



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

Pedro Vítor de Souza Soares



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
ISOLADOS NO CANTEIRO DE OBRAS DA SUBESTAÇÃO
JUAZEIRO III**



Departamento de
Engenharia Elétrica



PEDRO VÍTOR DE SOUZA SOARES

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS NO
CANTEIRO DE OBRAS DA SUBESTAÇÃO JUAZEIRO III

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, Sc. M.

Campina Grande
2019

PEDRO VÍTOR DE SOUZA SOARES

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS NO
CANTEIRO DE OBRAS DA SUBESTAÇÃO JUAZEIRO III

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Roberto Silva de Siqueira
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, Sc. M.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe com o propósito de pôr fim a sua incansável luta e conceder-lhe descanso e conforto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por incluir em seus planos a possibilidade de confecção deste trabalho e obtenção das honrarias que vêm em conjunto.

Em seguida, agradeço a minha mãe, Graça, por não poupar esforços e conceder tudo o que eu precisei para trilhar o caminho que me levou até aqui.

Agradeço à minha namorada, Stephanie, por me apoiar nos momentos mais difíceis e, como se não bastasse, ainda me auxilia na confecção deste documento.

Agradeço ao meu orientador, Sc. M. Leimar de Oliveira, pelo bom humor, pelas orientações, pelos momentos de descontração e por me aceitar como seu orientando. Sua presença, em minha história, foi de inegável valor. Aprendi lições que levarei comigo até o fim dos meus dias.

Agradeço à coordenação e secretaria do curso de graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em especial à Adail e Tchaikovsky, por proporcionarem orientações fundamentais e demasiado auxílio no caminho que é cursar engenharia elétrica na instituição. Para mais, agradeço a todos os professores dos quais fui discente ao longo desta caminhada. São muitos para citar características específicas, mas me proporcionaram grande conhecimento técnico e, por vezes, lições de vida e conduta. A todos os citados neste parágrafo, meu mais sincero obrigado.

Agradeço a todos os meus colegas de faculdade por todos os momentos, bons e ruins, que passaram comigo durante a graduação. Todos esses momentos construíram a pessoa que sou hoje e estão marcados na minha história. Cada um de vocês me deixou um ensinamento, que levarei comigo pelo resto dos meus dias.

Agradeço a todos os amigos pessoais que, embora poucos, sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço a todos que não tiveram aqui uma referência direta, mas que contribuíram na minha história em algum momento.

*“Trabalha como se fosses imortal.
Ama como se fosses morrer hoje.”*

Sêneca.

RESUMO

Este documento tem como objetivo o dimensionamento dos componentes de um sistema fotovoltaico isolado. Até o instante do dimensionamento, serão apresentados alguns conceitos sobre o tema. Inicia-se com a discussão da situação mundial, seguida de uma breve introdução. Na sequência, são abordados conceitos acerca do sol e da taxa de incidência solar no Brasil, seguidos pelo efeito fotovoltaico, a física da célula fotovoltaica e seu funcionamento, assim como os principais materiais utilizados em sua produção. Então, os componentes principais de um sistema fotovoltaico isolado são explanados, exaltando seus atributos e funcionalidades. Após esta explanação, o dimensionamento é iniciado, seguido dos resultados obtidos e suas conclusões. O dimensionamento baseia-se na alimentação de um canteiro de obras em operação localizado na zona rural do município de Juazeiro, estado da Bahia. A decisão de disposição dos equipamentos ficará por conta da empresa proprietária do canteiro, uma vez da mobilidade e dinamicidade das instalações.

Palavras-chave: Dimensionamento, Sistema Fotovoltaico Isolado, Efeito Fotovoltaico, Célula Fotovoltaica, Panorama Mundial, Canteiro de Obras.

