



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LUCAS SANTOS DE MELO

**SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE  
ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO**

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2014

LUCAS SANTOS DE MELO

SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE  
ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2014

LUCAS SANTOS DE MELO

# SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Energias Renováveis

Aprovado em        /        /

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

**Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram nesta longa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por tudo de bom que tem acontecido na minha vida e principalmente por ter me dado os pais maravilhosos que tenho.

Agradeço a meus pais, Luis e Celmar, por terem me proporcionado uma boa educação, por estarem sempre presentes, pelo apoio em momentos difíceis e por me oferecerem todas as condições de vencer na vida.

Agradeço à minha namorada, Lizzia, por estar sempre ao meu lado, pelos seus conselhos, por toda sua dedicação, amor, compreensão e companheirismo que só vieram acrescentar para que cada dia eu me torne uma pessoa melhor.

Agradeço toda a minha família, por tudo que me proporcionaram.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a minha vida. Aos amigos dos tempos de colégio, às muitas amizades feitas na universidade e aos amigos de estágio.

Agradeço também ao meu orientador, Leimar de Oliveira, pelo apoio, ajuda e orientação para a realização do Trabalho de Conclusão de Curso.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é proporcionar uma visão geral das tecnologias do processo da geração de energia solar fotovoltaica. Para isto, será realizado um estudo de caso de umas das principais usinas solares do Brasil. Ao longo do desenvolvimento deste, será feita uma revisão bibliográfica sobre os princípios da tecnologia fotovoltaica, além de uma análise do panorama global no que diz respeito ao emprego desta tecnologia. Os diversos componentes dos sistemas solares fotovoltaicos são abordados, destacando suas principais características e funcionalidades dentro do sistema. Após a fixação de todos os conceitos básicos da tecnologia, será apresentada a usina. Esta abordagem incluirá o estudo de viabilidade do projeto, os principais motivos para sua criação, a estruturação do empreendimento, a fase de implantação e os primeiros anos de operação. Os principais equipamentos da usina e seus dados técnicos são apresentados. Por fim, será feita uma breve análise do regime de operação da usina.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Tecnologia Fotovoltaica, Usina Solar, Conectado à Rede.

## ABSTRACT

The main purpose of this completion course paper is to provide an overview of the technologies of the solar photovoltaic generation process. For this, a case study of a major solar power plants in Brazil will be performed. Throughout the development of this work, a literature review on the principles of photovoltaic technology will be made in addition to an analysis of the global overview of this technology. The various components of solar photovoltaic systems are discussed, highlighting its main features and functionality within the system. After setting all the basics of the technology, the power plant will be presented. This approach includes the feasibility study of the project, the main reasons for its creation, structuring the enterprise, the deployment phase and the early years of operation. The main power plant equipment and its technical data are presented. Finally, a brief analysis of the regime of operation of the plant will be made.

**Keywords:** Solar Energy, Photovoltaic Technology, Solar Power Plant, On Grid.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Alexandre Edmond Becquerel: Primeiro a observar o Efeito Fotovoltaico.....	15
Figura 2.2 Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e a primeira célula solar desenvolvida em 1954	16
Figura 2.3 Capacidade acumulada de geração de energia fotovoltaica no mundo.....	17
Figura 2.4 Distribuição percentual da radiação solar incidente na superfície terrestre.....	18
Figura 2.5 Comparação entre as intensidades dos espectros da radiação solar e terrestre.....	19
Figura 2.6 Sistema de aquecimento solar com projeto popular para piscina.....	20
Figura 3.1 Níveis de energia entre os materiais.....	22
Figura 3.2 Junção pn de uma célula fotovoltaica de silício.....	24
Figura 3.3 Conversão da energia luminosa em uma célula de silício.....	25
Figura 3.4 Célula fotovoltaica de silício monocristalino.....	26
Figura 3.5 Célula de silício policristalino.....	27
Figura 3.6 Célula de silício amorfo.....	29
Figura 3.7 Módulo solar CIGS.....	30
Figura 3.8 Módulo solar de CdTe.....	31
Figura 3.9 Células solares híbridas.....	32
Figura 3.10 Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica de silício.....	33
Figura 3.11 Variação mensal e anual do fator de capacidade de uma usina solar de 190kWp conectada à rede.....	34
Figura 4.1 Painéis solares conectados em paralelo.....	36
Figura 4.2 Painéis solares conectados em série.....	36
Figura 4.3 Controlador de carga de 7A (12V).....	37
Figura 4.4 Inversores de onda quadrada.....	40
Figura 4.5 Inversores de onda senoidal.....	41
Figura 4.6 Inversores de onda senoidal modificada.....	41
Figura 4.7 Comparação entre as ondas portadoras $V_p$ (triangular) e de referência $V_r$ (senoidal), para geração dos pulsos de comando das chaves do inversor VSI-PWM senoidal.....	43
Figura 4.8 Banco de baterias solares constituído por 8 blocos de 6V, 200Ah.....	45
Figura 5.1 Vista geral da Usina Solar de Tauá (1 MW).....	46
Figura 5.2 Localização do município de Tauá.....	47
Figura 5.3 Infográfico esquemático da geração de energia solar.....	51
Figura 5.4 Quantidade de equipamentos por etapa no fluxo de geração de energia dentro da usina.....	52
Figura 5.5 Diagrama Unifilar Geral da Usina Solar de Tauá.....	53
Figura 5.6 Pannel fotovoltaico KD215GH-2PU.....	54
Figura 5.7 String Control Box da fabricante Ingeteam.....	56
Figura 5.8 Inversor Ingecon Sun 100 TL, da fabricante INGETEAM.....	57
Figura 5.9 Diagrama unifilar do quadro geral de baixa tensão.....	59
Figura 5.10 Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) instalado na usina.....	60
Figura 5.11 Placa de dados com as características elétricas do transformador elevador.....	61
Figura 5.12 Transformador Elevador ZILMER - 1250 kVA - 220 V / 13,8 kV.....	62
Figura 5.13 Cubículo de Média Tensão da fabricante EFACEC, montado pela INGETEAM.....	64
Figura 5.14 Geração de Energia Líquida e Projetada de Julho/2011 até Setembro/2012.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Quantidade de energia para vencer a banda proibida em semicondutores .....	23
Tabela 5.1 Fontes Normais Climatológicas do INMET, referentes ao município de Tauá.....	48
Tabela 5.2 Dados técnicos do painel fotovoltaico Kyocera (STC). .....	55
Tabela 5.3 Especificação técnica da Caixa de Controle - String Control Box.....	57
Tabela 5.4 Características técnicas do Inversor Ingecon Sun 100 TL.....	58
Tabela 5.5 Características gerais do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT).....	60
Tabela 5.6 Características elétricas do Disjuntor, TC's, TP's, Chave Seccionadora e Medidor digital presentes no cubículo de MT.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica  
APEC - Cooperação Econômica da Ásia e do Pacífico  
BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento  
CA - Corrente Alternada  
CC - Corrente Contínua  
CIGS - Disseleneto de Cobre, Gálio e Índio  
CIS - Disseleneto de Cobre e Índio  
COELCE - Companhia Energética do Ceará  
COEMA - Conselho Estadual de Meio Ambiente  
EVA - Etil Vinil Acetato  
FC - Fator de Capacidade  
GPS- Sistema de Posicionamento Global  
HCI - Células Fotovoltaicas Híbridas  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
LI - Licença de Instalação  
LO - Licença de Operação  
LP - Licença Prévia  
ONAN - Óleo Natural Ar Natural  
PCH - Pequena Central Hidrelétrica  
PET - Politereftalato de etileno  
PWM - *Pulse Width Modulation*  
QGBT - Quadro Geral de Baixa Tensão  
SEMACE - Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
STC - Condições Padrão de Teste  
TC - Transformador de Corrente  
TP - Transformador de Potencial  
UECE - Universidade Estadual do Ceará

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Ilustrações.....	viii
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	x
Sumário.....	xi
1 Introdução .....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Estrutura do Trabalho .....	13
2 Energia Solar Fotovoltaica.....	15
2.1 Histórico .....	15
2.2 Radiação Solar.....	18
2.2.1 Composição Espectral.....	19
2.2.2 Aproveitamento térmico .....	20
2.2.3 Conversão direta da radiação solar em energia elétrica.....	21
3. Tecnologia Fotovoltaica.....	22
3.1 Efeito Fotovoltaico .....	22
3.2 Célula Fotovoltaica.....	25
3.2.1 Silício (si) Monocristalino .....	26
3.2.2 Célula de Silício Policristalino.....	27
3.2.3 Células solares de películas finas.....	27
3.2.3.1 Célula de silício amorfo .....	28
3.2.3.2 Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio/Selênio (CIS/CIGS).....	29
3.2.3.3 Telureto de Cádmio (CdTe).....	30
3.2.4 Células Fotovoltaicas Híbridas (HCI).....	31
3.3 Modelo Equivalente de uma Célula Fotovoltaica .....	32
3.4 Fator de capacidade.....	34
4 Componentes Básicos de um Sistema Solar Fotovoltaico.....	35
4.1 Painéis solares.....	35
4.2 Controladores de carga .....	37
4.3 Inversores .....	38
4.3.1 Inversores de onda quadrada.....	40
4.3.2 Inversores de onda senoidal.....	41
4.3.3 Inversores de onda senoidal modificada .....	41
4.3.4 Inversores PWM .....	42
4.3.5 Inversores PWM senoidal .....	42
4.4 Banco de Baterias .....	44
5 Usina Solar de Tauá .....	46
5.1 Introdução.....	46
5.2 Localização.....	47
5.3 Estudo de Viabilidade.....	49
5.4 Impacto Ambiental .....	49
5.4.1 Licenciamento ambiental: Passo a passo.....	50
5.5 Estruturação do Empreendimento.....	50
5.5.1 Painéis Solares .....	54
5.5.2 <i>String box control</i> : .....	56
5.5.3 Inversores.....	57
5.5.4 Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT).....	59
5.5.5 Transformador Elevador.....	60
5.5.6 Cubículo de Média Tensão .....	62
5.6 Regime de Operação da Usina.....	64
6 Conclusão.....	66
Bibliografia .....	68

# 1 INTRODUÇÃO

A geração da energia elétrica através da luz solar faz parte de um grupo de energias renováveis, também conceituadas como complementares. Neste grupo se enquadram as usinas à biomassa, eólicas, geotérmicas e maremotrizes. Nos dias de hoje há uma tendência para que as usinas deste grupo passem a ter uma maior penetração na matriz energética mundial, fortalecendo a ideia de alcançar uma geração sustentável e que apresente menos impactos ambientais.

A conversão da energia solar em energia elétrica ocorre de duas formas: geração de vapor e pelo efeito fotovoltaico. Neste fenômeno, a radiação solar emitida pelo sol é convertida em eletricidade a partir de materiais semicondutores. No Brasil, a produção da energia solar fotovoltaica tem ocorrido predominantemente a partir de pequenas unidades produtoras. Estas unidades buscam fornecer energia elétrica para as regiões mais remotas não pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Os sistemas solares fotovoltaicos isolados são caracterizados por não serem conectados à rede elétrica. Em locais remotos um sistema isolado é muitas vezes a opção econômica mais viável e prática para se obter energia elétrica. Estes sistemas possuem baterias que asseguram o fornecimento de energia em períodos sem sol e de nebulosidade.

Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos de conexão à rede são caracterizados por estarem integrados à rede elétrica que abastece o país. Ao contrário dos sistemas isolados que atendem a um propósito específico e local, estes sistemas também são capazes de abastecer a rede elétrica com energia que pode ser utilizada por qualquer consumidor da mesma.

Os sistemas conectados possuem algumas vantagens com relação aos sistemas isolados. Eles são caracterizados por não utilizarem baterias e controladores de carga. Isso os torna cerca de 30% mais eficientes. Além disso, eles asseguram que toda a energia seja utilizada, de maneira interna no próprio sistema ou em outro ponto da rede.

Os sistemas fotovoltaicos com conexão à rede são compostos por painéis solares e inversores. Os inversores são utilizados para transformar a corrente contínua em alternada e elevar a tensão para o valor desejado. Além disso, eles devem sincronizar o

sistema com a rede elétrica. Como o sistema está conectado à rede, não há a necessidade de baterias, tendo em vista que a própria rede poderá compensar a falta de energia.

Algumas iniciativas isoladas para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica passaram a surgir nos últimos anos. Um grande exemplo disso foi a instalação da Usina Solar de Tauá, cidade localizada no interior do estado do Ceará, a 360km da capital Fortaleza. Inaugurada em agosto de 2011, esta foi a primeira usina solar em escala comercial da América Latina.

A usina apresenta uma potência instalada de aproximadamente 1MWp e possui 4860 painéis solares, com capacidade de expansão para até 50MWp. A capacidade instalada da usina é suficiente para abastecer 1.500 residências, produzindo cerca de 1,56 GWh por ano. A usina apresenta conexão com o sistema elétrico através de uma rede de 13,8kV conectada à subestação de Tauá (69kV/ 13,8kV), pertencente à Companhia Energética do Ceará (COELCE). Para a sua instalação a usina utilizou uma área de 12 mil metros quadrados.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é realizar o estudo de uma das principais usinas fotovoltaicas conectadas à rede elétrica do Brasil. Apresentar a tecnologia solar fotovoltaica e abordar as características e funcionalidades dos principais componentes da Usina Solar de Tauá, a primeira usina com geração fotovoltaica em escala comercial no Brasil e a maior usina com capacidade instalada no país, capaz de gerar até 5MW quando operar em toda sua capacidade.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em 6 capítulos. O primeiro capítulo é destinado à parte introdutória, apresentando uma contextualização geral no âmbito energético e a utilização da energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica. Os capítulos 2, 3 e 4 destinam-se exclusivamente a revisões bibliográficas e teóricas sobre o tema principal proposto no trabalho. O capítulo 2 aborda um breve histórico da utilização da energia solar fotovoltaica, além de alguns conceitos sobre a radiação solar. No capítulo 3 o foco será dado à tecnologia

fotovoltaica empregada para a conversão da energia luminosa do sol em energia elétrica. Neste capítulo está incluso o princípio básico de geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico, os diferentes tipos de materiais empregados na fabricação das células fotovoltaicas, apresentando características, processo de fabricação e eficiência final e, no final do capítulo, é apresentado uma modelagem matemática de uma célula fotovoltaica a partir de um circuito elétrico equivalente. O capítulo 4 destina-se a apresentação dos equipamentos principais que compõem um sistema solar fotovoltaico, identificando suas principais características e funcionalidades. O tema principal deste trabalho de conclusão de curso está apresentado no capítulo 5, abordando um estudo de caso como exemplo de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. O estudo abordará motivações, localização, planejamento, estruturação do empreendimento e os equipamentos que compõe este sistema fotovoltaico. Por fim, as conclusões extraídas pelo autor serão discutidas no capítulo 6.

## 2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Os sistemas solares fotovoltaicos realizam a geração de energia elétrica a partir da radiação eletromagnética solar. Para isto são utilizadas as células fotovoltaicas, construídas a partir de materiais semicondutores. Nos dias de hoje, o silício cristalino é a principal tecnologia do mercado destas células. As células fotovoltaicas são caracterizadas por não armazenarem energia elétrica. Nelas ocorre um fluxo de elétrons que é estabelecido enquanto houver a incidência da luz solar sobre ela. Tal fenômeno é conhecido por efeito fotovoltaico.

### 2.1 HISTÓRICO

Em 1839 Alexandre Edmond Becquerel, físico francês que realizava estudos nas áreas de espectro solar, magnetismo, eletricidade, dentre outras, descobriu o efeito fotovoltaico. Em seu experimento ele utilizou uma célula eletrolítica composta de dois eletrodos de metal em uma solução condutora e percebeu que a incidência de luz em um dos eletrodos da célula produzia uma diferença de potencial elétrico. O fenômeno ocorre quando a radiação solar apresenta energia suficiente para transferir os elétrons das bandas de valência para as bandas de condução.

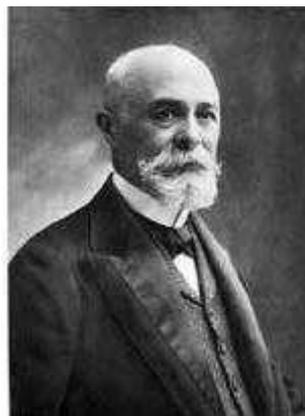


Figura 2.1. Alexandre Edmond Becquerel: Primeiro a observar o Efeito Fotovoltaico. [1]

A primeira célula fotovoltaica foi construída por Charles Fritts em 1883 e utilizava selênio revestido por uma camada muito fina de ouro como material

semicondutor. A eficiência da célula de selênio era extremamente baixa, em torno de 1% apenas.

