_{Nca}); corrente máxima de saída (I_{ca}) e frequência nominal ou da rede (f_{ca}). Na Figura 7 pode-se observar um inversor FV do fabricante Growatt.

Figura 7 - Inversor do modelo MIN1500tl-x, monofásico de 220V da Growatt.



Fonte: Aldo Solar (2021).

2.5.4 *String box* (caixa de junção)

A *string box*, ou caixa de junção, é um componente de proteção vindo do lado c.c. e conectada por cabos elétricos entre o arranjo FV e o inversor, justamente como forma de proteção contra sobretensão e sobrecorrente no inversor, podendo também evitar problemas como, por exemplo, efeito térmico e incêndio, curtos-circuitos, choques elétricos no usuário, intempéries, etc, além de permitir o seccionamento do circuito.

A *string box* contém os seguintes equipamentos e podem ser observados na Figura 8:

- Invólucro: Caixa onde estarão os dispositivos de proteção e as conexões elétricas;
- Chave seccionadora (ou disjuntor): Permite a conexão ou desconexão do sistema FV;
- Dispositivos de Proteção contra Sobretensão (DPS): Diminui o efeito de sobretensão no circuito causada por uma descarga atmosférica.
- Dispositivo de proteção contra sobrecorrente (fusíveis e/ou disjuntor): Proteção contra sobrecorrente e curtos-circuitos;

- Cabos c.c. e c.a.: Conexões elétricas tanto do lado c.c. quanto do lado c.a., permitindo a passagem de energia elétrica.

Figura 8 - *String box*.



Fonte: Energia solar sol central (2019).

2.5.5 Medição bidirecional e simultânea de energia elétrica

Para SFCR, existem alguns tipos de medições de energia elétrica como, por exemplo, medição bidirecional de registros independentes e medições simultâneas. Independentemente do modelo de medição utilizado, o medidor precisa ter a capacidade de registrar a entrada e saída de energia elétrica da unidade consumidora a qual está instalado, ou seja, ele precisa diferenciar a energia elétrica consumida (vem da rede elétrica) da energia elétrica gerada (vem do arranjo FV).

Na medição bidirecional pode ser utilizado apenas um medidor capaz de medir essa entrada e saída de energia elétrica ou dois medidores separados para medir a energia em cada sentido.

Tratando-se de exatidão, a medição simultânea é mais precisa se comparada a bidirecional, pois, irá medir toda a energia consumida e injetada na rede elétrica. Na medição

bidirecional, segundo Pinho e Galdino (2014, p. 291), “a energia medida é a energia líquida, ou seja, a gerada menos a consumida. Na condição de medição simultânea, toda a energia gerada é medida, assim como toda a energia consumida”.

No município de Tucuruí-PA (local de estudo desse trabalho) a concessionária responsável pela distribuição de energia elétrica é a Equatorial Energia, a mesma utiliza a medição bidirecional em suas unidades consumidoras. A Figura 9 ilustra um SFCR com o medidor bidirecional.

Figura 9 - SFCR com o medidor bidirecional.



Fonte: Solar Inove (2021).

2.6 NORMAS DA ANEEL PARA SFCR

Em 17 de abril de 2012, com a criação da Resolução Normativa (RN) Nº 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), o Brasil deu um grande passo no setor de energia solar para as instalações de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede associados à microgeração e minigeração.

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos enquadrados como sistemas de micro e minigeração, são regulamentados pela Resolução Normativa Aneel Nº 482/2012, e devem atender aos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3, e às normas de acesso das distribuidoras locais. A resolução 482 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014, p. 289).

Em 24 de novembro de 2015 foram feitas algumas modificações na RN N° 482/2012 através da RN N° 687/2015 e validadas a partir do dia 1° de março de 2016, segundo a ANEEL (2015), “com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração; compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (RN N° 414/2010); aumentar o público-alvo; e melhorar as informações na fatura”. Dessa forma, o sistema de compensação de energia elétrica consente a instalação de pequenos geradores, como sistemas fotovoltaicos, nas unidades consumidoras, permitindo a troca de energia elétrica com a distribuidora local e reduzindo o valor da fatura de energia elétrica. Após as modificações, merecem destaque alguns tópicos da RN N° 482/2012:

Art. 1° Estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

Art. 2° Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições:

I - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

II - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (Redação dada pela REN ANEEL 786, de 17.10.2017.)

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

IV - Melhoria: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, visando manter a prestação de serviço adequado de energia elétrica; (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

V - Reforço: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, para aumento de capacidade de distribuição, de confiabilidade do sistema de distribuição, de vida útil ou para conexão de usuários; (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

VI – empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento; (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

VII – geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada; (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

VIII – autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada. (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

Art. 6º Podem aderir ao sistema de compensação de energia elétrica os consumidores responsáveis por unidade consumidora: (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

IV – Caracterizada como autoconsumo remoto. (Incluído pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

§1º Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses. (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

Art. 7º No faturamento de unidade consumidora integrante do sistema de compensação de energia elétrica, devem ser observados os seguintes procedimentos: (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

VI - O excedente de energia que não tenha sido compensado na própria unidade consumidora pode ser utilizado para compensar o consumo de outras unidades consumidoras, observando o enquadramento como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto. (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.)

2.7 LOCALIZAÇÃO RESIDENCIAL E GEOGRÁFICA PARA O DIMENSIONAMENTO DO SFCR

Para o dimensionamento de um SFCR, devem ser considerados alguns dados como localização residencial e geográfica (latitude e longitude), com o intuito de analisar a irradiância solar incidente no local e, conseqüentemente, determinar a energia elétrica gerada pelo arranjo FV de tal forma a analisar a geração diária e a compensação de energia elétrica.

2.8 IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL NO MUNICÍPIO EM TUCURUÍ-PA

Para obter os dados da irradiação solar diária média mensal no município de Tucuruí-Pa, é necessário inserir as coordenadas de latitude e longitude do local (podem ser obtidas através do Google Maps⁸) na ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistema FV do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), a plataforma online SunData⁹.

2.9 ANÁLISE DE SOMBREAMENTO

Para o melhor posicionamento dos módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, para a máxima captação de energia elétrica ao longo do ano, a análise de sombreamento do SFCR dependerá da inclinação do arranjo FV, onde o mesmo deve estar orientado em direção à linha do equador de acordo com a latitude da residencial, pois a residência já está construída. Para que o excesso de sujeira sobre os módulos não reduza a captação da luz, sua inclinação deve ser de no mínimo 10° com intuito de reduzir o acúmulo de poeira, pois a própria chuva ajudará nessa limpeza (PINHO; GALDINO, 2014).

⁸ Google Maps: Plataforma online de localização geográfica por satélite (visualização de mapas). Pode ser acessado em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2021.

⁹ SunData: Plataforma online de irradiância solar diária média mensal. Pode ser acessada em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2021.

Para este projeto foi considerada a instalação dos módulos fotovoltaicos no telhado da residência, pois não há presença de sombras, uma vez que os imóveis ao lado não proporcionam efeito de sombreamento em tal área.

2.10 MÉDIA DO FATURAMENTO E CONSUMO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA DA RESIDÊNCIA

Para o dimensionamento de um sistema FV que suporte parcialmente a demanda energética, é importante obter o Consumo Médio Mensal de energia em kWh (C_{mm}) da residência no período de 12 (doze) meses, assim como, a média do faturamento anual em R\$. Essa última é necessária para estimar o período do retorno financeiro investido na instalação do sistema FV (*PayBack*).

2.11 DIMENSIONAMENTO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO PARA ESCOLHA E QUANTIDADE DOS MÓDULOS

Para o dimensionamento do arranjo FV desse trabalho, visando balancear a energia gerada pelo mesmo e a demandada energética da residência, é necessário utilizar o grupo de classificação de ligação, para saber o Custo de Disponibilidade Mínima de energia (C_{dm}), assim como, a Irradiância solar diária média anual incidente no local (G) e o Consumo Médio Mensal de energia (C_{mm}) da residência no período de 12 meses. Com essas variáveis, torna-se possível determinar a Potência Nominal (ou de Pico) teórica do arranjo FV (P_{FV}), além da quantidade de módulos fotovoltaicos a serem utilizados, de acordo com o modelo de módulo escolhido.

2.11.1 Potência nominal (ou de pico) teórica do arranjo fotovoltaico (P_{FV})

Para obter a potência nominal do arranjo FV (P_{FV}), torna-se necessário saber algumas variáveis, como a Geração de Energia Diária Média Anual (E) necessária para o arranjo FV, dada pela Equação (2.1), e a média diária anual das Horas de Sol Pleno incidente no plano do

módulo FV (HSP_{MA}), expressada pela Equação (2.2), assim como a Taxa de Desempenho (TD), adimensional, que, de acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 329), “é definida como a relação entre o desempenho real do sistema sobre desempenho máximo teórico possível”. No Brasil, sobre as condições de radiações solares, a TD para SFCRs bem ventilados e sombreados, está na faixa de 70% a 80%, contudo, o desempenho desse sistema depende da temperatura ambiente, assim como a tecnologia utilizada no mesmo (PINHO; GALDINO, 2014).

$$E(Wh/dia) = \frac{C_{mm}(kWh) - (C_{dm})(kWh)}{30(dias)} \quad (2.1)$$

$$HSP_{MA}(h/dia) = \frac{G(kWh/m^2 \cdot dia)}{1[kW/m^2]} \quad (2.2)$$

Portanto, a potência nominal teórica do arranjo FV (P_{FV}) é dada pela Equação (2.3).

$$P_{FV}(W_p) = \frac{(E/TD)}{HSP_{MA}} \quad (2.3)$$

2.11.2 Modelo do módulo fotovoltaico

A escolha do módulo FV não deve ser baseada apenas pela sua eficiência a não ser que a área disponível para instalação do módulo FV seja um fator restrito. De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 125), “a escolha de um módulo fotovoltaico deve se basear em diversos fatores, como, custo, durabilidade, reputação do fabricante, etc”.