ABSTRACT

This document aims to sizing of the components of an isolated photovoltaic system. Until the moment of sizing, some concepts about the theme will be presented. It begins with a discussion of the world situation, followed by a brief introduction. Next, concepts about the sun and the solar incidence rate in Brazil are approached, followed by the photovoltaic effect, the photovoltaic cell physics and its operation, as well as the main materials used in its production. Then the main components of an isolated photovoltaic system are explained, extolling its attributes and functionality. After this explanation, the sizing itself is started, followed by the obtained results and their conclusions. The sizing is based on the feeding of a construction site in operation located in the rural area of Juazeiro, state of Bahia. The decision to dispose of the equipment will be up to the owner of the site, once the mobility and dynamics of the facilities.

Keywords: Sizing, Isolated Photovoltaic System, Photovoltaic Effect, Photovoltaic Cell, World Situation, Construction Site.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Complexo solar flutuante no Japão.	19
Figura 2 - Complexo solar em Mula, Espanha.	21
Figura 3 - Arranjo de uma célula solar.	26
Figura 4 - Distribuição da incidência solar ao longo do território nacional no período 1999-2015.	28
Figura 5 - Pireliômetro.	29
Figura 6 - Piranômetro.	30
Figura 7 - Estrutura cristalina do silício.	32
Figura 8 - Faixa aproveitável do espectro eletromagnético.	34
Figura 9 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.	34
Figura 10 – Comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica.	35
Figura 11 - Curva de potência para uma célula fotovoltaica característica.	36
Figura 12 - Comportamento de uma célula fotovoltaica para diferentes temperaturas.	38
Figura 13 - Variação nos perfis de tensão e corrente para diferentes valores de incidência solar.	39
Figura 14 - Rendimento em termos de intensidade de radiação solar.	39
Figura 15 - Célula de silício monocristalino.	41
Figura 16 - Células de silício policristalino.	42
Figura 17 - Módulo de Arseneto de Gálio.	42
Figura 18 - Estrutura em camadas de uma célula de silício amorfo.	43
Figura 19 - Módulo de silício amorfo.	44
Figura 20 - Filme de telureto de cádmio.	45
Figura 21 - Filme de disseleneto de cobre índio/gálio.	46
Figura 22 - Comparação, em termos de rendimento, de vários tipos de materiais.	47
Figura 23 - Curva característica da conexão em série de células fotovoltaicas.	49
Figura 24 - Curva característica da conexão em paralelo de células fotovoltaicas.	50
Figura 25 - Curva característica de um módulo fotovoltaico.	50
Figura 26 - Influência da temperatura na característica de um módulo fotovoltaico.	52
Figura 27 - Influência da temperatura na curva de potência de um módulo fotovoltaico.	52
Figura 28 - Comportamento das grandezas para diferentes níveis de radiação incidente.	53
Figura 29 - Esquema elétrico de um controlador série.	56
Figura 30 - Esquema de um controlador <i>shunt</i>	57
Figura 31 - Esquema de um controlador <i>MPP</i>	58
Figura 32 - Gráfico de capacidade de uma bateria em termos do número de ciclos.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Incentivos fiscais brasileiros à geração de energia solar.	24
Tabela 2 - Energia necessária para vencer a banda proibida em alguns semicondutores.	32
Tabela 3 - Quantificação da potência das cargas para uma tensão de barramento de 48 V.	62
Tabela 4 - Características da bateria escolhida.	63
Tabela 5 - Quantificação dos acumuladores de carga.	63
Tabela 6 - Características do módulo escolhido.	65
Tabela 7 - Dimensionamento das novas tensão e corrente de máxima potência.	66
Tabela 8 - Dimensionamento do número de módulos fotovoltaicos.	67
Tabela 9 - Características do controlador de carga escolhido.	68
Tabela 10 - Informações sobre o conversor <i>DC-DC</i> escolhido.	69
Tabela 11 - Informações sobre o inversor escolhido.	70
Tabela 12 – Custos estimados dos principais componentes do sistema fotovoltaico.	73
Tabela 13 – Custo total do abastecimento para situação atual do canteiro.	74
Tabela 14 – Balanço financeiro levando-se em consideração a vida útil do sistema fotovoltaico.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
BEP	Barramento de Equipotencialização
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CIGS	Disseleneto de Cobre Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre Índio
COP21	21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas
DC	Corrente Constante
AC	Corrente Alternada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FF	Fator de Forma
GAP	Banda Proibida em Semicondutores
HCI	Heterojunção com Camada Intrínseca
MPP	Ponto de Máxima Potência
MPPT	Seguidor do Ponto de Máxima Potência
NBR	Norma Brasileira
NOCT	Temperatura Nominal de Operação da Célula
<i>Off Grid</i>	Fora do Sistema Interligado Nacional
<i>On Grid</i>	Ligado ao Sistema Interligado Nacional
PE	Condutor de Proteção
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PWM	Modulação por Largura de Pulso
<i>Silk-Screen</i>	Impressão em Tela
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	Condições Padrão de Teste
<i>Touchscreen</i>	Telas Táteis
A	Ampère
Ah	Ampère-Hora
Ah/dia	Ampère-Hora Por Dia