Em 1905 Albert Einstein conseguiu explicar de maneira satisfatória o efeito fotoelétrico, ganhando com isso o Prêmio Nobel daquele ano. Esta explicação aliada ao desenvolvimento tecnológico que ocorreu no início do século XX contribuíram para a produção da primeira célula fotovoltaica de silício de junção PN. A célula de silício apresentava eficiência de 6% e foi desenvolvida em laboratório nos Estados Unidos pelos pesquisadores Gerald Pearson, Calvin Fuller e Daryl Chapin, em 1954.



Figura 2.2. Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e a primeira célula solar. [2]

Com a crise petrolífera de 1973, surgiu a necessidade de buscar novas formas de geração de energia. Isso estimulou o estudo das células fotovoltaicas, caracterizadas por apresentar uma tecnologia renovável. Nos Estados Unidos, diversas empresas de petróleo diversificaram os seus investimentos, passando a englobar a produção de energia a partir da radiação solar. Entretanto, o principal fator que acelerou o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica foi a corrida espacial. Para longos períodos de permanência no espaço as células solares apresentam-se ainda hoje como a melhor opção para fornecer a quantidade de energia necessária. Isto também é válido para a energia utilizada por satélites.

Na atualidade, há uma forte tendência de crescimento do setor devido ao aumento da eficiência energética e à constante redução dos custos dessas tecnologias. Em junho de 2013 a China tornou-se o líder mundial em produção de energia a partir de grandes usinas solares. Em seis meses, o país instalou 40 novos parques, que somam ao todo 3 gigawatts (GW), superando a Alemanha em número de grandes instalações

fotovoltaicas. Com a expansão da locomotiva asiática, o potencial global foi elevado para 15GW, um aumento de 35% desde dezembro de 2012, com total de 596 parques em todo o mundo. Deve-se levar em consideração que o estudo para obter esses dados foi limitado às instalações com no mínimo 10 megawatts (MW) de capacidade, o suficiente para abastecer cerca de 3 mil residências por ano. Os demais países que estão entre os líderes da produção de energia solar são: Estados Unidos, Índia, Espanha, Itália, Canadá e França. [3]

### Capacidade fotovoltaica instalada acumulada no mundo em MW

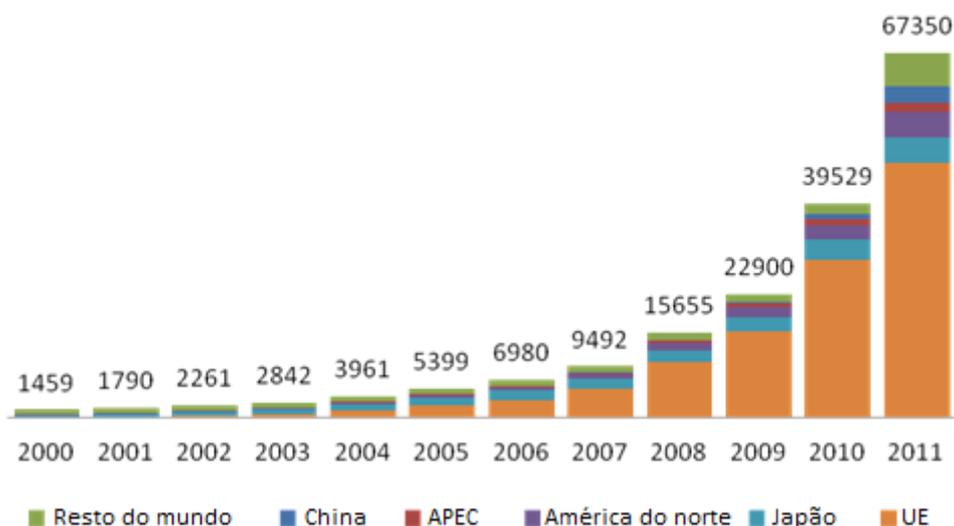


Figura 2.3. Capacidade acumulada de geração de energia fotovoltaica no mundo. [4]

Apesar de ainda estar distante dos líderes, o Brasil possui uma grande extensão territorial, além de sol abundante, tornando-se assim um país com grande potencial para a geração de energia solar. De acordo com estudos recentes, o Brasil recebe energia solar da ordem de  $10^{13}$  MWh anuais, o que corresponde a cerca de 50 mil vezes o seu consumo anual de eletricidade. Entretanto, possui poucos equipamentos de conversão de energia solar em outros tipos de energia, que poderiam estar operando e contribuindo para diminuir a pressão para construção de barragens para hidrelétricas e queima de combustíveis fósseis. O custo da energia solar no Brasil ainda é elevado. Para se ter uma ideia, as grandes hidrelétricas – principais fontes de energia do Brasil – produzem energia elétrica a um custo de R\$ 90 por megawatt/hora. Por outro lado, a energia solar custa R\$ 300 por megawatt/hora [5]. Faltam políticas que incentivem a inovação tecnológica, que reflitam no desenvolvimento de um parque industrial nacional e no aumento da oferta de equipamentos solares.

## 2.2 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é um fenômeno de natureza eletromagnética que se propaga segundo um movimento ondulatório. A radiação pode ser utilizada como fonte de energia térmica, como para o aquecimento de fluidos e ambientes. Além disso, ela pode ser convertida diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico que ocorre nos materiais semicondutores.

Atualmente, duas das principais finalidades para o aproveitamento da energia solar são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. A primeira é muito utilizada nas regiões mais frias, enquanto a segunda é adequada para comunidades isoladas da rede de energia elétrica.

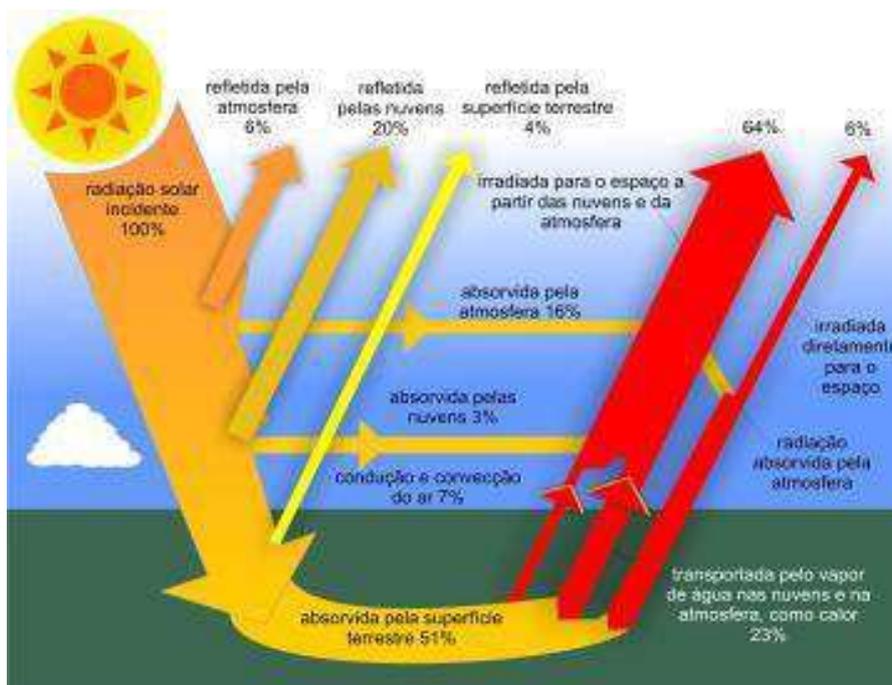


Figura 2.4. Distribuição percentual da radiação solar incidente na superfície terrestre. [6]

Para maximizar o aproveitamento da radiação solar, devemos ter inicialmente boas condições climáticas e atmosféricas. Neste sentido o Brasil é amplamente favorecido por suas características tropicais. Outro fator determinante é a posição dos painéis solares, que é ajustada de acordo com a latitude e o período do ano de determinada região.

### 2.2.1 COMPOSIÇÃO ESPECTRAL

A radiação solar se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, e atinge a superfície terrestre sob três formas principais: 55% sob a forma de raios infravermelhos, que possuem grande poder calorífico; 42% sob a forma de radiações dentro do espectro visível – luz; 3% sob a forma de raios ultravioleta (UV), radiações de pequeno comprimento de onda e grande quantidade de energia [7]. Através da dualidade onda-partícula da luz, observam-se aspectos ondulatórios e quânticos. Desse modo, a radiação eletromagnética é constituída de dois campos (elétrico e magnético) perpendiculares entre si. Esses campos também atuam oscilando de maneira perpendicular à direção de propagação da onda. Em termos de comprimentos de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 100 nm a 3000 nm (3  $\mu\text{m}$ ), e possui uma máxima densidade espectral em torno dos 550 nm, comprimento de onda que corresponde sensivelmente à luz verde-amarelada.

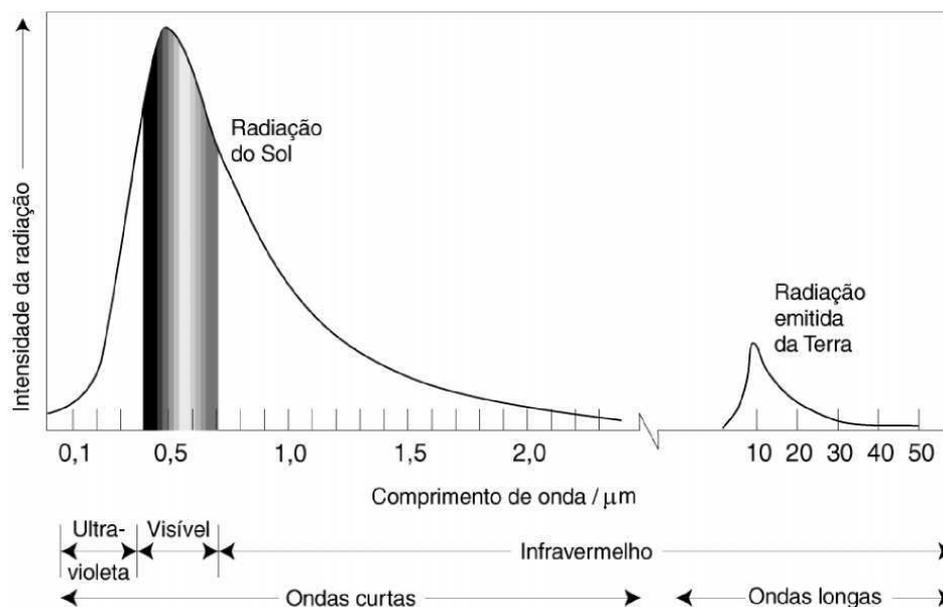


Figura 2.5. Comparação entre as intensidades dos espectros da radiação solar e terrestre. [7]

Como se pode observar na Figura 2.5, a parte mais alongada do espectro tem a sua máxima intensidade na banda dos infravermelhos próximos, decaindo lentamente com a diminuição da frequência. Por outro lado, a radiação ultravioleta é a radiação mais energética, ou seja, apresenta o comprimento de onda mais curto. A maior parte da radiação UV emitida pelo sol é absorvida pela atmosfera terrestre. Os raios UV que penetram na Terra são capazes de agredir a pele humana, os olhos, e os genes. Podem provocar queimaduras, rugas, envelhecimento até mesmo câncer.

### 2.2.2 APROVEITAMENTO TÉRMICO

Os coletores solares são utilizados para absorver a radiação solar e realizar o aquecimento de água. Seu uso ocorre tanto no setor residencial como no comercial. O coletor solar é instalado no teto das residências e edificações, porém na maioria dos casos a energia solar incidente sobre a superfície é insuficiente, sendo necessária a instalação de vários metros quadrados de coletores. Para o suprimento de água quente de uma residência típica (três ou quatro moradores), são necessários cerca de  $4\text{m}^2$  de coletor [8].



Figura 2.6. Sistema de aquecimento solar com projeto popular para piscina. [9]

Entretanto, alguns sistemas necessitam temperaturas mais elevadas. Neste caso, são utilizados os concentradores solares, responsáveis por captar a energia solar incidente numa área relativamente grande e concentrá-la numa área bem menor. Os concentradores solares normalmente possuem uma superfície refletora em formato parabólico, deste modo os raios incidentes são refletidos para uma superfície menor (foco), onde está localizado o material a ser aquecido. A eficiência dos sistemas parabólicos pode chegar a até 22% [8].

### 2.2.3 CONVERSÃO DIRETA DA RADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA

A radiação solar incidente sobre determinados materiais, em especial os semicondutores, pode ser convertida diretamente em energia elétrica. O efeito termoelétrico é caracterizado por apresentar uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, no instante em que essa junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades dos fios. O efeito fotovoltaico é decorrente da excitação dos elétrons em determinados materiais devido à incidência de luz solar. Na conversão da radiação solar em energia elétrica o silício é o material mais empregado. O principal problema para a geração de eletricidade em escala comercial é que as células solares ainda apresentam custo elevado.

## 3. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

### 3.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

A absorção da luz solar por células fotovoltaicas faz surgir uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, denominada de efeito fotovoltaico. Conforme dito anteriormente, o silício é amplamente empregado na construção dos painéis fotovoltaicos. O silício é obtido a partir do quartzo e o Brasil é o país que detém as maiores reservas mundiais deste mineral. Porém, como muitas das empresas operam no regime de garimpo e de forma muito rudimentar, elas não tem base tecnológica para agregar valor e explorar toda a potencialidade de uso do mineral. As células solares exigem silício com alto grau de pureza para que funcionem de forma eficiente. Apesar de possuir grandes reservas de quartzo, o Brasil acaba importando o silício purificado, encarecendo o custo dos painéis solares.

Os materiais semicondutores possuem características intermediárias entre os condutores e isolantes. No zero absoluto, eles apresentam uma faixa de energia completamente preenchida por elétrons, chamada banda de valência, e uma faixa totalmente vazia, denominada banda de condução. Entre essas bandas existe a chamada banda proibida.

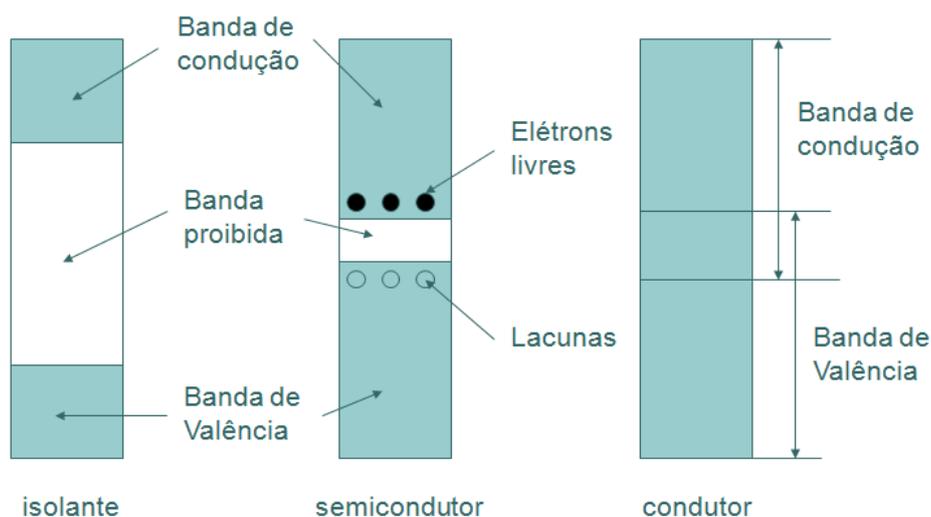


Figura 3.1. Níveis de energia entre os materiais. [10]

Os semicondutores são caracterizados por possuir uma banda proibida de largura pequena. Ao aquecer o material, alguns elétrons saem da banda de valência e passam

para a banda de condução. Isso é possível devido ao ganho de energia no elétron. Desta forma, em materiais semicondutores um aumento da temperatura provoca uma redução da resistência oferecida à passagem da corrente elétrica, devido a maior repulsão causada na união dos mesmos.