2.11.3 Quantidade de módulos fotovoltaicos (n° de módulos $_{FV}$)

A quantidade de módulos (n° de módulos $_{FV}$) é a razão da potência nominal teórica do arranjo FV pela potência máxima do módulo escolhido, essa última pode ser obtida na folha de dados (*datasheet*) do fabricante. Matematicamente se expressa pela Equação (2.4).

$$n^\circ \text{ de módulos}_{FV} = \frac{P_{FV}(W_p)}{P_{mp}(W_p)} \quad (2.4)$$

2.11.4 Máxima Potência gerada pelo arranjo fotovoltaico (P_{FVmax})

Para a máxima potência gerada pelo arranjo FV (P_{FVmax}), multiplica-se a quantidade de módulos pela potência máxima do módulo escolhido, como expresso pela Equação (2.5).

$$P_{FVmax}(W_p) = n^{\circ} \text{ de módulos}_{FV} \times P_{mp}(W_p) \quad (2.5)$$

2.12 DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DO INVERSOR

Assim como foi feito para os modelos de módulos fotovoltaicos, também é necessário fazer uma análise para a escolha adequada do inversor. De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 216), o inversor escolhido deve apresentar “alta eficiência em toda a sua faixa de operação, de modo a minimizar as perdas do sistema, principalmente quando se prevê que a operação das cargas, na maior parte do tempo, corresponderá a uma pequena fração nominal do inversor”, além da compatibilidade das características elétricas do gerador FV com o inversor, como, por exemplo, sua potência nominal (ou de pico).

2.12.1 Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM)

Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM) é um controlador instalado na entrada do inversor que permite manter o gerador FV operando na tensão correspondente à tensão de máxima potência e com isso obtém um melhor rendimento do sistema desprezando toda potência acima da potência da entrada c.c. do inversor, ou seja, não deixa que a potência vinda dos módulos fotovoltaicos seja maior do que a potência máxima suportada na entrada do inversor.

2.12.2 Modelo do inversor

Como foi visto na seção 2.5.3, a tensão de saída c.a. do inversor, dever ser sincronizada com a tensão da rede, além de, na entrada do inversor c.c., efetuar o SPPM do

gerador FV, sendo assim, é importante considerar as especificações técnicas, elétricas e registro do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) do inversor a ser escolhido.

A potência nominal dos módulos fotovoltaicos é inversamente proporcional à temperatura, dessa forma, em elevadas temperaturas, há redução dessa potência, porém, mesmo nas condições-padrão de ensaio (STC), com irradiância próxima de 1.000 W/m^2 , a máxima potência gerada pelos módulos fotovoltaicos ($P_{FV\text{máx}}$) dificilmente se aproximará da sua potência nominal, portanto, costuma-se dimensionar o arranjo FV com a máxima potência gerada superior à potência nominal c.a. do inversor (P_{Nca}). Caso a máxima potência gerada pelo arranjo FV ultrapasse a potência máxima da entrada c.c. do inversor ($P_{i\text{máx}}$), o mesmo deve ajustar seu SPPM desprezando toda potência acima deste limite (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 332), “os inversores de SFCRs podem estar sujeitos a elevadas temperaturas devido ao local onde estão instalados, como, por exemplo, montagem em telhados ou lajes. Nesse caso específico, recomenda-se uma potência nominal c.a. do inversor igual ou mesmo superior à máxima potência gerada pelo arranjo fotovoltaico”.

2.12.3 Fator de Dimensionamento do Inversor (*FDI*)

O Fator de Dimensionamento de Inversores (*FDI*) é a razão entre a potência nominal c.a. do inversor pela máxima potência gerada no arranjo FV (PINHO; GALDINO, 2014), como mostra a Equação (2.6).

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{P_{FV\text{máx}}(W_p)} \quad (2.6)$$

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 332), “análise de literatura mostra que os valores inferiores de *FDI* recomendados por fabricantes e instaladores situam-se na faixa de 0,75 a 0,85, enquanto o limite superior é de 1,05”.

2.12.4 Tensão do módulo fotovoltaico diferente da nominal ($V_{oc}(T)$)

Durante o ano há variação de temperatura (T) proveniente das estações e, conseqüentemente, há variação da tensão V_{oc} fornecida pelo arranjo FV ao inversor, por tanto, torna-se necessário analisar se essa variação tensão não ultrapasse o valor da tensão máxima c.c. suportada na entrada do inversor ($V_{i_{máx}}$), além da tensão de circuito aberto do módulo para STC (V_{ocSTC}). Para isso, devem ser levadas em consideração as situações extremas de temperatura (máxima e mínima), obtendo, dessa forma, as tensões de circuito aberto para altas e baixas temperaturas de inverno ($V_{ocTmáx}$ e $V_{ocTmín}$, respectivamente). A Equação (2.7) permite calcular, de cada vez, essas tensões de circuito aberto em função das temperaturas máxima e mínima.

$$V_{oc}(T) = V_{ocSTC}(1 + \beta(T - 25)) \quad (2.7)$$

A tensão V_{oc} do módulo FV varia de acordo com a temperatura devido ao seu coeficiente de temperatura (β) possuir sinal negativo, portanto, isso se torna muito importante na escolha do inversor mais adequado para o projeto. Os valores de β , V_{ocSTC} e $V_{i_{máx}}$ são retirados da folha de dados técnico dos fabricantes de módulo e inversor.

2.12.5 Tensão de entrada do inversor

A Equação (2.8) expressa a quantidade máxima de módulos que podem ser conectados em série para compor o arranjo FV ($N^{\circ} \text{módulo_série}$), utilizando a tensão máxima c.c. suportada na entrada do inversor e a tensão de circuito aberto para as baixas temperaturas de inversor ($V_{i_{máx}}$ e $V_{ocTmín}$, respectivamente) (PINHO; GALDINO, 2014), pois é na temperatura mínima que ocorre o fornecimento da máxima potência dos módulos fotovoltaicos ao inversor. De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 333), “o número máximo de módulos em série também deve respeitar a tensão máxima suportável pelo módulo, a qual é informada nas folhas de dados técnicos do fabricante e normalmente é em torno de 1000 V”.

$$N^{\circ} \text{módulos_série} \cdot V_{ocTmín} < V_{i_{máx}} \quad (2.8)$$

2.12.6 Faixa de tensão de operação do Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM) do inversor

Através da Equação (2.7), pode-se estimar a tensão de máxima potência de um módulo FV para as altas e baixas temperaturas de operação previstas ($V_{mpTmáx}$ e $V_{mpTmín}$, respectivamente), apenas substituindo as variáveis da tensão de circuito aberto (V_{oc}) pelas da tensão de máxima potência (V_{mp}) (PINHO; GALDINO, 2014), como mostra a Equação (2.9).

$$V_{mp}(T) = V_{mpSTC}(1 + \beta(T - 25)) \quad (2.9)$$

Onde:

V_{mpSTC} – Tensão de máxima potência do módulo FV para STC.

Através da variação de temperatura nos módulos fotovoltaicos em diferentes estações do ano, fará com que esses módulos forneçam diferentes valores de tensão de máxima potência ao inversor devido ao coeficiente de temperatura (β) negativo, como visto na seção 2.12.4. Esses valores devem ser analisados através da quantidade de módulos fotovoltaicos conectados em série de forma que atenda à faixa de tensão do SPPM do inversor de acordo com a Equação (2.10), ou seja, os módulos conectados em série precisam trabalhar dentro dessa faixa de tensão ou sua eficiência ficará comprometida e poderá provocar sua desconexão. Portanto, em altas temperaturas, a tensão de máxima potência do módulo FV deve ser superior à mínima tensão c.c de operação do SPPM do inversor ($V_{iSPPMmín}$). Da mesma forma, com baixas temperaturas a tensão de máxima potência do módulo FV deve ser inferior à máxima tensão c.c. de operação do SPPM do inversor ($V_{iSPPMmáx}$) (PINHO; GALDINO, 2014). Os valores da faixa de tensão do SPPM do inversor são encontrados na folha de dados técnico do fabricante.

$$\frac{V_{iSPPMmín}(V)}{V_{mpTmáx}(V)} < N^{\circ} \text{ módulos_série} < \frac{V_{iSPPMmáx}(V)}{V_{mpTmín}(V)} \quad (2.10)$$

2.12.7 Corrente máxima c.c. do inversor

O número de fileiras, conectadas em paralelo, das séries de módulos fotovoltaicos (N° *sérieFV_paralelo*) podem ser calculadas pela Equação (2.11), utilizando a razão entre a

corrente máxima c.c. admitida na entrada do inversor ($I_{m\acute{a}x}$) e a corrente de curto-circuito do m3dulo FV (I_{SC}), garantindo, dessa forma, que o valor da corrente de entrada c.c. do inversor n3o seja ultrapassado (PINHO; GALDINO, 2014).

$$N^{\circ} \text{ s3eries FV_paralelo} = \frac{I_{m\acute{a}x}(A)}{I_{SC}(A)} \quad (2.11)$$

2.13 M3DIA DA GERA33O ENERG33TICA MENSAL E ECONOMIA ESTIMADA

A m3dia estimada da gera33o energ33tica mensal do SFCR ($G_{m\acute{e}s}$) 3 dada a partir da Equa33o (2.12), onde 3 necess3ria a m3xima pot3ncia gerada pelo arranjo FV, a m3dia di3ria anual das Horas de Sol Pleno incidente no plano do m3dulo FV, a taxa de desempenho TD e a quantidade de dias em que ser3 gerada a energia durante o m3s.

$$G_{m\acute{e}s}(kWh) = P_{FVm\acute{a}x} \times HSP_{MA} \times TD \times 30(\text{dias}) \quad (2.12)$$

A economia mensal de energia el3trica da resid3ncia (Eco_{mensal}) 3 dada a partir do produto entre a m3dia estimada gera33o energ33tica mensal do SFCR e a tarifa de energia el3trica da resid3ncia ($tarifa_{ener}$), como mostra a Equa33o (2.13).

$$Eco_{mensal}(R\$) = G_{m\acute{e}s} \times tarifa_{ener}(R\$/kWh) \quad (2.13)$$

Essa tarifa pode ser obtida atrav3s do tal3o de energia el3trica, sendo ela, a raz3o entre a fatura (R\$) e o consumo (kWh), logo 3 dada em R\$/kWh (reais por quilowatts-hora), ou seja, 3 o valor pago em R\$ por cada kWh consumido da rede el3trica.