a-Si:H	Silício Amorfo dopado com Hidrogênio
a-Si	Silício Amorfo
c	Velocidade da Luz no Vácuo
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro Quadrado
CO ₂	Gás Carbônico
CdS	Sulfeto de Cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
eV	Elétron-Volt
f	Frequência
GaAr	Arseneto de Gálio
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-Hora
h	Constante de Planck
Hz	Hertz
K	Kelvin
kV	Quilovolt
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-Hora
kWh/dia.m ²	Quilowatt-Hora por Dia Metro Quadrado
mA	Miliampère
mA/cm ²	Miliampère por Centímetro Quadrado
mm ²	Milímetro Quadrado
m/s	Metro por Segundo
m-Si	Silício Monocristalino
mW	Miliwatt
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-Hora
OTI	Óxido de Estanho e Índio
V	Volt
W	Watt
W/m ²	Watt por Metro Quadrado
ZnO:Al	Óxido de Zinco dopado com Alumínio

nm	Nanometro
μm	Micrometro
λ	Comprimento de Onda
λ_{crit}	Comprimento de Onda Crítico

SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Objetivo	17
1.2	Motivação	17
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	Panorama Mundial.....	18
2.1	Japão	18
2.2	Europa.....	20
2.3	Estados Unidos	21
2.4	Ásia	22
2.5	Brasil.....	23
3	Trajectoria e Mensuração da Tecnologia	25
3.1	Introdução	25
3.2	Radiação Solar	26
3.3	Instrumentos de Medição	28
3.3.1	Pireliômetro	29
3.3.2	Piranômetro	29
4	A Célula Fotovoltaica.....	31
4.1	O Efeito Fotovoltaico.....	31
4.2	Circuito Elétrico Equivalente.....	34
4.3	Parâmetros Relevantes	37
4.3.1	Temperatura de Operação.....	37
4.3.2	Intensidade de Radiação Solar.....	38
4.4	Técnicas de Fabricação	40
4.4.1	Purificação	40
4.4.2	Dopagem.....	40
4.5	Materiais Empregados	40
4.5.1	Silício Monocristalino	41
4.5.2	Silício Policristalino	41
4.5.3	Arseneto de Gálio (<i>GaAr</i>).....	42
4.5.4	Filmes Finos (<i>Thin-Film</i>).....	42
4.5.5	Células Híbridas	46
5	Componentes Básicos de um Sistema Fotovoltaico Isolado.....	48
5.1	Módulo Fotovoltaico.....	48
5.1.1	Associação de Células	48
5.1.2	Parâmetros de Fábrica	51
5.1.3	Fatores Externos	52
5.2	Inversores.....	53