Materiais semicondutores, como o silício, necessitam de uma energia mínima da ordem de 1eV para vencer a banda proibida. A energia mínima para outros materiais pode ser observada na Tabela 3.1:

Tabela 3.1. Quantidade de energia para vencer a banda proibida de diferentes semicondutores [11]

<b>Material</b>	<b>Energia para vencer a banda proibida (eV)</b>
Boro (B)	1,1
Silício (Si)	1,12
Germânio (Ge)	0,72
Fósforo (P)	1,5
Arsênio (As)	1,2
Enxofre (S)	2,5
Selênio (Se)	1,7
Telúrio (Te)	0,36
Iodo (I)	1,25

Os átomos de silício possuem quatro elétrons de ligação que se unem aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao se adicionar átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado. Deste modo, surgirá uma lacuna e, com pouca energia térmica, este elétron poderá se descolar para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n.

Por outro lado, ao se introduzir átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, faltará um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Neste caso, temos a chamada lacuna e, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que a lacuna se desloque. Diz-se, portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante p.

Por meio da união dos cristais do tipo n e p, uma junção pn é formada. Nesta junção os elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram as lacunas que os capturam. Com isso, surge um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo. Logo, um campo elétrico na região da junção passa a existir. O processo atinge o

equilíbrio quando o campo elétrico cria uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n.

Quando a junção pn é exposta a fótons com energia maior que a banda proibida, surgirá a geração de pares elétron-lacuna que serão acelerados por efeito do campo elétrico em sentidos opostos, gerando assim uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencia já definida anteriormente como efeito fotoelétrico.

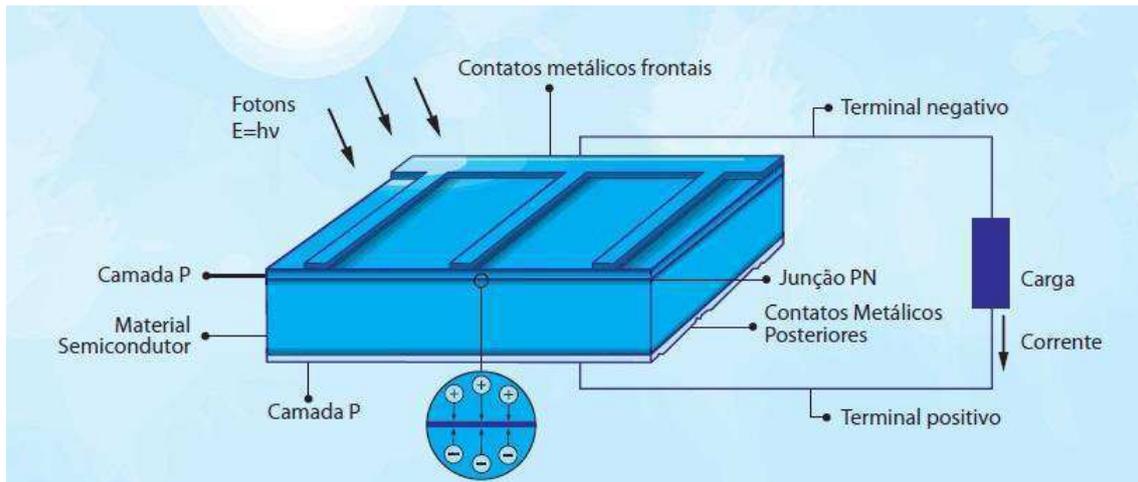


Figura 3.2. Célula fotovoltaica cortada transversalmente: Efeito fotoelétrico. [12]

Apenas os fótons com energia maior do que o gap do semicondutor são absorvidos e deslocam os elétrons para a banda de condução. A energia que um fóton necessita para provocar excitação é dada por:

$$E = \frac{12400}{\lambda c} (eV). \quad (1)$$

Onde  $\lambda c$  é o comprimento de onda do fóton.

Se o comprimento de onda da radiação excede  $\lambda c$ , a energia do fóton não é suficiente para deslocar o elétron para a banda de condução. A energia mínima para excitação intrínseca é a energia da banda proibida. O comprimento de onda crítico ou de corte de um material ( $\lambda c$ ) é o valor do comprimento de onda acima do qual a energia do fóton não é suficiente para elevar o elétron à banda de condução. Para uma célula de silício, tem-se:

$$\lambda c (Si) = 1,13 \mu m ,$$

$$E(Si) = 1,1 eV. [11]$$

Portanto, o espectro da radiação da luz do sol é um fator limitante no processo de conversão de energia da luz em energia elétrica. Como foi visto, ele se espalha numa ampla faixa e apenas a parcela com comprimento de onda inferior a  $1,13 \mu\text{m}$  é capaz de excitar os elétrons em células de silício. Outro fator é o de que cada fóton só consegue excitar um elétron. Portanto, para fótons com energia superior à energia do gap, haverá um excesso de energia que será convertida em calor. Por fim, mesmo para os elétrons excitados, existe uma probabilidade de que estes não sejam coletados, e não contribuam para a corrente.

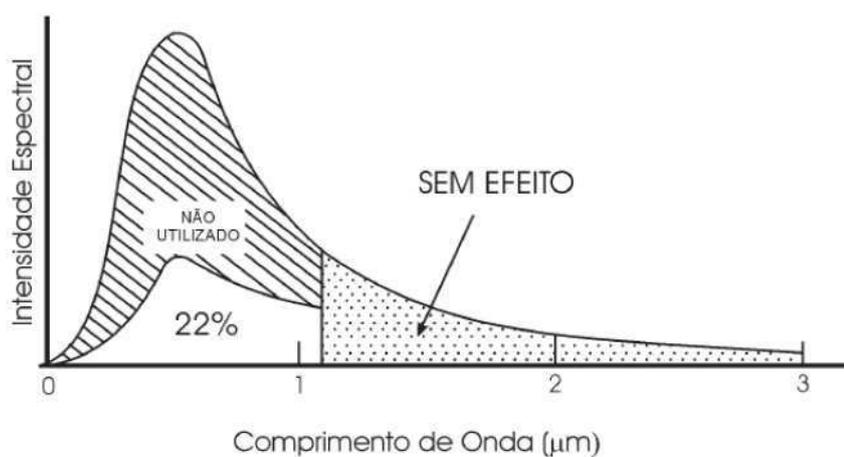


Figura 3.3. Conversão de energia luminosa em uma célula de silício. [11]

Os fatores limitantes no processo de conversão de energia estabelecem a eficiência da célula solar fotovoltaica. A Figura 3.3 ilustra uma combinação desses fatores e o percentual de energia luminosa convertida em energia elétrica (eficiência da célula).

## 3.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica, também chamada de célula solar, é um dispositivo capaz de realizar a conversão direta da luz em energia elétrica por meio do efeito fotoelétrico. Para captar a energia da luz solar são utilizados conjuntos de células solares chamados de painéis solares. As primeiras células fotovoltaicas apresentavam baixo rendimento, em torno de 1%, além de custo elevado. Na atualidade, no que diz respeito à tecnologia fotovoltaica, um novo recorde de eficiência de 44,7% foi alcançado por uma célula solar

de laboratório desenvolvida pelo Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, da Alemanha. [13]

A maioria das células são as fabricadas a partir do silício e são classificadas de acordo com a sua estrutura molecular: monocristalinas, policristalinas e silício amorfo.

### 3.2.1 SILÍCIO (SI) MONOCRISTALINO

A célula de silício monocristalino é a mais utilizada e comercializada na conversão de energia solar em eletricidade. Este material apresenta o dióxido de silício como matéria-prima. A primeira etapa de fabricação consiste na sua purificação e solidificação, por meio da desoxidação em grandes fornos. A célula fotovoltaica exige que o silício apresente um elevado grau de pureza. Para alcançar as qualificações desejadas faz-se uso de um procedimento denominado de Processo Czochralski. [14]

Neste processo ocorre a fusão do silício juntamente com uma pequena quantidade de dopante, geralmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob controle de temperatura, é possível extrair do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 0,3 mm.

Após a retirada das impurezas e do corte em fatias, são introduzidas impurezas do tipo n, de modo a obter a junção pn. Esse processo é feito através da difusão controlada, onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1500 °C. Depois de introduzir impurezas do tipo n, as pastilhas são equipadas com pistas elétricas e com uma camada de anti-reflexão (AR) na parte frontal.



Figura 3.4. Célula fotovoltaica de silício monocristalino. [14]

Geralmente, as células monocristalinas são as que apresentam a maior eficiência dentro das células fotovoltaicas feitas à base de silício. Atingem uma eficiência em torno de 16% nas células obtidas a partir do processo acima citado [15]. A Figura 3.4 apresenta uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

### 3.2.2 CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO

O processo de preparação das células de silício policristalino é menos rigoroso, se comparado ao do silício monocristalino. Desta forma, elas apresentam eficiência um pouco menor e são, conseqüentemente, mais baratas.



Figura 3.5. Célula de silício policristalino.[16]

As células podem ser preparadas através do corte de fitas, ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor quanto por imersão. Nos dois últimos casos apenas o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, no que diz respeito ao tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Hoje em dia, o processo de fabricação atinge uma eficiência para este tipo de material em torno de 14% [15].

### 3.2.3 CÉLULAS SOLARES DE PELÍCULAS FINAS

Conforme dito anteriormente, as células solares mais tradicionais são feitas a partir do silício, material que também é utilizado na fabricação dos chips de computadores. O silício tem sido o material preferido pela indústria eletrônica graças à sua grande estabilidade e não toxicidade. O problema é que o silício é caro,

respondendo sozinho por aproximadamente 45% do custo final da célula solar [17]. Para cortar os custos, os cientistas abandonaram os caros "wafers" - as pastilhas de silício sobre as quais são construídos tanto as células solares como os chips de computador, - e passaram a utilizar filmes de silício, finíssimas películas que, justamente pela sua pequena espessura, utilizam muito menos silício até o limite no qual elas passam a ser economicamente viáveis. A descoberta consiste em uma forma para se depositar sobre a película de silício uma finíssima camada de prata - com uma espessura de 10 nanômetros, o que representa alguns poucos átomos do metal. A célula solar é então aquecida a 200° C, fazendo com que o filme quebre-se em pequenas ilhas de 100 nanômetros de diâmetro. Isso aumenta a capacidade do material em capturar a luz do sol, aumentando o rendimento da célula solar. A grande desvantagem das células solares de película fina é que elas têm um baixo rendimento, convertendo em torno de 10% da luz solar em eletricidade. [18] Entre os materiais mais utilizados e disponíveis comercialmente estão o silício amorfo hidrogenado (*a-Si:H*), o disseleneto de cobre e índio (*CIS*) e o telureto de cádmio (*CdTe*).

#### 3.2.3.1 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO

As células solares de silício amorfo foram a primeira tecnologia de filmes finos desenvolvida, começando a ser empregadas em meados da década de 70. Elas surgiram como uma tecnologia ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo. Tais células se apresentam como camadas extremamente finas de silício, muitas vezes tendo não mais do que 0,5 micrometros de espessura com uma estrutura amorfa, o que reduz os níveis de eficiência quando comparado com as células cristalinas para 10%. [18]



Figura 3.6. Célula de silício amorfo. [19]

Além de possuir um alto grau de desordem na estrutura dos átomos, as células de silício amorfo têm a sua eficiência reduzida ao longo da sua vida útil. Isto acontece porque elas são afetadas por um processo de degradação nos seus primeiros meses de operação. Entretanto, o silício amorfo apresenta algumas vantagens: o processo de fabricação é relativamente simples e barato, possui possibilidade de fabricar células com grandes áreas e tem um baixo consumo de energia na produção.

#### 3.2.3.2 Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio/Selênio (CIS/CIGS)

Outro competidor no mercado fotovoltaico é a família dos compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CIS), e disseleneto de cobre, gálio e índio (CIGS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas. Painéis solares de CIS e CIGS apresentam uma boa aparência estética e estão surgindo no mercado com grandes superfícies, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Entretanto, para alcançar quantidades expressivas de produção, alguns aspectos como a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade deverão ser considerados.



Figura 3.7. Módulo solar CIGS. [20]

A Figura 3.7 mostra exemplos de módulos fotovoltaicos de CIGS. Dentre os filmes finos comercialmente disponíveis, módulos de CIGS são os que apresentam o melhor rendimento fotovoltaico, motivo pelo qual várias empresas vêm investindo nesta tecnologia. Ao contrário do silício amorfo, as células de CIGS não sofrem de degradação sob a ação da luz. Porém, deve-se realizar um selamento robusto, evitando a degradação do óxido de zinco, e conseqüentemente, a inutilização do módulo. Os módulos fotovoltaicos de CIGS possuem até 11% de eficiência. [21]

#### 3.2.3.3 Telureto de Cádmio (CdTe)

As células fotovoltaicas de Telureto de Cádmio são fabricadas em um substrato de vidro, com uma camada de condutor transparente como contato frontal, onde geralmente é utilizado o óxido de estanho e índio (OTI). O contato frontal é revestido com uma finíssima camada de Sulfeto de Cádmio (CdS) que é um semiconductor do tipo n, depois com uma camada de CdTe, que é do tipo p. Esse procedimento pode ser feito por uma espécie de impressão em tela (silk-screen) [21].

Assim como no caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica. A principal dificuldade para a fabricação de módulos fotovoltaicos utilizando o CdTe é a toxicidade do cádmio. O Telureto de Cádmio é um composto atóxico, que é tóxico somente durante o processo de fabricação, o que exige procedimentos rigorosos de controle. Assim como as células de CIGS, as células de CdTe não se degradam sob a ação da luz [21].



Figura 3.8. Módulo solar de CdTe. [22]

. Estes módulos, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro como mostra a Figura 3.8, também apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si. As empresas envolvidas com esta tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas como nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliando volumes de produção e reduzindo custos.

#### 3.2.4 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS HÍBRIDAS (HCI)

Uma célula fotovoltaica híbrida (HCI) é a junção da tecnologia do silício cristalizado com a tecnologia de película fina de silício amorfo hidrogenado. A sigla HCI significa Heterojunction with Intrinsic Layer - Heterojunção com Camada Intrínseca – e representa a estrutura de construção dessas células. Uma pastilha de silício monocristalino (m-Si do tipo n) forma o núcleo, que é revestido em ambos os lados por uma camada finíssima de silício amorfo (a-Si), do tipo intrínseco (silício puro, sem impurezas). Na parte superior da célula é colocada, sobre a camada de silício amorfo do tipo i, uma camada de silício amorfo do tipo p, formando uma junção p-i-n com pastilha de silício monocristalino do tipo n. Na inferior da célula é colocada uma camada de silício amorfo altamente dopado com impureza do tipo n (fósforo) que serve para evitar a recombinação dos portadores de carga no eletrodo superior. Não há degradação induzida pela luz, no silício amorfo, assim como acontecem nas células fotovoltaicas de película fina de silício amorfo.



Figura 3.9. Células solares híbridas. [23]

Em comparação com as células fotovoltaicas de silício cristalizado, as células HCI tem melhor rendimento em temperaturas elevadas. Neste caso, por cada incremento da unidade de temperatura em Grau Celsius, há uma queda de eficiência de 0,33%, em comparação com os 0,45% sentidos pelo silício cristalino. A célula HCI poupa energia e material no seu processo de fabricação. A temperatura necessária para a deposição é de apenas 200 °C. Isto significa que as pastilhas são expostas a um menor esforço térmico e podem ser reduzidas para uma espessura de aproximadamente 0,2 mm com uma eficiência de 17,3%. [24]

### 3.3 MODELO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTVOLTAICA

Uma célula solar pode ser representada por um circuito equivalente. Isso possibilita a análise do comportamento eletrônico e determinação das características elétricas das células fotovoltaicas. Em termos de modelo ideal, a célula pode ser modelada como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo. Por outro lado, para uma célula solar real as perdas devem ser incluídas. Elas surgem no modelo equivalente como resistências elétricas, onde representarão a queda de tensão através de perdas ôhmicas do material semicondutor, nos contatos metálicos e no contato do metal com o semicondutor, além das perdas que surgem principalmente através de perturbações elétricas entre as partes frontal e traseira da célula.