Com a economia mensal definida, pode ser estimado o *PayBack*, que 3 o retorno do dinheiro investido no SFCR atrav3s da economia da conta de energia el3trica, sendo calculado pela Equa33o (2.14), utilizando o investimento total ($Invest$) e a economia anual de energia el3trica da resid3ncia (Eco_{anual}).

$$Payback(R\$) = Invest(R\$) + Eco_{anual}(R\$) \quad (2.14)$$

A economia anual 3 dada pela Equa33o (2.15), sendo adicionado o gasto com a limpeza anual dos m3dulos fotovoltaicos (Lim_{anual}).

$$Eco_{anual}(R\$) = Eco_{mensal} * (12) - Lim_{anual}(R\$) \quad (2.15)$$

Dessa forma, chegará um momento (médio a longo prazo), no qual, o valor do investimento feito será liquidado, tendo, a partir daí, apenas a economia acumulada menos o valor da limpeza anual dos módulos, preservando, assim, o desempenho do mesmo.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será apresentada a metodologia utilizada com objetivo do estudo de caso de dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCCR) elétrica de distribuição de baixa tensão da Equatorial Energia, com intuito de gerar energia elétrica para a residência na qual for instalado, além de fornecer seu excedente à rede da concessionária, tendo, dessa forma, uma previsão da energia produzida para ser feita uma análise do possível investimento e retorno (*PayBack*).

Para o dimensionamento do sistema FV desse trabalho, utilizou-se a média do consumo de energia elétrica em Wh (Watt-hora) de uma residência do município de Tucuruí-PA, além de ter como base o livro de João Tavares Pinho e Marco Antonio Galdino (Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaico - 2014).

É de suma importância salientar que, não é intuito desse trabalho apresentar os dimensionamentos de cabos e dispositivos de proteção, além de não ser possível a instalação do sistema FV devido à falta de recursos financeiros, ou seja, será feita apenas o dimensionamento e análise para uma possível instalação futura.

3.1 DADOS DA LOCALIZAÇÃO RESIDENCIAL E GEOGRÁFICA

Alguns dados da localização residencial foram obtidos através da proprietária do imóvel, sendo fornecido:

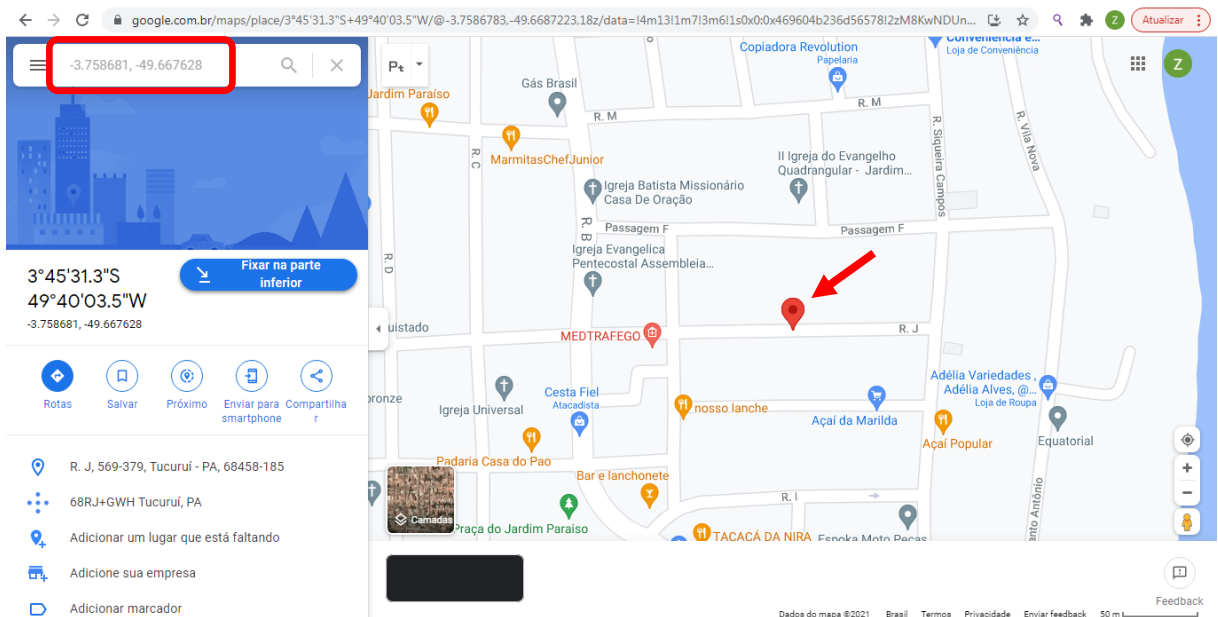
- Endereço: Rua J, Jardim Paraíso, Tucuruí-PA;
- Classificação da UC (Unidade Consumidora): Grupo B (baixa tensão) e baixa renda;
- Classificação de ligação: Monofásico com dois condutores.

No Anexo A pode ser visto o talão de energia elétrica referente ao mês de outubro de 2021 com os dados citados anteriormente.

Já os dados das coordenadas geográficas (latitude e longitude) foram obtidos, de forma aproximada, através do Google Maps, como pode ser observado em destaque na Figura 10. O ponto vermelho, indicado por uma seta, é onde fica localizada aproximadamente a residência.

- Latitude -3.758681;
- Longitude -49.667628.

Figura 10 - Coordenadas geográficas, de latitude e longitude, e localização da residência.



Fonte: Google Maps (2021).

3.2 DADOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA MENSAL MAIS PRÓXIMO DA RESIDÊNCIA

Com os dados das coordenadas geográficas de latitude e longitude, descritos na seção anterior, e inseridos na plataforma SunData, como pode ser observado na Figura 11, tornou-se possível analisar os dados da irradiação solar diária média mensal em três localidades próximas à essas coordenadas informadas.

Figura 11 - Coordenadas geográficas inseridas na plataforma digital SunData.

Fonte: Autoria própria.

Para o dimensionamento do SFCR desse trabalho, foi escolhido o local mais próximo da residência em estudo, onde, de acordo com a Figura 12 e em destaque, esse local possui uma distância de 5,1 km da residência e irradiação solar diária média anual incidente no local $G = 4,69 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$.

Figura 12 - Dados da irradiação solar diária média anual mais próximo da residência.

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]													Media	Delta		
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out			Nov	Dez
✓	Tucuruí	Tucuruí	PA	BRASIL	3,801° S	49,649° O	5,1	4,35	4,54	4,58	4,66	4,61	4,86	4,96	5,25	5,01	4,66	4,52	4,26	4,69	1,00
✓	Breu Branco	Breu Branco	PA	BRASIL	3,701° S	49,649° O	6,7	4,35	4,55	4,53	4,62	4,66	4,82	4,91	5,21	4,99	4,64	4,54	4,24	4,66	,97
✓	Tucuruí	Tucuruí	PA	BRASIL	3,801° S	49,749° O	10,2	4,39	4,54	4,62	4,65	4,63	4,93	5,02	5,27	5,00	4,69	4,56	4,26	4,71	1,01

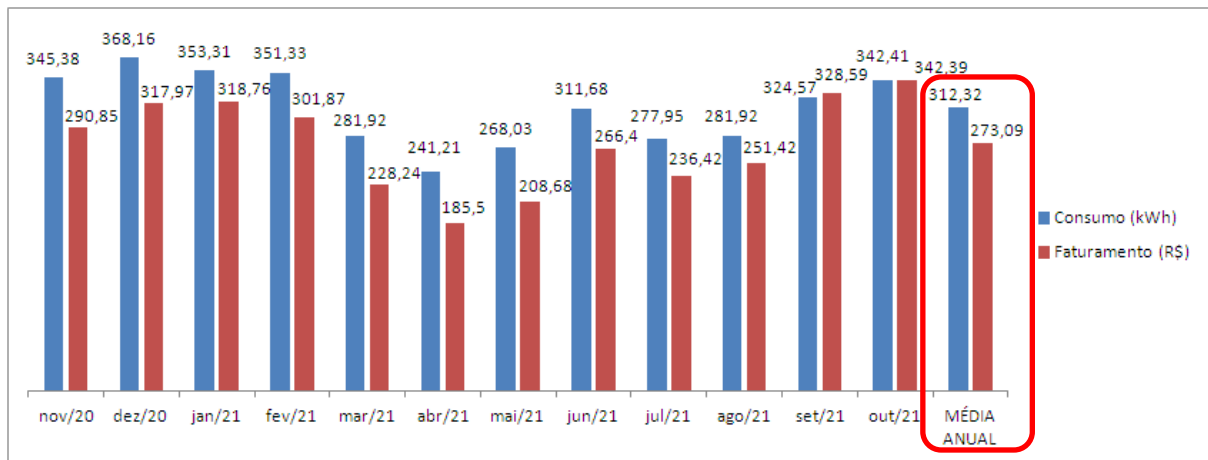
Fonte: Autoria própria.

3.3 DADOS DO FATURAMENTO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA RESIDÊNCIA

No Gráfico 1 pode ser observado o histórico de consumo elétrico da residência (objeto de estudo deste trabalho) obtido no site da Equatorial Energia¹⁰, onde constam o consumo em kWh e o faturamento em R\$ (reais), mês a mês, de energia elétrica da residência no período doze meses, entre os meses de novembro de 2020 e outubro de 2021. Portanto, pode-se afirmar que o consumo de energia, nesse período, foi de 3.747,87 kWh e faturamento de R\$ 3.277,09.

¹⁰ Equatorial Energia: Plataforma online da concessionária local. Pode ser acessado em: <<https://www.equatorialenergia.com.br/>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2021.

Gráfico 1 - Histórico do faturamento e consumo de energia elétrica da residência entre os meses de novembro de 2020 e outubro de 2021.



Fonte: Autoria própria.

3.4 CÁLCULOS E DADOS NECESSÁRIOS PARA O ARRANJO FV

A Resolução Normativa N° 414/2010 da ANEEL, seção V, Art. 98, onde trata sobre o custo de disponibilidade (C_{dm}), estabelece que:

Art. 98. O custo de disponibilidade do sistema elétrico, aplicável ao faturamento mensal de consumidor responsável por unidade consumidora do grupo B, é o valor em moeda corrente equivalente a:

I – 30 kWh, se monofásico ou bifásico a 2 (dois) condutores;

II – 50 kWh, se bifásico a 3 (três) condutores; ou

III – 100 kWh, se trifásico.