5.3	Controladores de Carga.....	56
5.3.1	Controlador Série.....	56
5.3.2	Controladores <i>Shunt</i>	57
5.3.3	Controlador Ponto de Máxima Potência (<i>MPP</i>)	57
5.4	Bancos de Baterias (Acumuladores de Carga).....	58
6	Dimensionamento Elétrico	61
6.1	Estudo Solarimétrico.....	61
6.2	Dimensionamento das Cargas	61
6.3	Dimensionamento dos Acumuladores.....	62
6.4	Dimensionamento do Arranjo dos Módulos	64
6.4.1	Corrente de Projeto.....	64
6.4.2	Correção dos Fatores de Máxima Potência.....	64
6.4.3	Dimensionamento do Número de Módulos	66
6.5	Controlador de Carga.....	67
6.6	Conversor <i>DC-DC</i>	68
6.7	Inversor de Frequência.....	69
6.8	Especificação dos Condutores	70
6.9	Fusíveis de Fileira	72
6.10	Disjuntores e Interruptor Diferencial Residual (IDR).....	72
6.11	Detalhes e Observações	72
6.12	Resultados Obtidos	73
7	Conclusões.....	76
	Referências	77
	Apêndice A.....	79
	Apêndice B.....	80
	Apêndice C.....	81
	Apêndice D.....	82

1 INTRODUÇÃO

Do final do século XX, década de 70, até o presente momento, tratativas sobre fontes renováveis de energia acontecem no mundo. Neste âmbito, pela primeira vez, em 1972, no Protocolo de Estocolmo, a preocupação com o meio ambiente foi posta em pauta. Nos anos seguintes, com o Protocolo de Montreal (1987), Protocolo de Kyoto (1997), Rio +10 (2002) e Acordo de Paris (2015), fontes alternativas foram buscadas com o propósito tanto de reduzir o impacto ambiental como assegurar o abastecimento energético. Esta iniciativa possibilitou, então, o aparecimento de novas fontes alternativas tais como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica.

A matriz energética brasileira conta, principalmente, com a forma hidrelétrica de obtenção de energia. Tal forma torna-se sustentável devido ao extenso potencial hidráulico brasileiro, composto pelas suas inúmeras bacias hidrográficas. Paralelamente, outros países têm alcançado avanços substanciais no que tange a outras formas renováveis de obtenção de energia. Além do seu potencial hidrelétrico, o Brasil conta com grande incidência solar anual e um considerável regime de ventos, o que proporciona as bases para a instalação e desenvolvimento de outras formas de obtenção de energia.

Neste trabalho, a fonte central de obtenção de energia será a solar fotovoltaica. Sendo seus primeiros estudos datados do final do século XIX, tal fonte, utilizada inicialmente para finalidades espaciais, é utilizada atualmente também para geração residencial, comercial e industrial, tanto ligada ao SIN (Sistema Interligado Nacional) (*on grid*) quanto isolada (*off grid*).

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo fornecer conceitos e explicações acerca da energia solar fotovoltaica incluindo sua trajetória histórica, princípios de funcionamento, principais componentes utilizados em um sistema fotovoltaico e suas funções e um estudo de caso onde a viabilidade de instalação de um sistema *off grid* é analisada.

1.2 MOTIVAÇÃO

O país está localizado, em sua maior parte, entre os Trópicos de Câncer e a Linha do Equador, atribuindo-lhe clima predominantemente tropical. Tal fato, aliado às condições de terreno e vegetação, o concede uma alta taxa de incidência solar anual. Dessa forma, torna-se propícia a utilização de formas solares de obtenção de energia.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho conta com sete capítulos. O primeiro é destinado à apresentação do tema, objetivos e forma de elaboração do documento. O segundo apresenta uma visão global de utilização de tal forma de energia. O terceiro mostra uma perspectiva histórica da evolução da tecnologia abordada, desde os primórdios dos estudos até a atualidade, assim como a energia solar, taxa de radiação solar anual e seus instrumentos de quantificação. O quarto aborda a célula fotovoltaica: o efeito fotovoltaico, circuito equivalente e métodos de produção. O quinto, a explanação dos elementos que compõem a configuração básica de um sistema solar fotovoltaico. O sexto aborda um estudo de caso, onde a viabilidade de instalação de um sistema fotovoltaico é analisada. O sétimo, por fim, apresenta as conclusões obtidas com o estudo.

