

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

FERNANDO CROMACK LIPPMANN

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM INVERSOR DE BAIXO CUSTO
PARA SISTEMAS CONECTADOS A REDE**

**CURITIBA
2015**

FERNANDO CROMACK LIPPMANN

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM INVERSOR DE BAIXO CUSTO
PARA SISTEMAS CONECTADOS A REDE**

Monografia, apresentada como requisito parcial para obtenção do título de especialista no curso de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, DAELT, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Jr.

CURITIBA
2015

TERMO DE APROVAÇÃO

FERNANDO CROMACK LIPPMANN

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM INVERSOR DE BAIXO CUSTO PARA SISTEMAS CONECTADOS A REDE

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 08 de dezembro de 2015, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
UTFPR

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

“O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo verificar, na forma de uma pesquisa aplicada o atendimento aos requisitos necessário para a conexão à rede elétrica por um inversor tipo conectado à rede encontrado facilmente em *sites* de comércio eletrônico internacional. Com a crescente popularização dos sistemas fotovoltaicos, aliado aos subseqüentes aumentos nas tarifas de energia elétrica ao consumidor residencial. Existe uma tendência natural da procura por sistemas que propiciem ao usuário uma significativa redução em sua despesa mensal com energia elétrica. Aliado a este fator, soma-se a ânsia do povo brasileiro em buscar sempre a solução de mais baixo custo, relegando muitas vezes a segurança e o cumprimento às normas, o que pode acarretar em sérios riscos as instalações dos consumidores e da própria concessionária de energia. Com a popularização dos *sites* internacionais de comércio eletrônico é fácil e barato adquirir um destes inversores, que são apresentados em diversas potências, desde 100 W até alguns milhares de Watts. Embora exista regulamentação para a ligação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, sempre haverá a possibilidade de o usuário realizar a instalação por conta própria e fazer a conexão com o sistema elétrico sem a anuência da concessionária. Mesmo que este não esteja recebendo os créditos pela geração da energia elétrica ele estará deixando de consumir energia da rede, desta forma, reduzindo sua fatura. De modo geral, o inversor alvo de estudo apresentou um desempenho satisfatório, atendendo as normas de segurança elétrica requeridas, porém não pode ser comparado ao desempenho de outras marcas já consolidadas no mercado.

Palavras chave: Inversor Conectado à Rede, Inversor de Baixo Custo, Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.

ABSTRACT

This study proposes to verify the compliance to the requirements from a low cost Grid Tie inverter, usually found in international e-commerce web sites to connect to the power grid. With the growing of the photovoltaic system, combined to the recent raise of the electricity bill to the home consumer. There is a natural trend to the alternative power supplement which may help to lower the monthly expenses with electricity. Tied to this factor, Brazilian people use to always look for the cheapest solution, sometimes forgetting about the safety and the standards, which may cause serious damages to the customer installation as to the utility grid also. With the growing of the international e-commerce web sites it is quite easy to purchase grid tie inverters, which are shown in several range of power, from 100W up to some kilowatts. Even with all the regulation for the connection of photovoltaic systems to the grid, there will be always the possibility of the customer makes the installation by itself, without the homologation of the system. Even if the customer does not receive the credits from the generation, he will be able to reduce the grid consumption of the energy by generate some of the consumed power, reducing the electric bill. It is fair to say that the inverter had a satisfactory performance and reach the required electrical standards for safety, but its performance cannot be compared to other well known brands already consolidated in the market.

Key Words: Grid Tie Inverter, Low Cost Inverter, Grid Tie Photovoltaic System.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 TEMA.....	11
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	12
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	12
1.4 OBJETIVOS.....	13
1.4.1 Objetivo Geral	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
1.5 JUSTIFICATIVA.....	13
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
2.1.1 HISTÓRIA.....	16
2.1.2 CÉLULA SOLAR E EFEITO FOTOVOLTAICO	18
2.1.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	29
2.2 INVERSORES	31
2.3 MICROGERAÇÃO CONECTADA À REDE	34
3. IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO INVERSOR ESTUDADO.....	39
3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	40
3.2 INSTALAÇÃO DO SISTEMA	42
3.3 RESULTADOS COLETADOS	49
3.3.1 Forma de onda da tensão de saída do inversor	49
3.3.2 Tempo de desligamento do inversor em caso de isolação da rede elétrica – Anti-ilhamento	51
3.3.3 Verificação da partida do inversor a sol pleno	55
3.3.4 Medições dos valores de geração lado CA	56
3.3.5 Medições dos valores de geração lado CC	66
4. CONCLUSÕES FINAIS.....	73
5. REFERÊNCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura típica de célula solar fotovoltaica.....	19
Figura 2: Ligação entre átomos de silício.....	20
Figura 3: Ligação entre átomos de silício (lacuna e elétron livre)	21
Figura 4: Célula solar fotovoltaica sob irradiação solar	21
Figura 5: Circuito equivalente da célula solar simplificado	23
Figura 6: Circuito equivalente da célula solar com resistência série e paralelo	24
Figura 7: Associação de células – representação em símbolos	29
Figura 8: Associação de células cristalinas	29
Figura 9: Características dos módulos <i>Kyocera</i>	31
Figura 10: Onda quadrada	32
Figura 11: Onda semi-senoidal.....	33
Figura 12: Onda senoidal pura	34
Figura 13: Proteções esquema de instalação de microgeração com inversor.....	38
Figura 14: Localização da instalação do sistema de teste	39
Figura 15: Dados de placa do módulo fotovoltaico.....	40
Figura 16: Esquema de ligação dos módulos fotovoltaicos	41
Figura 17: Detalhe dos módulos na estrutura, antes da instalação.	42
Figura 18: Detalhe da instalação no telhado – furação das telhas para passagem dos pés... 43	
Figura 19: Detalhe da instalação no telhado – fixação da estrutura nos pés	43
Figura 20: Detalhe da instalação no telhado – evitando apoio sobre o telhado.....	44
Figura 21: Detalhe da instalação no telhado – fugindo das sombras	44
Figura 22: Detalhe da instalação no telhado – fixação dos módulos na estrutura.....	45
Figura 23: Detalhe da instalação no telhado – visão próxima.....	46
Figura 24: Detalhe da instalação no telhado – visão ampla	46
Figura 25: Detalhe da instalação no telhado – fixação da fiação	47
Figura 26: Esquema elétrico do sistema em teste.....	48
Figura 27: Montagem do sistema	49
Figura 28: Forma de onda de saída do inversor.....	50
Figura 29: Forma de onda medida na rede com o inversor desligado	51

Figura 30: Primeira atuação: Tempo 5,1ms.....	52
Figura 31: Segunda atuação – Tempo 6,4ms.....	52
Figura 32: Terceira atuação – Tempo 3,1ms	53
Figura 33: Quarta atuação – Tempo 3,4ms.....	54
Figura 34: Quinta atuação – Tempo 8,5ms.....	54
Figura 35: Harmônicos de corrente em percentual.....	65
Figura 36: Harmônicos de tensão, em percentual	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Características elétricas de uma célula solar	26
Tabela 2: Rendimento máximo de diferentes tipos de células	28
Tabela 3: Inversores homologados Copel	35
Tabela 4: Proteções Mínimas para geradores com inversor	37

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução da potência instalada fotovoltaica no mundo	17
Gráfico 2: Países com maior potência fotovoltaica instalada.....	18
Gráfico 3: Influência da irradiância na curva corrente <i>versus</i> tensão da célula solar	23
Gráfico 4: Influência da variação da resistência série	25
Gráfico 5: Influência da variação da resistência paralelo.....	25
Gráfico 6: Ponto de máxima potência da célula solar	27
Gráfico 7: Contribuição individual das células na curva do módulo	30
Gráfico 8: Tensão e Corrente na partida a sol pleno	55
Gráfico 9: Potência na partida a sol pleno.....	56
Gráfico 10: Potência Ativa medida no dia 28/07/2015	56
Gráfico 11: Potência Reativa medida no dia 28/07/2015	57
Gráfico 12: Corrente medida no dia 28/07/2015	57
Gráfico 13: Tensão medida no dia 28/07/2015	58
Gráfico 14: THD de Tensão medida no dia 28/07/2015	59
Gráfico 15: THD de Corrente medida no dia 28/07/2015	59
Gráfico 16: Potência Ativa medida no dia 29/07/2015	60
Gráfico 17: Potência Reativa medida no dia 29/07/2015	61
Gráfico 18: Corrente medida no dia 29/07/2015	62
Gráfico 19: Tensão medida no dia 29/07/2015	63
Gráfico 20: THD de Tensão medida no dia 29/07/2015	64
Gráfico 21: THD de Corrente medida no dia 29/07/2015	65
Gráfico 22: Corrente no Lado CC medida no dia 28/07/2015	67
Gráfico 23: Tensão no Lado CC medida no dia 28/07/2015.....	67
Gráfico 24: Potência no Lado CC medida no dia 28/07/2015.....	68
Gráfico 25: Temperatura do inversor medida no dia 28/07/2015	69
Gráfico 26: Corrente no Lado CC medida no dia 29/07/2015	69
Gráfico 27: Tensão no Lado CC medida no dia 29/07/2015.....	70
Gráfico 28: Potência no Lado CC medida no dia 29/07/2015.....	71
Gráfico 29: Temperatura do Inversor medida no dia 29/07/2015	71

1. INTRODUÇÃO

O ser humano, em seu estágio atual de evolução, é totalmente dependente de energias (EPALANGA, 2013). Não é possível mais imaginar a civilização atual consumindo alimentos sem um preparo adequado, desde sua produção até o consumo final, deslocando pessoas e materiais pelos diversos meios de transporte ou se entretendo e se comunicando com qualquer tipo de aparato moderno sem o consumo de algum tipo de energia.

A energia está intrinsecamente ligada à evolução humana (PETRY, 2012). Desde a mais remota idade antiga o ser humano utiliza-se de suas descobertas – ocasionais ou por pesquisa – para melhorar sua condição de vida, seja por necessidade ou conforto. Isto teve início há mais de 30.000 anos com o domínio do fogo pelo homem de Cro-Magnon (BURNS, 1968), passou pelo surgimento da agricultura, uso do vento e das águas para tarefas que requeriam maior esforço físico, até alcançar a revolução industrial, onde foram inventadas máquinas movidas pelo vapor gerado pela queima de carvão mineral.

A partir da revolução industrial, no século XVIII (IGLÉSIAS, 1981), a taxa de dependência e consumo de energia pelo ser humano apresenta um crescimento acelerado e, de igual forma, precisam se expandir as formas de obtenção desta energia. Predominantemente a energia consumida no mundo provém de fontes não renováveis em curto prazo, e a possibilidade de escassez e, conseqüentemente, o aumento do custo destas tem forçado a pesquisa e a busca por alternativas menos impactantes em nosso meio ambiente, bem como de custo mais atrativo. Considerando exclusivamente a energia elétrica, segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2013), mais de 80% da energia gerada no mundo no ano de 2010 provinha de fontes não renováveis (carvão, petróleo, gás e nuclear).

É fato que as energias renováveis são a fonte mais segura para suprir estas necessidades, embora possam não ser a mais barata, são totalmente limpas em sua operação e praticamente inesgotáveis. Este apelo eco ambiental tem impulsionado cada vez mais políticas governamentais em diversos países de incentivo a implantação de geração de energia, seja distribuída ou concentrada, proveniente de fontes limpas e renováveis (VILLALVA, 2012).

A energia solar fotovoltaica possui um grande potencial para ser utilizada em países em desenvolvimento. Ela representa uma solução para a energização de cargas em lugares onde não há conexão com a rede elétrica das concessionárias (KREUTZ, 2003). Os níveis de irradiação solar no Brasil são muito propícios à utilização de energia fotovoltaica. Devido à faixa de latitude em que se encontra, os níveis de radiação incidente medidos no Brasil são muito superiores aos níveis encontrados na maior parte do mundo (PEREIRA *et al.*, 2006).

Os sistemas conectados à rede são capazes de injetar toda a energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos na rede, garantindo uma alta produtividade. Outra vantagem desse tipo de sistema é a vida útil elevada devido à ausência de baterias (URBANETZ, 2010).

Aliado a essa necessidade, os recentes reajustes tarifários da energia elétrica (GAZETA DO POVO, 2015), deverão impulsionar fortemente a procura pelos sistemas de micro geração distribuída nos próximos anos com o intuito de amenizar esta alta dos preços nos orçamentos dos consumidores. Infelizmente existe no Brasil uma cultura de economia a qualquer custo, que leva, diversas vezes, a utilização de materiais de procedência desconhecida ou duvidosa, bem como de qualidade inferior para minimização dos custos iniciais (FLACH, 2012). Somando-se a isto a facilidade de compras em lojas virtuais de comércio eletrônico internacional ou o contrabando de material eletrônico, muito comum nas fronteiras do Brasil (GLOBO, 2015), existe a real possibilidade de equipamentos não adequados serem ligados às redes das concessionárias, mesmo que de forma clandestina. Embora existam regras e normas para a conexão de tais sistemas, é comum que elas sejam relegadas em prol de uma economia imediata pelo cidadão comum (PRADO, 2005).

O intuito deste estudo é apresentar as possíveis consequências do uso inadvertido de equipamento na rede elétrica sem as devidas homologações.

1.1 TEMA

Análise de um inversor conectado à rede, de baixo custo, modelo SY-GWV-500W.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Será abordado neste trabalho a interação de um inversor de baixo custo, modelo SY-GWV-500W com a rede elétrica residencial do ponto de vista do atendimento às normas para conexão à rede elétrica. Os ensaios serão realizados dentro das características descritas no manual do equipamento a fim de verificar se o mesmo seria elegível à homologação das concessionárias de distribuição de energia elétrica brasileiras. Não serão feitos ensaios destrutivos, testes de interferência e emissão eletromagnética ou *burn-in* no mesmo.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Atualmente a facilidade de compras pela internet, em especial em lojas virtuais internacionais tem trazido para o mercado nacional produtos de qualidade, no mínimo, questionável. A aplicação destes produtos em uma rede de distribuição de energia pode ocasionar desde inserção de harmônicos até grandes surtos de tensão, que podem gerar danos sérios a equipamentos conectados nesta rede. Aliado a isso, os constantes reajustes tarifários propiciam a busca por novas fontes de energia pelos consumidores, em especial, os residenciais. Preocupados com os possíveis impactos destes equipamentos nas redes de distribuição de energia, será verificado o comportamento de um inversor de procedência não certificada, comprado em uma loja de comércio eletrônico internacional.

Sobretudo, procurou-se responder às seguintes questões:

- Este inversor, em específico, atende aos requisitos necessários para conexão à rede elétrica local?
- Este inversor possui qualidade suficiente para justificar a economia ao se preterir uma marca mais conceituada?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho objetiva verificar o comportamento de um inversor tipo conectado à rede, modelo SY-GWV-500W, comprado em uma loja de comércio eletrônico internacional, no tocante ao atendimento dos requisitos dispostos nas normas técnicas vigentes solicitados pela concessionária local.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Levantar os requisitos necessários para conexão de geração fotovoltaica de baixa potência à rede elétrica local;
- Medir parâmetros de funcionamento do inversor, como tensão, corrente, potência e distorção harmônica;
- Simular situações adversas, como queda da rede e partida em plena carga para verificar aspectos funcionais de proteção e o atendimento aos requisitos da concessionária local.

1.5 JUSTIFICATIVA

É notório o risco de se efetuar modificações e conectar equipamentos à rede elétrica sem que estes tenham sido exaustivamente testados pelos órgãos certificadores oficiais, como incêndios e choques elétricos, bem como redução da qualidade de energia no ponto de conexão. Ainda não há hoje no Brasil estrutura para suprir a necessidade e com a agilidade necessária para o crescimento da matriz energética. Desta forma busca-se analisar a existência de grandes impactos na utilização deste modelo de inversor caso utilizado sem maiores critérios, e caso existam, elencar quais riscos foram encontrados.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Quanto ao procedimento de pesquisa adotado, considera-se este trabalho uma pesquisa aplicada, de campo e experimental, com um caso de estudo específico, o inversor modelo SY-GWV-500W conforme descrito por Gil (1995, p.58), “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capaz de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

As etapas observadas no desenvolvimento desse trabalho consistem em:

- a) Pesquisar bibliografias acerca dos principais conceitos necessários para o cumprimento dos objetivos propostos. Essa pesquisa é apresentada nos primeiros capítulos desse trabalho. A importância da pesquisa bibliográfica é construir uma base de conhecimento que proporcione conceitos claros e concisos acerca dos principais temas que constituem o trabalho proposto. Os principais temas abordados na pesquisa bibliográfica são: a constituição e o funcionamento de módulos fotovoltaicos, os equipamentos inversores de tensão e os critérios para conexão com a rede de distribuição;
- b) Analisar a relevância do trabalho, levantando os problemas e premissas. Compreender as verdadeiras necessidades a serem satisfeitas permite que o objetivo principal do trabalho seja justificado e auxilia o direcionamento das ideias e proposições, mantendo-os dentro do contexto do trabalho;
- c) Pesquisar material relativo ao projeto proposto. Pesquisar máquinas, equipamentos e sistemas que cumprem tarefas semelhantes às demandadas. Comparar as características dos mesmos com as características do projeto proposto;
- d) Montar um sistema fotovoltaico conectado à rede, de acordo com o aprendido durante as disciplinas deste curso. Também serão medidas as grandezas elétricas inerentes ao sistema, para análise do comportamento do inversor.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi separado em quatro capítulos a citar:

No capítulo 1 é feita a introdução deste trabalho. Nela serão descritas a introdução propriamente dita, a origem e motivação do trabalho, qual sua importância do ponto de vista social e a estrutura do mesmo.

No capítulo 2 são colocadas as revisões bibliográficas consistidas pelos: estado atual dos equipamentos que constituem um sistema fotovoltaico conectado à rede, as normativas e diretivas para conexão de sistemas fotovoltaicos às redes de distribuição no Brasil.

No capítulo 3 estão descritos a instalação do sistema fotovoltaico interligado a rede, bem como os resultados dos ensaios realizados no inversor.

No capítulo 4 estão apresentadas as verificações feitas a partir da análise dos dados coletados, as implicações destes e possíveis melhorias que podem ser incluídas nos sistemas para torná-los mais seguros para as instalações do consumidor e da concessionária. Também são apresentadas sugestões para futuros desenvolvimentos sobre este tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1.1 HISTÓRIA

Em 1839, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820 - 1891) descobriu o efeito fotovoltaico. Becquerel percebeu que alguns materiais apresentavam uma pequena diferença de potencial entre as suas extremidades ao serem expostos à luz. O professor inglês Willoughby Smith (1828 - 1891) observou o mesmo efeito no Selênio, em 1873. Após alguns anos, o professor Smith e seu aluno William G. Adams (1836 - 1915), também observaram o efeito fotovoltaico em junções de selênio e platina. Todas essas constatações e estudos serviram de base para que Charles Fritts desenvolvesse o protótipo da primeira célula fotovoltaica em 1883, feito de selênio e uma fina camada de ouro. A peça tinha um preço muito elevado de confecção e seu rendimento era de aproximadamente 1,5% (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2011).

Em 1954, pesquisadores do laboratório *Bell Labs* nos Estados Unidos descobriram acidentalmente que diodos de junção p-n produziam tensão quando as luzes do laboratório estavam acesas. Isso direcionou as pesquisas nesse laboratório para efeito fotovoltaico, que então culminaram na confecção de uma célula de silício p-n com eficiência de aproximadamente 6% em cerca de um ano. Houve então um grande interesse nessa tecnologia, uma vez que se propôs a utilização de células solares fotovoltaicas para fornecer energia elétrica para satélites (LUQUE e HEGEDUS, 2005).

A partir da década de 60 o tema energia solar atraiu o interesse de diversas instituições, que passaram a investir em novas descobertas nessa área. Em 1958 a NASA lançou o satélite *Vanguard*, cuja energia reserva era produzida a partir de células fotovoltaicas de silício. Em 1959 a *Hoffmans Electronics* dos Estados Unidos apresentou células de silício com eficiência de 10%. No Japão em 1963 apareceram os primeiros módulos fotovoltaicos no comércio. Em 1973, a crise mundial do petróleo provocou o interesse de muitas nações na busca de energias alternativas e a energia fotovoltaica chamou a atenção de muitos devido a construção da primeira residência alimentada por

painéis fotovoltaicos na Universidade de Delaware, nos Estados Unidos. Na década de 80 surgiu a primeira célula de filme fino. Nessa mesma década foi instalado no Canadá um sistema com 6 MW e foi testado na Austrália a primeira célula com eficiência maior do que 20%. Em 1995 uma iniciativa alemã propôs a larga utilização de sistemas fotovoltaicos residenciais, o que impulsionou a criação de legislações para a geração e utilização da energia solar fotovoltaica em vários países. No ano de 1997 a potência instalada fotovoltaica mundial atingiu a marca de 100 MW e dois anos depois, em 1999, a potência instalada mundial subiu para 1000 MW. No ano de 2000 foi concebido na Austrália o primeiro bacharelado em engenharia solar e fotovoltaica. Em 2002 a potência instalada mundial atingiu a marca de 2000 MW (o dobro do valor registrado três anos antes) (LUQUE e HEGEDUS, 2005).