Portanto, de acordo com o que foi visto na seção 3.1, o C_{dm} da residência será igual a 30 kWh (monofásico a dois condutores). Sendo assim, a Geração de Energia Diária Média Anual necessária, calculada a partir da Equação (2.1), será:

$$E = \frac{312,32(kWh) - 30(kWh)}{30(dias)} \cong 9,41 kWh/dia$$

Já a média diária anual das Horas de Sol Pleno incidente no plano do módulo FV, calculada a partir da Equação (2.2), será:

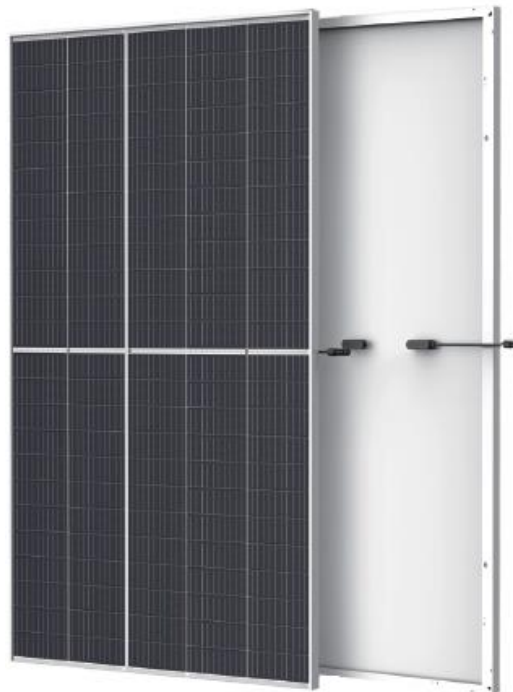
$$HSP_{MA} = \frac{4,69(kWh/m^2 \cdot dia)}{1[kW/m^2]} = 4,69 h/dia$$

De acordo com a seção 2.11.1, TD está na faixa de 70% a 80%. Nesse trabalho optou-se por utilizar TD igual a 75% devido algumas possíveis perdas de desempenho provenientes da temperatura ambiente e da tecnologia utilizada nos módulos fotovoltaicos, portanto, pode-se concluir, a partir da Equação (2.3), que a potência nominal (ou de pico) teórico do arranjo FV, será:

$$P_{FV} = \frac{9,41(kWh)/0,75}{4,69(h)} \cong 2,68 kW_p$$

Após algumas pesquisas para a escolha do módulo FV adequado para o sistema, o modelo escolhido foi de m-Si, modelo TSM-DE09¹¹, da fabricante Trina Solar, ilustrado na Figura 13, com 120 células de m-Si e garantia de 25 anos.

Figura 13 - Módulo fotovoltaico de m-Si, modelo TSM-DE09, da Trina Solar.



Fonte: Trina Solar (2021).

¹¹ O *datasheet* (folha de dados) de tal módulo pode ser acessado em: <https://static.trinasolar.com/sites/default/files/400W%20Datasheet_Vertex_DE09_2021_PT.pdf> Acesso em 15 de janeiro de 2022.

Na Tabela 1 podem ser observadas algumas das características elétricas, sob STC, do módulo FV escolhido para esse trabalho. A folha de dados de tal módulo encontra-se no ANEXO B e C.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico escolhido, sob STC.

Módulo fotovoltaico TSM-DE09	
Ponto de máx. potência do módulo FV (P_{mp}) [Wp]	405
Tensão de máxima potência STC (V_{mpSTC}) [V]	34,4
Corrente de máxima potência (I_{mp}) [A]	11,77
Tensão de circuito aberto STC (V_{ocSTC}) [V]	41,4
Corrente de curto-circuito (I_{sc}) [A]	12,34
Eficiência do módulo [%]	21,1
Coefficiente de temperatura V_{oc} (β) [%/°C]	-0,25

Fonte: Autoria própria.

Ao tratar-se da quantidade de módulos fotovoltaicos, é importante salientar que, caso o cálculo dessa quantidade não seja um resultado com número inteiro, então o valor adotado deve ser o inteiro superior ao resultado obtido, justamente para suprir a demanda energética necessária da residência, portanto, com os dados da potência nominal teórica do arranjo FV e da potência máxima do módulo escolhido, conclui-se, a partir da Equação (2.4), que a quantidade de módulos fotovoltaicos, será:

$$n^{\circ} \text{ de módulos}_{FV} = \frac{2680(W_p)}{405(W_p)} \cong 6,61 \text{ módulos}$$

Portanto, são necessários 7 (sete) módulos fotovoltaicos para suprir a necessidade energética da residência.

Se o resultado da quantidade de módulos fotovoltaicos for um número inteiro, então afirmar-se que a máxima potência gerada pelo arranjo FV (P_{FVmax}) é igual a potência nominal teórica do mesmo (P_{FV}), caso contrário, essa máxima potência se dá a partir da Equação (2.5), onde:

$$P_{FVmax} = 7 \times 405(W_p) = 2,835 \text{ kW}_p$$

3.5 CÁLCULOS E DADOS NECESSÁRIOS PARA O INVERSOR

Após algumas pesquisas para a escolha do inversor FV mais adequado para esse trabalho, levando em conta a compatibilidade das características elétricas do arranjo FV com o inversor, local de instalação e custo-benefício, foi escolhido o inversor do modelo MIN2500tl-x, monofásico de 220V, do fabricante Growatt, ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Inversor do modelo MIN2500tl-x, monofásico de 220V da Growatt.



Fonte: GROWATT (2021).

Na Tabela 2 podem ser observadas algumas das características elétricas do inversor utilizado nesse trabalho, de acordo com a folha de dados¹² técnicos do fabricante, presente no ANEXO D.

¹² O *datasheet* (folha de dados) de tal inversor pode ser acessado em: <<https://www.ginverter.pt/show-40-578.html>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2022.

Tabela 2 - Especificações elétricas do inversor escolhido.

Inversor Solar On-grid 2,5 kW Growaat MIN2500tl-x Monofásico 220 V 1SPPM	
Dados de entrada (CC)	
Potência máxima de entrada CC ($P_{i_{máx}}$) [kW]	3,5
Tensão máxima CC ($V_{i_{máx}}$) [V]	500
Faixa de operação SPPM CC ($V_{i_{SPPM}}$) [V]	60-500
Corrente máxima CC por SPPM ($I_{i_{máx}}$) [A]	12,5
Dados de saída (CA)	
Potência nominal CA (P_{Nca}) [kW]	2,5
Corrente máxima CA (I_{ca}) [A]	11,3
Tensão nominal CA (V_{ca}) [V]	230
Faixa de operação CA [V]	160-300
Frequência nominal CA (f_{ca}) [Hz]	60 (± 5)
Eficiência máxima [%]	98,2

Fonte: Autoria própria.

A partir da Equação (2.6) determinou-se o FDI do inversor escolhido, que é a razão entre a potência nominal c.a. do inversor (P_{Nca}) e a potência de pico do gerador FV ($P_{FV_{máx}}$):

$$FDI = \frac{2,5(kW)}{2,835(kW_p)} \cong 0,88$$

De acordo com a seção 2.12.3, o inversor escolhido está na faixa dos valores inferiores de 0,75 a 0,85 e limite superior de 1,05 do FDI .

Considerando valores de temperatura extremas para os módulos FV no município de Tucuruí-PA, com capacidade de atingir 70 °C durante o dia e 10 °C durante a noite, dependendo da estação do ano, além dos valores de $\beta = -0,25\%/^{\circ}C$ e $V_{ocSTC} = 41,4$ V, retirados da Tabela 1, conclui-se que, os valores de $V_{ocT_{mín}}$ e $V_{ocT_{máx}}$ da Equação (2.7), serão:

Para temperatura mínima com $T = 10$ °C:

$$V_{ocT_{mín}}(10\text{ }^{\circ}C) = 41,4(1 + (-0,0025)(10 - 25)) \cong 42,95\text{ V}$$

Para temperatura máxima com $T = 70$ °C:

$$V_{ocTm\acute{a}x}(70\text{ }^{\circ}C) = 41,4(1 + (-0,0025)(70 - 25)) \cong 36,74\text{ V}$$

Portanto, um valor mais elevado de tensão entregue ao inversor pelo m3dulo FV pode acontecer em baixas temperaturas (10 °C), dessa forma, torna-se poss3vel verificar, atrav3s da Equa3o (2.8), se esse valor de tens3o entregue ao inversor, com os m3dulos conectados em s3rie, ultrapassa o valor m3ximo de tens3o suportada na entrada do mesmo ($V_{i_{max}} = 500\text{ V}$), retirado da Tabela 2.

$$7(42,95\text{ V}) < 500\text{ V}$$

$$300,65\text{ V} < 500\text{ V}$$

Logo, conclui-se que todos os m3dulos ser3o conectados em s3rie formando o arranjo FV, pois seu valor de tens3o de sa3da 3 menor que a tens3o m3xima suportada na entrada do inversor.

De acordo com a Equa3o (2.9), a faixa de tens3o de m3xima pot3ncia de um m3dulo FV para as temperaturas de opera3o previstas de 70 °C e 10 °C ($V_{mpTm\acute{a}x}$ e $V_{mpTm\grave{m}n}$, respectivamente) e com o valor de $V_{mpSTC} = 34,4\text{ V}$, retirado da Tabela 1, tem-se:

Para temperatura m3nima com $T = 10\text{ }^{\circ}C$:

$$V_{mpTm\grave{m}n}(10\text{ }^{\circ}C) = 34,4(1 + (-0,0025)(10 - 25)) = 35,69\text{ V}$$

Para temperatura m3xima com $T = 70\text{ }^{\circ}C$:

$$V_{mpTm\acute{a}x}(70\text{ }^{\circ}C) = 34,4(1 + (-0,0025)(70 - 25)) = 30,53\text{ V}$$

Dessa forma, a partir da Equa3o (2.10) para a faixa de opera3o do SPPM do inversor, com a m3nima tens3o c.c de opera3o ($V_{iSPPMm\grave{m}n} = 60\text{ V}$) e m3xima tens3o c.c. de opera3o ($V_{iSPPMm\acute{a}x} = 500\text{ V}$), retiradas da Tabela 2, tem-se:

$$\frac{60(V)}{30,53(V)} < 7 < \frac{500(V)}{35,69(V)}$$

$$1,97 < 7 < 14,01$$

Para encontrar a faixa de tensão de máxima potência do arranjo FV, basta fazer o produto da quantidade de módulos conectados em série com os valores de $V_{mpTmáx}$ e V_{mpTmin} , encontrados anteriormente. Logo, essa faixa será de 213,71 V a 249,83 V, respectivamente. Portanto, os valores mínimo e máximo de tensão para diferentes valores de temperatura, estão dentro da faixa de operação do SPPM do inversor.