2 PANORAMA MUNDIAL

É inegável que as formas renováveis de obtenção de energia têm se espalhado substancialmente pelo mundo. A Europa atinge ápices súbitos, seguidos de quedas de mesmo patamar. As variações monocristalina e policristalina do silício se apresentam de forma sólida no mercado compondo grande parte dos módulos utilizados no mundo. No Brasil, a adesão à tal forma de energia tem caráter incerto, uma vez da elaboração e aprovação de normas que dificultam sua viabilização. Neste Capítulo, abordar-se-á a situação em diversas regiões do globo.

2.1 JAPÃO

O Japão, com sua pouca extensão territorial, é tomado por relevos irregulares. Tais condições fazem com que o país busque formas alternativas e engenhosas de abastecimento de energia.

Após o incidente nuclear de Fukushima, o país passou a adotar programas em escala e políticas de subsídios para encorajar a adesão à energia solar. Em 2011, após o acidente nuclear, os 54 reatores que compunham a usina foram desligados sequencialmente. Em março de 2013, após o desligamento do penúltimo reator operante, o único restante localizava-se na ilha de *Hokkaido*.

Em substituição às centrais nucleares, vitais ao abastecimento do país, o Japão iniciou, em 2013, um projeto denominado "Cinturão Solar do Leste do Japão". Já em operação, o complexo conta com uma capacidade de 70 megawatts (*MW*) instalados e ocupa uma área de mais de 1,2 bilhão de metros quadrados, localizado em uma enseada segura de desastres naturais ao sul do país. O complexo possui cerca de 290 mil painéis solares e é capaz de alimentar cerca de 22 mil residências.

Em 2016, as empresas *Kyocera* (já participante no projeto "Cinturão Solar do Leste do Japão") e *Century Tokyo Leasing* iniciaram um projeto que conta com 51 mil painéis flutuantes, conforme a Figura 1. A previsão é de que seja a usina de energia solar flutuante mais potente do mundo. O lugar definido para construção da grande e potente usina foi sobre as águas do reservatório *Yamakura*, localizado a cerca de 70

quilômetros (*km*) de Tóquio. Em funcionamento total, a usina deverá produzir mais de 16 gigawatt-hora (*GWh*) por ano, suficientes para abastecer cerca de 5 mil residências. O projeto foi finalizado em março de 2018 e, segundo estimativas, consegue evitar uma emissão 7411 toneladas de gás carbônico (CO_2) para a atmosfera a cada ano.

Figura 1 – Complexo solar flutuante no Japão.



Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/usina-de-energia-solar-flutuante-mais-potente-do-mundo-e-concluida-no-japao.html>

Para mais, a cidade de *Ota*, localizada na província de *Gunma*, a 138 *km* de Tóquio, conta com mais de 1000 painéis solares instalados sobre suas residências, que ajuda a suprir a demanda dos seus 220 mil habitantes. Tal densidade de painéis solares e visão característicos tornaram-na conhecida como "a cidade solar".

Em termos de tecnologia, o Japão retém quase que a maior parte da produção de células de silício amorfo mundial. Tal produção é voltada ao mercado interno para uso em utensílios cotidianos como calculadoras e relógios. Em termos de células de silício cristalino, a produção é quase totalmente direcionada à exportação para a Europa e ao mercado indiano. Conta ainda com uma pequena produção de células de *CdTe*, utilizadas basicamente na produção de calculadoras.

2.2 EUROPA

Registrou, entre 2004 e 2012, um aumento exponencial de potência instalada, de meros 0,7 *kWh* a 62,5 megawatt-hora (*MWh*). Políticas governamentais favoráveis, como subsídios e sistemas de apoio, associadas à crescente queda nos preços dos equipamentos, graças à concorrência chinesa, tornaram tal desenvolvimento possível, liderado pela Alemanha, Espanha e Itália. Em tal ponto, a Europa liderava o mercado solar, sendo responsável pela produção de 59% da energia solar fotovoltaica mundial, com 81,3 gigawatts (*GW*) de potência instalada.