O Gráfico 1 apresenta a evolução da potência instalada fotovoltaica mundial de 2004 até 2014. O Gráfico 2 mostra os 10 países com maior potência instalada, ressaltando a potência que foi instalada no ano de 2014.

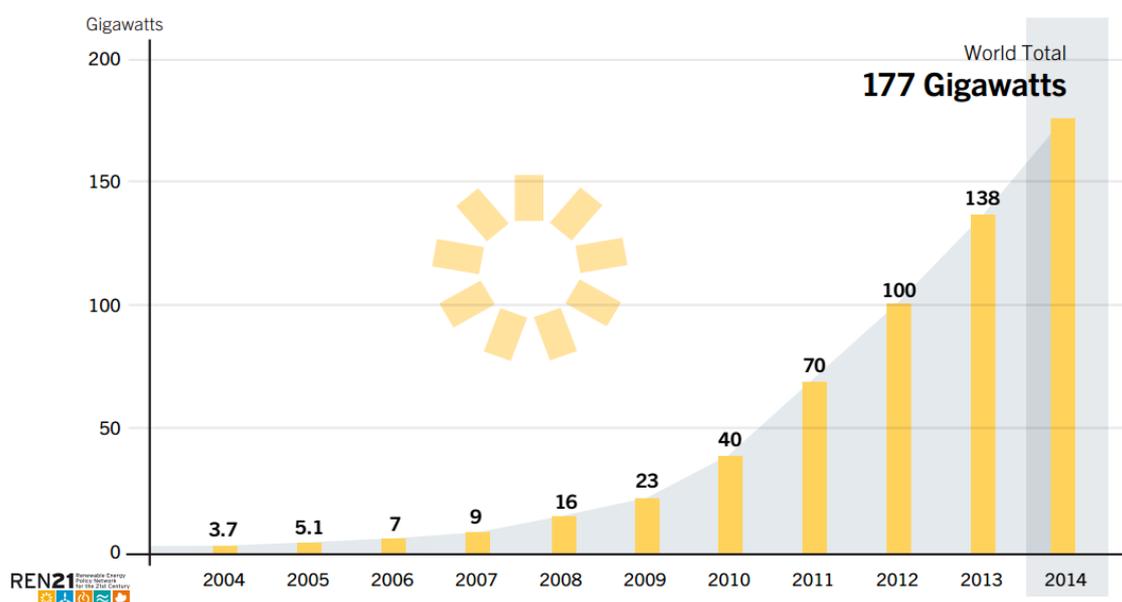


Gráfico 1: Evolução da potência instalada fotovoltaica no mundo

FONTE: REN21 (2014)

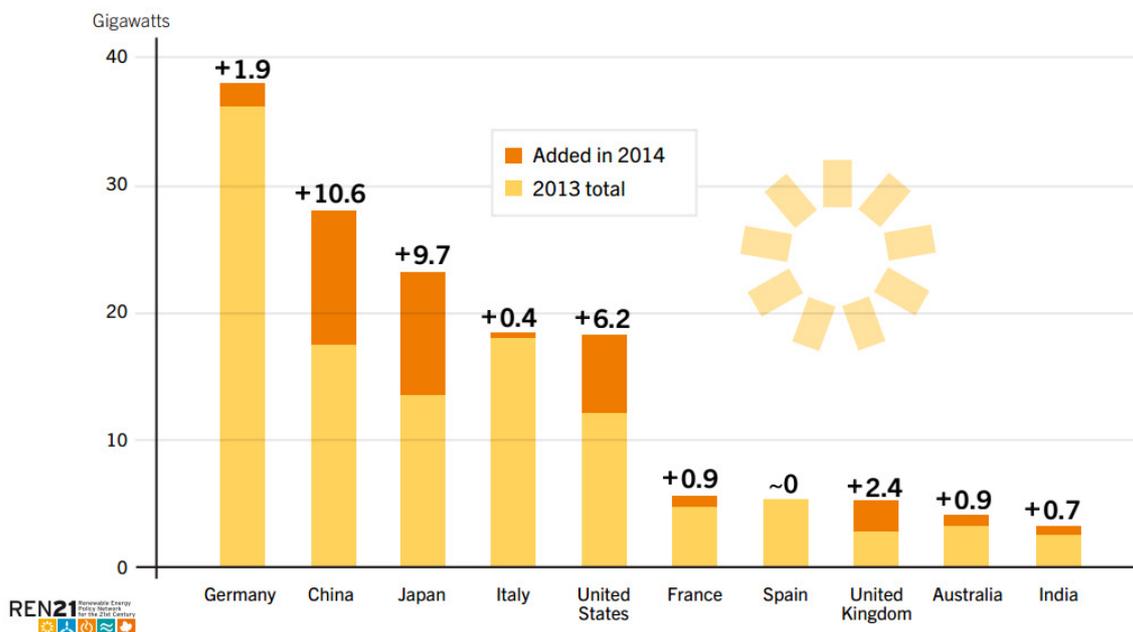


Gráfico 2: Países com maior potência fotovoltaica instalada

FONTE: REN21 (2014)

2.1.2 CÉLULA SOLAR E EFEITO FOTOVOLTAICO

Células solares são capazes de converter luz solar em eletricidade. Isso ocorre por meio da utilização de materiais semicondutores, como o silício, que emitem elétrons ao serem atingidos por um feixe de fótons. Como resultado tem-se uma diferença de potencial entre os extremos do material. O mesmo efeito pode ser observado, por exemplo, com a utilização de eletrodos conectados a um sistema líquido, porém praticamente todos os sistemas compostos por células solares convencionais utilizam materiais semicondutores (GOETZBERGER e HOFFMANN, 2005).

Uma célula solar é composta basicamente de duas camadas finas, sendo cada uma composta por um material semicondutor distinto. Uma camada é a camada positiva, *p*, e a outra é a camada negativa, *n*. A Figura 1 apresenta a estrutura de uma célula solar típica.

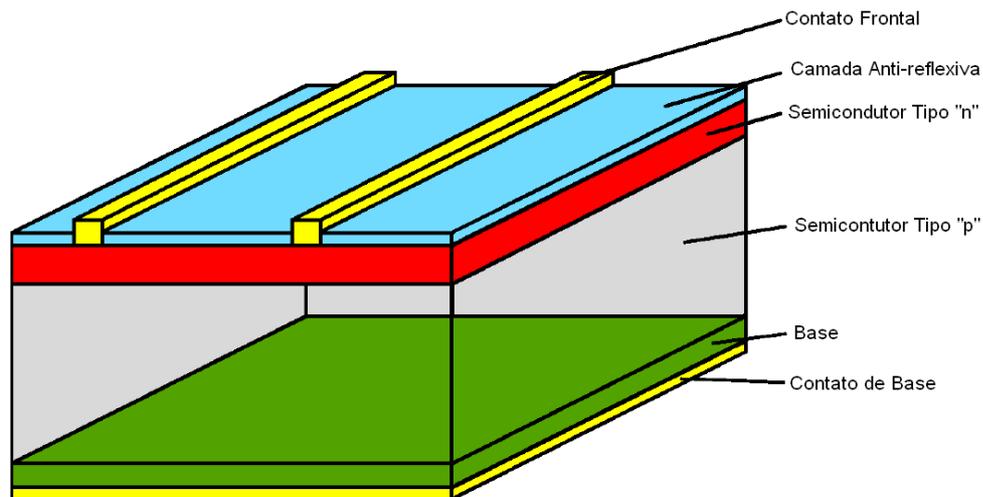


Figura 1: Estrutura típica de célula solar fotovoltaica

FONTE: GOETZBERGER e HOFFMANN, 2005 (ADAPTADO).

Quando a camada n é exposta à luz solar, ela passa a ser constantemente atingida por fótons, que transferem energia para os elétrons da camada de valência dos átomos do material semicondutor. Cada fóton pode transferir energia para apenas um elétron. Quando o fóton transfere energia suficiente para que o elétron da camada de valência dê um salto quântico, este deixa de fazer parte da eletrosfera do átomo de material semicondutor e pode mover-se livremente. Caso a energia transferida pelo fóton não seja suficiente para que o elétron avance para um nível mais energético, essa energia é convertida em energia cinética para o átomo e como consequência tem-se o aquecimento da célula solar. Em uma célula solar, os elétrons são atingidos por fótons de diferentes comprimentos de onda e transferem diferentes quantidades de energia para os elétrons da camada de valência dos átomos do material semicondutor, fazendo com que alguns deles tornem-se elétrons livres e outros apenas aqueçam a célula solar. À conversão de luz solar em eletricidade dá-se o nome de efeito fotovoltaico (SEN, 2008).

Quando um átomo da camada n libera um elétron, tem-se uma lacuna na camada de valência do átomo e este passa a ter carga positiva. Elétrons da camada p são atraídos pelas cargas positivas da camada n e deixam suas camadas de valência da camada p para ocupar as lacunas existentes na camada n. Assim tem-se carga positiva na camada p devido

à falta de elétrons e carga negativa na camada n devido ao excesso de elétron (QUASCHNING, 2009).

Um átomo de silício possui quatro elétrons na sua camada de valência. Para estabelecer uma configuração elétrica estável similar à do gás nobre Argônio, os átomos de silício compartilham pares de elétrons, como mostrado na Figura 2. Ao receber energia proveniente de um fóton, um elétron da camada de valência do átomo de silício desprende-se da eletrosfera do átomo e torna-se um elétron livre (Figura 3).

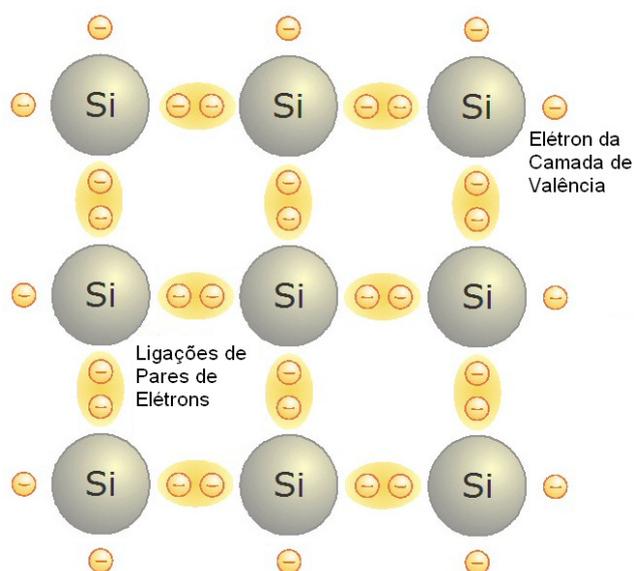


Figura 2: Ligação entre átomos de silício
FONTE: QUASCHNING 2009 (ADAPTADO)

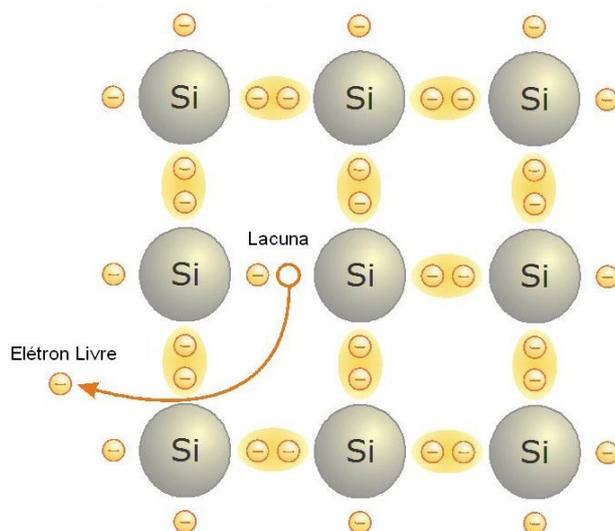


Figura 3: Ligação entre átomos de silício (lacuna e elétron livre)

FONTES: QUASCHNING 2009 (ADAPTADO)

Apenas uma parte da irradiação solar incidente sobre uma célula solar fotovoltaica é convertida em eletricidade. Apenas fótons com energia suficiente para provocar um salto quântico dos elétrons da camada de valência são capazes de produzir corrente elétrica. Fótons que possuem uma quantidade de energia menor acabam caracterizando perdas (queda de rendimento) para o sistema fotovoltaico, pois a energia transferida para o elétron da camada de valência aquece a célula fotovoltaica sem produzir corrente elétrica. Outras perdas são provocadas pelos efeitos de reflexão e transmissão dos fótons, como mostrado na Figura 4.

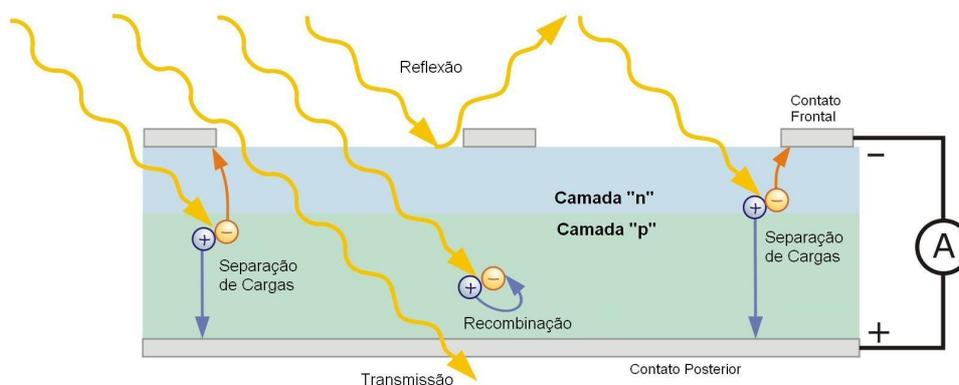


Figura 4: Célula solar fotovoltaica sob irradiação solar

FONTES: QUASCHNING 2009 (ADAPTADO)

As características construtivas de células solares são as mesmas de um diodo. Elas são compostas de duas camadas de material semicondutor (n e p) e uma região de depleção. O comportamento elétrico da célula solar pode ser representado, portanto, de maneira simples por um diodo em paralelo com uma fonte de corrente (QUASCHNING, 2009).

Na Figura 5, representa-se a célula solar como um circuito composto por uma fonte de corrente e um diodo em paralelo. Considerando a corrente de saturação do diodo (I_s) no sentido de bloqueio e o fator do diodo igual a m , escreve-se a equação da corrente da célula solar em função da tensão da célula (U):

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\left(\frac{U}{m} \cdot U_t \right)} - 1 \right)$$

onde:

I - Corrente fornecida pela célula

I_{ph} - Corrente produzida pelo efeito fotovoltaico

I_d - Corrente que percorre o diodo

I_s - Corrente de saturação inversa do diodo

U - Tensão nos terminais da célula

m - Fator de idealidade do diodo (igual 1 se o diodo for ideal, maior do que 1 para diodos não ideais)

U_t - Tensão térmica: $U_t = k \cdot \frac{T}{q}$ vale 25,7 mV em *STC*

k - Constante de Boltzmann igual a $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

q - Temperatura absoluta da célula em Kelvin

T - Carga elétrica do elétron igual a $1,6 \times 10^{-19}$ C

STC - *Standard Test Conditions* – Condições padrão para testes. São elas: Irradiância de 1 kW/m², massa de ar igual a 1,5 e Temperatura da célula igual a 25 °C.

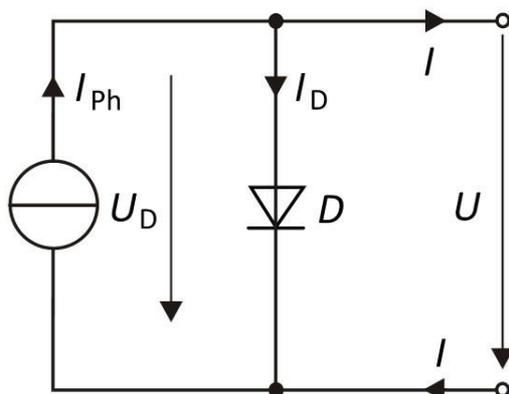


Figura 5: Circuito equivalente da célula solar simplificado

FONTE: QUASCHNING, 2009

A tensão de temperatura U_t é cerca de 25,7 mV para uma temperatura de 25°C. A corrente de saturação é da ordem de 10^{-10} A. Para um diodo ideal, considera-se o fator de diodo *m* igual a 1. Pode-se tratar a corrente produzida pela fonte de corrente (I_{ph}) simplesmente pelo produto da intensidade de irradiação E por um coeficiente C . Sendo a corrente uma função da irradiância, podem-se traçar curvas que representam a influência da irradiância nas características de tensão e corrente da célula solar, como mostrado no Gráfico 3 (QUASCHNING, 2009).

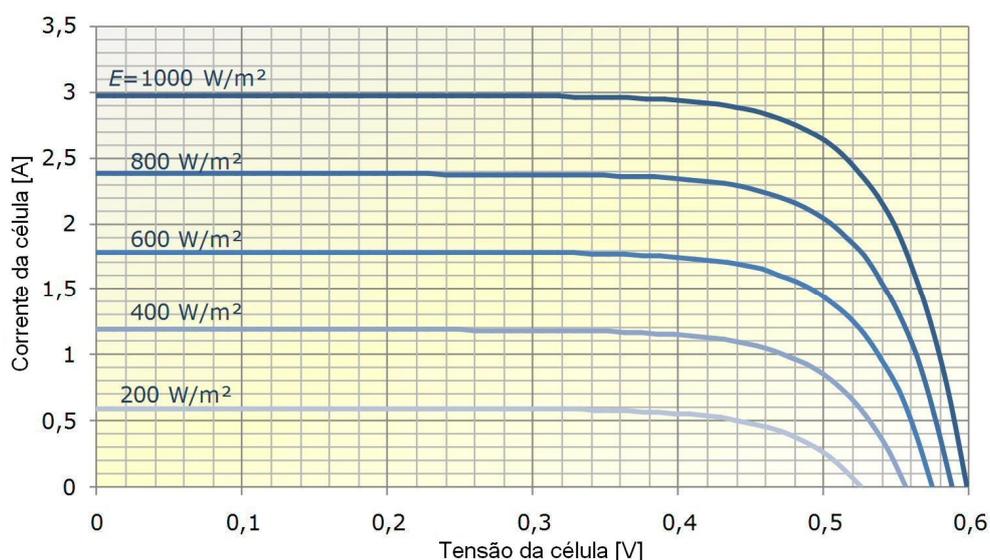


Gráfico 3: Influência da irradiância na curva corrente *versus* tensão da célula solar

FONTE: QUASCHNING 2009 (ADAPTADO)

A representação da célula solar por apenas uma fonte de corrente e um diodo apresenta um erro pequeno entre a curva calculada e a medida. Porém, para uma representação mais fiel do sistema, deve-se levar em consideração a perda de tensão que ocorre na condução de carga entre o material semicondutor e o contato externo. Essa perda de tensão pode ser representada por um resistor em série (R_s) com a célula fotovoltaica. Além disso, podem ser consideradas as fugas de corrente que ocorrem nas extremidades da célula solar. Essas correntes de fuga podem ser representadas por um resistor em paralelo (R_p) com a célula solar. Consideradas ambas as perdas descritas, representa-se o circuito equivalente da célula solar como mostrado na Figura 6.