Para a Equação (2.11), onde é calculado o número de fileiras, conectadas em paralelo, das séries de módulos fotovoltaicos (para saber a máxima corrente suportada na entrada do inversor), utiliza a corrente máxima c.c. admitida na entrada do inversor ($I_{máx} = 12,5$ A) e a corrente de curto-circuito do módulo FV ($I_{SC} = 12,34$ A), ambas retiradas das Tabelas 2 e 1, respectivamente, logo:

$$N^{\circ} \text{ séries FV}_{paralelo} = \frac{12,5(A)}{12,34(A)} \cong 1,01 \text{ fileira em paralelo}$$

Portanto, todos os módulos fotovoltaicos estarão conectados apenas em série, não havendo a necessidade de conexões em paralelo para elevar o valor de corrente elétrica na entrada do inversor, sendo assim, pode-se afirmar que, a corrente c.c. na entrada do inversor é igual à corrente de curto-circuito do módulo (12,34 A), que é menor que a corrente máxima c.c. admitida na entrada do inversor (12,5 A).

3.6 CORREÇÃO DO SFCR PARA UM AUMENTO DE CARGA (220V)

É importante salientar que, de acordo com a Tabela 2 e com os cálculos feitos anteriormente, todos os parâmetros elétricos da saída c.a. do inversor estão aptos para atender as necessidades da residência, exceto a tensão nominal monofásica de 230 V (fase-neutro) com faixa de operação de 160 V a 300 V, pois a residência é atendida com tensão monofásica de 127 V (fase-neutro).

Dessa forma, foram estipuladas, a seguir, duas possíveis soluções para esse problema:

I – Instalar um autotransformador que baixe a tensão de saída c.a. do inversor de 230 V para 127 V e, assim, alimentar a residência, porém, concluiu-se que, poderia haver gastos adicionais tanto com a compra ou possíveis trocas futuras (em caso de defeito) do

autotransformador quanto com a manutenção do mesmo. A Figura 15 ilustra um autotransformador conversor 500 Va de 127V/220V ou 220V/127V do fabricante Girardi.

Figura 15 - Autotransformador conversor 500Va de 127V/220V ou 220V/127V.



Fonte: Mercado Livre.

II – A cliente (titular da linha) fosse à concessionária e solicitasse o aumento de carga de 127 V (fase-neutro) para 220 V (fase-fase), dessa forma, a residência passaria a ser alimentada por uma rede bifásica (duas fases e um neutro), sendo assim, apta para receber a tensão c.a. de 220 V vinda do inversor sem comprometer a instalação. Contudo, os cálculos deveriam ser refeitos, pois o C_{dm} iria mudar de 30 kWh para 50 kWh, de acordo com a RN N° 414/2010 citada na seção 3.4, dessa forma, mudaria os demais parâmetros que dependem desse resultado.

Como forma de segurança e até mesmo pelo custo-benefício, optou-se em aconselhar a cliente para que fosse solicitado o aumento de carga à concessionária de 127 V para 220 V.

3.6.1 Novos cálculos para o arranjo fotovoltaico

Com a alteração do C_{dm} de 30 kWh para 50 kWh através da solicitação do aumento de carga (220 V) à concessionária, foram refeitos os cálculos da seção 3.4.

A Geração de Energia Diária Média Anual necessária, Equação (2.1), será:

$$E = \frac{312,32(kWh) - 50(kWh)}{30(dias)} \cong 8,744 kWh/dia$$

A média diária anual das Horas de Sol Pleno incidentes no plano do módulo FV, Equação (2.2), terá o mesmo resultado, logo:

$$HSP_{MA} = 4,69 h/dia$$

A Potência Nominal (ou d pico) teórica do arranjo FV, Equação (2.3), será:

$$P_{FV} = \frac{8,744(kWh)/0,75}{4,69(h)} \cong 2,485 kW_p$$

Utilizando o mesmo modelo do módulo FV escolhido (TSM-DE09 da fabricante Trina Solar), a quantidade de módulos fotovoltaicos, Equação (2.4), será:

$$n^{\circ} \text{ de módulos}_{FV} = \frac{2,485(kW_p)}{405(W_p)} \cong 6,13 \text{ módulos}$$

Portanto, permanecerão os 7 (sete) módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, a Máxima Potência Gerada pelo arranjo FV, Equação (2.5), terá o mesmo resultado, logo:

$$P_{FVmáx} = 2,835 kW_p$$

3.6.2 Novos cálculos para o inversor

Como não foi necessário alterar o modelo do módulo FV e nem a quantidade do mesmo, vistos na seção anterior, conclui-se que, não é necessário alterar o modelo do inversor escolhido nem os cálculos feitos na seção 3.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão abordados os resultados e discussões necessários para dimensionamento e análise da elaboração desse trabalho.

4.1 GERAÇÃO ENERGÉTICA ESTIMADA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A geração estimada mensalmente do SFCR ($G_{mês}$), a partir da Equação (2.12), será:

$$G_{mês} = 2835 \times 4,69 \times 0,75 \times 30 \cong 299,163 \text{ kWh}$$

Portanto, tem-se uma geração média anual de 3.589,956 kWh.

4.2 GASTOS E POSSÍVEL RETORNO DO INVESTIMENTO

Os possíveis gastos (investimento) referentes a esse projeto constam apenas os valores dos módulos fotovoltaicos, inversor, limpeza anual dos módulos e mão de obra. Gastos referentes à *string box* e/ou estrutura de fixação dos módulos não foram adicionados.

Após serem consultadas algumas empresas de instalação de energia solar da região, obteve-se como média um valor de R\$ 150,00 para a limpeza de cada módulo, assim como, o valor de mão de obra para a instalação do SFCR, sendo na faixa de 40% a 60% (dependendo da quantidade de módulos) em cima do valor referente à soma dos módulos e inversores. Nesse trabalho optou-se por utilizar 50% desse valor. Os gastos, aproximados, citados anteriormente podem ser observados na Tabela 3, onde consta um investimento total (sem limpeza anual dos módulos) no valor de -R\$ 19.661,40. O sinal negativo simboliza a saída de dinheiro de posse da cliente.

Tabela 3 - Investimento para a instalação do SFCR.

INVESTIMENTO INICIAL		
	Cada um	Total
Módulo FV	R\$ 1.439,00	R\$ 10.073,00
Inversor	R\$ 3.034,60	R\$ 3.034,60
Limp. anual mód.	R\$ 150,00	1.050,00
Mão de obra (50%)	R\$ 6.553,80	
Total	-R\$ 19.661,40	

Fonte: Autoria própria.

Como houve a necessidade de alterar C_{dm} para 50 kWh, então, de acordo com o Art. 98 da RN N° 414/2010 citado na seção 3.4, mesmo após a instalação do SFCR, a cliente pagará, em R\$, uma taxa mínima, o chamado Custo de Disponibilidade Mínima de energia, de acordo com o grupo da unidade consumidora (grupo B – equivalente a 50 kWh, bifásico a três condutores), além de não ficar isenta dos impostos como ICMS (caso o consumo seja maior do que a geração) e taxa de iluminação pública, ou seja, se o arranjo FV gerar exatamente a mesma quantidade de kWh necessária para suprir a demanda energética da residência no período de um mês, a cliente ainda terá de pagar a concessionária uma taxa mínima equivalente a 50 kWh mais a taxa de iluminação pública. Por outro lado, como visto na seção 2.6, caso a geração seja maior do que o consumo, ou seja, injeção de energia ativa no sistema de distribuição pela unidade consumidora (“empréstimo de energia”), a cliente terá um crédito de energia ativa que poderá ser utilizado em um prazo de até 60 (sessenta) meses.

A média da tarifa de energia elétrica da residência foi obtida através do levantamento feito nos talões de energia dos últimos 4 (quatro) anos da residência estudada, como mostra a Tabela 4. A média da tarifa em 2021 pode ser obtida através no Gráfico 1, porém, os talões de energia dos anos anteriores não foram anexados nesse trabalho devido à falta da qualidade de visualização e deterioração dos mesmos.

Tabela 4 - Média mensal da tarifa de energia nos últimos anos.

Ano	Consumo médio mensal (kWh)	Faturamento médio mensal (R\$)	Tarifa média mensal (R\$/kWh)
2018	327,00	257,87	0,788593
2019	228,29	249,00	1,090718
2020	261,07	200,68	0,768683
2021	312,32	273,09	0,874387

Fonte: Autoria própria

Dessa forma foi possível analisar a variação da tarifa de energia de um ano para o outro seguinte, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Variação da tarifa de energia de um ano para o outro.

Período	Variação (%)
2018/2019	38,31
2019/2020	-29,53
2020/2021	13,75

Fonte: Autoria própria.

Nesse trabalho, optou-se por utilizar a variação mais recente (2020/2021) que corresponde a um aumento de 13,75% na tarifa de energia, portanto, para os próximos anos estima-se que essa tarifa irá aumentar 13,75% com relação ao ano anterior.

Considerando o resultado inicial da tarifa de energia elétrica relacionado aos meses do ano de 2021 no valor de 0,874387 R\$/kWh (Tabela 4) e adicionando 13,75% desse valor, estima-se que a tarifa de energia para o ano seguinte (2022) será de, aproximadamente, 0,994615 R\$/kWh. Conclui-se que, a economia mensal (Eco_{mensal}), a partir da Equação (2.13), para o ano de 2022 (possível instalação do SFCR), será:

$$Eco_{mensal} = 299,163 (kWh) \times 0,994615 \left(\frac{R\$}{kWh} \right) \cong R\$ 297,55$$

Logo, através da Equação (2.15), tem-se uma economia anual (Eco_{anual}) de:

$$Eco_{anual} = (297,55(12)) - 1.050,00 \cong R\$ 2.520,63$$

Dessa forma, o *PayBack*, de acordo com a Equação (2.14), onde se utiliza o investimento total com sinal negativo (simbolizando a saída de dinheiro) e a economia anual com sinal positivo (simbolizando o retorno do dinheiro), será:

$$\text{Payback} = -19.661,40 + 2.520,63 \cong -R\$ 17.140,77$$

Portanto, em 2022 irá retornar R\$ 2.520,63 do dinheiro investido, faltando, dessa forma, retornar o valor de R\$ 17.140,77 nos próximos anos à cliente.