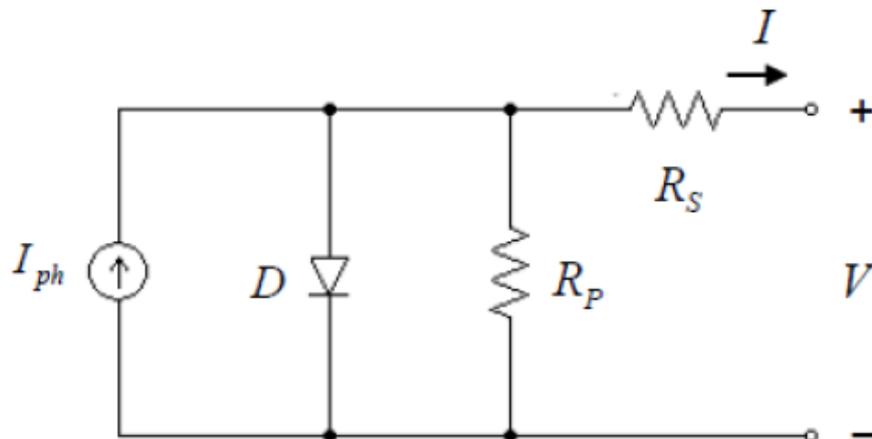


Figura 3.10. Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica de silício [8]

Onde  $I_{ph}$  representa a corrente gerada a uma determinada radiação; o diodo  $D$  representa a junção  $pn$ ;  $I$ , a corrente fornecida ao circuito externo;  $V$ , a tensão nos terminais de saída da célula e  $R_p$  e  $R_s$  as resistências em paralelo e série da célula, respectivamente.

De acordo com o circuito da Figura 3.10, é possível determinar a seguinte expressão para a corrente de saída da célula:

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2)$$

Em que  $I_r$  é a corrente de saturação reversa da célula;  $n$  é o fator de idealidade da junção;  $q$  é a carga do elétron;  $k$  é a constante de *Boltzmann* e  $T$  é a temperatura da célula.

A corrente de saturação reversa depende da temperatura de acordo com:

$$I_r = I_{rr} \cdot \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left[ \frac{q \cdot E_G}{n \cdot k} \cdot \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

Na qual  $T_r$  é uma temperatura de referência,  $I_{rr}$  é a corrente de saturação reversa na temperatura  $T_r$ , e  $E_G$  é a energia da banda proibida do material da célula.

A corrente  $I_{ph}$  depende da radiação incidente e da temperatura conforme:

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha_T \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{S}{1000} \quad (4)$$

Em que  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito da célula na temperatura e radiações padrões,  $\alpha_T$  é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito da célula e  $S$  é a radiação incidente em  $W/m^2$ .

### 3.4 FATOR DE CAPACIDADE

Na operação das usinas solares, um fator que merece ser destacado é o Fator de Capacidade (FC). O fator de capacidade pode ser definido como sendo a razão entre a produção efetiva ao ano e a potência instalada da central, previamente multiplicada pelo fator de 8.760 horas [41]. Na Figura 3.11 pode-se observar o fator de capacidade de uma usina solar de 190kWp conectada à rede.

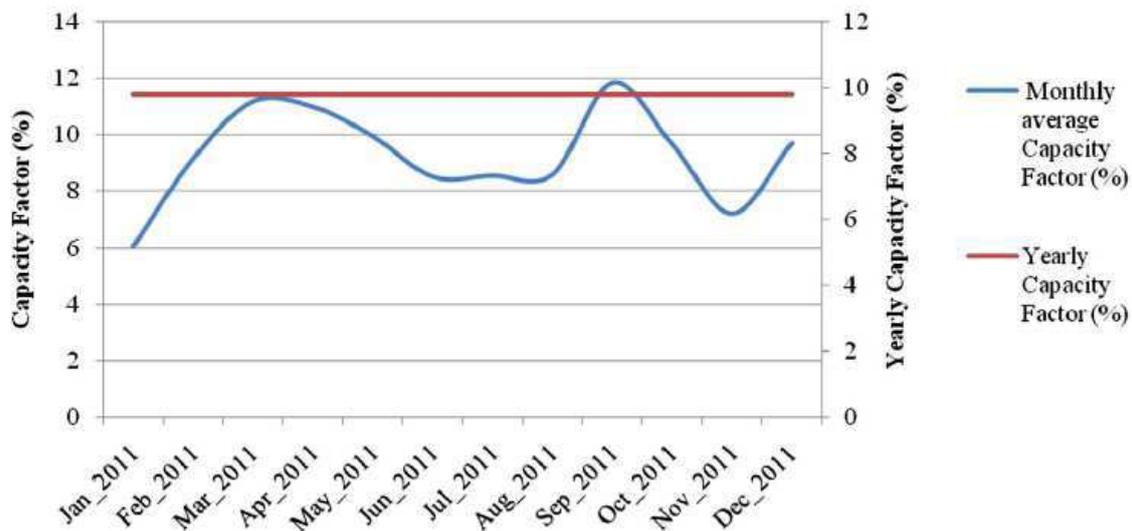


Figura 3.11. Variação mensal e anual do fator de capacidade de uma usina solar de 190kWp conectada à rede. [42]

O fator de capacidade anual projetado é inferior a 12%. Entretanto, os fatores de capacidade levantados mensalmente e obtidos a partir dos dados de geração da usina resultam em fatores de capacidade menores na maioria dos meses de análise. Logo, a Figura 3.11 ilustra um caso típico de usinas solares conectadas à rede, onde o fator de capacidade estimado e o real são expostos.

## 4 COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos normalmente possuem quatro componentes principais: Painéis solares, controladores de carga, inversores e banco de baterias. Os sistemas interligados à rede utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual esta conectada. Todo o arranjo é conectado em inversores e logo em seguida interligado diretamente na rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

### 4.1 PAINÉIS SOLARES

São um agrupamento de várias células fotovoltaicas. Este agrupamento é necessário uma vez que uma única célula apresenta baixa corrente e tensão de saída. O número de células a serem agrupadas e a escolha das suas conexões, em série ou em paralelo, dependerá da tensão e da corrente que se deseja obter. Geralmente os fabricantes de módulos fotovoltaicos produzem módulos com um agrupamento de 54 e 60 células. São responsáveis por transformar energia solar em eletricidade. O módulo é composto por células que são conectadas em série e em paralelo com a finalidade de produzir níveis de tensão e corrente suficientes para a utilização da energia. Além de fornecer níveis de tensão e corrente desejáveis, o agrupamento de células em um módulo é necessário para proteção contra esforços mecânicos e fatores ambientais, pois as células apresentam uma espessura muito reduzida.

**Conexão em paralelo:** A conexão de células em paralelo permite conectar os terminais de duas ou mais células em um ponto comum, de modo que os terminais positivos sejam ligados em um ponto e os negativos em outro ponto.

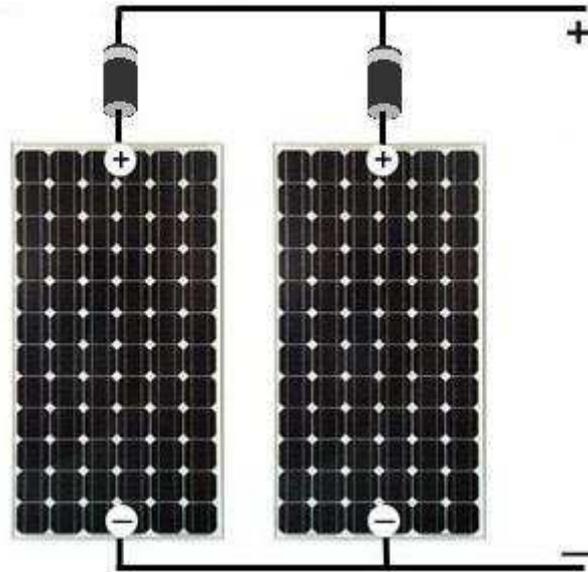


Figura 4.1. Painéis solares conectados em paralelo. [25]

A corrente final é a soma das correntes individuais de cada célula, porém a tensão final é a mesma de uma única célula, aproximadamente 0,7 V. Isto impossibilita a utilização deste arranjo em algumas situações.

**Conexão em Série:** A conexão de células em série é realizada ligando o terminal positivo de uma célula no negativo da outra e assim sucessivamente.

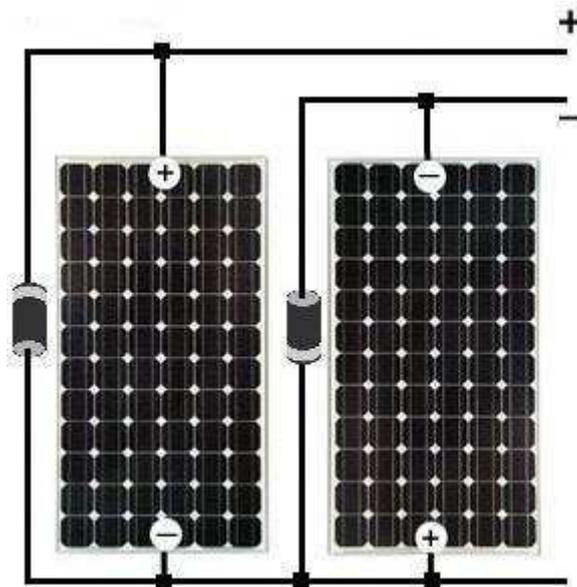


Figura 4.2. Painéis solares conectados em série. [26]

Neste caso, a corrente será igual à corrente de cada módulo individual, mas a tensão total será igual ao somatório das tensões de cada módulo. A corrente de uma única célula é aproximadamente 6,0 A. Normalmente, este tipo de arranjo é o mais utilizado.

## 4.2 CONTROLADORES DE CARGA

O controlador/regulador de carga é um dos principais componentes de um sistema solar fotovoltaico, sendo o responsável pela duração da vida útil dos bancos de baterias. A função do regulador de carga é a de proteger as baterias de serem sobrecarregadas, ou de sofrerem descargas exageradas na bateria. Estas medidas asseguram que toda a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos seja armazenada com maior eficácia nas baterias. Os controladores de carga possuem uma série de dispositivos que informam permanentemente sobre o estado de carga do sistema e alertam o utilizador para que este possa adaptar a instalação às suas necessidades particulares, aumentando assim o tempo de vida útil das baterias. Os reguladores de carga são utilizados principalmente em sistemas isolados da rede, ou seja, autónomos, compostos por módulos fotovoltaicos, ligados a um regulador, que por sua vez está ligado a baterias para alimentação. Os reguladores de carga devem ser selecionados de acordo com as características do sistema fotovoltaico a ser utilizado.



Figura 4.3. Controlador de carga de 7A (12V). [27]

Um controlador típico possui entradas para os painéis fotovoltaicos, saída para as baterias e saídas para as cargas. Os parâmetros para especificação dos controladores de carga são obtidos da demanda de energia e das curvas características das baterias e a de vida útil (em ciclos) desejada [28]. Basicamente, é especificado o valor de máxima corrente, que deve ser maior do que a máxima corrente de curto-circuito esperada para o arranjo fotovoltaico, e a tensão nominal, que deve ser igual à tensão nominal da bateria. A proteção contra sobrecarga é a mais básica e está presente em todo e qualquer

controlador de carga. Existem também controladores com outras características, que aumentam a complexidade e o custo do equipamento, tais como: Proteção contra corrente reversa, desconexão da carga (proteção contra descargas excessivas), compensação térmica e desvio da energia do arranjo.

### 4.3 INVERSORES

A função de um inversor consiste em converter uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica de amplitude e frequência desejadas. A tensão de saída pode ser fixa ou variável em uma frequência também fixa ou variável. Uma tensão de saída variável pode ser obtida variando-se a amplitude da tensão de entrada CC e mantendo-se o ganho do inversor constante. O ganho do inversor pode ser definido como a relação entre a tensão de saída CA e a tensão de entrada CC. Por outro lado, se a tensão de entrada CC for fixa e não controlável, uma tensão de saída variável pode ser obtida pela variação do ganho do inversor, a qual é normalmente realizada pelo controle modulação por largura de pulso (do inglês pulse width modulation – PWM).

Nos sistemas fotovoltaicos os inversores convertem a corrente contínua (CC) dos painéis e banco de baterias em corrente alternada (CA) para alimentar um conjunto de cargas. Logo, o inversor é a unidade condicionadora de potência do sistema fotovoltaico. A escolha de um inversor interfere no desempenho, confiabilidade e custo de um sistema fotovoltaico.

Apesar de adicionarem complexidade aos circuitos, os inversores possuem os atrativos de facilitar a instalação elétrica e permitir o uso de acessórios convencionais (TVs, vídeos, geladeiras etc). Para especificar um inversor, algumas características devem ser consideradas. Dentre elas estão: Considerar a tensão de operação (CC/CA), potência, eficiência, forma de onda, frequência, fator de potência e capacidade de surto. No caso de sistemas conectados, os inversores também são responsáveis pela sincronia com a rede elétrica.

A potência nominal de saída do inversor indica que potência o inversor pode fornecer continuamente à carga. Na especificação dos inversores, a potência a ser fornecida deve ser sempre superior às necessidades máximas das cargas. Logo, um possível aumento de demanda não causará grandes problemas. Além disso, os inversores devem ser capazes de suportar surtos de corrente por um curto instante de

tempo, excedendo a sua potência nominal. Estes surtos podem surgir no momento de partida de motores CA, por exemplo. Portanto, outra característica que deve ser especificada nos inversores é a sua capacidade de surto.

As tensões de operação de entrada e saída são funções da potência total fornecida pelo inversor às cargas CA. Normalmente, a tensão nominal de entrada do inversor aumenta com o aumento da demanda de carga, o que mantém a corrente em níveis adequados. A tensão de saída da maioria dos inversores é regulada. Ela deve atender às especificações necessárias para alimentar as cargas que serão operadas [28]. A eficiência dos inversores varia, normalmente, na faixa de 50 a 90%. Deve-se projetar um inversor visando alcançar eficiência superior a 90%. Os valores especificados nos catálogos de fabricantes são os valores máximos que podem ser obtidos. Quando operando alguns motores, a eficiência real pode ser inferior a 50%. A eficiência de muitos inversores tende a ser mais baixa quando estão operando bem abaixo da sua potência nominal [28].

Os circuitos internos mais sensíveis de um inversor devem ser bem protegidos contra os surtos causados por descargas elétricas, partidas de motores e condições de sobrecarga. Sobrecargas podem ser causadas por mau funcionamento de equipamentos, problemas com fiação elétrica ou simplesmente pelo excesso de equipamentos ligados ao mesmo tempo. Um inversor deve se autodesligar caso a tensão das baterias esteja muito baixa, para protegê-las contra danos por descarga excessiva.

Um inversor consome energia mesmo estando sem carga. Em aplicações onde o sistema permanece por muito tempo sem carga ou com carga muito baixa, esta é uma característica importante. O consumo típico está entre 15 e 50 Watts. O consumo em amperes normalmente é indicado nas folhas de especificações dos fabricantes. Para economizar a carga das baterias, alguns inversores de uso doméstico possuem um sensor que detecta a ausência de carga desligando sua saída quando não há nenhum consumo de energia, religando sua saída ao identificar algum consumo energia.

Alguns inversores produzem uma forma de onda senoidal em sua saída, livre de distorções, semelhante à forma de onda da energia entregue pela concessionária de energia elétrica sendo, portanto, os mais apropriados para utilização doméstica. Existem também os inversores que produzem uma onda senoidal modificada em sua saída, são mais baratos, mas podem afetar o funcionamento de alguns equipamentos. Estes inversores reduzem a eficiência de motores e transformadores entre 10% e 20%. Ruídos podem ser ouvidos em alto-falantes ou emitidos por algumas lâmpadas fluorescentes,

ventiladores de teto e transformadores. Alguns fornos de micro-ondas podem também emitir algum ruído e aquecer menos os alimentos. TVs e monitores de vídeo de computadores podem mostrar uma “faixa” deslocando-se pela tela.

As formas de onda da tensão de saída de inversores ideais deveriam ser puramente senoidais. Entretanto, as formas de onda de inversores práticos são não senoidais e contêm certos harmônicos. Para aplicações de baixa e média potência, tensões de onda quadrada ou quase quadrada podem ser aceitáveis; e para aplicações de potência elevada, são necessárias formas de onda senoidais com baixa distorção. Com a disponibilidade de dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, o conteúdo harmônico da tensão de saída pode ser minimizado ou reduzido significativamente por técnicas de chaveamento.