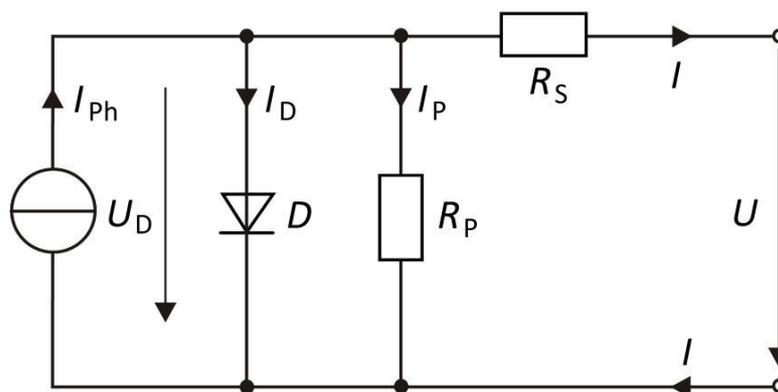


Figura 6: Circuito equivalente da célula solar com resistência série e paralelo

FONTE: QUASCHNING, 2009

Em células solares convencionais o valor da resistência série é da ordem de $m\Omega$ enquanto a resistência em paralelo é normalmente superior a 10Ω . Ao modificar os valores das resistências série e paralelo, obtêm-se novas curvas de corrente *versus* tensão da célula solar. O Gráfico 4 mostra o efeito causado pela variação da resistência série, enquanto o Gráfico 5 mostra o efeito causado pela variação da resistência paralelo na curva característica da célula solar. Aplicando-se a Lei de Kirchoff dos Nós no circuito da Figura 6, tem-se:

$$0 = I_{ph} - I_d - I_p - I$$

Sendo I_p definido por:

$$I_p = \frac{(U_d)}{(R_p)} = \frac{(U + R_s \cdot I)}{(R_p)}$$

Define-se, então, a equação da célula solar considerando as resistências série e paralelo da seguinte forma:

$$0 = I_{ph} - I_S \cdot \left(e^{\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T} \right)} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} - 1$$

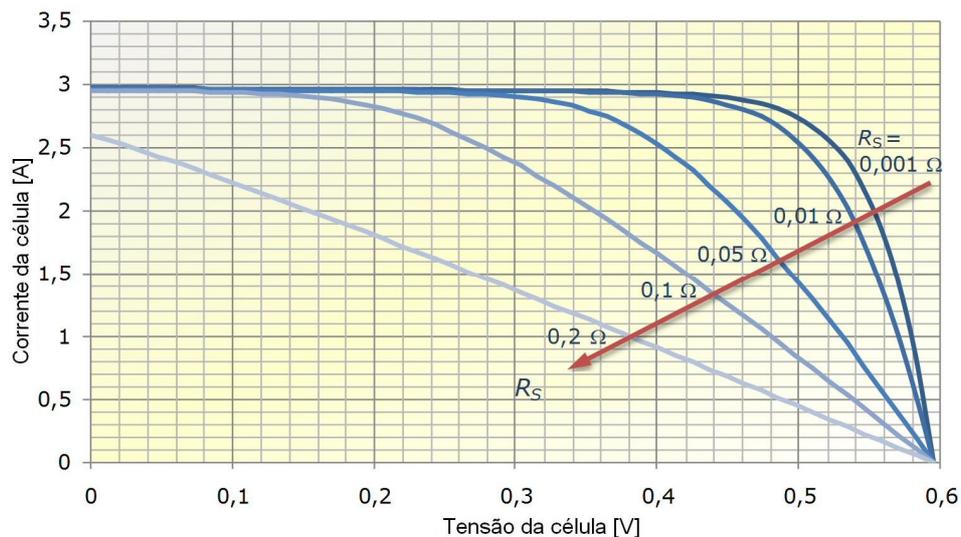


Gráfico 4: Influência da variação da resistência série

FONTE: QUASCHNING, 2009 (ADAPTADO).

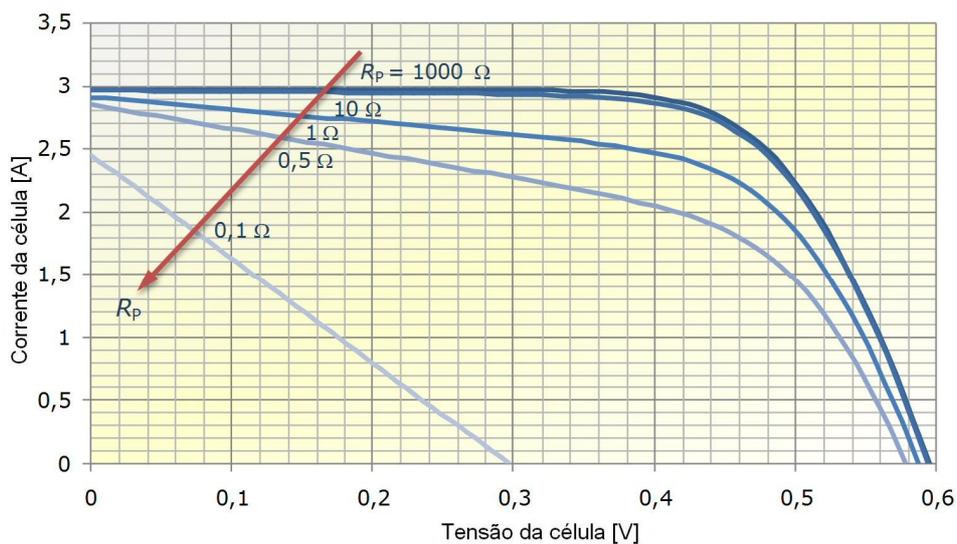


Gráfico 5: Influência da variação da resistência paralelo

FONTE: QUASCHNING, 2009 (ADAPTADO).

Existem diversos tipos de células solares fotovoltaicas. Cada tecnologia apresenta características elétricas próprias. As características elétricas mais utilizadas para descrever o comportamento da célula são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Características elétricas de uma célula solar

Referência	Unidade	Descrição
Tensão de circuito aberto	[V]	Tensão entre os terminais da célula em circuito aberto (<i>STC</i>)
Corrente de curto circuito	[A]	Corrente de curto circuito da célula (<i>STC</i>)
Tensão <i>MPP</i> *	[V]	Tensão da célula no ponto de máxima potência (<i>STC</i>)
Corrente <i>MPP</i> *	[A]	Corrente da célula no ponto de máxima potência (<i>STC</i>)
Potência <i>MPP</i> *	[W]	Potência máxima da célula (<i>STC</i>)
Rendimento	%	Porcentagem da energia irradiante que é convertida em energia elétrica

**MPP* - *Maximum power point* - Ponto de máxima potência

FONTE: QUASCHNING, 2009 (ADAPTADO).

O ponto de máxima potência, citado na Tabela 1, é o ponto no qual a célula fornece a maior quantidade de potência possível. O gráfico 6 apresenta, em azul, a curva característica corrente *versus* tensão da célula solar e, em vermelho, a curva potência *versus* tensão da célula solar. No mesmo gráfico, em laranja, têm-se as linhas que definem os valores de corrente e tensão do ponto de máxima potência (*MPP*), também marcado no gráfico.

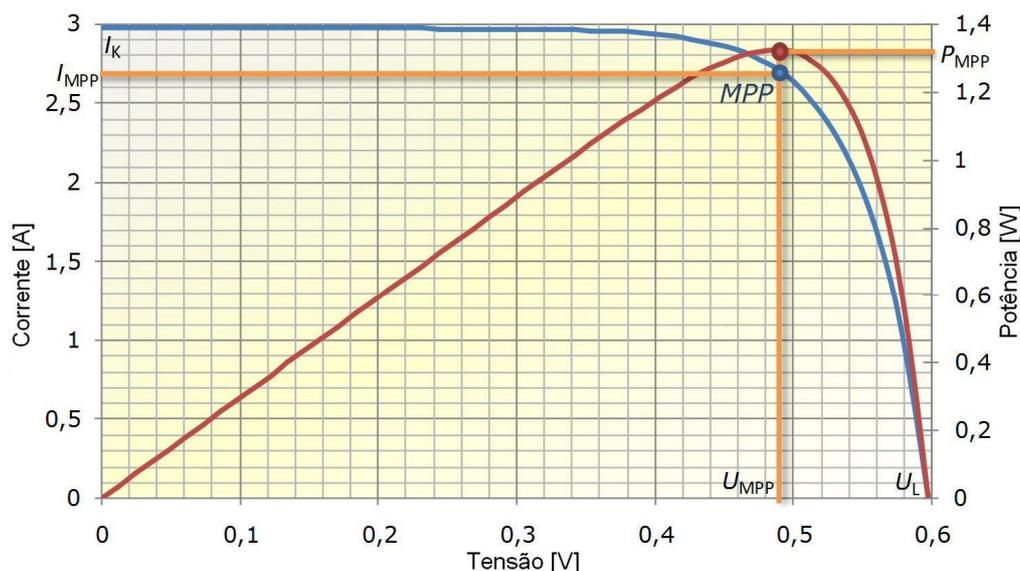


Gráfico 6: Ponto de máxima potência da célula solar

FONTE: QUASCHNING, 2009 (ADAPTADO).

Além das características elétricas, outro fator é utilizado para avaliar a qualidade das células solares. Esse fator é denominado fator de preenchimento (F_p) e quantifica a semelhança da curva corrente *versus* tensão da célula com o retângulo de máxima potência, mostrado na cor laranja no gráfico 6. O valor de F_p é sempre menor do que um e pode ser calculado segundo a seguinte equação:

$$F_p = \frac{(P_{mpp})}{(U \cdot I)} = \frac{(U_{mpp} \cdot I_{mpp})}{(U \cdot I)}$$

No cálculo de F_p são utilizados os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito. O ponto de máxima potência da célula solar também é utilizado no cálculo do rendimento da célula. O rendimento relaciona a máxima potência que a célula pode fornecer com a potência fornecida à célula em forma de irradiação solar. Seu valor significa o percentual de energia solar incidente que é transformado em energia elétrica pela célula. O cálculo do rendimento pode ser feito segundo a equação a seguir:

$$\eta = \frac{(P_{mpp})}{(E \cdot A)} = \frac{(F_p \cdot U \cdot I)}{(E \cdot A)}$$

Desde 1993, o periódico *Progress in Photovoltaics* tem publicado listas com as células solares fotovoltaicas e módulos mais eficientes produzidos com cada tecnologia

existente no mercado. A Tabela 2 mostra a eficiência de algumas células, conforme publicação referente ao ano de 2014.

Tabela 2: Rendimento máximo de diferentes tipos de células

Tecnologia / Material	Eficiência	Área	Voc	Isc (mA/cm²)	Fator de preenchimento
<i>Silicon</i>					
Si (crystalline)	25.6 ± 0.5	143.7 (da)	0.740	41.8	82.7
Si (multicrystalline)	20.4 ± 0.5	1.002 (ap)	0.664	38.0	80.9
Si (thin film transfer)	20.1 ± 0.4	242.6 (ap)	0.682	38.14	77.4
Si (thin film minimodule)	10.5 ± 0.3	94.0 (ap)	0.492	29.7	72.1
<i>III-V Cells</i>					
GaAs (thin film)	28.8 ± 0.9	0.9927 (ap)	1122	29.68	86.5
GaAs (multicrystalline)	18.4 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.2	79.7
InP (crystalline)	22.1 ± 0.7	4.02 (t)	0.878	29.5	85.4
<i>Thin film chalcogenide</i>					
CIGS (cell)	20.5 ± 0.6	0.9882 (ap)	0.752	35.3d	77.2
CIGS (minimodule)	18.7 ± 0.6	15.892 (da)	0.701	35.29	75.6
CdTe (cell)	19.6 ± 0.4	1.0055 (ap)	0.8573	28.59	80.0
<i>Amorphous/microcrystalline Si</i>					
Si (amorphous)	10.1 ± 0.3	1.036 (ap)	0.886	16.75	67.8
Si (microcrystalline)	11.0 ± 0.3	1.045 (da)	0.542	27.44	73.8
<i>Dye sensitised</i>					
Dye sensitised	11.9 ± 0.4	1.005 (da)	0.744	22.47	71.2
Dye sensitised (minimodule)	29.9 ± 0.4	17.11 (ap)	0.719	19.4	71.4
Dye (submodule)	8.8 ± 0.3	398.8 (da)	0.697	18.42	68.7
<i>Organic</i>					
Organic thin film	10.7 ± 0.3	1.013 (da)	0.872	17.75	68.9
Organic (minimodule)	9.1 ± 0.3	25.04 (da)	0.794	17.06	67.5
Organic (submodule)	6.8 ± 0.2	395.9 (da)	0.798	13.50	62.8
<i>Multijunction devices</i>					
InGaP/GaAs/InGaAs	37.9 ± 1.2	1.047 (ap)	3.065	14.27	86.7
a-Si/nc-Si/nc-Si (thin film)	13.4 ± 0.4	1.006 (ap)	1.963	9.52	71.9
a-Si/nc-Si (thin film cell)	12.3 ± 0.3%	0.962(ap)	1.365	12.93	69.4
a-Si/nc-Si (thin film minimodule)	11.8 ± 0.6	40.26 (ap)	1.428	12.27	67.5

FONTE: GREEN, 2014 (ADAPTADO).

2.1.3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

As células solares fornecem tensão e corrente insuficientes para a alimentação da maioria das cargas. Por esse motivo, associam-se as células solares formando módulos. Usualmente são associadas de 32 a 40 células com o objetivo de fornecer tensão necessária para o carregamento de baterias de chumbo ácido de 12 V. Podem ser utilizados também módulos que contém uma quantidade menor de células ou uma quantidade expressivamente maior de células, o número de células associadas varia conforme a aplicação (QUASCHNING, 2009).

A Figura 7 e a Figura 8 ilustram, respectivamente, uma representação em símbolos da associação de células solares e a mesma associação em um módulo de células cristalinas. Na figura observa-se que a corrente elétrica é a mesma para todas as células e a tensão elétrica nos terminais extremos é equivalente à soma das tensões individuais das células.

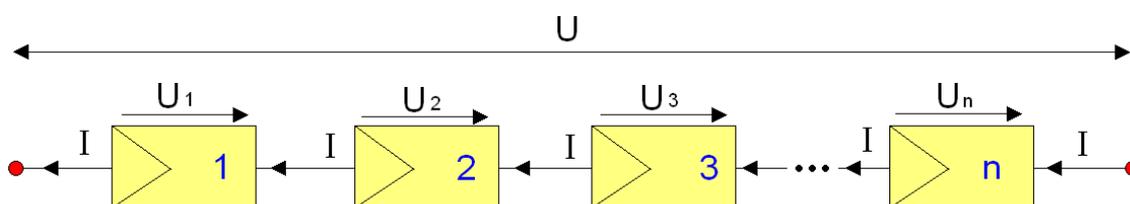


Figura 7: Associação de células – representação em símbolos

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

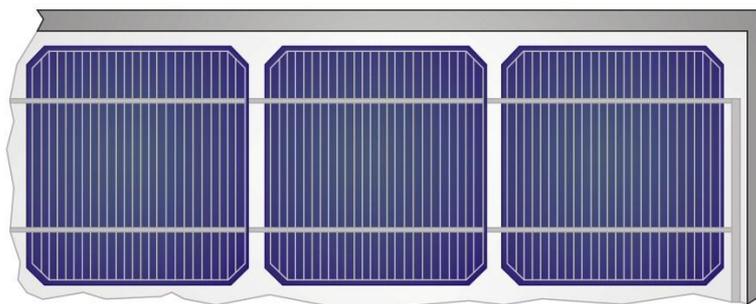


Figura 8: Associação de células cristalinas

FONTE: QUASCHNING, 2009

A curva característica corrente *versus* tensão do módulo é semelhante à curva das células. Cada célula contribui com um aumento da tensão terminal podendo ser possível ilustrar essa contribuição individual, conforme mostrado no gráfico 7.

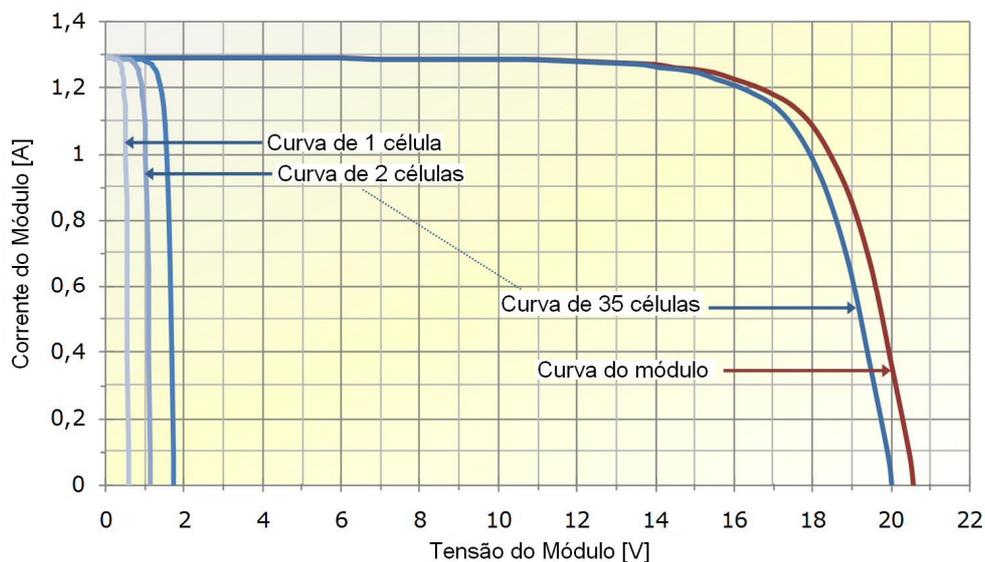


Gráfico 7: Contribuição individual das células na curva do módulo

FONTE: QUASCHNING, 2009 (ADAPTADO).

As características elétricas que são apresentadas com o objetivo de descrever o comportamento dos módulos são as mesmas usadas para as células. A Figura 9 é parte do catálogo de produtos marca *Kyocera* e apresenta as características elétricas de alguns dos módulos vendidos pela empresa.



	KD240GX-LFB	KD235GX-LFB	KD230GX-LFB	KD215GX-LFBS	KD210GX-LFBS	KD205GX-LFBS	KD185GX-LFBS	KD135GX-LFBS
Maximum Power	240W	235W	230W	215W	210W	205W	185W	135W
Number of Cells	60	60	60	54	54	54	48	36
Tolerance	+5%/-3%	+5%/-3%	+5%/-3%	+5%/-3%	+5%/-3%	+5%/-3%	+5%/-5%	+5%/-5%
Maximum System Voltage	600V	600V	600V	600V	600V	600V	600V	600V
Maximum Power Voltage	29.8V	29.8V	29.8V	26.6V	26.6V	26.6V	23.6V	17.7V
Maximum Power Current	8.06A	7.89A	7.72A	8.09A	7.90A	7.71A	7.84A	7.63A
Open Circuit Voltage	36.9V	36.9V	36.9V	33.2V	33.2V	33.2V	29.5V	22.1V
Short Circuit Current	8.59A	8.55A	8.36A	8.78A	8.58A	8.36A	8.58A	8.37A
Series Fuse Rating	15A	15A	15A	15A	15A	15A	15A	15A
Length	65.4"	65.4"	65.4"	59.1"	59.1"	59.1"	52.7"	59.1"
Width	39.0"	39.0"	39.0"	39.0"	39.0"	39.0"	39.0"	26.3"

Figura 9: Características dos módulos *Kyocera*

FONTE: KYOCERA SOLAR, 2010.

2.2 INVERSORES

Inversores são equipamentos cuja função é converter corrente contínua em corrente alternada. Isso é feito por meio de dispositivos semicondutores, como IGBTs e transistores que realizam o chaveamento da corrente de entrada (corrente contínua) para produzir em sua saída uma corrente alternada (PINTO NETO, 2012).

Os inversores são utilizados em situações onde a corrente disponível é contínua, mas as cargas a serem alimentadas demandam corrente alternada. São bastante utilizados em ambientes isolados juntamente com baterias, pois a energia armazenada nas baterias é disponibilizada em corrente contínua. Dependendo da aplicação, os inversores podem ter características diferenciadas. Eles podem ser basicamente divididos em dois grandes grupos: Inversores Isolados e Inversores Conectados à Rede Elétrica. Os Inversores Isolados são aqueles que não possuem ligação com a rede elétrica comum, podendo disponibilizar a energia elétrica em qualquer nível de tensão e frequência requeridos pela

carga. Sua aplicação em sistemas fotovoltaicos se dá como descrito no capítulo anterior, em SISTEMAS FOTOVOLTACOS ISOLADOS. Analogamente, a topologia da aplicação dos Inversores Conectados à Rede Elétrica em sistemas fotovoltaicos está descrita em SISTEMAS FOTOVOLTACOS CONECTADOS À REDE.

De acordo com a aplicação, os inversores podem disponibilizar diferentes formas de onda na corrente de saída. A seguir alguns exemplos:

Inversor de onda quadrada: É mais simples e barato do que as demais tecnologias, porém apresenta limitações no tipo da carga alimentada, bem como baixa eficiência e alta distorção harmônica quando conectados à rede elétrica. Não devem ser utilizados para alimentação de motores e cargas sensíveis, pois os mesmos ficam sujeitos a mau funcionamento, ruídos, aquecimento excessivo e danos elétricos. Um exemplo da forma de onda da corrente de saída desse inversor é mostrado na Figura 10.