Seguindo esse raciocínio para encontrar o *PayBack* no final do primeiro ano de geração, foram estipulados 15 (quinze) anos utilizando o SFCR para analisar a economia durante esse período, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - *PayBack* para um período de 15 (quinze) anos.

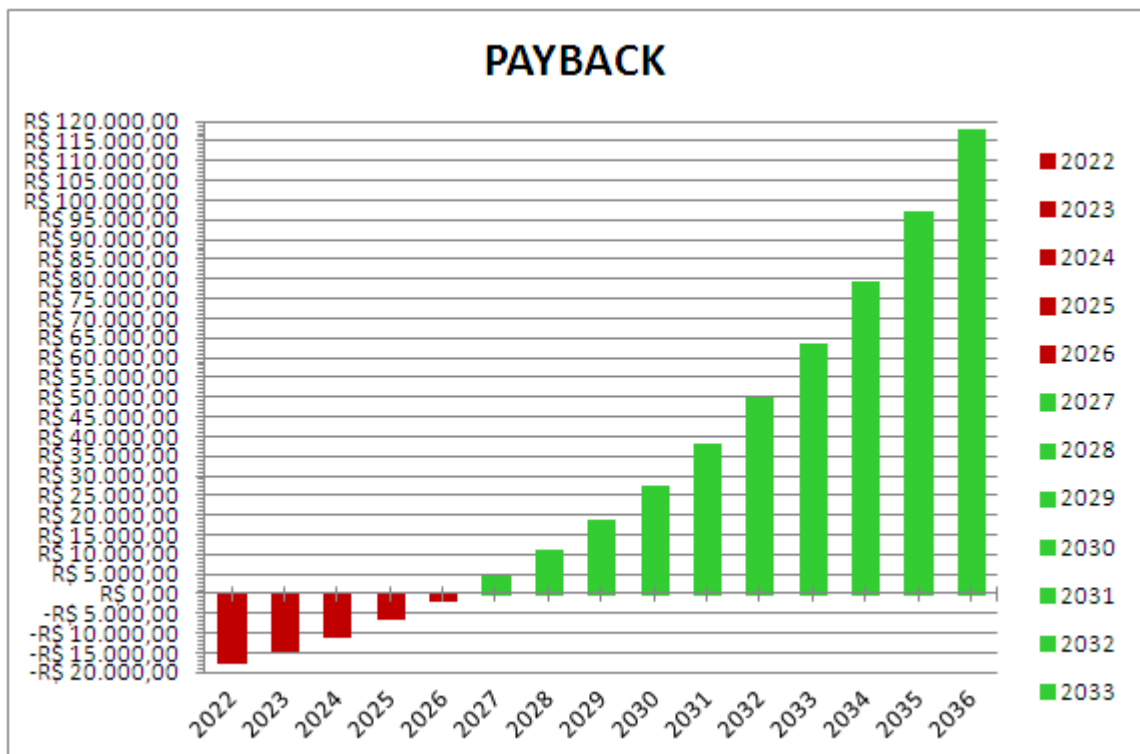
Ano	Tarifa (R\$/kwh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)	<i>PayBack</i> (R\$)
2022	0,994615	297,55	2.520,63	-17.140,77
2023	1,131375	338,47	3.011,59	-14.129,18
2024	1,286939	385,00	3.570,06	-10.559,12
2025	1,463893	437,94	4.205,32	-6.353,80
2026	1,665178	498,16	4.927,92	-1.425,88
2027	1,894140	566,66	5.749,89	4.324,01
2028	2,154584	644,57	6.684,87	11.008,88
2029	2,450840	733,20	7.748,42	18.757,30
2030	2,787830	834,02	8.958,20	27.715,50
2031	3,171157	948,69	10.334,33	38.049,83
2032	3,607191	1.079,14	11.899,67	49.949,50
2033	4,103180	1.227,52	13.680,25	63.629,76
2034	4,667367	1.396,31	15.705,66	79.335,42
2035	5,309130	1.588,30	18.009,57	97.344,99
2036	6,039135	1.806,69	20.630,26	117.975,25

Fonte: Autoria própria.

Em meados do sexto ano de geração (2027) torna-se possível obter o retorno de todo dinheiro investido com a instalação do SFCR, tendo, a partir daí, apenas a economia

acumulada menos o valor da limpeza anual dos módulos, preservando, assim, o desempenho do mesmo. Observa-se também que, após os 15 (quinze) anos de geração a cliente irá economizar, aproximadamente, R\$ 117.975,25. No Gráfico 2 pode ser observado o desenvolvimento do *PayBack* para a melhor visualização e entendimento de acordo com a Tabela 6.

Gráfico 2 - Desenvolvimento do *PayBack*.



Fonte: Autoria própria.

Comparando os gastos de R\$ 3.277,09 da fatura de energia elétrica de 2021 (seção 3.3) com a economia anual estimada de R\$ 2.520,63 para 2022 (Tabela 6), pode-se afirmar que, a cliente irá economizar, aproximadamente, 76,92%. E comparando a geração de 3.747,87 kWh de energia elétrica de 2021 (seção 3.3) com a geração energética do sistema FV de 3.589,956 kWh para 2022 (seção 4.1), pode ser afirmar que, o arranjo FV irá gerar energia suficiente para economizar, aproximadamente, 95,79% da energia que seria consumida de rede de distribuição.

Caso aumente o consumo de energia elétrica devido à utilização de mais equipamentos elétricos na residência, então, talvez seja necessária a instalação de mais módulos fotovoltaicos, porém, sempre havendo o cuidado para não ultrapassar os limites elétricos

suportados pelo inversor. Caso isso ocorra, então o inversor deverá ser trocado por outro que suporte essa demanda elétrica vinda do arranjo FV, logo, o *PayBack* deverá ser recalculado.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi visto o dimensionamento e análise estimada da geração de energia elétrica residencial/monofásica através da possível instalação do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) elétrica de baixa tensão no município de Tucuruí-PA, além de ser levado em consideração a irradiância solar diária média anual incidente no local, com intuito de reduzir o custo da fatura de energia elétrica da residência (compensação), ter uma estimativa dos possíveis gastos com a instalação e uma previsão do retorno desse investimento (*PayBack*) em forma de economia.

Através da comparação dos valores obtidos e estimados com relação aos dados financeiros, consumo e geração dos anos de 2021 e 2022, pôde-se constatar que, caso haja a implementação do sistema FV no início de 2022 e após os 12 (doze) meses de geração, haverá uma economia financeira de, aproximadamente, 76,92% e com relação ao consumo e geração, essa economia será de, aproximadamente, 95,79%. Com isso, foi calculado o *PayBack* em torno de 6 (seis) anos de geração através da variação estimada da tarifa de energia obtida entre os anos de 2020 a 2021, considerando um aumento de 13,75% com relação ao ano anterior. Tendo em vista esse aumento anual da tarifa de energia elétrica e no período de 15 (quinze) anos de geração, entre os anos de 2022 a 2036, foi estimada uma economia de, aproximadamente, R\$ 117.975,25.

No decorrer desse trabalho foi necessário refazer os cálculos para um aumento de carga da residência, no qual, é monofásico de 127 V (fase-neutro) passando a ser calculada como bifásico 220 V (fase-fase) a fim de atender as especificações elétricas de saída c.a. do inversor e evitando, dessa forma, a instalação de um autotransformador, ou seja, houve a necessidade de refazer os cálculos que dependiam do C_{dm} , pois, devido a isso e seguindo as recomendações da RN N° 414/2010, o mesmo passou de 30 kWh para 50 kWh, porém, não houve alteração na quantidade de módulos do arranjo FV e, conseqüentemente, nem nos cálculos para o dimensionamento do inversor.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a implementação do SFCR visto nesse trabalho com intuito de comparar os valores teóricos estimados com os valores práticos no período de 12 (doze) meses, como por exemplo, geração de energia do sistema FV, faturas

de energia antes e depois da implementação e se o valor estimado do *PayBack* estará coerente com o que foi visto.

O estudo do SFCCR foi de suma importância para minha carreira estudantil e profissional com relação ao conhecimento adquirido em microgeração e minigeração baseado em energia solar.

Visto isso, pode-se afirmar que, apesar do elevado custo de investimento, a instalação desse sistema ainda torna-se vantajosa pelo fato de indicar à cliente a geração própria de energia elétrica através de fonte renovável e gratuita (luz solar), além da redução da fatura de energia elétrica e o retorno de todo dinheiro investido após um determinado período de geração, restando apenas a economia.

REFERÊNCIAS

ALDO SOLAR. **Inversor solar fotovoltaico on grid growatt (68207-0)**, 2021. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/produto/68207-0/inversor-solar-fotovoltaico-on-grid-growatt-mic1500tl-x-15kw-monofasico-220v-1mppt-monitoramento>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração distribuída**, 2015. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 414**, 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 24 de novembro de 2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482**, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 24 de novembro de 2021.

MAIA, M. ARAUJO. **Sistema fotovoltaico conectado à rede**: Um estudo de caso de dimensionamento e análise de geração de energia, 2021. TCC (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Pará, 2021.

ARCE. **Usina localizada em Tauá é pioneira na geração de energia fotovoltaica**, 2015. Disponível em: <<https://www.arce.ce.gov.br/2015/10/16/usina-localizada-em-taua-e-pioneira-na-geracao-de-energia-fotovoltaica/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2021.

BLOOMBERG. **Superando nações desenvolvidas, principais mercados emergentes atraem investimento recorde de US\$ 126 bilhões em energia limpa**, 2015. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com.br/blog/superando-nacoes-desenvolvidas-principais-mercados-emergentes-atraem-investimento-recorde-de-us-126-bilhoes-em-energia-limpa/>>. Acesso em: 13 de janeiro de 2022.