Os inversores são amplamente utilizados em aplicações industriais (por exemplo, acionamento de máquinas CA em velocidade variável, aquecimento indutivo, fontes auxiliares, sistema de energia ininterrupta). A entrada pode ser uma bateria, célula combustível, célula solar ou outra fonte CC. As saídas monofásicas típicas são: a) 120 V a 60 Hz, b) 220 V a 50 Hz e c) 115 V a 400 Hz. Para sistemas trifásicos de alta potência, as saídas típicas são: a) 220 / 380 V a 50 Hz, b) 120 / 208 V a 60 Hz e c) 115 / 200 V a 400 Hz.

#### 4.3.1 INVERSORES DE ONDA QUADRADA

Fornecem uma saída CA com harmônicos elevados e pequena regulação de tensão. A onda quadrada é obtida alternando-se a tensão e corrente. Comparando-se com a operação em tensão senoidal da rede elétrica, um motor de indução, que esteja operando com estes tipos de inversores, tem somente cerca de 60% do seu torque normal e aquecimentos indesejáveis. São tipicamente mais baratos, mas não devem ser usados para cargas indutivas, como motores. Entretanto, são muito adequados para cargas resistivas, tais como lâmpadas incandescentes.

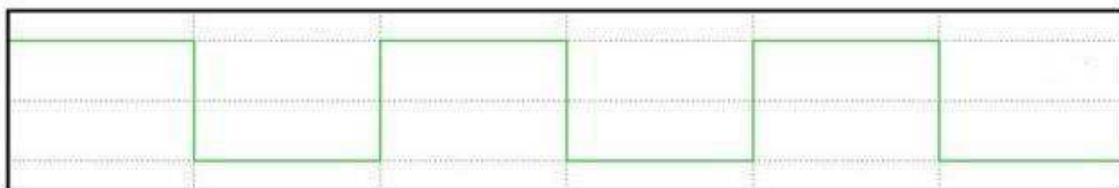


Figura 4.4. Inversores de onda quadrada. [29]

### 4.3.2 INVERSORES DE ONDA SENOIDAL

São geralmente mais caros; entretanto, se adequadamente projetados e dimensionados, são os que produzem uma tensão de saída e desempenho mais adequados. Podem operar qualquer aparelho CA ou motor, dentro da sua classificação de potência. Utilizam normalmente a técnica PWM com uma filtragem posterior. Usado, em geral, para inversores trifásicos.

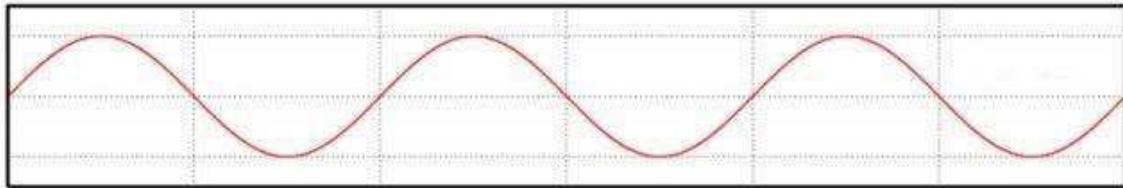


Figura 4.5. Inversores de onda senoidal. [29]

### 4.3.3 INVERSORES DE ONDA SENOIDAL MODIFICADA

São um refinamento dos inversores de onda quadrada. Utilizam chaveamentos adicionais para melhor aproximação de uma onda senoidal e, por isso, estes possuem menor distorção harmônica que os de onda quadrada. Estes inversores são adequados para uma maior variedade de cargas, incluindo lâmpadas, equipamentos eletrônicos e a maioria dos motores, embora não consigam operar um motor tão eficientemente quanto um inversor de onda senoidal. Com tais inversores, o aquecimento do motor é menor. Desta forma, eles são mais indicados para operarem motores do que os inversores de onda quadrada. Os torques de partida e operação também são melhores, visto que a tensão e corrente de pico são maiores. Entretanto, a tensão de pico destes inversores não deve ser excessiva.

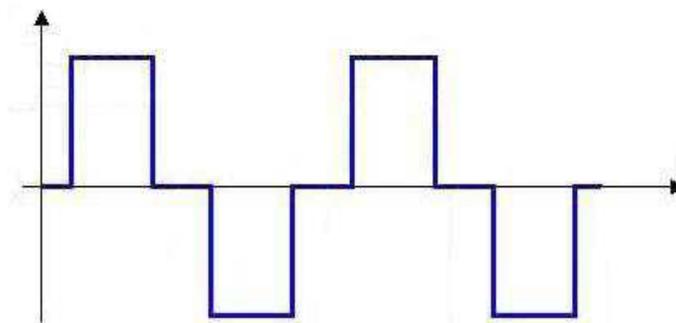


Figura 4.6. Inversores de onda senoidal modificada. [29]

#### 4.3.4 INVERSORES PWM

Um inversor de frequência PWM realiza o controle da frequência e da tensão na seção de saída do inversor. A tensão de saída tem uma amplitude constante e através de chaveamento ou modulação por largura de pulso, a tensão média é controlada. O inversor básico consiste no próprio inversor que converte a alimentação de entrada de 60 Hz para frequência e tensão variáveis. A frequência variável é o requisito real que controlará a velocidade do motor.

O chaveamento do inversor normalmente resulta em tensões de saída não senoidais, que podem afetar o desempenho e a durabilidade do motor. A geração de formas de onda alternadas com baixo conteúdo harmônico é extremamente importante, tendo em vista que filtros não podem ser empregados com sucesso, dada a grande variação de frequência de saída do inversor. Desta forma, a lógica de disparo das chaves do inversor é de fundamental importância na eficiência e no desempenho do sistema de acionamento.

As técnicas de chaveamento modernamente utilizadas fazem uso da modulação por largura de pulso (PWM), que possibilitem a obtenção de formas de onda de tensão de saída de baixo conteúdo harmônico. Dentre elas, pode-se destacar o PWM senoidal, analisado na sequência.

#### 4.3.5 INVERSORES PWM SENOIDAL

Nesta técnica, os pulsos que controlam as chaves do inversor são gerados a partir da comparação de uma onda portadora triangular de alta frequência,  $V_p$ , com a onda senoidal de referência (onda moduladora),  $V_r$ , cuja frequência é a desejada para a tensão de saída do conversor. Os pontos de cruzamento das duas ondas definem a lógica de disparo dos semicondutores de potência do inversor. Quando  $V_r$  (onda senoidal de referência) é maior que  $V_p$  (triangular), a saída do comparador determina que a chave semicondutora correspondente entre em condução; quando  $V_r$  é menor que  $V_p$  a chave em questão é bloqueada.

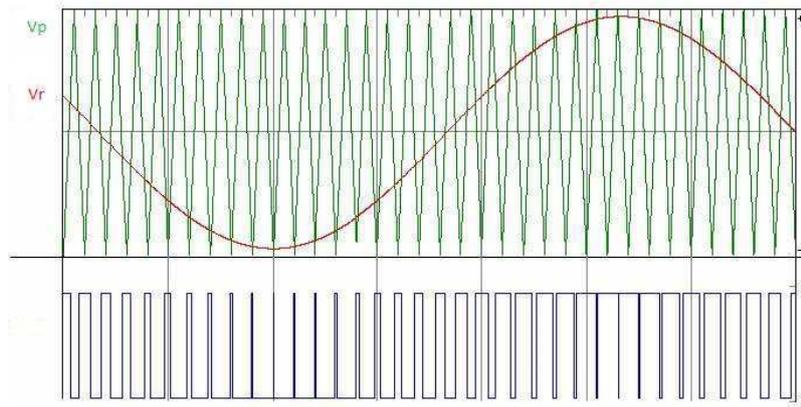


Figura 4.7. Comparação entre as ondas portadoras  $V_p$  (triangular) e de referência  $V_r$  (senoidal), para geração dos pulsos de comando das chaves do inversor VSI-PWM senoidal. [30]

Observando a Figura 4.7 é possível perceber que a largura de cada pulso de comando das duas chaves semicondutoras é resultante dos intervalos entre sucessivas interseções entre a senoide de referência e a triangular; por isso, a largura do pulso é aproximadamente proporcional à ordenada média da senoide em cada intervalo. Quanto maior a frequência da portadora, mais próxima da forma de onda ideal pra esse PWM, pois menor será a variação da amplitude da senoide em cada intervalo e, portanto, a largura de cada pulso será uma função senoidal da posição angular. Em um PWM senoidal, as menores ordens harmônicas da tensão de saída aparecem em torno da frequência de chaveamento. Como nos inversores atuais esta frequência varia em torno de 5 a 20 kHz, graças à utilização de IGBT's, todas as componentes harmônicas de baixa ordem já se encontram naturalmente eliminadas, otimizando a operação do motor. As harmônicas de ordem elevada da tensão gerada não representam grande problema, já que a própria indutância do motor impede a entrada de suas respectivas correntes.

#### Vantagens do Inversor PWM

- Boa eficiência – O inversor pode alcançar uma eficiência superior a 90% em velocidade plena e plena carga;
- Fator de Potência – Um retificador de ponte de diodo é utilizado para retificar a linha de entrada. Isto permite um bom fator de potência na faixa de velocidade de operação plena do inversor;
- By-pass – Se o inversor falhar o motor pode ser operado diretamente na linha de entrada em operação contínua;

- Cargas de alta inércia – O inversor pode adaptar a sua operação para evitar sobrecargas causadas pela aceleração de cargas de alta inércia em algumas aplicações;
- Manutenção – O inversor pode ser testado e operado sem estar conectado ao motor;
- Operação com vários motores – Mais de um motor pode ser operado a partir do mesmo inversor. Além disso, o inversor não é sensível à alteração da combinação dos motores operados, desde que a corrente de carga total não exceda a corrente nominal do inversor.

#### Desvantagens do Inversor PWM

- Custo inicial – O custo inicial do sistema do inversor é relativamente alto;
- Conversão de potência – A potência total distribuída para o motor deve ser convertida pelo inversor. Isso requer componentes de alta potência dentro do inversor;
- Manutenção – O inversor possui uma grande quantidade de circuitos sofisticados que requerem técnicos especializados para a manutenção.

## 4.4 BANCO DE BATERIAS

Armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol. As baterias mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são geralmente do tipo chumbo-ácido. As baterias adequadas para sistemas de energia renovável são as baterias estacionárias ou de ciclo profundo. Estas baterias suportam grandes descargas que uma bateria comum não suportaria. Elas podem ser descarregadas entre 20% e 80% de sua capacidade máxima e recarregadas novamente todos os dias, durando muitos anos, conforme especificação do fabricante. As baterias são necessárias apenas nos sistemas isolados, tendo em vista que sistemas solares conectados à rede não necessitam armazenar energia.



Figura 4.8. Banco de baterias solares constituído por 8 blocos de 6V, 200Ah. [31]

Além de o banco de baterias ter capacidade suficiente de fornecer energia às cargas, dois parâmetros importantes também devem ser considerados: a autonomia do sistema e a profundidade de descarga determinada da bateria. A capacidade do banco é determinada através da associação em paralelo das baterias. A autonomia do sistema considera o número de dias que o banco é capaz de suprir à carga na ausência total de energia pelos painéis fotovoltaicos. Quanto maior a autonomia, maior a confiabilidade do sistema, porém, maior o custo com a quantidade de baterias necessária. Já a profundidade de descarga considera o percentual máximo da capacidade da bateria que deve ser descarregado

A vida útil da bateria está diretamente relacionada com a profundidade de descarga. Portanto, este é um parâmetro que deve ser cuidadosamente analisado para prolongar ao máximo a vida útil das baterias. Existe no mercado uma grande variedade de baterias. As baterias estacionárias disponíveis no mercado brasileiro são de ciclo raso, com uma vida útil de no máximo dois anos para uma profundidade de descarga de 30%. Devido a este fato, os custos do banco de baterias se tornam imensos devido à reposição de componentes em um curto espaço de tempo, visto que o tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos são superiores a 25 anos. Entretanto, no mercado internacional é possível encontrar baterias estacionárias de ciclo profundo com tempo de vida útil consideravelmente superior às de ciclo raso.

## 5 USINA SOLAR DE TAUÁ

### 5.1 INTRODUÇÃO

Em agosto de 2011 o Ceará recebeu a primeira usina solar em escala comercial do país. A construção da Usina Solar de Tauá foi um empreendimento que surgiu a partir de estudos iniciados em 2008. A decisão da implantação da usina ocorreu em setembro de 2010. Instalada no município de Tauá, no sertão cearense, a usina foi inaugurada com capacidade de geração inicial de 1MW, energia capaz de suprir a necessidade de aproximadamente 1500 residências. Além de acrescentar potência à rede elétrica, o sistema foi capaz de fornecer informações importantes aos pesquisadores sobre o potencial efetivo de exploração de energia fotovoltaica em território brasileiro. Os investimentos iniciais foram em torno de 10 milhões de reais. A usina é conectada diretamente ao sistema elétrico através de uma rede de 13,8 kV interligada à Subestação de Tauá (69 kV/ 13,8 kV), pertencente à concessionária local COELCE.



Figura 5.1 Vista geral da Usina Solar de Tauá (1 MW). [32]

O projeto da usina prevê expansão de potencial até 50 MW e esta já possui autorização da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) para o aumento da capacidade instalada.

## 5.2 LOCALIZAÇÃO

O estado do Ceará é caracterizado por apresentar uma significativa parcela de sua matriz energética composta por energias renováveis. A produção eólica (518,93 MW de potência) é a segunda principal fonte do estado. A sua frente está apenas a geração térmica, com 877 MW. Além destas, há uma pequena central hidrelétrica (PCH), de 4 MW, o que totaliza uma capacidade instalada de 1,4 mil MW, de acordo com dados de janeiro de 2011 da ANEEL.

O município de Tauá, situado a cerca de 360 quilômetros da capital Fortaleza, passou por um processo seletivo rigoroso e foi escolhido por apresentar vantagens técnicas sobre os demais. Tauá concorreu com outros dois municípios cearenses: Irauçuba e Sobral, também privilegiados por uma intensa radiação solar. Tauá foi o município escolhido, caracterizado por receber uma média de 177,7 horas de radiação solar, por mês, no primeiro semestre do ano, e 244,8 horas de radiação no segundo semestre.



Figura 5.2. Localização do município de Tauá. [33]

A partir de dados históricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), desde 1961 até 1990, chegamos à Tabela 5.1 que apresenta as médias anuais de Temperaturas (mínima, média e máxima), bem como dados referentes à Irradiação Global Horizontal, Precipitação Total e Nebulosidade. A temperatura média anual de Tauá é 26,6°C. Além disso, o município apresenta índice de nebulosidade de 4,7 em uma escala de 0 a 10.

Tabela 5.1. Fontes Normais Climatológicas do INMET, referentes ao município de Tauá. [34]

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA (TAUÁ)	FONTES NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO INMET (1961-1990)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
<b>Temperatura</b>													
<b>Mínima (°C)</b>	19.9	22.4	20.6	21.3	19.3	19.5	20.1	20.0	21.6	22.2	22.7	22.9	21.0
<b>Média (°C)</b>	27.0	25.6	25.4	25.0	24.8	24.5	24.5	25.8	26.8	27.3	27.8	27.7	26.6
<b>Máxima (°C)</b>	33.1	31.1	30.1	30.3	30.3	30.5	30.7	32.3	33.4	32.2	32.1	33.5	31.6
<b>Irradiação Global Horizontal</b>													
<b>KWh/m<sup>2</sup></b>	179.2	175.8	184.8	166.3	160.9	146.7	159.7	182	194.1	199.3	179.4	176.3	2105.5
<b>Precipitação Total</b>													
<b>(mm)</b>	57.8	104.8	133.9	138.3	54.7	25.3	105.1	76.4	72.8	60.2	53.4	43.0	925.7
<b>Nebulosidade</b>													
<b>(0-10)</b>	6.0	6.0	6.0	6.0	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	4.7

A população estimada de Tauá no ano de 2013 era de 57.246 habitantes. O município tem área de unidade territorial 4.018,162km<sup>2</sup> e conta com boa infraestrutura viária. Além disso, possui uma subestação da Eletrobrás/Chesf em suas proximidades. A instalação da usina foi empreendimento que ainda despertou o interesse da comunidade acadêmica. O turismo científico da região foi fortalecido e ganhou espaço entre as demais atividades econômicas. A Universidade Estadual do Ceará (UECE) fez parceria com a empresa responsável pela usina, de modo que alunos recebem informações meteorológicas da usina para análise e monitoramento das informações. Isso permite a análise da relação entre a energia elétrica gerada e as diversas variáveis climáticas. Nesse processo, os dados emitidos pela Estação Meteorológica, como a radiação solar, a temperatura ambiente e a temperatura na superfície dos painéis fotovoltaicos, são transferidos, em tempo real, para os computadores da UECE que os avaliarão. Como resultado, universitários são capacitados na área de energia solar, realizando estudos que contribuem para a evolução do conhecimento sobre esta fonte no Brasil.