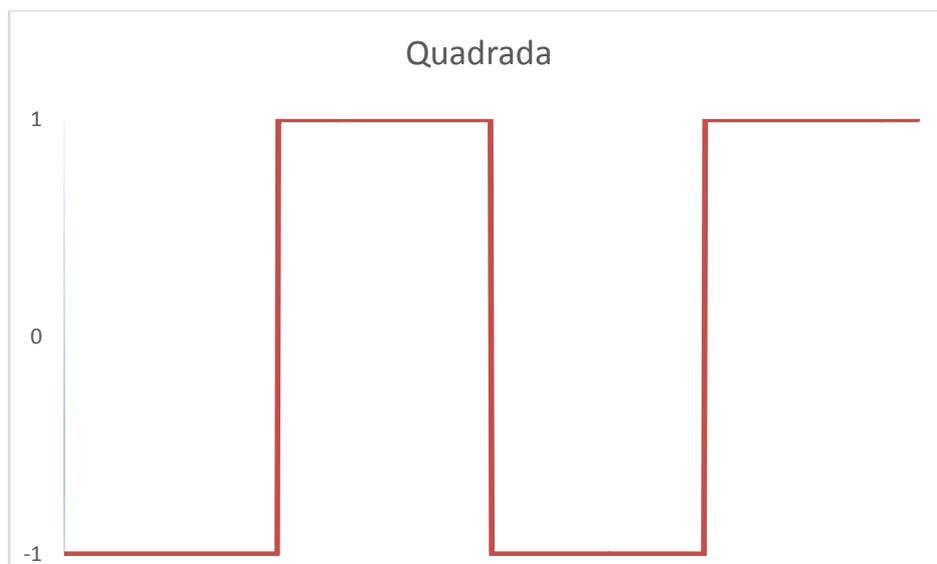


Figura 10: Onda quadrada
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Inversor de onda retangular ou senoidal modificada: Também chamado de inversor semi senoidal, pois apresenta uma forma de onda da corrente de saída baseada numa senoide, porém retangular. São altamente utilizados para alimentação de cargas de pequeno porte, pois são inversores de baixo custo e ao mesmo tempo compatíveis com a maioria das

cargas. Um exemplo da forma de onda da corrente de saída desse inversor é mostrado na Figura 11.

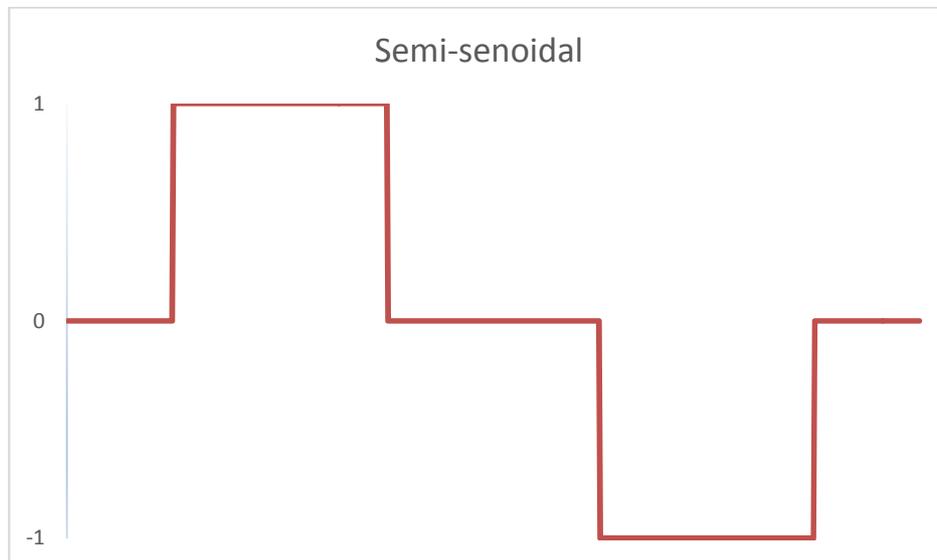


Figura 11: Onda semi-senoidal

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Inversor de onda senoidal pura: Apresenta uma maior tecnologia agregada, pois a forma de onda da corrente de saída é uma senóide pura, com distorção harmônica nula. A eficiência do sistema é elevada, pois esse inversor entrega à carga exatamente a forma de onda esperada pela mesma. Devido ao seu preço mais elevado em relação às tecnologias supracitadas, o inversor de onda senoidal pura é aplicado em situações onde a carga é mais sensível ao formato da onda de corrente, evitando possíveis danos e garantindo um melhor funcionamento. Um exemplo da forma de onda de saída do inversor senoidal é mostrado na Figura 12.



Figura 12: Onda senoidal pura
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

No caso dos inversores isolados, deve-se escolher a tecnologia mais apropriada de acordo com a natureza da carga e da fonte de corrente contínua, bem como dimensionar corretamente os parâmetros elétricos. No caso de inversores conectados à rede elétrica, há uma série de cuidados adicionais que devem ser tomados para garantir a integridade das cargas, dos equipamentos e da rede elétrica como um todo. Com o objetivo de minimizar a ocorrência de falhas e acidentes na rede elétrica, as concessionárias têm estabelecido normas de conexão do consumidor com a rede, onde são descritas as funções de proteção necessárias para um inversor ser elegível à conexão com as suas redes.

2.3 MICROGERAÇÃO CONECTADA À REDE

A microgeração fotovoltaica no Brasil tem se tornado uma prática muito bem aceita pela população no cenário atual. Os constantes aumentos nas tarifas de energia têm reduzido drasticamente o tempo de retorno dos investimentos em microgeração fotovoltaica. O sistema brasileiro de compensação se dá por custo evitado, portanto quanto maior o preço da energia, melhor o retorno obtido pelo microgerador.

Como o presente trabalho refere-se a uma instalação de pequeno porte na região de Curitiba, os dados apresentados na sequência terão sempre como referência instalações

abaixo de 100kW, abaixo de 100A e localizadas na região de concessão da concessionária Copel.

Cada concessionária brasileira regula o acesso à sua própria rede como deseja, regulamentando a atividade de microgeração dentro de sua área de concessão. A concessionária Copel, por exemplo, publica suas diretrizes na norma NTC 905200 - ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL. Essa norma estabelece critérios quanto aos procedimentos de acesso à rede, requisitos técnicos, arranjos de conexão e especificação de equipamentos. A concessionária Copel também disponibiliza uma lista de inversores homologados por ela para uso em microgeração. Recentemente a Copel também permitiu o uso de inversores homologados pelo Inmetro, mas até então somente os inversores presentes na lista Copel eram liberados para uso em microgeração conectada à sua rede. A lista mais recente de inversores homologados pela Copel para sistemas fotovoltaicos até 10kW pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3: Inversores homologados Copel

Fabricante	Modelo	Potência (kWp)
ABB	PVI 3.0*/3.6*/4.2*/5000*/6000*/10.0* (*-TL-OUTD)	3,0/3,6/4,2/5,0/6,0/10,0
ABB	TRIO 5.8*/7.5*/8.5* (*-TL-OUTD)	5,8/7,5/8,5
ABB	UNO 2.0-I-OUTD/2.5-I-OUTD	2,0/2,5
Advanced Energy	PV Powered - PVP2000	2,0
Astronergy	CHPI 1.5KTL/2KTL/3KTL/4KTL/4.4KTL/5KTL	1,6/2,0/2,85/4,2/4,6/5,2
B&B Power	SF 1600TL/3000TL/5000TL	1,6/3,0/5,0
Chint Power	CPS SCE 1.5KTL/2KTL/3KTL/4KTL-O/4.6KTL-O	1,5/2,0/3,0/4,0/4,6
Chint Power	CPS SCA 8KTL/10KTL	8,0/10,0
Compact Cia	500W / 127V - 1000W / 220V	0,5/1,0
CP Eletrônica	INVSOL 1000	1,0
Enphase Energy	M215	0,27
Fronius	IG Plus 25/30/35/50/55/60V-1	2,6/3,0/3,5/4,0/5,0/6,0
Fronius	Galvo 2.5-1/3.0-1	2,5/3,0
iEnergy	GT260	0,23
KLNE	Sunteams 1500/2000/3000/4000/5000	1,5/2,0/3,0/4,0/5,0

Outback Power	GTFX2524*/GTFX3048*/GVFX3524*/GVFX3648*	2,5/3,0/3,5/3,6
SAJ	Sununo TL1.5K/2K/3KA/3KB/4KA/4KB/5K	1,5/2,0/3,0/3,3/4,0/4,4/5,0
Santerno	M Plus 1300E/2600E/3600/3600E/4300/4300E/5300/6400/7800	1,0/2,0/2,8/2,8/3,3/3,3/4,1/4,9/6,0
Schneider	Conext RL 3000E/4000E/5000E	3,0/4,0/5,0
Schneider	Conext TL 8000E/10000E	8,0/10,0
Schneider	Conext TX2800NA/TX3300NA/TX3800NA/TX5000NA	2,8/3,3/3,8/5,0
Schneider	XW4024/XW4548/XW6048	4,0/4,5/6,0
SMA	Sunny Boy 3000-US/3800-US/4000-US	3,0/3,8/4,0
SMA	Sunny SMC 4600A/5000A/6000A/7000HV	4,6/5,0/6,0/7,0
Solar Energy do Brasil	SE-TL1.5K/2K/3KA/3KB/4KA/4KB/5K	1,5/2,0/3,0/3,3/4,0/4,4/5,0
Steca	Stecagrid 2020	2,0
Valenia	Aurus 20/30/40/50	1,7/2,5/3,4/4,2
Xantrex	GT2.5/3.0/3.3/3.8/4.0/5.0	2,5/3,0/3,3/3,8/4,0/5,0

FONTE: COPEL (2015)

Para instalações abaixo de 100kW e que utilizam inversores, as proteções indicadas são as descritas na Tabela 4.

Tabela 4: Proteções Mínimas para geradores com inversor

CLASSIFICAÇÃO DA GERAÇÃO		MICROGERAÇÃO	
TIPO DE GERADOR		MONOFÁSICO, BIFÁSICO ou TRIFÁSICO (nota 1)	
FAIXA DE POTÊNCIA DA USINA (SOMA DA POTENCIA DOS GERADORES)		até 100 kW (nota 4)	
ELEMENTO DE SECCIONAMENTO MANUAL - VISÍVEL	CHAVE SECCIONADORA		
REQUISITOS NA USINA			
EQUIPAMENTOS	OBJETIVO	ESPECIFICAÇÃO	
TRAFO ABAIXADOR (EXCLUSIVO)	ISOLAR FLUTUAÇÃO	D / Yat.	
		Yat (R0<X0) / Yat	
DISJUNTOR NA BT			SIM
RELIGADOR NA MT			
ELEMENTO DE INTERRUPTÃO (E) DISJUNTOR/ RELIGADOR COM RELÉS NO PONTO DE CONEXÃO	DESCONECTAR O GERADOR DO SISTEMA COPEL EM CASOS DE FALTAS E DISTURBIOS NA REDE	50/51 - 50/51N - 50BF	
		81U/O - 27 - 59	
		Anti ilhamento - 78 / 81 (df/dt)	
		25	
		46(12) + 37	
		67- 67N - 47 - 46 - 51V	
		59N e TPs (p/ traços D/Yat.)	
DISPONIBILIZAR PARA O COD COPEL COMANDOS E SUPERVISÃO DO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO	NÃO PERMITIR O FECHAMENTO EM CASO DE TENSÃO DO LADO DO ACESSANTE DE GERAÇÃO	CHECK DE SINCRONISMO: LIVE LINE / DEAD BUS - 27 e TPs BARRA	
		SISTEMA DE COMANDO DO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO - SISTEMA E MEIO DE COMUNICAÇÃO (fibra óptica, rádio ou GPRS)	
INVERSOR (nota 3)	PROTEÇÃO E CONTROLE	27/59;81 U/O;25;Anti ilhamento	SIM

NOTAS:

- 1) Geradores monofásicos ou bifásicos < 10 kW
- 2) Facultativo, porém recomendado pela COPEL
- 3) O inversor deve possuir no mínimo as seguintes funções de proteção:27/59;81 U/O;25; sistema de Anti ilhamento (NBR IEC 62116).
- 4) Para a faixa de 76 a 100kW cujos consumidores sejam atendidos em MT, não necessitarão alterar sua entrada para BT. Para os consumidores na faixa de 76 a 100 kW que preferirem ser atendidos em BT, a COPEL irá analisar caso a caso.

FONTE: NTC905200

Além das proteções citadas na Tabela 4, a concessionária Copel também exige que a topologia da instalação seja conforme o descrito em norma. A responsabilidade pelo arranjo físico dos equipamentos na instalação fica por conta do acessante, porém a Copel avalia o projeto proposto na etapa de solicitação de acesso e aprova somente se julgar adequado. Quanto ao sistema de medição, a recomendação da Copel é utilizar medição direta quando o acesso for feito na rede de baixa tensão e a corrente não for superior a

100A. Para tais instalações, utilizam-se medidores bidirecionais com no mínimo dois registradores, de maneira que possam ser registradas independentemente a energia elétrica ativa injetada na rede e a consumida. A solução de comunicação é definida e instalada pela Copel, de acordo com o medidor utilizado e as características da entrada de serviço e do local. Todos os custos do projeto, bem como adequação do sistema de medição e da entrada de serviço são responsabilidade do cliente acessante, enquanto a responsabilidade técnica pelo projeto de medição e fornecimento dos equipamentos é por conta da Copel. A Figura 13 ilustra a topologia de instalação do sistema conectado em baixa tensão com utilização de inversores. O elemento EI representa um equipamento de interrupção e o elemento M representa o medidor de energia elétrica bidirecional. Mais detalhes técnicos sobre a instalação podem ser obtidos na própria norma e nas normas nela referenciadas (Norma Copel - NTC905200).

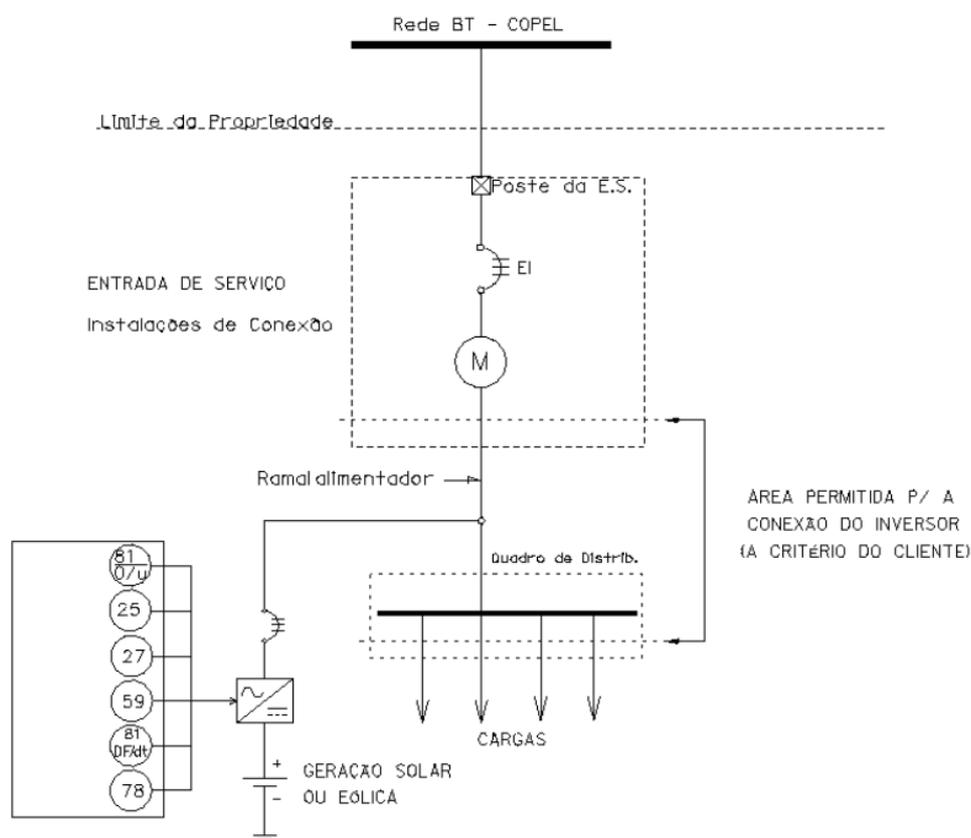


Figura 13: Proteções esquema de instalação de microgeração com inversor

FONTE: NTC905200

3. IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO INVERSOR ESTUDADO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário dimensionar um sistema fotovoltaico que atendesse a necessidade do inversor alvo do estudo. Assim, são dois os parâmetros que balizam o dimensionamento:

- A capacidade do inversor alvo do estudo;
- O local da instalação.

O inversor alvo do estudo possui capacidade máxima de 500W – dado de catálogo – suportando uma sobrecarga de até 20%, chegando a 600W.

O local do sistema de testes será uma residência particular cujas coordenadas da instalação são: 25,484190° S, 49,226970° O.

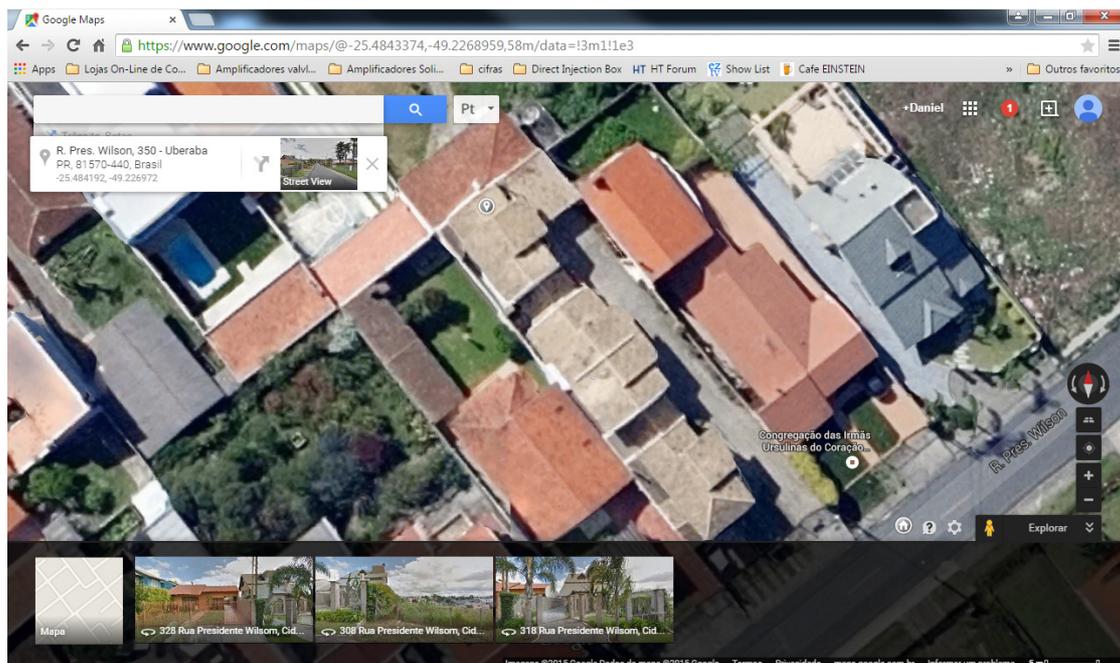


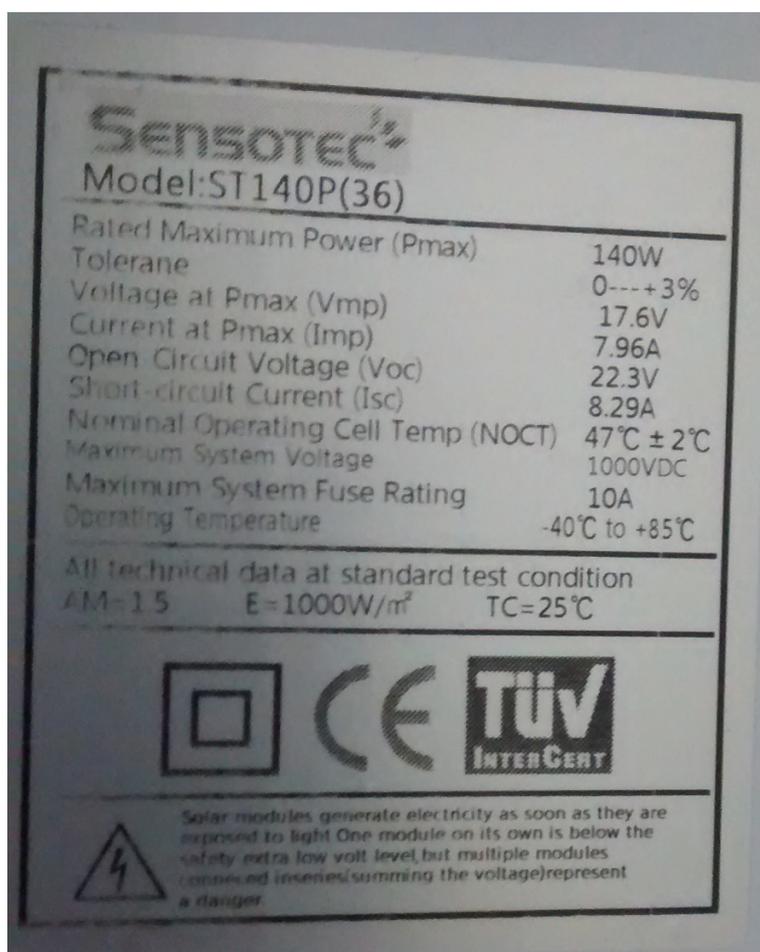
Figura 14: Localização da instalação do sistema de teste

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Determinado o local da instalação é necessário dimensionar o sistema para fornecer a potência necessária ao inversor. Considerando uma possibilidade de sobrecarga de até 10%, foi definido que o painel solar deverá prover uma potência de 550W.