No período 2011-2012, com a ruptura da bolha, o declínio foi substancial. O mercado alemão, por exemplo, caiu do primeiro ao quarto lugar mundial após registrar crescimento de apenas 3,3 *GW* após 3 anos consecutivos registrando crescimento de 7,6 *GW* anuais. Tendo como predecessores o fim dos subsídios nacionais e internacionais, a multiplicação dos projetos especulativos e a guerra de preços dos painéis, as empresas apresentaram declínio.

Em função da potência instalada, a Europa lidera, por algum tempo, o desenvolvimento da energia fotovoltaica. Graças à falta de investimento, logo é ultrapassada pela Ásia, que detém 60% das instalações mundiais.

Atualmente, a Europa enfrenta dificuldades acerca do excesso de capacidade de produção. Tal fato ocasiona uma diminuição considerável no preço unitário da eletricidade. Além disso, uma visão mais ecológica de utilização de energia tende a se espalhar dentre a população, remetendo a um processo de "poupança energética". Como consequência, há um declínio no interesse por fontes solares.

Mesmo com tal panorama, é estimado que a integração energética, a superação do problema de irregularidade luminosa (devido ao clima temperado característico) e o consequente desenvolvimento de novos sistemas constituirão as bases para ajustes no fornecimento. Não obstante, a *COP21*, conferência sobre alterações climáticas, incita alterações que permeiam aprimoramentos no setor como melhorias de acesso à energia renovável e a já existente redução de 20% na emissão de gases que provocam efeito estufa até 2020.

Recentemente, foi inaugurada a maior central solar da Europa. Instalada em Mula, município de Múrcia, Espanha, tem 494 *MW* instalados, geridos pela *Northleaf*. A central foi conectada à rede em julho deste ano, concedendo recordes de produção à

Espanha. Têm uma extensão de aproximadamente 1000 hectares, conforme a Figura 2, com uma produção estimada de 750 *GWh* por ano, suficiente para abastecer uma cidade como a capital Múrcia, com mais de 440 mil habitantes.

Figura 2 - Complexo solar em Mula, Espanha.



Fonte: <https://www.portal-energia.com/maior-central-solar-fotovoltaica-europa-147920/>

Sua tecnologia consiste quase que completamente de células de silício cristalino, voltado ao mercado interno para aplicações financiadas pelo governo.

2.3 ESTADOS UNIDOS

Apresenta um exemplo de expansão no setor mesmo com a oposição de diversos fatores substanciais. Durante o governo de seu ex-presidente, Barack Obama, grande defensor de fontes renováveis, os Estados Unidos lideram a expansão fotovoltaica no mundo. Com a posse de seu atual presidente e adoção de medidas protecionistas, o mercado de energias renováveis acaba prejudicado.

Algumas dessas medidas entraram em vigor no ano em que tomou posse, tais quais a que retira o limite à emissão de gases pelas usinas de combustíveis fósseis, a retirada do país do acordo climático de Paris e a eliminação de todas as medidas do Plano de Energia Limpa criado por Barack Obama. Não obstante, impôs ainda tarifa de 30% sobre todos os módulos chineses importados, que constituem grande parte dos

módulos de utilização mundial e que respondem por grande parte dos já instalados no país.

Mesmo com todos os empecilhos, o setor ainda continua em crescimento. Juntamente com a energia eólica, representa 94% da nova potência instalada no país no primeiro trimestre de 2018, segundo o *Energy Infrastructure Update for March 2018*. Tal avanço inclui 92 projetos solares, somando uma potência de 1,36 GW.