BLUMENAU VERTICAL. **Sistema fotovoltaico: Energia limpa e renovável**, 2015. Disponível em: <<http://www.blumenauvertical.com.br/2015/12/sistemas-fotovoltaicos-energia-limpa-e.html>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

CANAL ENERGIA. **Brasil assume 16ª posição no ranking mundial de energia solar**, 2020. Disponível em: <<https://canalenergia.com.br/noticias/53140046/brasil-assume-16a-posicao-no-ranking-mundial-de-energia-solar>>. Acesso em: 24 de novembro de 2021.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData V 3.0**, 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2021.

ENERGIA SOLAR SOL CENTRAL. **PHB solar**, 2019. Disponível em: <<http://www.solcentral.com.br/produtos/caixas-de-juncao/phb-2/>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

EQUATORIAL ENERGIA. **Escolha o seu estado**. Disponível em: <<https://www.equatorialenergia.com.br/>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2021.

EQUATORIAL ENERGIA. **Valor de tarifa e serviços**. Disponível em: <<https://al.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/#residencial-baixa-renda>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2022.

FORBES. **Brasil atinge 1 milhão de consumidores com geração própria de energia**, 2022. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesesg/2022/01/brasil-atinge-1-milhao-de-consumidores-com-geracao-propria-de-energia-solar/>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.

GOOGLE MAPS, 2021. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2021.

GROWATT. **MIN 2500-6000TL-X**, 2021 Disponível em: <<https://www.ginverter.pt/show-40-578.html>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2022.

ITAIPU BINACIONAL. **Geração**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica**. 8ª ed. AMGH, 2016.

MERCADO LIVRE. **Inversor Solar On Grid Growatt 2.5kw Monofasico 220v 1mppt**, 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1762329403-inversor-solar-on-grid-growatt-25kw-monofasico-220v-1mppt-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=eff44202-cc2e-4c70-be04-48a4c43e6b89>. Acesso em: 11 de janeiro de 2022.

MERCADO LIVRE. **Placa Solar Painel Modulo Fotovoltaico 400w Half-cell Tsm400**, 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2106874297-placa-solar-painel-modulo-fotovoltaico-400w-half-cell-tsm400-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=484e1a66-34bf-413c-99e8-1390ce50fa50>. Acesso em: 11 de janeiro de 2022.

MERCADO LIVRE. **Transformador Conversor 500 Va 127 / 220v E 220 Para 110 127v Girardi Plus**, 2021. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1101472352-transformador-conversor-500-va-127-220v-e-220-para-110-127v-girardi-plus-_JM#position=2&search_layout=stack&type=pad&tracking_id=8f8a7a17-a8ce-4542-ac04-b3d62b3b2f68&is_advertising=true&ad_domain=VQCATCORE_LST&ad_position=2&ad_click_id=MTAzYjVjOTktZTc3Yy00OGVILWIyNGEtOGQxODkyMTk1MTM2>. Acesso em: 11 de janeiro de 2022.

ORIGO ENERGIA. **A história da energia solar no Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://origoenergia.com.br/blog/a-historia-da-energia-solar-no-brasil>>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, R. M.; DE ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1ª ed. São José dos Campos: INPE, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaico**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. **Fontes de Energia Renováveis: Tudo o que você precisa saber**, 2015. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/fontes-de-energia-renovaveis.html>>. Acesso em: 13 de janeiro de 2021.

RIBEIRO, R. PEREIRA. **Estudo de caso: Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial**, 2016. TCC (Bacharel em Engenharia de Automação Industrial) – CEFET Minas Gerais, Minas Gerais, 2016.

SOHO. **Nossa estrela o sol**, 2020. Disponível em: <<https://sohowww.nascom.nasa.gov/classroom/classroom.html>>. Acesso em: 01 de dezembro de 2021.

SOLAR INOVE. **Qual a diferença entre o medido convencional e o bidirecional**, 2021. Disponível em: <<https://blog.solarinove.com.br/qual-a-diferenca-entre-o-medidor-convencional-e-o-bidirecional/>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

SOLENERGIA. **Edmond Becquerel: O homem por trás dos painéis solares**, 2021. Disponível em: <<https://solenergy.com.ph/solar-panel-philippines-edmond-becquerel/>>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

TRINA SOLAR. **Datasheet Vertex DE09**, 2021: O homem por trás dos painéis solares, 2021. Disponível em: <https://static.trinasolar.com/sites/default/files/400W%20Datasheet_Vertex_DE09_2021_PT.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

UNISC. **Um estudo da temperatura e da irradiação solar em células fotovoltaicas**, 2017. Disponível em: <<file:///C:/Users/Familia/Downloads/11378-Texto%20do%20Artigo-51280-1-10-20180727.pdf>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2021.

WGSOL. **O descobridor do efeito fotovoltaico**, 2021. Disponível em: <<https://wgsol.com.br/o-descobridor-do-efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

ZILLES, ROBERTO. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Oficina do Texto, 2012. (Coleção aplicações da energia solar fotovoltaica; 1).

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012.

NASCIMENTO R. L. **Energia solar no Brasil**: Situação e perspectiva [Relatório]. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017.

ANEXO A – FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA

Equatorial Pará Distribuidora de Energia S.A.
 Rodovia Augusto Montenegro, km 8,5 | Belém - PA
 CEP 6623-010 | CNPJ 04.895.728/0001-80
 Inscrição Estadual: 15.074.480-3

Tarifa Social de Energia Elétrica criada pela Lei 10.438/02

SUB GRUPO: B1 GRUPO TENSÃO: B TIPO DE FORNECIMENTO: Monofásico
 TIPO DE TARIFA: CONVENCIONAL MONOFÁSICA TENSÃO NOMINAL: 127 V - MO INSTALAÇÃO: 5396891
 CLASSIFICAÇÃO: Resid. Baixa Renda UL/SEQ: T104B003-470
 SUBCLASSE: RESIDENCIAL BAIXA RENDA

Para atendimento, informe este número.
Conta Contrato
 [REDACTED]

R. J. S. R. PARAISSÓ JD PARAISSÓ [REDACTED] FUCURUÍ - PA
 CPT: [REDACTED]

Parcela de Negócio
539689

Conta mês: 10/2021 Total a pagar: R\$ 342,39 Vencimento: 15/10/2021

Nota Fiscal | Fatura de Energia Elétrica | Serie B: 000522396
 Número da Fatura: 0202110000522396 | CFOP: 5258/AA
 Data de emissão: 07/10/2021

Períodos: Bandeira Verde: 09/09 - 07/10 * Para esse faturamento foi calculada a perda no ramal. Resolução ANEEL 771/2017. * Bandeira DUT/21 Classe Residencial Tarifa Social: [REDACTED] (patamar 2) custo adicional de R\$ 9,492 a cada 100kWh. * Consulte sua meta de Redução de Consumo através dos nossos canais de atendimento.

Datas das Leituras	Leitura Anterior	Leitura Atual	Nº de Dias	Próxima Leitura
	08/09/2021	07/10/2021	29	08/11/2021

Itens de Fatura	Quantidade	Tarifa	Valor
Fornecimento			
CONSUMO	30	0,248820	7,45
CONSUMO	70	0,426550	29,84
CONSUMO	120	0,639820	76,77
CONSUMO	122,41	0,710020	87,02
Benefício Tarifário Bruto			42,33
Adicional Band. Vermelha			26,83
ICMS			79,80
PIS			2,43
COFINS			11,19
Itens Financeiros			
Benefício Tarifário Líquido			-42,33
Cip. Trans. Pub. Pref. Munic.			21,06

Tributo	Base de Cálculo (R\$)	Alíquota (%)	Valor (R\$)
ICMS	319,20	25,0000	79,80
PIS	283,86	0,8557	2,43
COFINS	283,86	3,9412	11,19

Reserva ao Fisco
 E554D9C2F6A890773C2333AB51F21C8A

Medidor	Grandezas	Postos horários	Leitura Anterior	Leitura Atual	Const. Medidor	Consumo
11023050473	Consumo	Ativo Total	11.328	11.072	1,00	244

Fator de Potência	Perdas no Ramal	Resolução ANEEL	Apresentação	Nº do Programa Social
0	1,59 x	2920/21	07/10/2021	16247652771

Reaviso de Vencimento

Informações para o cliente

CLIENTE CADASTRADO NA TARIFA SOCIAL

CLIENTE BOM PAGADOR

ANEXO B – FOLHA DE DADOS TÉCNICO DO MÓDULO (PÁGINA 1)

Mono Poli Soluções

Vertex S
MÓDULO EMOLDURADO MONOCRISTALINO

PRODUTO: TSM-DE09
FAIXA DE POTÊNCIA: 390-405W

405W+

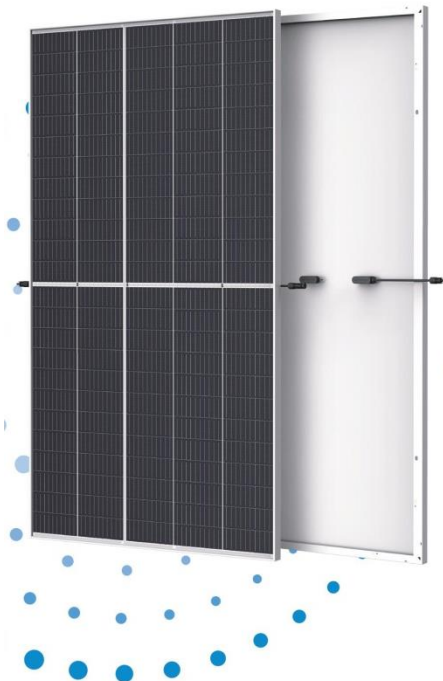
POTÊNCIA MÁXIMA

0~+5W

TOLERÂNCIA POSITIVA

21.1%

EFICIÊNCIA MÁXIMA



Pequeno em tamanho, Gigante em potência

- Fator de forma ajustado. Alta geração de energia em espaços limitados. Até 405W e 21.1% de eficiência disponível em um módulo com tecnologia de alta densidade de interconexão celular
- Tecnologia Multi-busbar que melhora a captura de luz, reduz a resistência em série e melhora a coleta de corrente elétrica
- Aumento do retorno do investimento do sistema solar utilizando menores áreas de terreno
- Melhor performance em instalações em lugares de alta temperatura devido ao baixo coeficiente de temperatura (-0.34%)