Buscando em fornecedores de módulos fotovoltaicos na cidade de Curitiba, conseguiram-se módulos da fabricante Sensotec de 140Wp, os quais podem ser agrupados em 4 resultando numa potência máxima total de 560Wp na condição padrão de teste (STC).



Sensotec	
Model: ST140P(36)	
Rated Maximum Power (Pmax)	140W
Tolerance	0---+3%
Voltage at Pmax (Vmp)	17.6V
Current at Pmax (Imp)	7.96A
Open Circuit Voltage (Voc)	22.3V
Short-circuit Current (Isc)	8.29A
Nominal Operating Cell Temp (NOCT)	47°C ± 2°C
Maximum System Voltage	1000VDC
Maximum System Fuse Rating	10A
Operating Temperature	-40°C to +85°C
All technical data at standard test condition AM=1.5 E=1000W/m ² TC=25°C	
 Solar modules generate electricity as soon as they are exposed to light. One module on its own is below the safety extra low volt level, but multiple modules connected in series (summing the voltage) represent a danger.	
 	

Figura 15: Dados de placa do módulo fotovoltaico

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Devido a opção de utilização de 4 módulos fotovoltaicos, para não exceder a tensão máxima de trabalho do inversor, determinada como 60V – dado de catálogo – o painel foi definido como sendo a associação em paralelo de dois módulos em série.

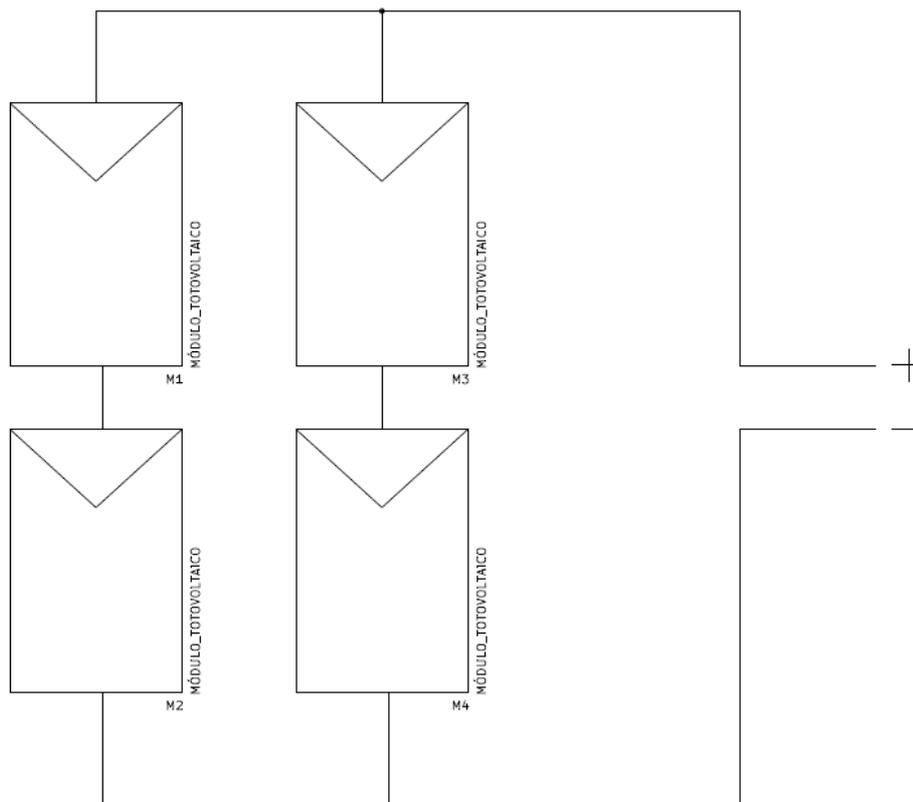


Figura 16: Esquema de ligação dos módulos fotovoltaicos

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Considerando a associação do painel, tem-se que a máxima corrente que circulará pelos condutores de conexão ao inversor é de $2 \times I_{sc} \rightarrow 2 \times 8,29A = 16,58A$. A tensão de trabalho no ponto de máxima potência é $2 \times V_{mp} \rightarrow 2 \times 17,6V = 35,2V$. A distância entre os módulos fotovoltaicos e o inversor, pelo encaminhamento dos cabos, é de 12 metros. De posse da tensão no ponto de máxima potência pode ser calculada a bitola do cabo necessária para uma queda de tensão máxima de 5% sobre os condutores.

$$S_{cond} = \left(\frac{2 \times l \times P \times 0,0178}{V^2 \times \Delta V} \right) \rightarrow S_{cond} = \left(\frac{2 \times 12 \times 560 \times 0,0178}{35,2^2 \times 0,05} \right) = \left(\frac{239,232}{61,952} \right) \\ = 3,861 \text{ mm}^2$$

A seção comercial mais próxima é 4mm^2 .

3.2 INSTALAÇÃO DO SISTEMA

É sabido que o melhor rendimento do sistema é conseguido quando voltado diretamente para o norte, entretanto o local de instalação não fornece diretamente tal possibilidade junto ao telhado, desta forma foi necessário projetar um suporte para a instalação do painel de modo que este ficasse orientado totalmente para o norte.



Figura 17: Detalhe dos módulos na estrutura, antes da instalação.

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

O suporte foi confeccionado com cantoneiras em aço carbono com pés de diferentes alturas para que pudesse ser colocado em cima da residência sem acompanhar o telhado, e mesmo assim, respeitando ângulo de inclinação ideal, que no local de instalação é de 25°, aproximadamente.



Figura 18: Detalhe da instalação no telhado – furação das telhas para passagem dos pés

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

A passagem dos pés para fixação na laje foi feita por furos nas telhas. Depois de passados os mesmos a vedação foi feita com selador específico para este fim.



Figura 19: Detalhe da instalação no telhado – fixação da estrutura nos pés

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

A estrutura para colocação dos módulos foi fixada aos pés com parafusos de aço. Esta situação permitiu que se ajustasse a altura de colocação da parte traseira do suporte, ajustando o ângulo de inclinação do conjunto.



Figura 20: Detalhe da instalação no telhado – evitando apoio sobre o telhado

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Durante a instalação foi tomado o cuidado para que o painel não ficasse apoiado diretamente sobre o telhado, uma vez que não se sabe se o mesmo tem estrutura para suporte deste sistema.



Figura 21: Detalhe da instalação no telhado – fugindo das sombras

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Outro cuidado necessário foi verificar os possíveis criadores de sombra para o sistema, uma vez que estes diminuiriam a eficiência do mesmo. Nota-se a antena parabólica ao fundo, o sistema foi montado de forma tal que a mesma não venha a sombreá-lo. Ainda na montagem, outras antenas foram removidas e realocadas para que o painel pudesse ser instalado neste local.



Figura 22: Detalhe da instalação no telhado – fixação dos módulos na estrutura

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Uma vez instalada a estrutura os módulos foram fixados a esta com parafusos de aço convencionais. Cada módulo possui 4 furos para fixação, garantindo uma boa fixação mecânica.



Figura 23: Detalhe da instalação no telhado – visão próxima

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Terminada a instalação foram removidas as sobras das hastes que sustentam a parte traseira. Para minimizar a ação do tempo estas hastes foram pintadas com esmalte sintético, da mesma cor da estrutura.



Figura 24: Detalhe da instalação no telhado – visão ampla

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Embora não esteja paralelo ao telhado, o sistema foi montado de modo a permitir circulação de ar sob os mesmos para realizar seu arrefecimento em dias de maior calor.



Figura 25: Detalhe da instalação no telhado – fixação da fiação

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Ao final da montagem a fiação foi fixada com abraçadeiras plásticas para evitar que pudessem se soltar com a ação dos ventos exercidos sobre o conjunto.

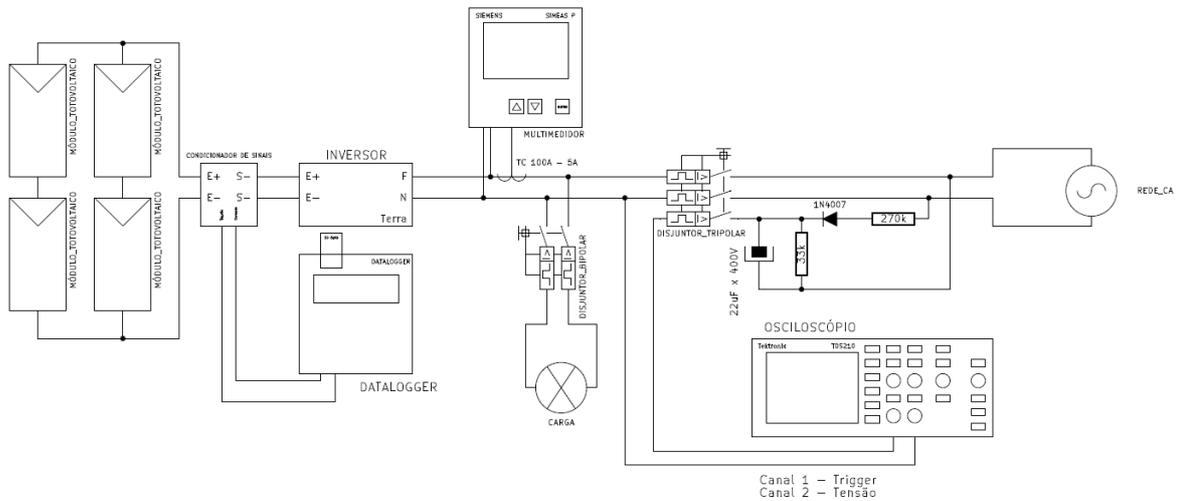


Figura 26: Esquema elétrico do sistema em teste

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Além do painel fotovoltaico e do inversor em análise, o sistema também é composto de disjuntores de proteção e manobra, cargas de teste e equipamentos para medição. Embora a maioria dos equipamentos de medição sejam comerciais, foi necessário construir um equipamento específico para aquisição das medições em corrente contínua.

Para facilitar os testes o sistema foi montado em uma *work board*, de forma que todos os componentes ficassem próximos e fáceis de serem acessados.



Figura 27: Montagem do sistema

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

3.3 RESULTADOS COLETADOS

Inicialmente foram coletados os valores de tensão em circuito aberto e corrente de curto circuito do arranjo:

$$V_{OC} = 40,02V$$

$$I_{SC} = 15,44A$$

Estes valores estão ligeiramente abaixo dos valores nominais dos módulos (44,6V e 16,58A), o que é aceitável, esta coleta de dados foi feita em um dia de sol pleno, próximo ao meio dia, com os módulos submetidos a uma temperatura superior aos 25°C nominais onde são feitos os ensaios de fábrica.

3.3.1 Forma de onda da tensão de saída do inversor

Segundo o manual do próprio equipamento, a forma de onda de saída é uma senoide pura. Como o inversor é do tipo conectado à rede, não é possível medir a saída em

aberto, pois o mesmo necessita de uma referência de frequência da rede. O inversor foi desacoplado da rede por dois resistores de $1k\Omega$, um em cada fase, para que houvesse tensão suficiente para o inversor entender estar conectado à rede, porém não conseguir injetar a energia gerada, devido à impedância colocada para a rede.

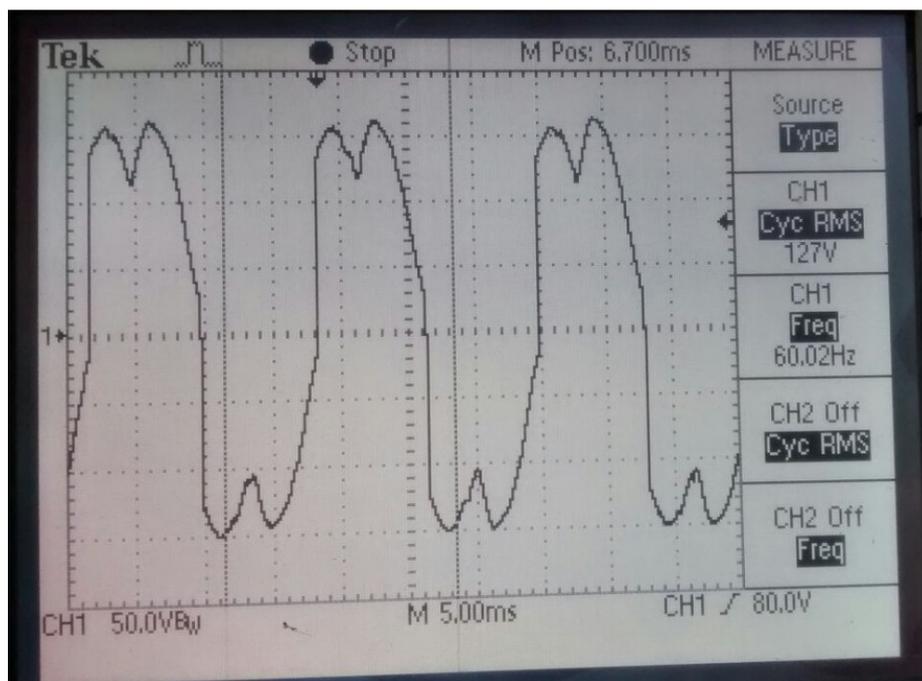


Figura 28: Forma de onda de saída do inversor

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Para efeito de comparação, a Figura 29 traz a forma de onda medida com o inversor desligado.

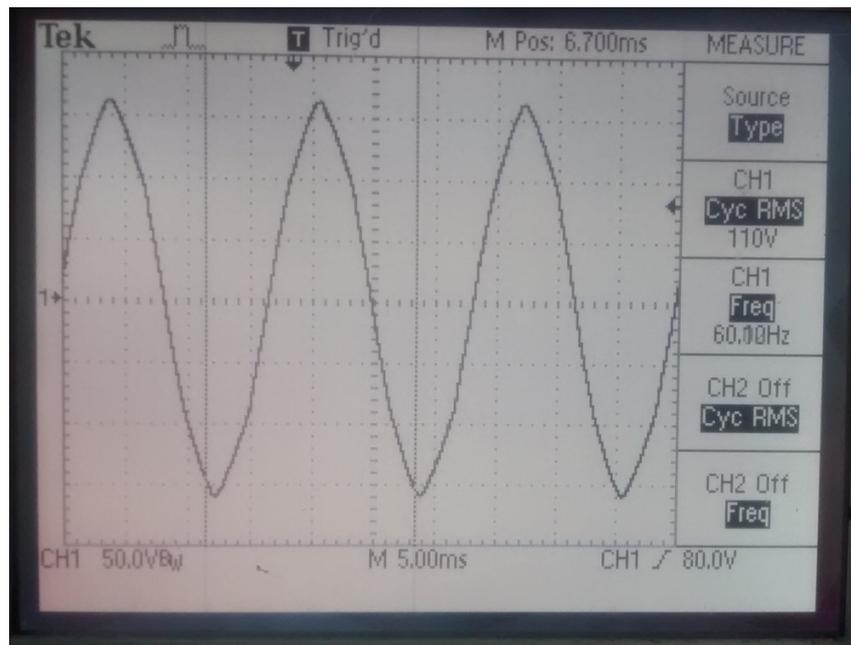


Figura 29: Forma de onda medida na rede com o inversor desligado

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

3.3.2 Tempo de desligamento do inversor em caso de isolação da rede elétrica – Anti-ilhamento

Uma das características necessárias ao inversor é interromper a geração caso seja desconectado da rede, ou seja, cessado o fornecimento de tensão dela, para prover segurança à rede. Com um osciloscópio realizaram-se medições dos tempos que o inversor leva para efetivamente parar de fornecer tensão a carga nesta situação. Esta interrupção foi gerada pelo acionamento do disjuntor tripolar. O disjuntor tripolar foi utilizado nesta situação, pois além de interromper a passagem de tensão, o terceiro polo foi utilizado para gerar um sinal de disparo – *trigger* – para o osciloscópio.

Para essa verificação foram realizados 5 atuações aleatórias e a medição do tempo entre o disparo registrado pelo canal 1 e a queda da tensão de saída para valores abaixo de 40V está registrada pelos cursores do osciloscópio.

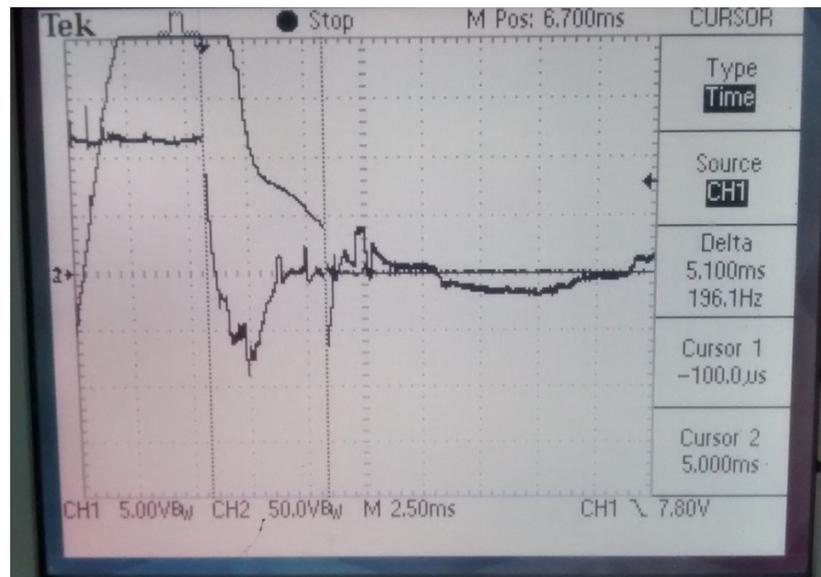


Figura 30: Primeira atuação: Tempo 5,1ms

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Na primeira atuação foi percebido um tempo de 5,1 milissegundos entre o desligamento da tensão da rede e a suspensão de fornecimento de tensão pelo inversor.

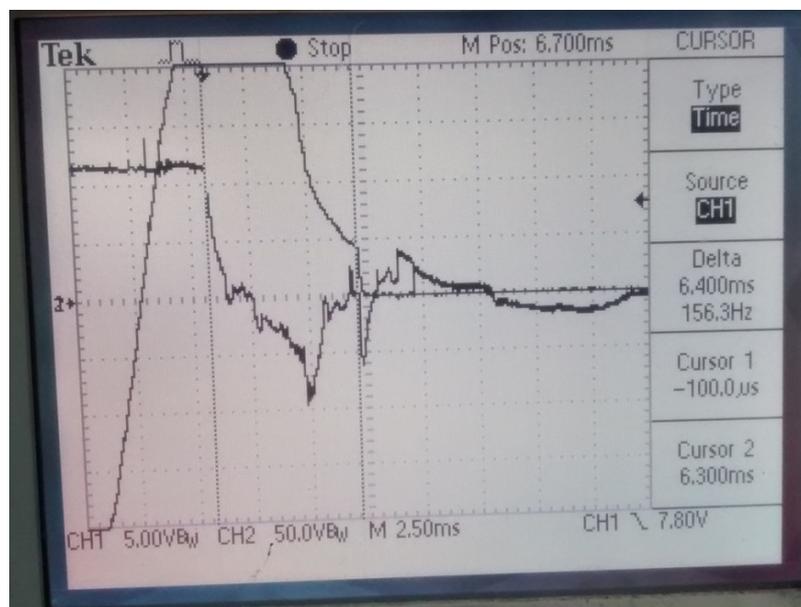


Figura 31: Segunda atuação – Tempo 6,4ms

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Na segunda atuação este tempo foi de 6,4 milissegundos entre o desligamento da tensão da rede e a suspensão de fornecimento de tensão pelo inversor.