A usina solar de Tauá foi dimensionada para crescer em três etapas. A unidade, inicialmente inaugurada com capacidade de 1 MW, já está preparada para uma expansão de 5 MW, que terá um total de 22 mil painéis fotovoltaicos e capacidade para

produzir 7,74 milhões kWh/ano. Na terceira etapa, estão previstos 220 mil painéis, com capacidade instalada de 50 MW.

### 5.3 ESTUDO DE VIABILIDADE

Diversos estudos foram realizados antes da construção da usina. A empresa fez visitas a parques solares no exterior e pesquisou soluções de fabricantes, de modo a garantir que as mais modernas tecnologias do mercado fossem aplicadas. Os especialistas visitaram parques solares nos países onde a tecnologia se apresentava mais desenvolvida. A Espanha, por exemplo, contou com uma grande instalação desta fonte nos últimos anos. Fábricas de produção de painéis solares de outros países também foram visitadas. A configuração ideal para a usina de Tauá foi definida com ajuda de uma consultoria internacional americana.

Os painéis solares da usina de Tauá são da fabricante japonesa Kyocera. Os painéis fotovoltaicos contam com tecnologia policristalina, possuem 18 quilos e dimensão de 1500 x 990 milímetros. Além disso, os painéis têm potência unitária de 215 watts – pico. Os painéis fotovoltaicos usam uma proteção das células feita de vidro endurecido e uma película EVA. As estruturas metálicas de suporte para os painéis foram fornecidas pela Conectavol, empresa espanhola especializada no ramo. Tais estruturas foram adaptadas ao modelo fornecido pela Kyocera para o projeto. A empresa Ingeteam, também espanhola, foi responsável por fornecer os inversores adotados pela usina. Estes possuem potência nominal de 100 kW e operam em uma faixa de temperatura que varia entre 10°C e 65°C.

### 5.4 IMPACTO AMBIENTAL

O possível impacto ambiental provocado pela obra foi amplamente discutido. Desde o desaparecimento vegetal ao levantamento paleontológico da área onde está instalada a usina de Tauá, cada item foi considerado detalhadamente. Equipes de especialistas da área de meio ambiente fizeram levantamento e catalogação das espécies da fauna e flora, usando tecnologias como o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Na geografia de Tauá, predominam terrenos formados por rochas cristalinas, vegetação de caatinga e fauna pouco diversificada. Em uma região marcada pela existência de

sítios arqueológicos, o trabalho, durante as obras civis, envolveu a análise do terreno em busca de vestígios fósseis, através de levantamento paleontológico. Os trabalhos não identificaram novas descobertas. Na implantação do projeto, que recebeu licença ambiental da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (Semace), a empresa responsável desenvolveu um conjunto de 12 programas voltados para questões socioambientais, como monitoramento dos ruídos, controle de erosão e assoreamento, gestão ambiental, educação ambiental e comunicação ambiental - esta considerada essencial para informar à comunidade sobre benefícios e impactos do empreendimento. De um modo geral, a implantação da usina apresentou baixo impacto ambiental.

#### 5.4.1 LICENCIAMENTO AMBIENTAL: PASSO A PASSO

Após os estudos de impactos ambientais apresentados ao Conselho Estadual de Meio Ambiente (Coema), a Semace concedeu, na fase preliminar do planejamento, a Licença Prévia (LP). Essa licença aprova a localização e concepção do empreendimento, bem como atesta a sua viabilidade ambiental e estabelece os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implantação. O segundo passo aconteceu em março de 2010, quando a empresa recebeu a Licença de Instalação (LI) da usina. A LI autoriza o começo da construção do empreendimento, seguindo as especificações estabelecidas nos planos, programas e projetos executivos aprovados. O terceiro e último passo foi a obtenção da Licença de Operação (LO), em abril de 2011, que deu sinal verde para a geração de energia solar em Tauá.

### 5.5 ESTRUTURAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

A etapa inicial da construção da Usina Solar de Tauá compreendeu a preparação do terreno e a instalação de aproximadamente 1000 bases de concreto sobre as quais foram incluídas as estruturas de suporte e o conjunto de painéis solares. Três edificações foram erguidas: Casa de Apoio, Guarita e Sala de Inversores. A usina solar possui sua própria estação meteorológica, responsável pelo monitoramento dos dados climáticos. Esta estação fornece dados da radiação solar, temperatura na superfície dos painéis e temperatura ambiente. O sistema fotovoltaico é interligado à rede de 13.8kV da

Companhia Energética do Ceará (Coelce), a partir de uma linha de transmissão de 12 quilômetros.

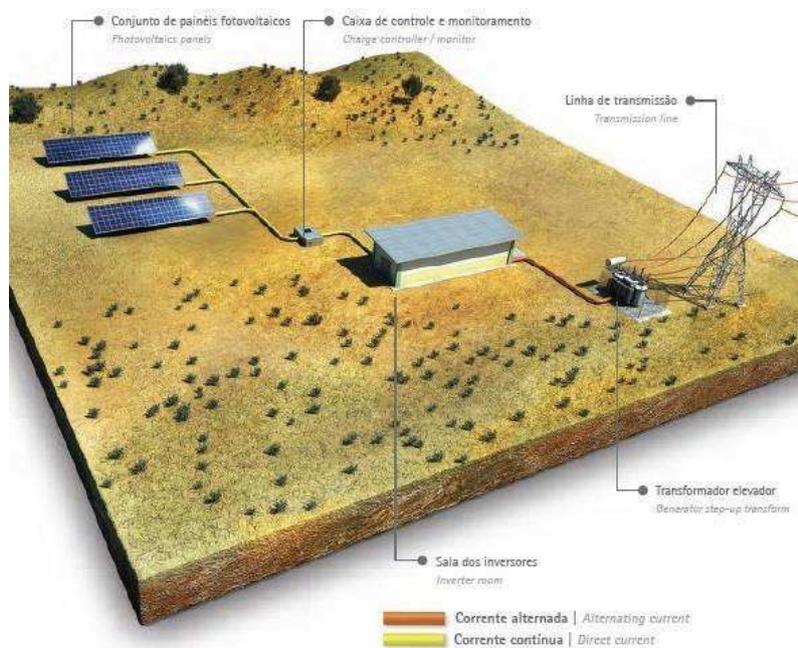


Figura 5.3. Infográfico esquemático da geração de energia solar. [35]

A partir da Figura 5.3 pode-se observar o princípio de funcionamento da usina. O conjunto de painéis fotovoltaicos recebe energia solar e produz eletricidade em corrente contínua. A energia elétrica é então conduzida por cabos até caixas de controle e monitoramento. Após concentrada, toda essa energia é enviada por cabos subterrâneos para a sala de inversores onde ocorre a transformação da energia em corrente contínua para corrente alternada. A partir dos inversores a corrente alternada segue para o transformador elevador, responsável por elevar a tensão e transmitir a potência gerada.

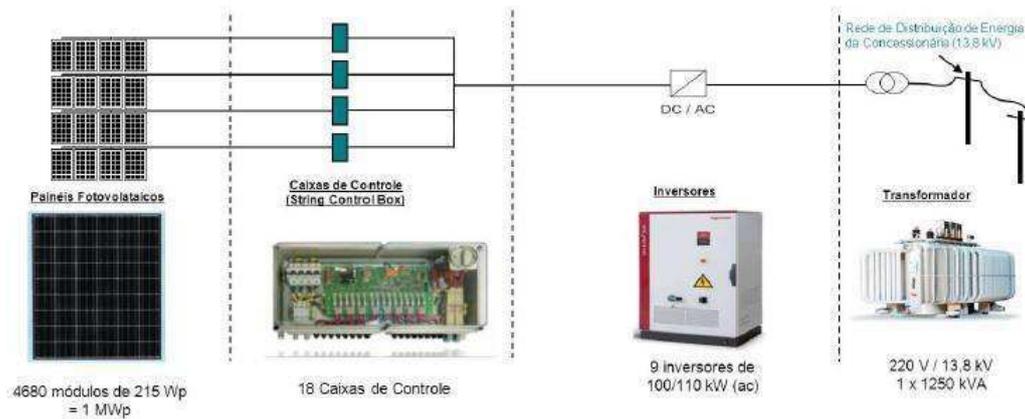


Figura 5.4. Quantidade de equipamentos por etapa no fluxo de geração de energia dentro da usina. [36]

A disposição dos 4680 painéis solares da usina ocorre da seguinte forma: 20 painéis são ligados em série, formando assim um conjunto de painéis. Estes conjuntos são chamados de strings. Em seguida, 13 strings são conectados em paralelo para cada mesa, totalizando 260 painéis. Este grupo fornece uma potência total de 55,9 kWp. Cada grupo de 260 painéis é conectado a uma Caixa de Controle nomeada String Control Box. Para este sistema fotovoltaico existem 18 caixas de controle, totalizando assim os 4680 painéis solares. A cada duas caixas de controle a potência de 111,8 kWp é levada para um único inversor.

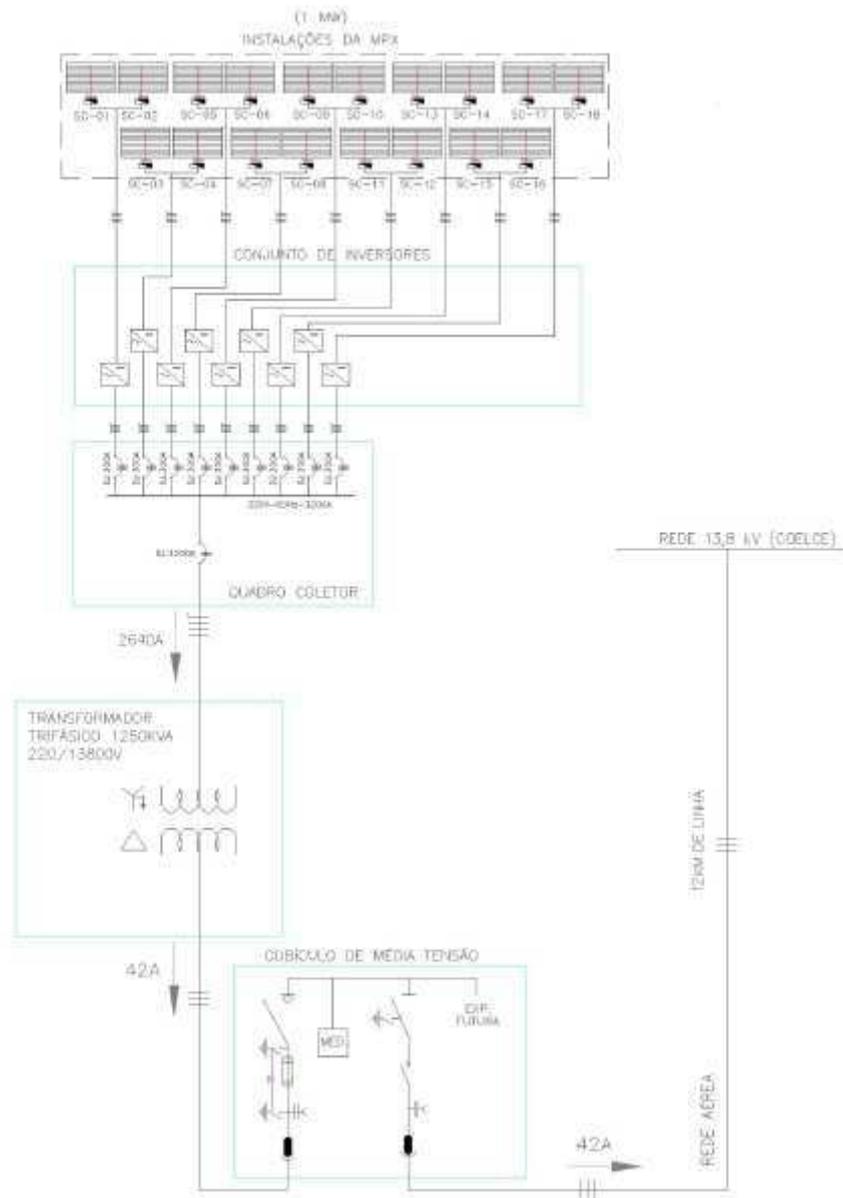


Figura 5.5. Diagrama Unifilar Geral da Usina Solar de Tauá. [36]

A Figura 5.5 contém o diagrama unifilar do projeto, exibindo as conexões de todas as etapas do projeto, desde a geração até a conexão com a rede. A potência gerada a partir do grupo de painéis solares passa pelas *String Control Boxes* e em seguida até os grupos de inversores de frequência. Um quadro geral de baixa tensão (QGBT) coleta a energia gerada nos nove inversores e direciona para o transformador elevador. Um cubículo de média tensão, com disjuntor SF6, é utilizado para fazer a interface entre o transformador elevador e a linha de transmissão. Após 12 quilômetros de linha a conexão é feita através de um bay de conexão ligado diretamente à rede de 13,8 kV da concessionária local COELCE.

### 5.5.1 PAINÉIS SOLARES

Os painéis fotovoltaicos deste projeto são do fabricante japonês Kyocera e o modelo de painel utilizado é o KD215GH-2PU. As células fotovoltaicas utilizam a tecnologia do silício policristalino e apresentam dimensão básica de 156x156mm. Além disso, possuem uma eficiência de 14.4%. Cada painel é constituído de 54 células agrupadas, possuindo assim um tamanho total de 1,5m de comprimento por 0,99m de largura e aproximadamente 18kg.

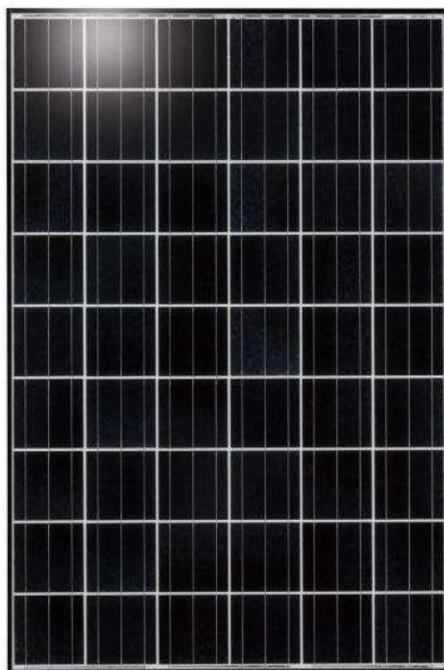


Figura 5.6. Painel fotovoltaico KD215GH-2PU. [37]

As células são condicionadas entre uma cobertura de vidro endurecido e uma película de EVA e lacradas no verso com uma película de PET. A tomada de conexão do lado traseiro é equipada com diodos de by-pass, que evitam o risco de superaquecimento das células solares individuais.