Além de constituir formas mais amplas de obtenção de energia, o avanço na energia solar contribui para a geração de novos empregos no país. É estimado que 1 a cada 50 funcionários contratados o é feito por uma empresa de energia solar. Ao longo de 2016, cerca de 260 mil novos postos de trabalho foram gerados no país pelo setor. Entre 2016 e 2015 foi estimado um crescimento de 25% na geração de empregos.

Em termos de tecnologia, tem sua produção composta basicamente por silício cristalino, com alguns poucos produtores de silício amorfo voltados ao mercado interno. Incrementou, recentemente, esta produção, competindo agora com o Japão.

2.4 ÁSIA

Segundo a consultoria *Rystad Energy*, o investimento em energia renovável na região Ásia-Pacífico deverá ultrapassar os aportes na exploração de petróleo e gás em 2020. A China se apresenta, atualmente, como o principal investidor mundial em energia renovável. Compreende também, em seus domínios, o aporte tecnológico mais utilizado mundialmente em sistemas fotovoltaicos, liderando a exportação de tal maquinário. Além da China, a Índia, Austrália, Japão, Vietnã e Coreia do Sul constituem os principais alvos de investimentos internacionais no setor até 2020, motivados principalmente por políticas governamentais locais que dão o aporte necessário. É estipulado que, até 2020, as grandes petroleiras da região como a *Petronas* e a *Shell* sejam os desenvolvedores de tecnologias renováveis, incluindo a forma eólica.

Em janeiro deste ano, o Cazaquistão inaugura a usina solar de "*SES Saran*", com uma potência instalada de 100 MW. Tal potência a concede o título de maior usina solar de toda a Ásia Central. Situada nos arredores de *Saran*, na província de *Qaraghandy*, Cazaquistão, ocupa uma área de 164 hectares e conta com 307 mil painéis solares. De acordo com o chefe de estado *Nursultan Nazarbayev*, o objetivo consiste em alterar a

matriz energética do país com a inserção de fontes renováveis até a faixa dos 30%. Objetiva-se tal feito até 2030.

2.5 BRASIL

No início de outubro de 2017, o Brasil contava com 15,7 mil instalações fotovoltaicas, somando 438,3 *MW* de potência instalada. Segundo o Ministério De Minas e Energia (MME) (2016), considerando a micro e mini geração distribuída, o setor comercial detém a maior fatia de potência instalada (37%), o setor residencial o maior número de usuários (75%) e o setor industrial a maior potência por usuário (81 quilowatts - *kW*). Ao mesmo tempo, vários incentivos fiscais são adotados, conforme Tabela 1, como forma de motivação à adesão. Atualmente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) propôs uma taxa que recai diretamente sobre a geração distribuída e acaba por frustrar o setor. A taxa recai sobre a parcela de energia que é gerada e voltaria em quase 100% como crédito ao gerador. Segundo estimativas, a redução no crédito é da ordem de 68%. Tal panorama acaba por dificultar a adesão do micro e mini gerador à forma crescente de geração.

Tabela 1 - Incentivos fiscais brasileiros à geração de energia solar.

Tributo(s)	Descrição
Isenção de IPI	Decreto nº 7212, de 15/06/2010, que torna a energia elétrica imune.
Isenção de ICMS	Há a isenção do imposto sobre circulação de mercadorias para componentes utilizados para aproveitamento das energias eólica e solar.
Desconto na TUSD/TUST	Redução de 80% no imposto sobre distribuição e transmissão de energia para empreendimentos abaixo de 30 <i>MW</i>
Isenção de ICMS, PIS e Cofins na Geração Distribuída	Os tributos só se aplicam a instalações abaixo de 1 <i>MW</i> e para o excedente de energia do consumidor.
Inclusão no programa "Mais Alimentos"	Possibilita financiamento de equipamentos a juros mais baixos.
Apoio BNDES	O Banco Nacional para Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) foi autorizado a financiar projetos de geração distribuída com taxas diferenciadas em escolas públicas e hospitais.
Plano Inova Energia	Fundo criado pelo BNDES, Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ANEEL com foco na empresa privada e visando desenvolvimento tecnológico em energias renováveis e demais áreas.