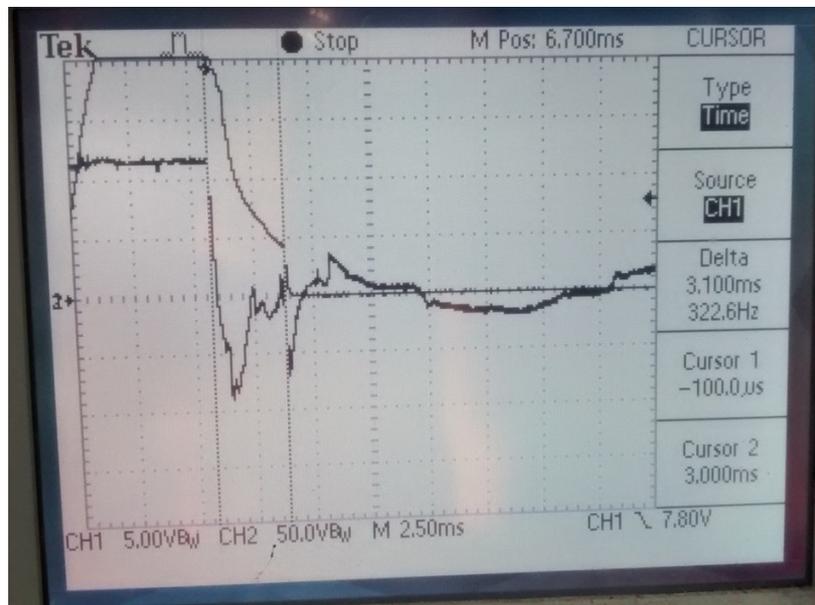


Figura 32: Terceira atuação – Tempo 3,1ms

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Na terceira atuação foi percebido um tempo de 3,1 milissegundos entre o desligamento da tensão da rede e a suspensão de fornecimento de tensão pelo inversor.

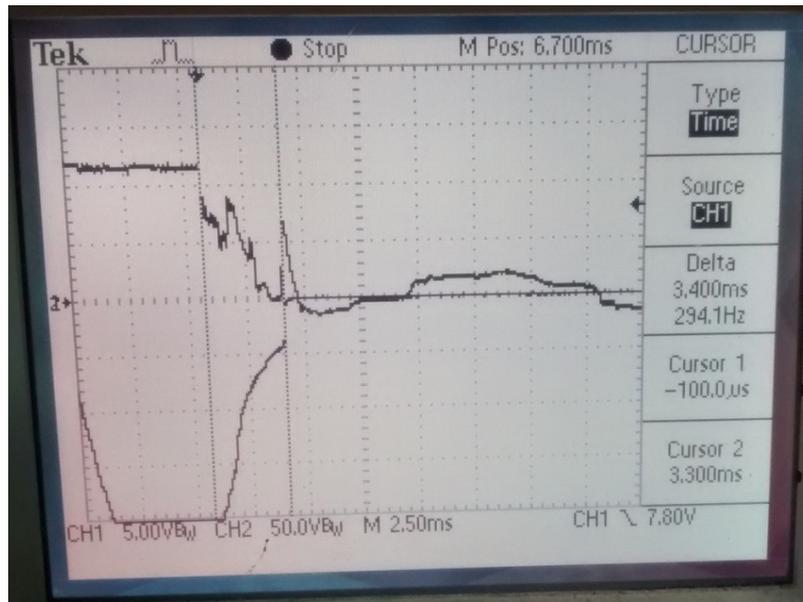


Figura 33: Quarta atuação – Tempo 3,4ms

FONTA: AUTORIA PRÓPRIA

Na quarta atuação foi percebido um tempo de 3,4 milissegundos entre o desligamento da tensão da rede e a suspensão de fornecimento de tensão pelo inversor.

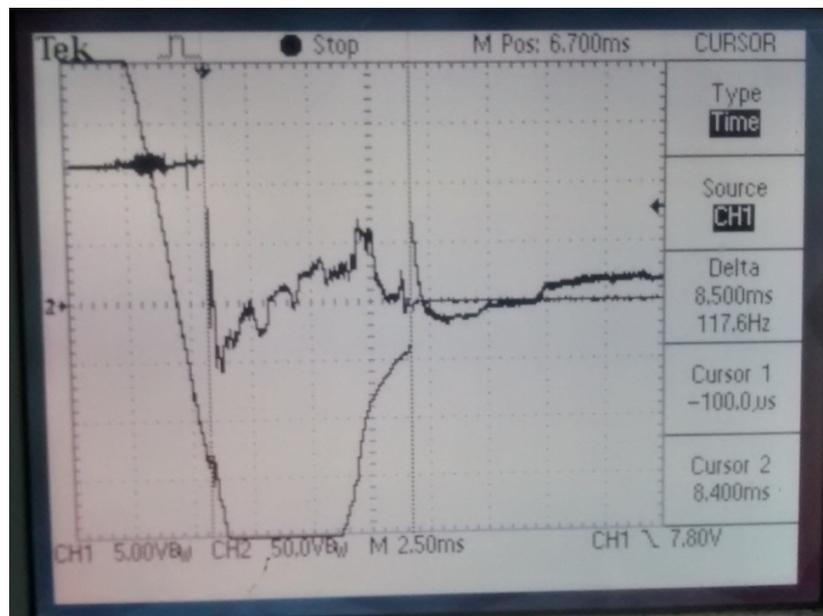


Figura 34: Quinta atuação – Tempo 8,5ms

FONTA: AUTORIA PRÓPRIA

E na quinta atuação foi percebido um tempo de 8,5 milissegundos entre o desligamento da tensão da rede e a suspensão de fornecimento de tensão pelo inversor. Este foi o maior tempo registrado nas amostragens.

3.3.3 Verificação da partida do inversor a sol pleno

Um dos itens verificados foi a partida a sol pleno. Nesta situação é onde se encontram as maiores tensões de circuito aberto e as maiores correntes de curto circuito. Uma partida suave do inversor é desejada para que o mesmo se adapte à rede elétrica sem causar surtos de tensão nem poluir a rede com harmônicos.

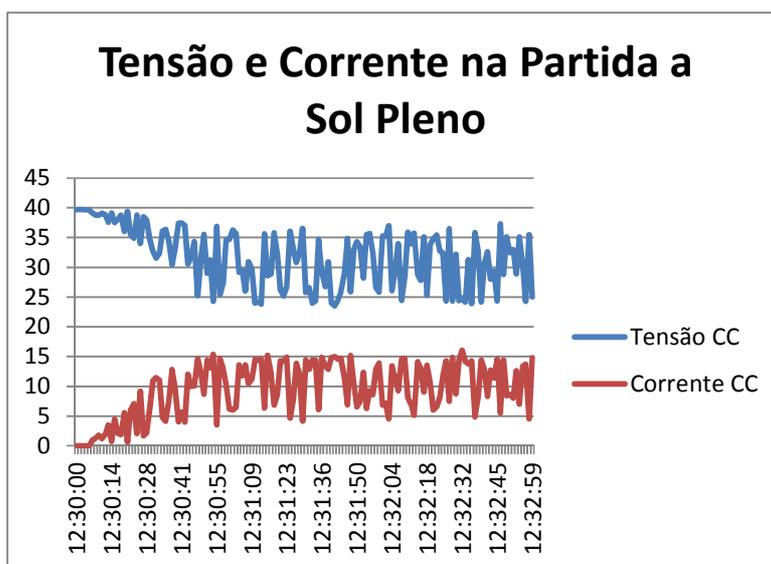


Gráfico 8: Tensão e Corrente na partida a sol pleno

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Acompanhando a tendência da tensão e corrente, a potência também é entregue a rede de forma gradual.

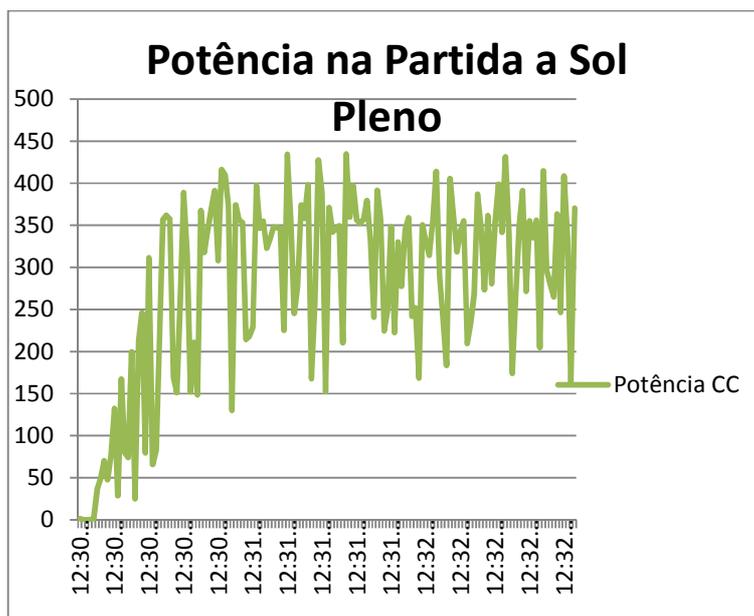


Gráfico 9: Potência na partida a sol pleno

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

3.3.4 Medições dos valores de geração lado CA

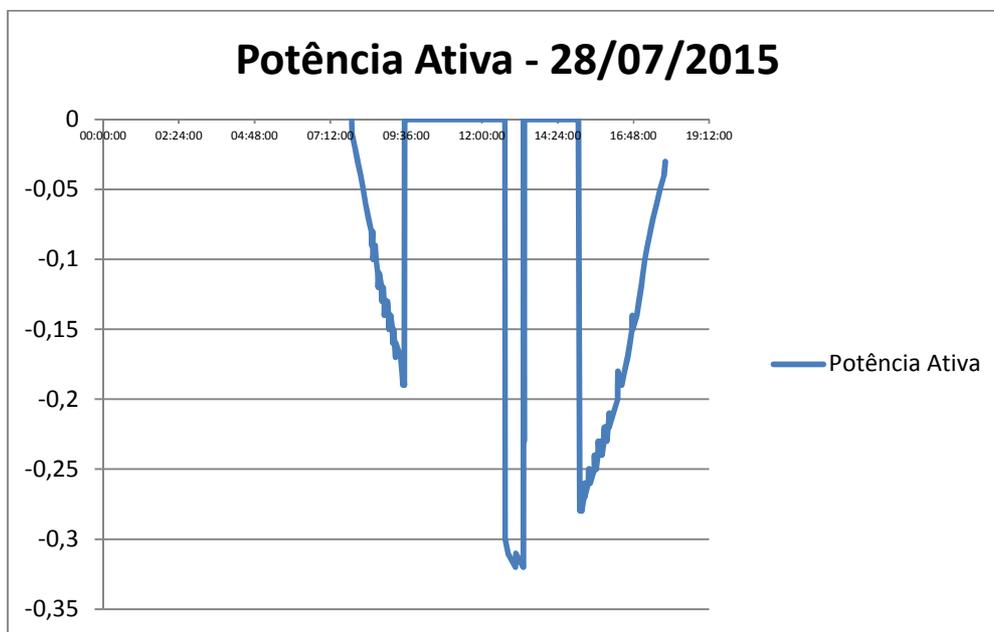


Gráfico 10: Potência Ativa medida no dia 28/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Neste dia houveram desligamentos acidentais do sistema, por isto existem duas descontinuidades na geração de potência.



Gráfico 11: Potência Reativa medida no dia 28/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Como a geração é local, não há componente de potência reativa significativa.

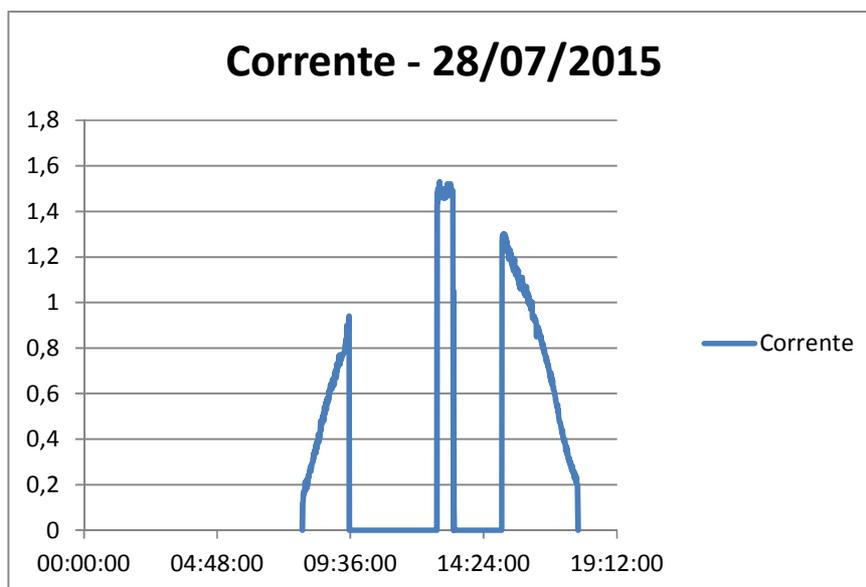


Gráfico 12: Corrente medida no dia 28/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

Como houve o desligamento acidental, não houve injeção de corrente por dois momentos durante o dia.

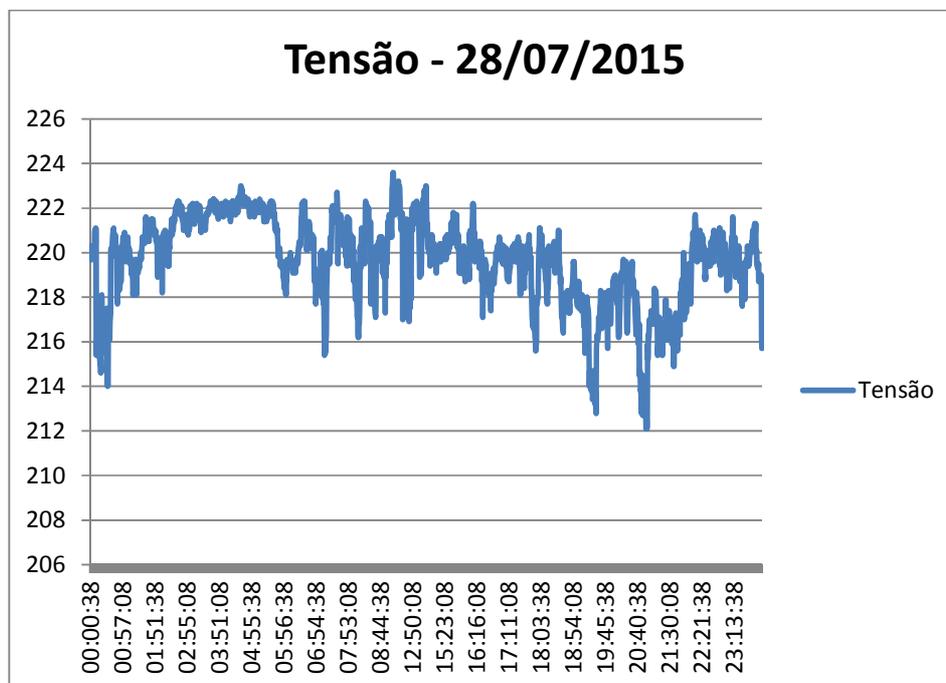


Gráfico 13: Tensão medida no dia 28/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

A tensão é independente da geração, uma vez que em sistemas conectados à rede a tensão da rede é parâmetro para geração.

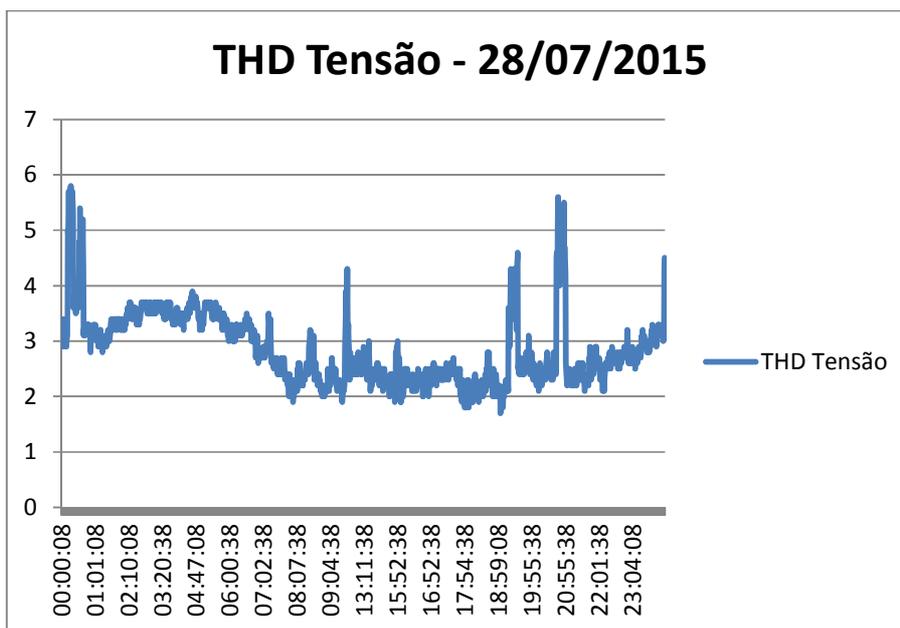


Gráfico 14: THD de Tensão medida no dia 28/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

A distorção harmônica total de tensão, da mesma forma que a tensão, é medida durante todo o dia, pois ela está presente independente de geração pelo sistema.

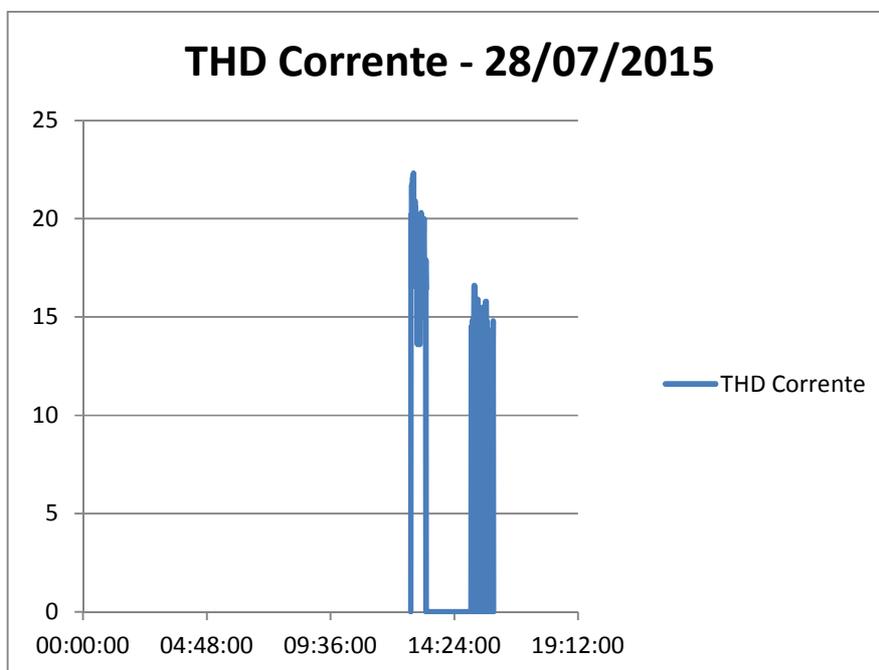


Gráfico 15: THD de Corrente medida no dia 28/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Diferente da distorção harmônica de tensão, a distorção harmônica de corrente só existe em momentos onde há geração de energia pelo sistema. Em especial pode-se perceber que ela só aparece quando a potência gerada pelo sistema supera os 200W.

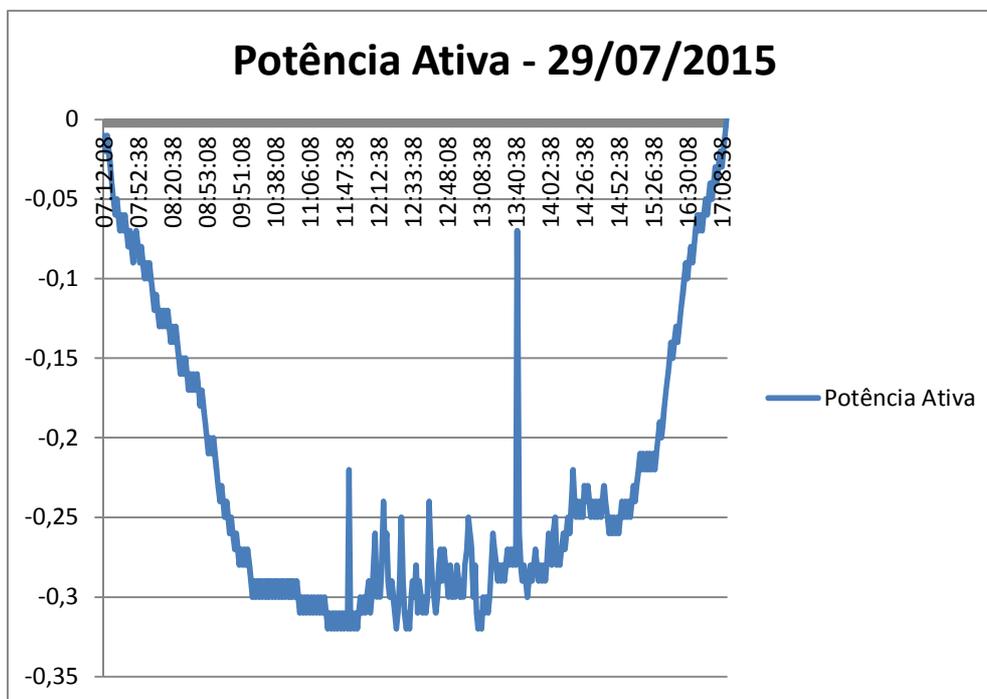


Gráfico 16: Potência Ativa medida no dia 29/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Neste dia pode-se observar uma irregularidade na geração, em especial nos momentos onde deveria haver máxima potência. Esta situação foi desencadeada por nuvens, que reduzem a quantidade de irradiação direta sobre o painel solar. Por consequência, menos energia é convertida pelo inversor e injetada na rede.