Tabela 5.2. Dados técnicos do painel fotovoltaico Kyocera (STC). [38]

DADOS ELÉTRICOS			DIMENSÕES		
Tipo de módulo PV	KD215GH-2PU		Comprimento	[mm]	1500 (±2,5)
<b>A 1000 W/m<sup>2</sup> (STC)*</b>			Largura	[mm]	990 (±2,5)
Potência nominal P	[W]	215	Espessura/ inclusive tomada	[mm]	46
Tensão máx. do sistema	[V]	1000	Peso	[Kg]	18
Tensão à potência nominal	[V]	26.6	Cabo	[mm]	(+950/(-)750)
Corrente à potência nominal	[A]	8.09	Tipo de conexão	MC PV-KBT3/ MC PV-KST3	
Tensão de circuito aberto	[V]	33.2	Tomada de conexão	[mm]	105x108x20
Corrente de circuito-circuito	[A]	8.78	Código IP	IP65	
<b>A 800 W/m<sup>2</sup> (NOCT)**</b>			<b>DADOS GERAIS</b>		
Potência Nominal P	[W]	152	Garantia de desempenho	10 <sup>***</sup> / 20anos <sup>****</sup>	
Tensão à potência nominal	[V]	23.6	Garantia	5 anos <sup>*****</sup>	
Corrente à potência nominal	[A]	6.47	<b>CÉLULAS</b>		
Tensão de circuito aberto	[V]	30.0	Quantidade por módulo	54	
Corrente de circuito-circuito	[A]	7.12	Tecnologia da célula	Policristalina	
NOCT	[°C]	47.9	Tamanho da célula (quadrado)	[mm]	156x156
Tolerância de potência	[%]	+5 / -3	Contato da célula	3-Barramento	
Carga de corrente de retorno Ig	[A]	15			
Proteção máx. de cordão	[A]	15			
Coefficiente de temperatura da tensão de circuito aberto	[V/°C]	-1,20x10 <sup>-1</sup>			
Coefficiente de temperatura da corrente de circuito-circuito	[A/°C]	5,27x10 <sup>-3</sup>			
Coefficiente de temperatura da potência à P <sub>máx</sub>	[W/°C]	-9,91x10 <sup>-1</sup>			
Redução do grau de atuação (1000 à 200 W/m <sup>2</sup> )	[%]	6,0			

Os painéis da usina são agrupados em grupos de 20 módulos em série, denominados *strings*. Assim, com a soma das tensões, passam a ter como característica uma tensão, por grupo, de  $20 \times 26,6V = 532 V$ . Cada 13 grupos destes são colocados em paralelo, com o auxílio de uma Caixa de Controle (*String Control Box*), formando assim um arranjo de 260 painéis, que possuem tensão de 532 V e corrente total de  $13 \times 8,09A = 105,2 A$ . Desta forma, cada arranjo de 260 painéis apresenta:

Arranjo de 260 Painéis Solares:

$$P = 260 \times 215 W \rightarrow P = 55,9 \text{ kWp}$$

$$V = 532 V; I = 105, 2 A$$

Os módulos possuem um limite de atuação de tensão máxima no sistema de 1000 V, o qual é respeitado. Cada arranjo de 260 painéis é conectado a uma *String Control Box*, discutida na sequência.

### 5.5.2 STRING BOX CONTROL:

As caixas de controle e monitoramento, *String Control Boxes*, são os equipamentos que realizam a interface entre os painéis fotovoltaicos e os inversores. Estes dispositivos permitem medir e monitorar, com precisão, a corrente proveniente das ligações em série dos painéis fotovoltaicos. O equipamento utilizado é da fabricante INGETEAM e é apresentado na Figura 5.7.



Figura 5.7. String Control Box da fabricante Ingeteam. [39]

O equipamento desempenha duas funções principais: Medição eletrônica de cada ligação em série de painéis fotovoltaicos e detecção de corrente defeituosa por ligação série de painéis. Além disso, apresenta fusível de proteção individual por ligação série de painéis e a funcionalidade de alarme para qualquer corrente defeituosa. Também possuem descarregadores de sobretensão em CC e chave seccionadora CC. Conforme visto anteriormente, cada *string* de 20 painéis em série possui 532 V de tensão e corrente de 8,09 A, e é conectado a uma entrada do *String Control Box*, utilizando um total de 13 entradas do equipamento que tem até 16 entradas disponíveis.

Tabela 5.3. Especificação técnica da Caixa de Controle - String Control Box. [39]

	String Control
Número máximo de strings conectáveis	16
Número máximo de canais mensuráveis	16
Corrente máxima por string	10 Adc
Corrente máxima total	160 Adc
Número de fusíveis	16
Tensão máxima	1,000 Vdc
Comunicação	RS-485, GSM/GPRS, Ethernet, WiFi, Fibra ótica
Temperatura ambiente	-20°C até +65°C
Classe de proteção	IP65

Deste modo é feita a conexão em paralelo de 13 módulos de 20 grupos de painéis série, totalizando um número de 260 painéis por cada *String Control Box*, com potência total de 55,9 kW e corrente total de 105,2 A. Pode-se observar que a corrente total está dentro do limite especificado pelo equipamento (160A – CC).

### 5.5.3 INVERSORES

A próxima etapa do fluxo de geração de energia engloba os inversores. Duas caixas de controle levam a energia gerada a partir de 520 painéis fotovoltaicos até cada inversor. Os inversores são responsáveis pela conversão da energia elétrica gerada nos painéis fotovoltaicos em corrente contínua para corrente alternada. Os inversores utilizados no projeto são da fabricante INGETEAM e o modelo é o Ingecon Sun 100 TL.



Figura 5.8. Inversor Ingecon Sun 100 TL, da fabricante INGETEAM. [40]

Com uma eficiência máxima de 98,4%, o inversor Ingecon Sun 100TL apresentou ótimo desempenho em um estudo comparativo entre os níveis de eficiência máxima de inversores centrais de 100kW dos principais fabricantes do mundo. Estes inversores são do tipo *grid-tie* e são específicos para operarem conectados diretamente com a rede. Nesta usina são utilizados nove inversores de 100/110 kW (máximo). Um dos inversores é responsável por checar as condições da energia gerada pelos painéis e realizar o sincronismo com a rede elétrica tão logo sejam satisfeitas as condições, tanto de entrada quanto de saída. Desta forma, o inversor comanda a sincronização da usina com a rede elétrica. Um importante dispositivo de proteção utilizado nesta tecnologia é a função anti-ilhamento (em inglês, *anti-islanding*) que garante que os inversores se desliguem em situações em que não haja detecção de tensão na rede elétrica. Com isso, caso parte do sistema seja desligada após a detecção de um defeito, a usina deverá sair de operação através da percepção pela função citada. Assim, não colocará em risco a segurança dos trabalhadores do sistema elétrico que forem realizar a manutenção da linha. Toda a sequência de entrada em operação e desligamento é feita de forma autônoma, sendo dispensada a presença de um operador para tais funções.

Tabela 5.4. Características técnicas do Inversor Ingecon Sun 100 TL. [40]

Entrada (CC)		Saída (AC)		Informações gerais	
Faixa de potência recomendada	103-130 KWp	Potência nominal AC HT <sup>(2)</sup>	100 KW	Refrigeração de ar	2,600 m <sup>3</sup> /h
Faixa de tensão	405-820 V	Potência nominal AC HP <sup>(3)</sup>	110 KW	Consumo em Stand-by	30 W
Tensão máxima CC	900 V	Corrente máxima AC	326 A	Consumo à noite	1 W
Corrente máxima CC	260 A	Tensão nominal AC	220 V/T System	Temperatura ambiente	-20°C até +65°C
Entradas CC	4	Frequência AC	50/60 Hz	Humidade relativa	0-95%
MPPT <sup>(1)</sup>	1	Cosseno Phi <sup>(4)</sup>	1	Classe de proteção	IP 20
<b>Eficiência</b>		Cosseno Phi ajustável	+/-0.9 para Pnom		
Eficiência máxima	98,40%	THD <sup>(5)</sup>	<3%		

Notas: <sup>(1)</sup> Maximum Power Point Tracking <sup>(2)</sup> High Temperature Mode, saídas nominais a 45°C <sup>(3)</sup> High Power Mode, saídas nominais a 40°C <sup>(4)</sup> Até 40°C de temperatura ambiente, Pmax=Pnom <sup>(5)</sup> Total Harmonic Distortion

Conforme dito anteriormente, a usina conta com nove inversores, sendo que cada inversor recebe a potência proveniente de duas *String Control Boxes*, totalizando uma potência de 111,8 kW, com corrente de 210,4 A, a uma tensão de 532V por inversor. Cada um dos inversores tem a capacidade de operar a uma potência máxima de 110 kW sem nenhuma perda de eficiência. Pode-se observar que o valor da potência de projeto na entrada do inversor está um pouco acima do limite estabelecido em sua especificação. Porém, tal condição incorpora as perdas inerentes ao processo de

geração, como as perdas por temperatura, que atuam diretamente nos painéis, bem como as perdas elétricas nos cabos. Além disso, a usina não atua com irradiação solar a todo instante. Deste modo, a potência está dentro de um limite suportável para a sua operação. Os inversores são do tipo auto comutado a IGBT's e, após a conversão, oferecem uma tensão de saída de 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro, em corrente alternada e frequência de 60Hz, para a sincronização com a rede. A saída dos inversores passa por um quadro geral de baixa tensão que faz a conexão com o transformador elevador.

#### 5.5.4 QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO (QGBT)

Um quadro geral de baixa tensão é responsável por interligar os inversores com o transformador elevador. A corrente de saída dos nove inversores é direcionada por um único caminho ao transformador. A representação no diagrama unifilar que ilustra esta ação do QGBT é apresentada na Figura 5.9.

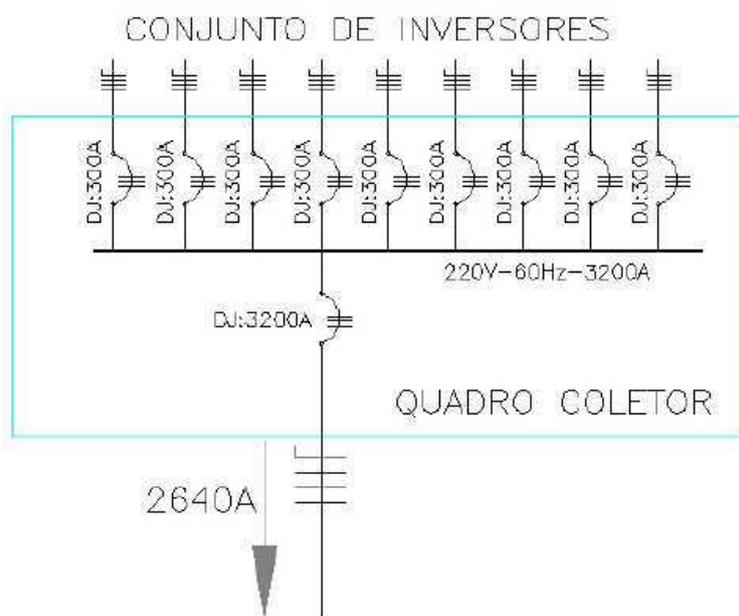


Figura 5.9. Diagrama unifilar do quadro geral de baixa tensão. [36]

A partir dos valores obtidos para as de chegada e saída dos quadros, é possível dimensionar os disjuntores que serão utilizados nos mesmos. Conforme se pode observar no diagrama unifilar da Figura 5.9, para as correntes advindas dos inversores são utilizados disjuntores do tipo caixa moldada 300 A / 70 kA, providos de contatos auxiliares com um conjunto de conectores de força e comando. Por outro lado, para a corrente total de saída do quadro que irá posteriormente para o transformador elevador,

utiliza-se um disjuntor do tipo caixa aberta 3200 A / 80 kA provido de bobinas de abertura e contatos auxiliares, além de comando motorizado.

Tabela 5.5. Características Gerais do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT). [36]

CARACTERÍSTICAS GERAIS – QUADRO GERAL DE BAIXA TENSÃO (QGBT)			
Características Principais		Características dos Barramentos	
Item	Descrição	Item	Descrição
Barramento Principal	3200 A	Material	Cobre Eletrolítico
		Conexões	Prateadas
Barramentos Verticais	400 A	Temperatura Máxima	105°C
		Revestimento	Cobre Nú
Tipo de Construção	Armário Auto-Portante, construção tipo 1; conforme NBR IEC 60439-1	Dispositivo de Manobra	Disjuntor Caixa Aberta
		Isolação	750 V em PVC
Uso	Abrigado	Tipo	Flexível, Anti-Chama
		Força	2,5mm <sup>2</sup>
Fixação	Pela Base	Controle e Iluminação	1,5mm <sup>2</sup>
		Circuitos Secundários	2,5mm <sup>2</sup>
Grau de Proteção	IP 4X	Entrada de Cabos	Parte Inferior do Painel
		Equipamentos Auxiliares	Tomadas Internas Tipo Universal



Figura 5.10. Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) instalado na usina. [36]

### 5.5.5 TRANSFORMADOR ELEVADOR

Após passar pelo Quadro Geral de Baixa Tensão, o fluxo de potência chega a um transformador elevador responsável por realizar a conexão com a rede elétrica. O

transformador utilizado no projeto é da fabricante ZILMER e tem potência nominal 1250 kVA e relação de transformação 220 V / 13.800 V. Trata-se de um transformador trifásico à óleo com refrigeração ONAN (Óleo Natural Ar Natural). Os transformadores a óleo possuem seu sistema isolante composto por uma parte sólida (papel isolante) e uma parte líquida (óleo isolante), este conjunto tem a função de garantir a rigidez dielétrica e mecânica do bobinado. Transformadores deste tipo são os mais comuns e são amplamente utilizados em diversas áreas. A refrigeração ONAN é uma refrigeração natural, que é feita pela circulação natural do óleo, que retira o calor do conjunto núcleo-bobina, transferindo-o ao meio ambiente. Os enrolamentos de baixa são ligados em estrela aterrado, enquanto os de alta são ligados em delta, para compatibilização com a rede de distribuição da concessionária local COELCE.



**ZILMER INELTEC**  
CONSTRUÇÕES ELÉTRICAS LTDA

Rua São João Clímaco, nº315  
 CEP-04255-000-São Paulo-SP  
 Fone : (011) 6947-4988

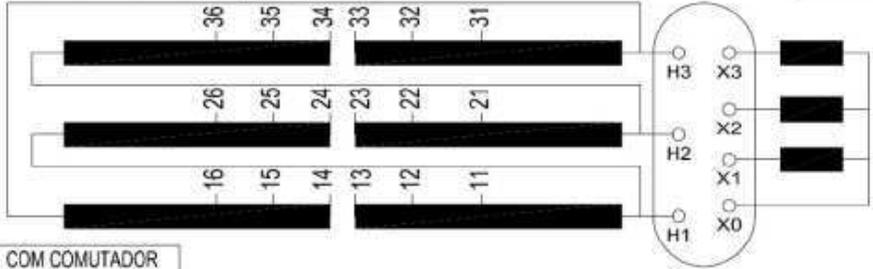
### TRANSFORMADOR A ÓLEO

SÉRIE N° **138980** TIPO **TAO** POT.NOM. **1250** kVA REFR. **ONAN** NBI **110** kV  
 FREQ. **60** Hz FASES **3** ANO **2010** MANUAL INSTR. **ZI-MO95** NORMA **NBR 5356**

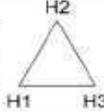
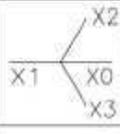
LIMITE ELEV. TEMP. ENROL. **65** °C NÍVEL A.T. B.T.  
 LIMITE ELEV. LIQ. ISOLANTE **65** °C ISOLAC. **1,2 15** kV FREQ. INDUSTRIAL **10 34** kV

CORR. EXCIT.  % IMPED.  % TEMP. DE REF. **75** °C EM **60** Hz POS. **14,49** kV

NÚCLEO E ENROLAMENTO **1390** Kg ÓLEO **780** Kg ÓLEO TIPO: **A** ÓLEO **910** l  
 CAIXA E ACESSÓRIOS **980** Kg TOTAL **3150** Kg



COM COMUTADOR

LINHA A.T. : H1 - H2 - H3				B.T.: X0-X1-X2-X3		
TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	COMUT	COMUTADOR CONECTA	CONEXÃO	CONEXÃO	TENSÃO (V)
14490	49,8	1	13-14 / 23-24 / 33-34			220Y/127 CORRENTE (A) ONAN
14145	51,0	2	12-14 / 22-24 / 32-34			
13800	52,3	3	12-15 / 22-25 / 32-35			
13455	53,6	4	11-15 / 21-25 / 31-35			
13110	55,0	5	11-16 / 21-26 / 31-36			
				GRUPO DE CONEXÃO	<b>Dyn 1</b>	<b>3280,0</b>

C.N.P.J. N° 60.618.428/0001-24 IND. BRASILEIRA

Figura 5.11. Placa de dados com as características elétricas do transformador elevador. [36]

A corrente projetada para circular no lado de baixa do transformador, como previamente apresentado, é de 2640 A. Aplicando-se a relação de transformação, a corrente a circular no lado de alta é de  $2640 \times (220 / 13.800) = 42$  A. Analisando-se a placa de dados verificamos que ambas as correntes estão dentro do limite especificado pelo transformador. Na saída do transformador, com o nível de tensão em 13,8 kV, os cabos isolados são enterrados e levados através de canaletas para o cubículo de média tensão.