Solução universal para telhados

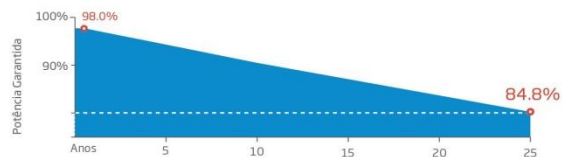
- Compatível com os principais otimizadores, inversores e estruturas de fixação disponíveis no mercado
- Pequeno e leve. Fácil manuseio
- Integração flexível



Confiabilidade Garantida

- 25 anos de garantia de performance com baixa degradação;
- Resistência PID garantida pelo rigoroso controle de qualidade
- Resistência a cargas mecânicas de até 6000 Pa positiva e 4000 Pa negativa

Curva de Garantia de Performance



Certificações Internacionais do Produto



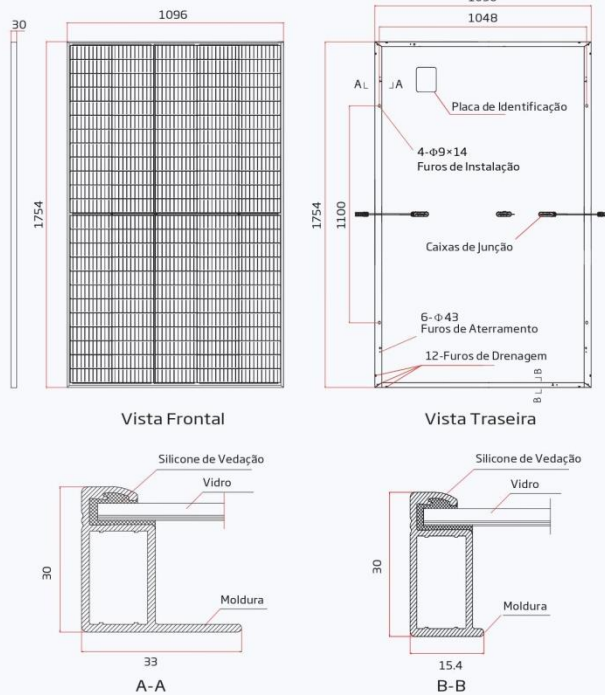
IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716
ISO 9001: Sistema de Gestão de Qualidade
ISO 14001: Sistema de Gestão Ambiental
ISO 14064: Sistema de Verificação de Gases do Efeito Estufa
ISO45001: Sistema de Gestão de Segurança e Saúde Ocupacional

Trinasolar

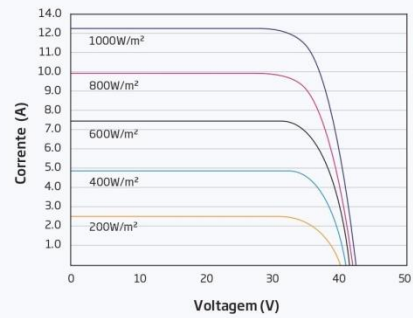
ANEXO C – FOLHA DE DADOS TÉCNICO DO MÓDULO (PÁGINA 2)



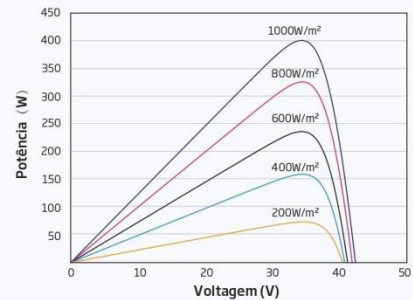
DIMENSÕES DO MÓDULO FOTOVOLTAICO (mm)



CURVAS I-V DO MÓDULO (400 W)



CURVES P-V DO MÓDULO (400W)



DADOS ELÉTRICOS (STC)

Potência de Pico - P_{MAX} (Wp)*	390	395	400	405
Tolerância de Potência - P_{MAX} (W)	0 ~ +5			
Tensão Máxima - V_{MP} (V)	33.8	34.0	34.2	34.4
Corrente Máxima - I_{MP} (A)	11.54	11.62	11.70	11.77
Tensão de Circuito Aberto - V_{oc} (V)	40.8	41.0	41.2	41.4
Corrente de Curto Circuito - I_{sc} (A)	12.14	12.21	12.28	12.34
Eficiência do Módulo η_m (%)	20.3	20.5	20.8	21.1

STC: Irradiação 1000W/m², Temperatura de Célula 25°C, Massa do Ar AM1.5. *Tolerância de Medida: ±3%.

DADOS ELÉTRICOS (NOCT)

Potência de Pico - P_{MAX} (Wp)*	295	298	302	306
Tensão Máxima - V_{MP} (V)	31.8	32.0	32.2	32.5
Corrente Máxima - I_{MP} (A)	9.26	9.32	9.38	9.41
Tensão de Circuito Aberto - V_{oc} (V)	38.4	38.6	38.8	38.9
Corrente de Curto Circuito - I_{sc} (A)	9.78	9.84	9.90	9.95

NOCT: Irradiação 800W/m², Temperatura Ambiente 20°C, Velocidade do Vento 1m/s.

DADOS MECÂNICOS

Células	Monocristalinas
No. de Células	120 células
Dimensões do Módulo	1754 × 1096 × 30 mm (69.06 × 43.15 × 1.18 polegadas)
Peso	21.0 kg (46.3 lb)
Vidro	3.2 mm (0.13 pol.), Alta Transmissão, Anti-Reflexo, e Recobrimento Térmico
Material Encapsulante	EVA/POE
Backsheet	Branco
Moldura	30mm (1.18 polegadas) Liga de alumínio anodizado
Caixa de Conexão	IP 68
Cabos	Cabo de Tecnologia Fotovoltaica 4.0mm (0.006 polegadas), Retrato: 280/280 mm (11.02/11.02 polegadas) Comprimento Customizável
Conector	MC4 EVO2 / TS4*

*Verificar conector com o vendedor local

COEFICIENTES DE TEMPERATURA

NOCT (Temperatura Nominal de Operação de Célula)	43°C (±2°C)
Coefficiente de Temperatura P_{MAX}	-0.34%/°C
Coefficiente de Temperatura V_{oc}	-0.25%/°C
Coefficiente de Temperatura I_{sc}	0.04%/°C

LIMITES DE OPERAÇÃO

Temperatura Operacional	-40 ~ +85°C
Tensão Máxima do Sistema	1500V DC (IEC)
Capacidade Máx do Fusível em Série	20A

GARANTIA

12 anos de garantia de integridade do produto
25 anos de garantia de produção de energia
2% de degradação no primeiro ano
0.55% de taxa de degradação anual

(Verificar documento de garantia para maiores detalhes)

EMBALAGEM E TRANSPORTE

Modulos por caixa: 36 unidades
Modulos por container 40': 936 unidades



CUIDADO: LEIA AS INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA E INSTALAÇÃO ANTES DE USAR O PRODUTO

©2020 Limitado a Trina Solar. Todos os direitos reservados. As especificações incluídas nesta folha de dados estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.

Número da Versão: TSM_PT_2021_B

www.trinasolar.com

ANEXO D – FOLHA DE DADOS TÉCNICO DO INVERSOR

Ficha de dados	MIN 2500TL-X	MIN 3000TL-X	MIN 3600TL-X	MIN 4200TL-X	MIN 4600TL-X	MIN 5000TL-X	MIN 6000TL-X
Dados de entrada							
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para o módulo STC)	3500W	4200W	5040W	5880W	6440W	7000W	8100W
Máxima tensão CC	500V	500V	550V	550V	550V	550V	550V
Tensão de partida	100V						
Faixa de tensão de MPPT / tensão nominal de MPPT	60V-500V /360V	60V-500V /360V	60V-550V /360V	60V-550V /360V	60V-550V /360V	60V-550V /360V	60V-550V /360V
Corrente máxima de entrada	12.5A/12.5A						
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP	16A/16A						
Número de MPPT / strings por MPPT	2/1						
Saída (CA)							
Potência nominal de saída CA	2500W	3000W	3600W	4200W	4600W	5000W	6000W
Potência aparente máxima de CA	2500VA	3000VA	3600VA	4200VA	4600VA	5000VA	6000VA
Corrente máxima de saída	11.3A	13.6A	16A	19A	20.9A	22.7A	27.2A
Tensão nominal de saída (Faixa)	230V(160V-300V)						
Frequência de rede CA(Faixa)	50Hz/60Hz ± 5Hz						
Fator de potência ajustável	0.8f-0.8c						
THDI	<3%						
Conexão CA	Fase única						
Eficiência							
Máxima eficiência	98.2%	98.2%	98.2%	98.4%	98.4%	98.4%	98.4%
Eficiência europeia	97.1%	97.1%	97.2%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%
Eficiência MPPT	99.9%						
Dispositivos de proteção							
Proteção de polaridade reversa de CC	sim						
Interruptor CC	sim						
Proteção sobretensão CC	Tipoll						
Proteção de sobrecorrente de saída	sim						
Proteção de sobretensão CA	sim						
Monitoramento de falta à terra	sim						
Monitoramento de grade	sim						
Unidade de monitoramento de corrente de vazamento sensível a todos os pólos integrada	sim						
Dados Gerais							
Dimensões (L/A/P)	375/350/160mm						
Peso	10.8kg						
Faixa de temperatura operacional	-25°C... + 60°C						
Emissão de ruído (típico)	≤35 dB(A)						
Altitude	4000m						
Auto-consumo à noite	< 1W						
Topologia	Sem transformador						
Restrição	Restrição Natural						
Grau de proteção ambiental	IP65						
Humidade relativa	100%						
Características							
Conexão CC	H4 / MC4 (opcional)						
Conexão CA	Conector						
Exibição	OLED+LED						
Interfaces: RS485 / USB / Wi-Fi/ 4G / RF	sim/sim/opcional /opcional/opcional						
Garantia: 5 anos / 10 anos	Sim/opcional						
CE, IEC62109, G98, G99, VDE0126-1-1, AS4777, AS/NZS 3100, VDE-AR-N4105, CQC, IEC61683, IEC60068, IEC61727, IEC62116, INMETRO							