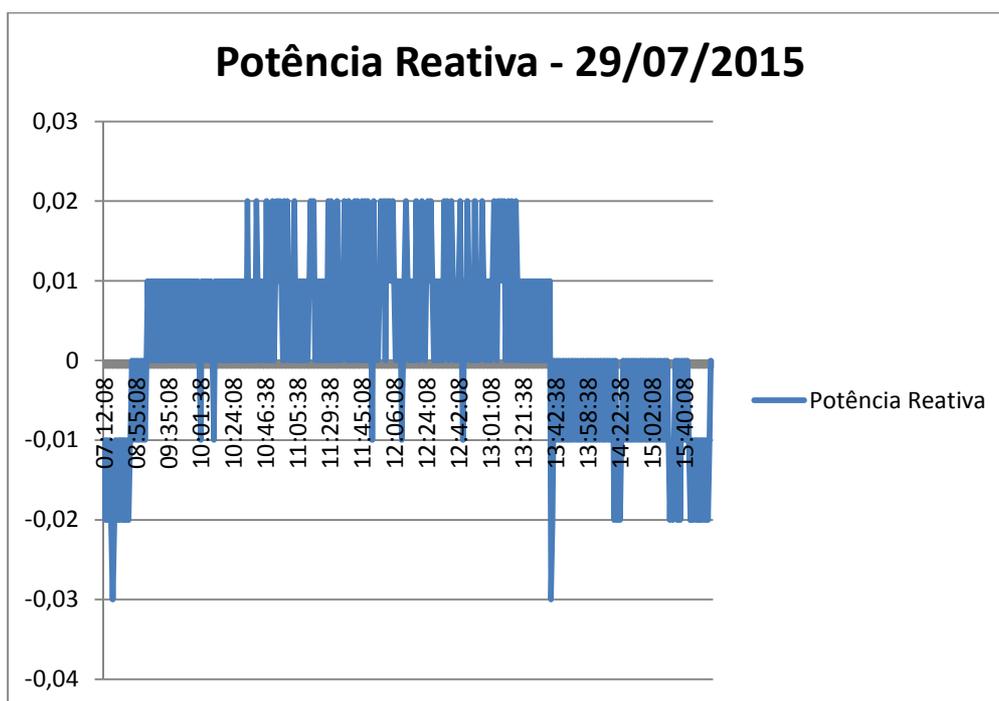


Gráfico 17: Potência Reativa medida no dia 29/07/2015

FONTES: AUTORIA PRÓPRIA

Em dias onde há instabilidade na irradiação solar há mais componente reativa na geração. Isto é causado pelas correções necessárias feitas pelo inversor para se ajustar a condição de geração. Embora exista mais componente reativa, ainda assim ela é desprezível.

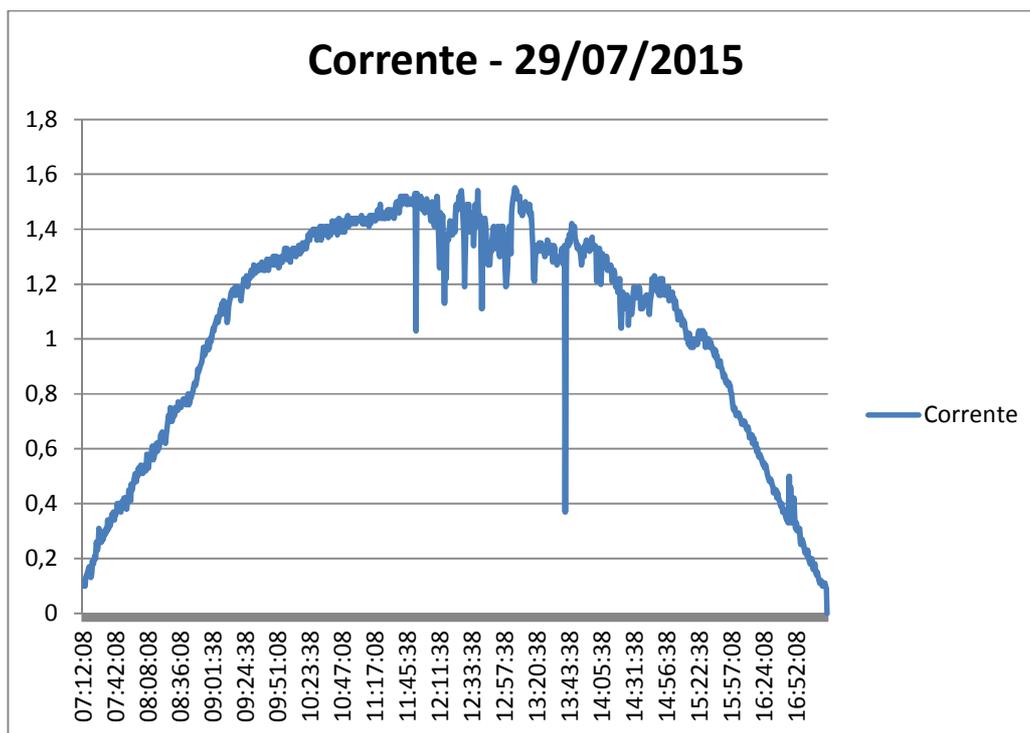


Gráfico 18: Corrente medida no dia 29/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

Da mesma forma que a potência, existem discontinuidades no fornecimento da corrente pela passagem de nuvens pelo sistema.

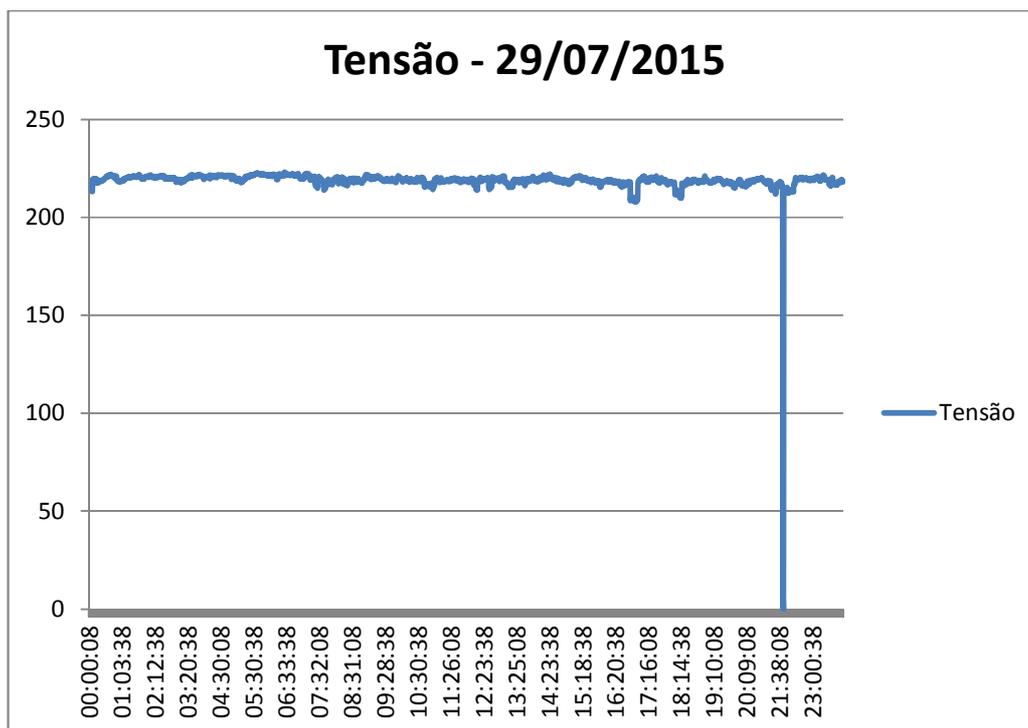


Gráfico 19: Tensão medida no dia 29/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Neste dia houve, excepcionalmente, um distúrbio na medição de tensão. Não foi possível determinar a origem deste distúrbio. Sabe-se, porém, que pelo horário do mesmo ele não foi causado pelo sistema de geração de energia, já que no referido horário o sistema estava desligado.

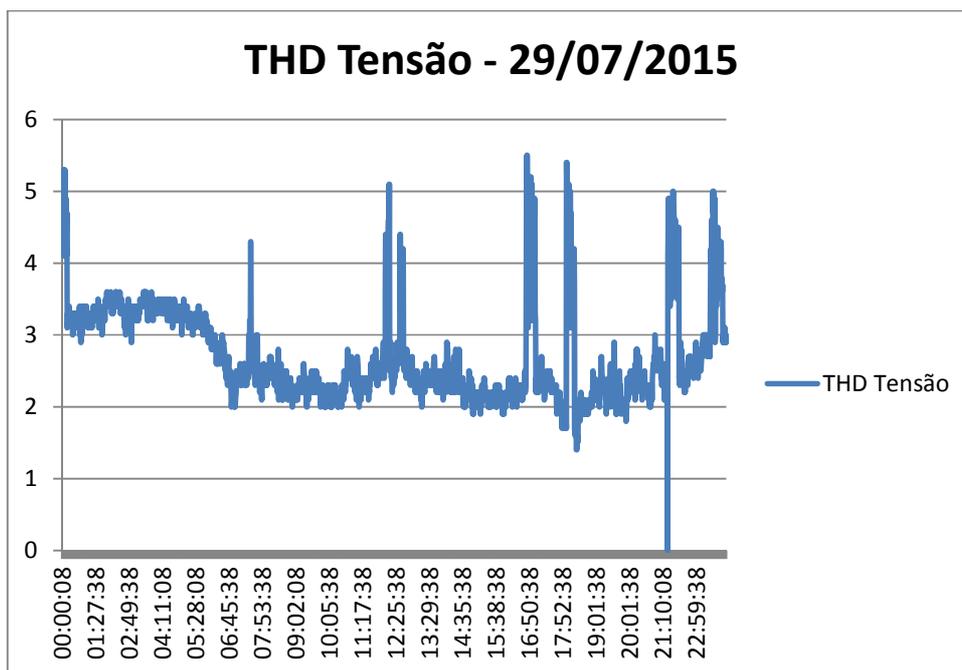


Gráfico 20: THD de Tensão medida no dia 29/07/2015

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

No Gráfico 20 visualiza-se, outra vez, que a distorção harmônica total da tensão independe da geração. Ela está presente em todo o dia e possui uma redução sensível mesmo antes do início da geração pelo sistema fotovoltaico. Da mesma forma, existe um aumento no final do dia, num momento onde o sistema já não está mais em funcionamento.

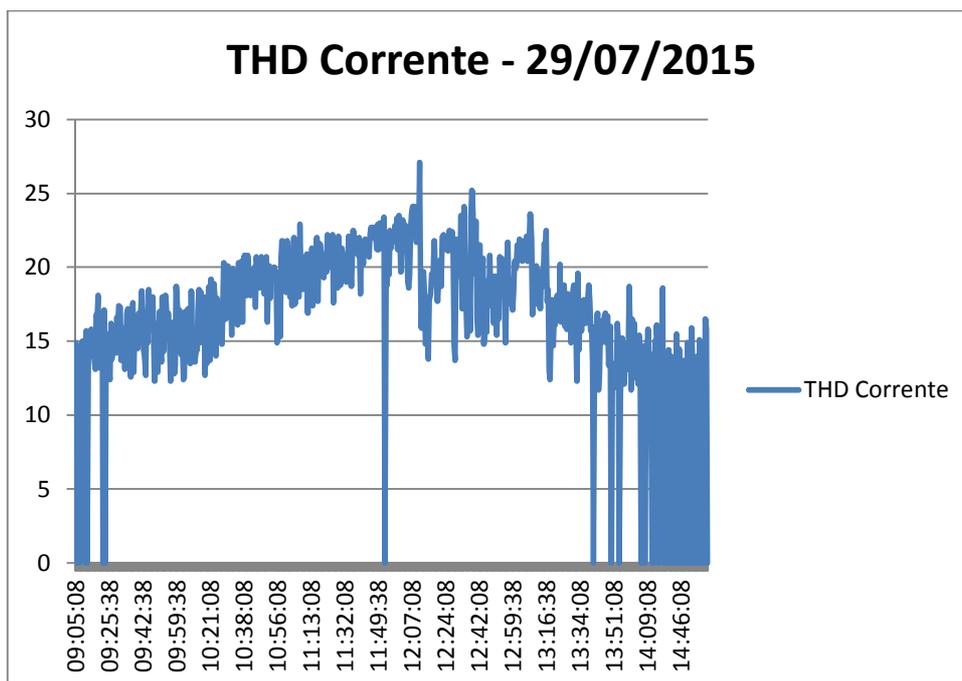


Gráfico 21: THD de Corrente medida no dia 29/07/2015

FONTES: AUTORIA PRÓPRIA

No Gráfico 21 fica mais evidente o aumento da distorção harmônica total de corrente em função do aumento da potência, bem como a existência dessa distorção apenas nos momentos em que a potência entregue pelo inversor supera os 200W.

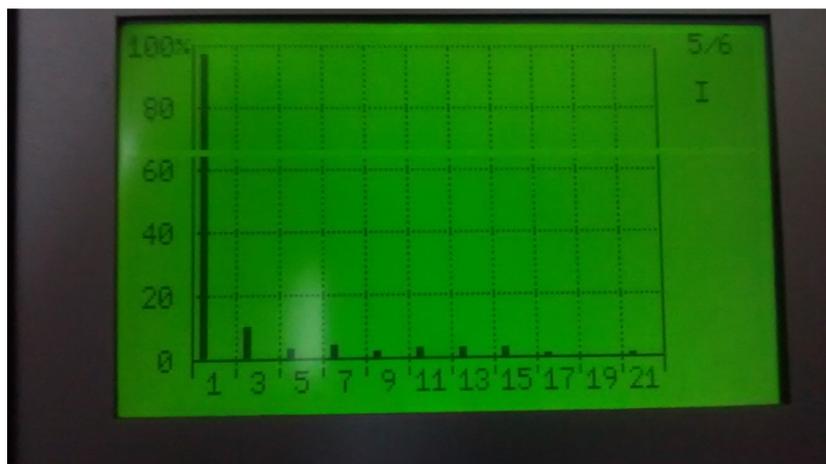


Figura 35: Harmônicos de corrente em percentual

FONTES: AUTORIA PRÓPRIA

A Figura 365 mostra os harmônicos individuais presentes no sistema em um momento onde a geração está a plena carga. Esta geração de harmônicos se dá pelo fato do inversor não ser de onda senoidal pura. A componente de 3º harmônico chega a atingir 10%.

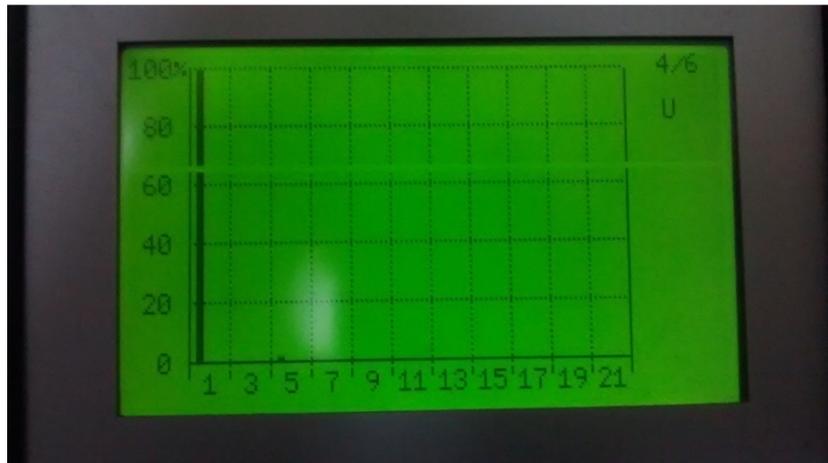


Figura 36: Harmônicos de tensão, em percentual

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Os harmônicos de tensão, por outro lado, não são expressivos. Existe apenas uma componente de 5º harmônico, mas em valor muito pequeno.

3.3.5 Medições dos valores de geração lado CC

Foram medidas também as grandezas elétricas em corrente contínua, bem como outras grandezas relevantes, como, por exemplo, a temperatura do inversor.

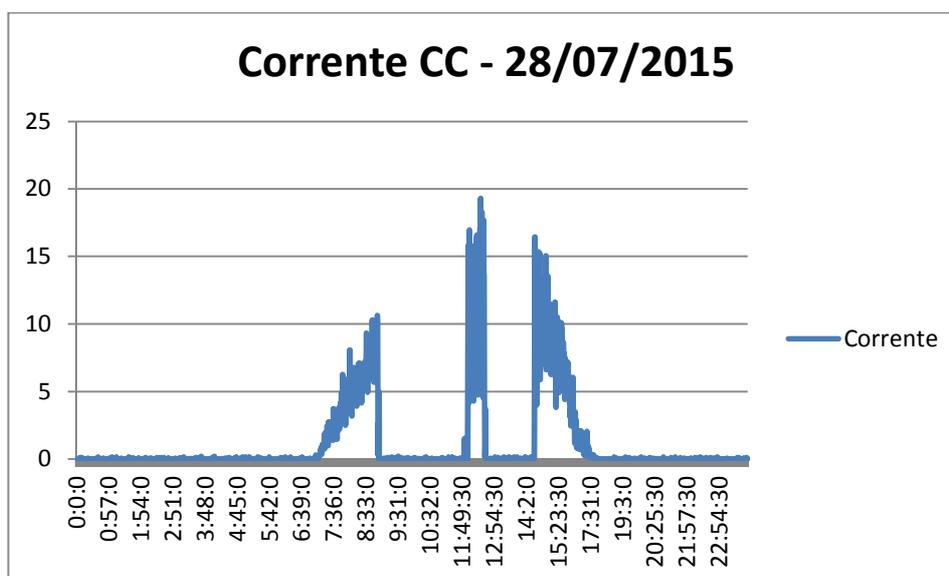


Gráfico 22: Corrente no Lado CC medida no dia 28/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

É possível verificar no gráfico de consumo de corrente do lado CC as descontinuidades causadas pelos desligamentos acidentais do sistema neste dia.

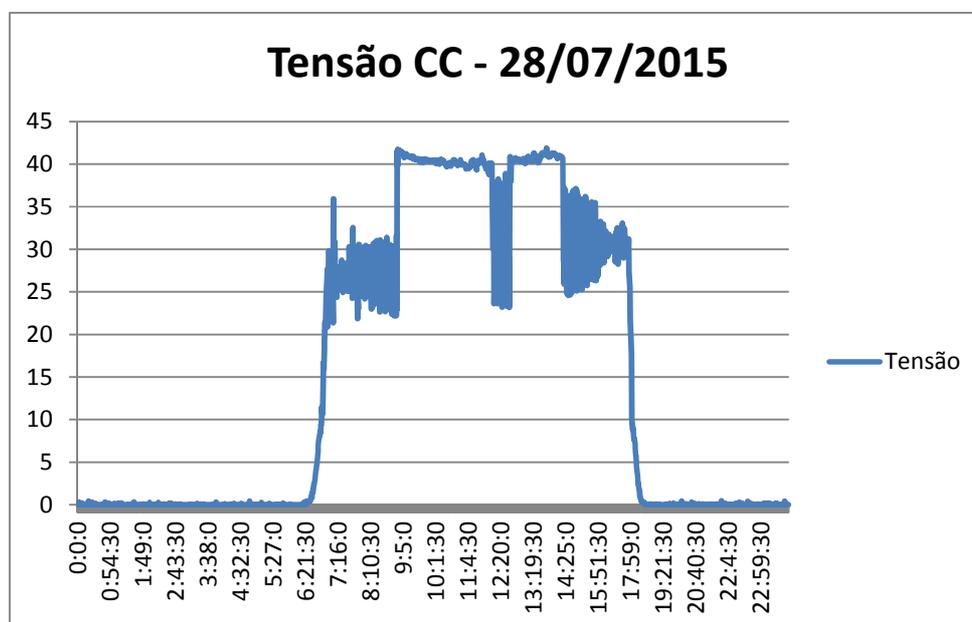


Gráfico 23: Tensão no Lado CC medida no dia 28/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

Por este motivo, nos momentos onde houve o desligamento do sistema a tensão percebida sobre o painel fotovoltaico se estabeleceu em seu máximo, ou seja, a tensão de circuito aberto.