Figura 5.12. Transformador Elevador ZILMER - 1250 kVA - 220 V / 13,8 kV. [36]

### 5.5.6 CUBÍCULO DE MÉDIA TENSÃO

A interface entre o transformador elevador e a linha de transmissão é realizada por um cubículo de média tensão. O cubículo é conectado ao transformador elevador por cabos isolados através de canaletas subterrâneas. Por outro lado, a interligação com a rede de distribuição da COELCE é feita por uma rede de 12km no padrão rural, onde a potência é transmitida a uma tensão de 13.8kV. Neste projeto, o modelo do cubículo é da fabricante portuguesa EFACEC, sendo montado pela empresa INGETEAM. Dentre os principais componentes do cubículo estão os Transformadores de Potencial (TP's) e Transformadores de Corrente (TC's). Além disso, o cubículo possui um disjuntor a gás SF<sub>6</sub>. O SF<sub>6</sub> é usado como um gás isolante em subestações, como um isolador e meio refrescante em transformadores e como um isolador e extintor de arco elétrico em disjuntores para aplicações de alta e média tensão. Estes são sistemas fechados que estão extremamente seguros e livres de improváveis fugas. Os disjuntores a SF<sub>6</sub> estão

tomando posição de destaque nas aplicações nos sistemas de potência devido à experiência operacional bem sucedida. O cubículo de média tensão ainda possui outros dois dispositivos que são: Chave Seccionadora e de Aterramento e o Medidor Digital Multifunção.

Tabela 5.6. Características elétricas do Disjuntor, TC's, TP's, Chave Seccionadora e Medidor digital presentes no cubículo de MT. [36]

<b>Disjuntor à Gás SF6</b>			<b>Transformador de Potencial</b>		
Tensão nominal	V	15000	Tensão máxima	V	15000
Classe de tensão	V	24000	Relação nominal	KV	13,8/v3 – 0,115/v3
Tensão suportável à frequência industrial	KV	38	Classe de exatidão e carga nominal	-	0,6P75
Tensão suportável de impulso atmosférico	KV	95	Fator de sobretensão	-	1,15
Corrente nominal	A	630	Quantidade	-	3
Capacidade de interrupção em circuito-circuito	KA	20	<b>Transformador de Corrente Tipo Enrolado</b>		
Ciclo de operações	-	O-0,3s-CO-3min-CO	Classificação (medição/proteção)	-	Medição e Proteção
Tensão nominal circuito auxiliares e comando	V	125Vcc	Relação de transformação	-	50/5-5
			Classe de exatidão e carga nominal	-	0,3C25/10B100
Número de pólos	-	3	Fator térmico nominal		1,2
			Quantidade	-	3
<b>Chave Seccionadora e de Aterramento</b>			<b>Medidor digital multifunção</b>		
Número de pólos	-	3	Grandezas disponíveis	-	V, A, kW, kVA, kWh, kVar, FP
Lâmina de terra (sim/não)	-	sim	Sinal de corrente	A	5
Base para fusíveis (sim/não)	-	sim	Sinal de tensão	V	115 Vac
Mecanismo de comando (manual/ motorizado)	-	manual	Alimentação auxiliar	V	125 Vcc
Acionamento	-	Sob carga	Saída serial	-	Sim
Classe de tensão	V	24000	Protocolo de comunicação em rede	-	Modbus RTU
Tensão nominal	V	13800			
Corrente nominal	A	630	Quantidade	-	1
Quantidade	-	1			



Figura 5.13. Cubículo de Média Tensão da fabricante EFACEC, montado pela INGETEAM. [36]

## 5.6 REGIME DE OPERAÇÃO DA USINA

A Usina Solar de Tauá só é capaz de fornecer energia para a rede nos períodos do dia onde a radiação solar está presente, sabendo-se que a mesma não apresenta banco de baterias. Para os períodos em que não existe radiação a usina é desligada. A eficiência da usina é afetada por certos fatores como as perdas por temperatura que atuam nos painéis solares e as perdas elétricas que ocorrem nos cabos, equipamentos e inversores.

A usina foi projetada para gerar efetivamente cerca de 1,56 GWh ao ano [35]. Pode-se então calcular o fator de capacidade projetado para a usina:

$$FC = \frac{\textit{Produção efetiva ao ano}}{\textit{Potência instalada da central} \times 8.760} = \frac{1,56\textit{GWh}}{1,0062\textit{MW} \times 8.760\textit{h}} = 17,7\%$$

Logo, o fator de capacidade projetado para a usina nas condições citadas apresenta uma média anual de 17,7%. A Figura 5.14 apresenta um gráfico comparativo



## 6 CONCLUSÃO

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, ficou evidenciado que as fontes de energias renováveis têm recebido cada vez mais atenção da sociedade nos dias de hoje. Surge então a busca por novos meios de geração de energia que sejam independentes dos combustíveis fósseis e que tenham menos impactos ambientais. Desta forma, a energia solar se apresenta como uma das soluções para complementar a geração de energia no Brasil.

Conforme foi constatado, apesar dos pontos positivos apresentados, um dos grandes empecilhos para a produção da energia fotovoltaica em larga escala são os elevados custos ainda existentes. Esta forma de energia é mais cara que a geração hidrelétrica e até mesmo que a eólica, outra importante fonte renovável. Além disso, a tecnologia solar fotovoltaica apresenta um baixo rendimento quando comparada a outras fontes de geração de energia. Hoje em dia, a aplicação da energia solar como uma fonte principal de geração de energia ainda é inviável, principalmente se comparada à geração hidrelétrica no Brasil. Entretanto, com o desenvolvimento da eficiência das células solares de silício, os custos da tecnologia fotovoltaica diminuíram significativamente nos últimos anos. Além disso, as células de película fina apesar de possuírem eficiência reduzida, apresentam menor desperdício de material e uma maior eficiência no seu processo de produção. Logo, grandes expectativas estão sendo criadas no que diz respeito às contínuas reduções de custos dos módulos fotovoltaicos.

Um importante fator a ser destacado é que muitos dos países que lideram a produção da energia solar são países que não recebem uma quantidade elevada de radiação solar. Um exemplo disto é Alemanha, país de clima tipicamente frio, onde uma significativa parcela da sua matriz energética é proveniente da energia solar. Tem-se, portanto um exemplo bem sucedido do emprego da tecnologia fotovoltaica. O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano.

O passo inicial para futuramente alcançar o mesmo sucesso de outros países foi a implantação da Usina Solar de Tauá, localizada estrategicamente em uma região onde a radiação solar é intensa praticamente o ano todo. Nos primeiros anos de operação da usina os resultados alcançados foram motivadores, tendo em vista que muitas das metas

de produção projetadas foram ultrapassadas. A usina foi um marco da inovação no país, sendo a primeira usina solar em escala comercial na América Latina. Nos dias de hoje, outras usinas fotovoltaicas conectadas à rede estão em operação no Brasil como a Usina Solar Tanquinho e a Usina Solar Cidade Azul, esta última com capacidade instalada de 3MWp e composta por 19.424 painéis.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] SOLAR ENERGY AT HOME. **Photovoltaic Solar Power**. 2014. Disponível em: <<http://www.solar-energy-at-home.com/photovoltaic-solar-power.html>>. Acesso em: 02 Agosto 2014.
- [2] AMBIENTE BRASIL. **Histórico das Células Fotovoltaicas e a Evolução da Utilização de Energia Solar**. 2014. Disponível em: <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia\\_solar/historico\\_das\\_celulas\\_fotovoltaicas\\_e\\_a\\_evolucao\\_da\\_utilizacao\\_de\\_energia\\_solar.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_a_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar.html)>. Acesso em: 05 Agosto 2014.
- [3] EXAME. **Os países líderes em geração com usinas solares**. 2013. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/china-lidera-geracao-com-usinas-solares-veja-ranking>>. Acesso em: 10 Agosto 2014.
- [4] NHH. **How to compare solar PV capacity with other energy sources**. 2014. Disponível em: <<http://blogg.nhh.no/reconhub/?p=70>>. Acesso em: 14 Agosto 2014.
- [5] GLOBO. **Energia eólica é cada vez mais viável. Solar poderá ser nos próximos anos**. 2013. Disponível em: <<http://redeglobo.globo.com/globoecologia/noticia/2013/08/energia-eolica-e-cada-vez-mais-viavel-solar-podera-ser-nos-proximos-anos.html>>. Acesso em: 14 Agosto 2014.
- [6] SANTOS, A. R.. **A atmosfera terrestre**. 2014. Disponível em: <[http://www.notapositiva.com/trab\\_estudantes/trab\\_estudantes/fisico\\_quimica/fisico\\_quimica\\_trabalhos/atmosferaterrestre.htm](http://www.notapositiva.com/trab_estudantes/trab_estudantes/fisico_quimica/fisico_quimica_trabalhos/atmosferaterrestre.htm)>. Acesso em: 16 Agosto 2014.
- [7] QUÍMICA NOVA INTERATIVA. **A química no efeito estufa**. 2014. Disponível em: <<http://qnint.sbj.org.br/>> . Acesso em: 16 Agosto 2014.
- [8] ANEEL. **Energia Solar: Tecnologias de Aproveitamento**. 2009. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/3\\_3.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3.htm)>. Acesso em: 21 Agosto 2014.
- [9] ALIBABA. **Sistema de aquecimento solar com projeto popular para piscina**. 2014. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/solar-heating-system-with-popular-design-for-swimming-pool-431983068.html>> Acesso em: 18 Agosto 2014.
- [10] SANTOS, G. V.. **Materiais Semicondutores**. 2013. Disponível em: <<http://eletronicaemcasa.blogspot.com.br/2013/02/materiais-semicondutores.html>> Acesso em: 16 Agosto 2014.
- [11] BARBOSA, I. S. B.. **Dimensionamento de um Sistema Solar Fotovoltaico Isolado**. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- [12] COMERCIAL PYRAMON STUDIO LIGHT LTDA. **Energia do sol ilumina o desenvolvimento**. 2011. Disponível em: <<http://comercialpyramonstudiolight.blogspot.com.br/2011/11/energia-do-sol-ilumina-o.html#.VCw53vldV9U>> Acesso em: 21 Agosto 2014.
- [13] FRAUNHOFER ISE. **World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency**. 2013. Disponível em: <<http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/world-record-solar-cell-with-44.7-efficiency>>. Acesso em: 3 Setembro 2014.

- [14] UNIA. **Materiales y procesos de fabricación de células fotovoltaicas**. 2010. Disponível em: <[http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/tecnologia-de-celulas-y-modulos-fotovoltaicos/Materiales/unidad-3/skinless\\_view](http://ocw.unia.es/ciencias-tecnologicas/tecnologia-de-celulas-y-modulos-fotovoltaicos/Materiales/unidad-3/skinless_view)> Acesso em: 3 Setembro 2014.
- [15] PORTAL ENERGIA. **Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares**. 2011. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/>>. Acesso em: 5 Setembro 2014.
- [16] PAINÉIS FOTOVOLTAICOS. **Painéis policristalinos**. 2011. Disponível em: <<http://www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos.php>> Acesso em: 5 Setembro 2014.
- [17] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Células solares mais baratas têm aumento de eficiência**. 2007. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115070523#.VDAJ-fldV9V>>. Acesso em: 6 Setembro 2014.
- [18] ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Tecnologias: Painéis Fotovoltaicos (PV)**. 2014. Disponível em: <[http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID\\_conteudo=43&ID\\_area=8&ID\\_sub\\_area=26](http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=43&ID_area=8&ID_sub_area=26)>. Acesso em: 9 Setembro 2014.
- [19] ECOVOLTS. **Constituição das células**. 2011. Disponível em: <<http://ecovolts.webnode.pt/celulas-fotovoltaicas/constitui%C3%A7%C3%A3o/>> Acesso em: 9 Setembro 2014.
- [20] ALIBABA. **CIGS Módulos solares**. 2014. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-free/cigs-solar-modules-260273386.html>> Acesso em: 11 Setembro 2014.
- [21] BLUESOL. **Energia Solar: Como Funciona? – Tipos de Células Fotovoltaicas**. 2012. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 11 Setembro 2014.
- [22] AMÉRICA DO SOL. **Telureto de Cádmio (CDTE)**. 2014. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/telureto-de-cadmio-cdte/>> Acesso em: 11 Setembro 2014.
- [23] ATHENNA. **Novas células solares híbridas podem aumentar a eficiência energética em até 25%**. 2014. Disponível em: <[http://www.athenna.com/pt/novas-celulas-solares-hibridas-podem-aumentar-a-eficiencia-energetica-em-ate-25/athenna/web\\_design/web-design/](http://www.athenna.com/pt/novas-celulas-solares-hibridas-podem-aumentar-a-eficiencia-energetica-em-ate-25/athenna/web_design/web-design/)> Acesso em: 14 Setembro 2014.
- [24] PORTAL ENERGIA. **Energia fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. 2014. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 14 Setembro 2014.
- [25] MPPT SOLAR. **Ligação em paralelo de painéis solares**. 2014. Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>> Acesso em: 16 Setembro 2014.
- [26] MPPT SOLAR. **Ligação em série de painéis solares**. 2014. Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html>> Acesso em: 16 Setembro 2014.
- [27] SOLOSTOCKS. **Descrição de Controlador de Carga 7A 12V**. 2014. Disponível em: <<http://www.solostocks.com.br/venda-produtos/outros-produtos-equipamentos-eletricos/controlador-de-carga-7a-12v-unitron-total-control-80-770632>> Acesso em: 16 Setembro 2014.
- [28] GTES; CEPEL-CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Edição Especial PRC-PRODEEM, 2004.
- [29] BARBIAN, E.. **Conheça os tipos de No-break**. 2013. Disponível em: <<http://www.oficinadanet.com.br/post/10738-conheca-os-tipos-de-no-break>> Acesso em: 19 Setembro 2014.

- [30] ADRENALINE. **Tipo de onda senoidal**. 2012. Disponível em: <<http://adrenaline.uol.com.br/forum/energia/437545-tipo-de-onda-senoidal-no-break-ax750.html>> Acesso em: 19 Setembro 2014.
- [31] IPB. **Banco de baterias solares**. 2014. Disponível em: <[http://portal.ipb.pt/portal/page?\\_pageid=395,227844&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://portal.ipb.pt/portal/page?_pageid=395,227844&_dad=portal&_schema=PORTAL)> Acesso em: 20 Setembro 2014
- [32] VEJA. **Eike inaugura primeira usina solar comercial do país**. 2011. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/noticia/economia/eike-inaugura-primeira-usina-solar-comercial-do-pais>>. Acesso em: 20 Setembro 2014.
- [33] WIKIPÉDIA. **Tauá**. 2014. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Tau%C3%A1>>. Acesso em: 20 Setembro 2014.
- [34] INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 21 Setembro 2014.
- [35] **SOLAR TAUÁ - Preparando-se Para o Futuro**. Energia, MPX. Rio de Janeiro: s.n., 2012.
- [36] BEIGELMAN, B. B.. **A energia solar fotovoltaica e a aplicação na usina solar de Tauá**. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [37] SUNFIELDS. **Painel fotovoltaico Kyocera**. 2014. Disponível em: <<http://www.sfe-solar.com/distribucion-venta-modulos-fotovoltaicos/kyocera/kyocera-kd215gh-2pu/>>. Acesso em: 21 Setembro 2014.
- [38] KYOCERA. **Kyocera Solar**. 2014. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.au/assets/001/5424.pdf>>. Acesso em: 21 Setembro 2014.
- [39] INGLETEAM. **String Control**. 2014. Disponível em: <[http://www.ingetteam.it/en/energy\\_division/photovoltaic/ingecon\\_sun\\_string\\_control/](http://www.ingetteam.it/en/energy_division/photovoltaic/ingecon_sun_string_control/)>. Acesso em: 21 Setembro 2014.
- [40] INGLETEAM. **Inversores Ingecon Sun Power**. 2014. Disponível em: <[http://www.ingetteam.com/Portals/0/Catalogo/Producto/Documento/PRD\\_803\\_Archivo\\_ingecon-sun-power-tl.pdf](http://www.ingetteam.com/Portals/0/Catalogo/Producto/Documento/PRD_803_Archivo_ingecon-sun-power-tl.pdf)>. Acesso em: 22 Setembro 2014.
- [41] ANEEL. **RESOLUÇÃO N° 62, DE 5 DE MAIO DE 2004**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2004062.pdf>>. Acesso em: 22 Setembro 2014.
- [42] SHARMA, V., CHANDEL, S.S.: **Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India**. Energy 55, 476 – 485. 2013.