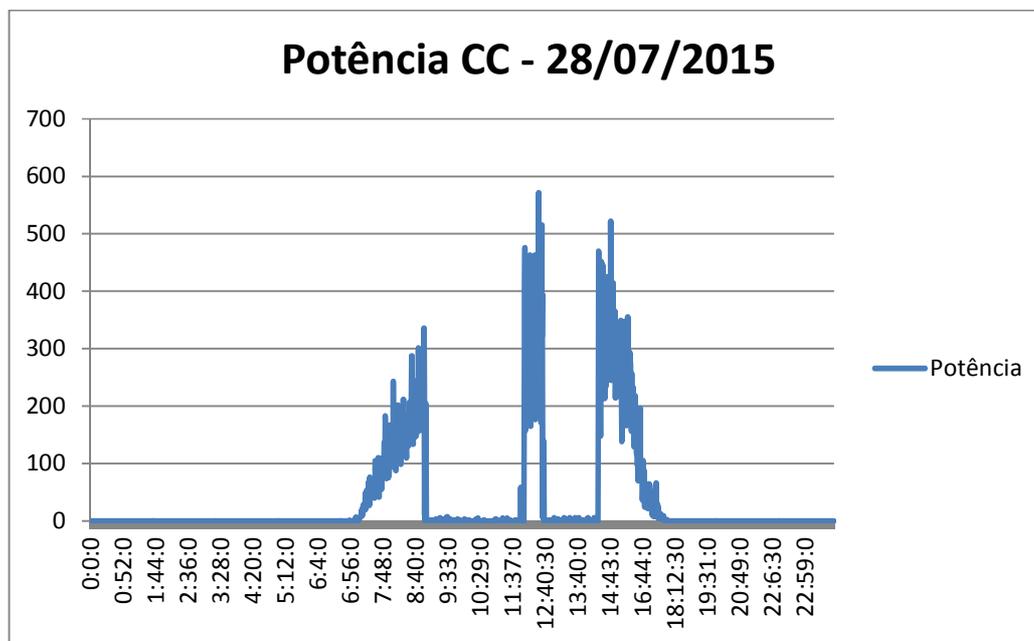


Gráfico 24: Potência no Lado CC medida no dia 28/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

Acompanhando a corrente consumida, durante os momentos em que o sistema esteve desligado não se percebe potência significativa sendo recebida do sistema fotovoltaico. Apenas uma pequena parcela de potência é necessária para manter o inversor ligado.

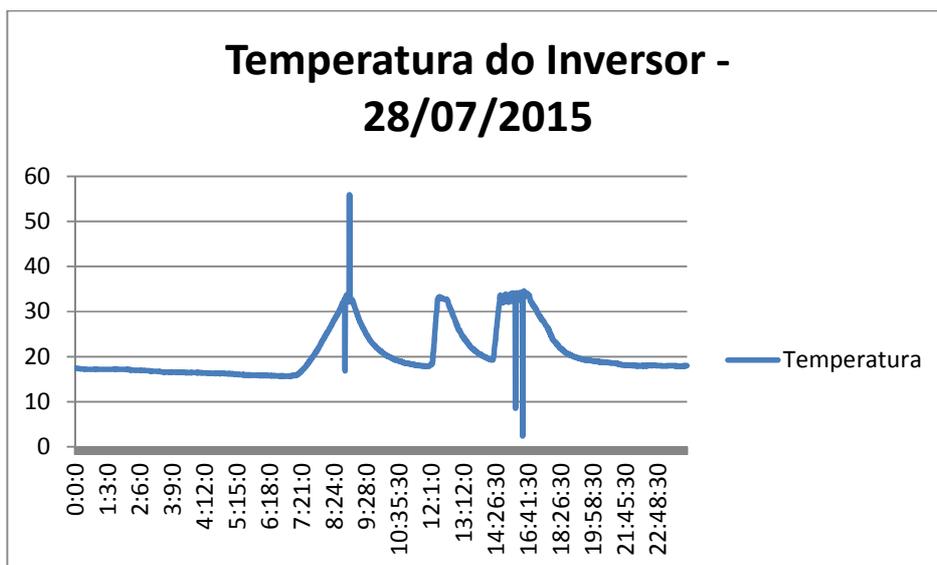


Gráfico 25: Temperatura do inversor medida no dia 28/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

A temperatura aumenta gradativamente e, nos momentos onde há o desligamento do sistema, ela é reduzida. Existem alguns pontos com erros de medição causados, provavelmente, por problemas de temporização na conversão analógico-digital do sensor de temperatura.

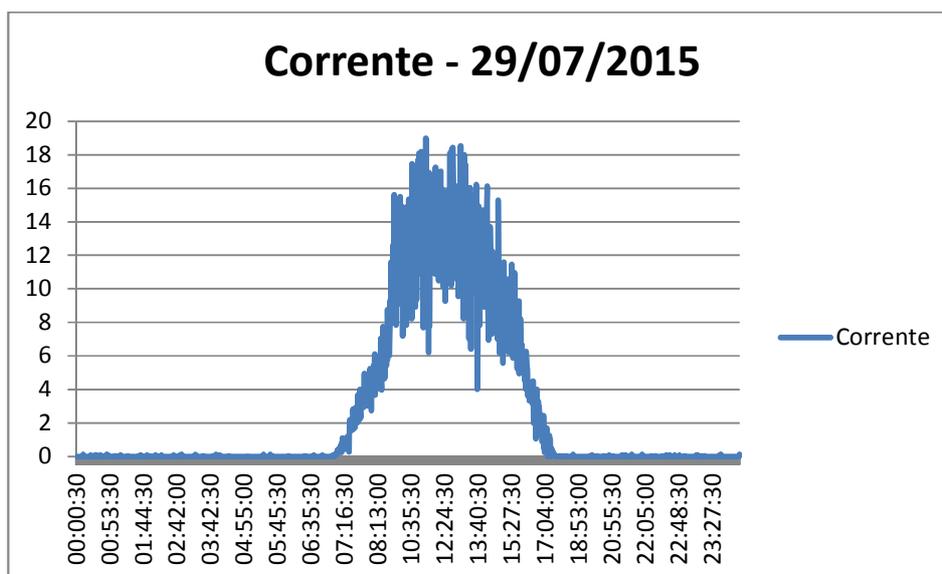


Gráfico 26: Corrente no Lado CC medida no dia 29/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

Neste dia, devido a incidência de nuvens, houve uma sensível variação na corrente entregue pelo painel fotovoltaico.

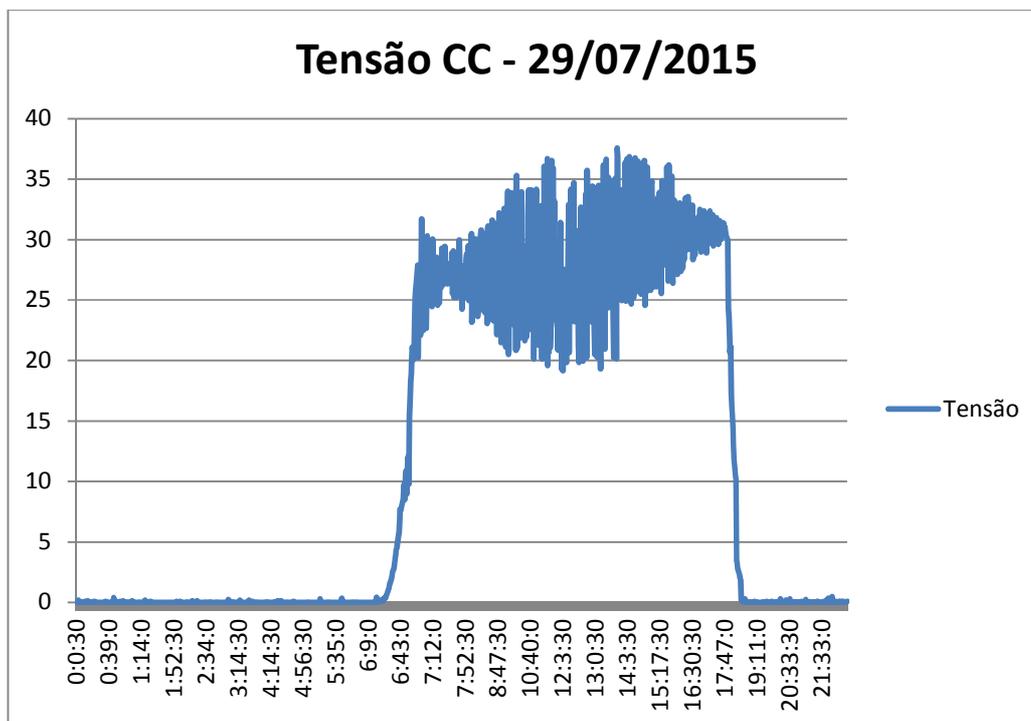


Gráfico 27: Tensão no Lado CC medida no dia 29/07/2015

FONTES: PIAZZETTA, 2015

A mesma variação também é percebida nas medições de tensão, como pode ser visto no Gráfico 27.

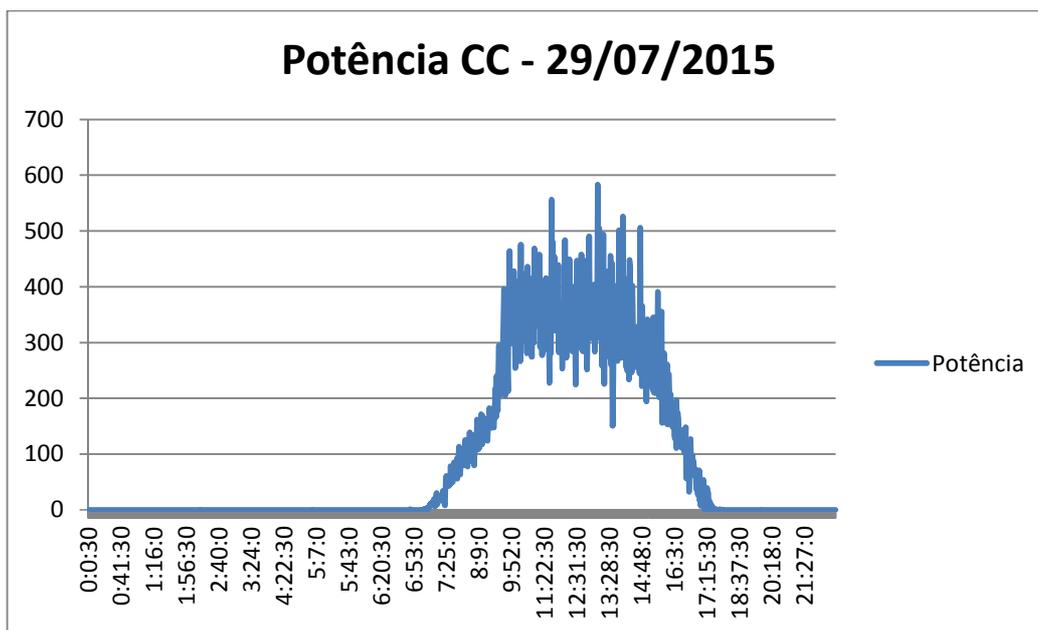


Gráfico 28: Potência no Lado CC medida no dia 29/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

O mesmo fenômeno pode ser observado também na medição de potência, conforme mostrado no Gráfico 28.

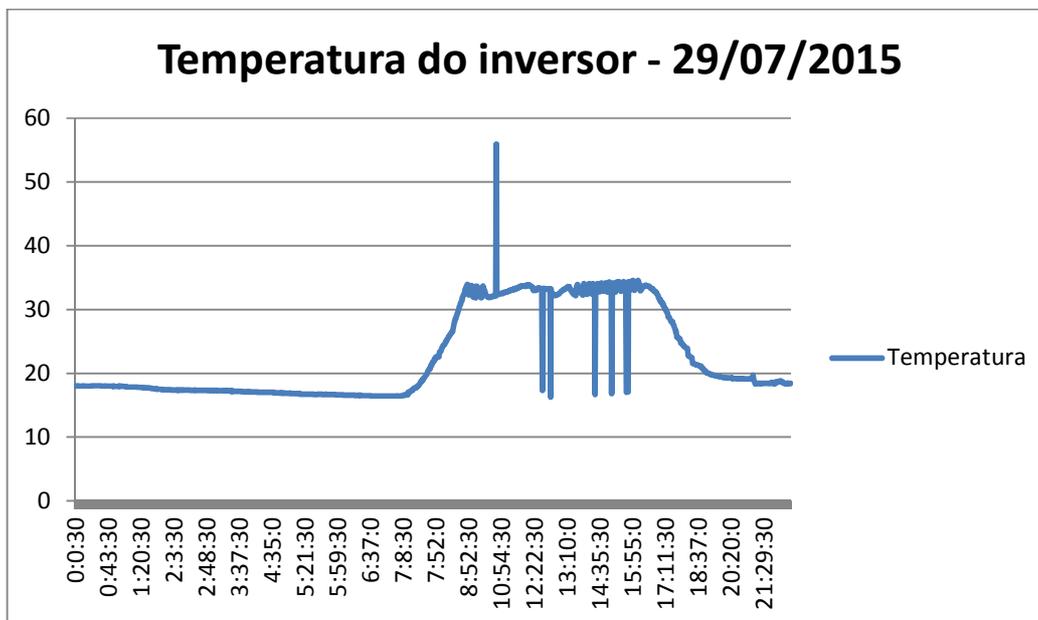


Gráfico 29: Temperatura do Inversor medida no dia 29/07/2015

FONTE: PIAZZETTA, 2015

Observando-se o Gráfico 29 percebe-se um aumento gradual da temperatura ao início da geração e a sua estabilização, com pequenas variações ao longo do período em operação do inversor. Estas pequenas variações são devido a atuação do ventilador interno. Ao final da geração pode-se notar a redução gradativa da mesma até atingir a temperatura ambiente.

4. CONCLUSÕES FINAIS

A primeira verificação relevante foi com relação ao funcionamento do inversor em 127Vca (instalação entre fase e neutro). Embora o manual afirme que o inversor funcione em 127Vca ou 220Vca, quando conectado a uma rede de 127Vca o inversor identifica a rede com sendo desta tensão porém apresenta erro e se desliga. Analisando o circuito interno do inversor existem *jumpers* para definição da tensão de operação. Estes *jumpers* são feitos por pontos de solda. Isto é um ponto negativo para o equipamento, pois restringe muito a aplicabilidade em residências monofásicas onde a tensão nominal de fornecimento é 127Vca. A troca do *jumper* não é uma tarefa que possa ser realizada por um usuário comum.

Com relação à proteção anti-ilhamento, pelos dados coletados verifica-se que o fornecimento de tensão cessa ao final do semiciclo corrente, de forma que, o maior tempo necessário para o desligamento da geração não ultrapassará meio semiciclo. Percebe-se, pelas formas de onda coletadas, que existe uma histerese na geração de tensão, pois a senoide não segue sua forma normal até o fim. Isto ocasiona uma demora de alguns microssegundos no tempo final de desligamento. Contudo, em termos de proteção anti-ilhamento, o equipamento em questão não apresentou falhas.

A partida sob sol pleno também aconteceu da forma esperada, de maneira suave sem que houvessem picos de corrente, por consequência, com o fornecimento de energia sendo gradual à rede.

Um fato relevante é que, em alguns momentos, pode-se verificar que o inversor para de fornecer potência, como se tivesse sido desligado, retomando automaticamente após alguns segundos. Nesta situação verifica-se a atuação do sistema de busca de máxima potência até seu ponto ótimo. Este é um comportamento absolutamente aleatório, tanto que só foi observado em alguns dias. Por diversas vezes o sistema operou completamente isento destes desligamentos. Esse é um dos resultados mais agudos deste trabalho, pois atesta que o equipamento pode apresentar comportamento irregular e com isso não é possível garantir que as demais especificações também serão mantidas com o tempo.

Num balanço geral é justo afirmar que, mesmo sendo um equipamento de baixo custo, sem nenhum tipo de certificação, a sua relação custo-benefício acaba sendo

justificada. O fato de não possuir nenhum tipo de garantia, representante comercial ou distribuidor local, faz com que o risco de problemas na instalação seja por demais elevado se comparado a um similar mais presente no mercado. Estes problemas podem forçar uma parada do sistema por um tempo excessivo se comparado a outro produto com suporte local. Isto deve ser levado em conta ao se instalar este tipo de equipamento.

Ainda no decorrer das atividades deste trabalho foram verificados problemas nos conectores MC4 de ligação dos módulos fotovoltaicos, o que ocasionou uma grande perda de rendimento do sistema. Os mesmos foram retirados e a ligação dos módulos foi feita por emendas soldadas com estanho para garantir o perfeito contato entre os condutores. O conector fornecido com os módulos fotovoltaicos era de baixa qualidade e estava danificado. Se este sistema tivesse sido instalado em um ambiente não controlado, esse defeito poderia não ter sido rapidamente percebido e a consequência seria a diminuição do rendimento e consequente aumento do tempo de *payback* do sistema.

São sugestões para futuros trabalhos:

Análise dos conectores MC4 de mercado para verificação construtiva, atendimento as normas e sua durabilidade;

Análise de vida-útil de equipamentos inversores de baixo custo encontrados no *e-commerce* internacional.

5.REFERÊNCIAS

BURNS, E. M.. **História da Civilização Ocidental**. Editora Globo, 1968.

COPEL - **LISTA DE INVERSORES HOMOLOGADOS PARA MICROGERAÇÃO**.

Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2fhpcopel%2froot%2fpagcopel2.nsf%2fdocs%2fb57635122ba32d4b03257b630044f656>>. Acesso em 21 de setembro de 2015.

NTC905200. **Normas Técnicas Copel NTC905200 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuído ao Sistema da COPEL**. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/ntc905200/\\$FILE/905200.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/ntc905200/$FILE/905200.pdf)>. Acesso em: 01 de outubro de 2015

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS - **Balanco Energético Nacional, 2013** – Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 6 mai. 2014

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Photovoltaic Effect**. Encyclopædia Britannica Online. Encyclopædia Britannica, 2011. Disponível em: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/458271/photovoltaic-effect>>. Acesso 10 de setembro de 2015.

EPALANGA, O. A. S. 2013. **Energia Eólica – Viabilidade Técnica de Projeto Eólico na Região de Urubici**. TCC, Univercidade Federal de Santa Catarina.

FLACH, L. 2012. **O Jeitinho Brasileiro: Analisando suas Características e Influências nas Práticas Organizacionais**. Revista Gestão e Planejamento, Salvador.

GAZETA DO POVO, **Copel aprova reajuste de 24% na tarifa e adia diferença para 2015**. Disponível em <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/copel-aprova-reajuste-de-24-na-tarifa-e-adia-diferenca-para-2015-eag06nkpreykplfhmqd52mq1a>>. Acesso em 12.jan. 2015

GIL, A. C. 1995. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas.

GLOBO, 2015. **Falta de fiscalização nas fronteiras facilita contrabando e tráfico-**
<http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2015/09/falta-de-fiscalizacao-nas-fronteiras-facilita-contrabando-e-trafico-diz-tcu.html> acesso em 10 de set de 2015.

GOETZBERGER, A.; HOFFMANN V.U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Berlin: Springer, 2005.

GREEN, M. A. et al. **Solar cell efficiency tables: version 44**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 8, p. 701-710, 2014.

IGLÉSIAS, F. 1981. **A Revolução Industrial**. São Paulo: Brasiliense.

KREUTZ, G. 2003. **Photovoltaik: Aus dem Sonnenlicht Strom erzeugen**. Neue Energie vom Bauernhof.

PIAZZETTA, D. L. **Montagem de um Sistema de Aquisição de Dados para uma Instalação Solar Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica** (Trabalho de Conclusão de Curso). Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba, 2015.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Wiley, 2005.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2006.

PETRY, B. M. 2012. **Desenvolvimento e aplicação de uma Ferramenta de Análise de avariada de Eletricidade (FATE)**. Disponível em <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/12434/8351>. Acesso em 15 de janeiro de 2015.

PINTO NETO, AIMÉ FLEURY DE CARVALHO. **Qualificação e Etiquetagem de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede** - USP. São Paulo: USP, 2012.

PRADO, M. C. A. 2005. **‘Jeitinho’ e Cultura Organizacional Brasileira – Ultrapassando a Abordagem de Integração**. Relatório de Pesquisa FGV-EAESP/GV Pesquisa. Disponível em http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/3213/P00337_1.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 de setembro de 2015.

QUASCHNING, V. **Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung - Simulation**. Hanser Verlag München 2009.

REN21. **Renewables 2014 Global Status Report**. Paris, França: Worldwatch Institute, 2014.

SEN, Z. **Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques**. Springer 2008.

URBANETZ JR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que possam afetar a Conectividade** (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2010.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J. R. 2012. **Energia Solar Fotovoltaica – Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Editora Érica.