Fonte: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>

3 TRAJETÓRIA E MENSURAÇÃO DA TECNOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

A primeira observação data de 1839, pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Em seus estudos, Becquerel observava o paramagnetismo do oxigênio líquido, quando por acaso observou que eletrodos de platina ou de prata, quando expostos à luz, produzem uma resposta elétrica. Tal fenômeno, na época, foi denominado de efeito fotovoltaico.

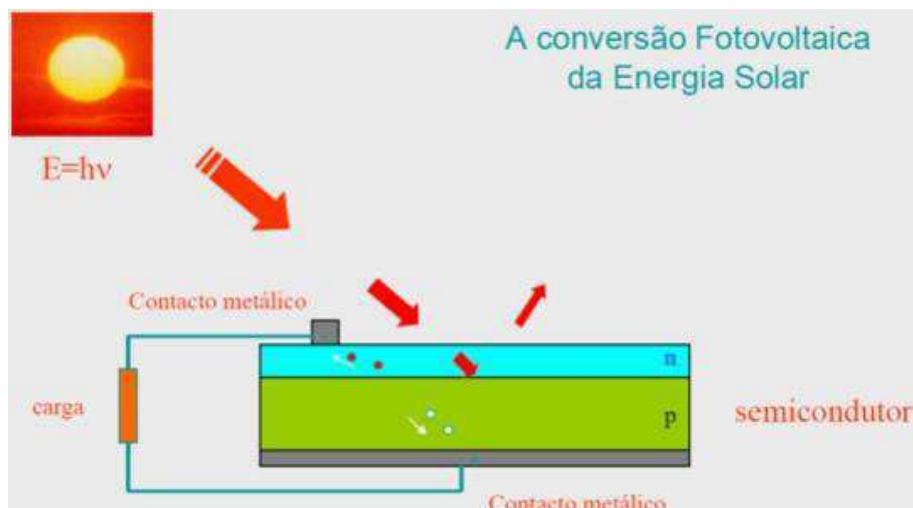
Anos depois, em 1877, Adams e seu aluno, Richard Day, produziram o primeiro dispositivo capaz de converter energia luminosa em energia elétrica. O conjunto era constituído por uma película de selênio depositada sobre uma base de ferro, onde o contato era estabelecido por uma película de ouro. A célula produzia o efeito fotovoltaico, mas com uma eficiência de apenas 0,5%.

Charles Fritts, 6 anos mais tarde, têm êxito na construção das primeiras células fotovoltaicas conforme mostrado na Figura 3. Tais modelos tinham eficiência de 1%. Os dispositivos eram formados por duas películas de ouro, entre as quais jazia uma terceira de selênio.

Anos depois, ainda no final do século XIX, o engenheiro Werner Siemens, que futuramente compõe o império de mesmo nome, utiliza-se das propriedades fotoelétricas das células para o comércio de fotômetros, utilizados em máquinas fotográficas da época.

O século XX inicia-se com o advento do silício, que agora passa a ser o composto base das células fotovoltaicas. Em 1954, um químico, Calvin Fuller, em parceria com Gerald Pearson e Daryl Chapin, físico e engenheiro, respectivamente, utilizam-se da dopagem de material para gerar células mais estáveis e eficientes. Deste ponto em diante marca-se o início da era moderna da energia solar. Com esse novo advento, o silício utilizado agora seria dopado com arsênio e, posteriormente, com boro, compondo assim as junções características. As células obtidas atingiram eficiência de 6%, considerada recorde para a época.

Figura 3 - Arranjo de uma célula solar.



Fonte: <http://www.strombrasil.com.br/efeito-fotovoltaico/>

No mesmo ano, houve a primeira apresentação formal de um exemplar de célula fotovoltaica. Tal modelo foi apresentado na reunião anual da *National Academy of Science*, em Washington, e posteriormente numa conferência de imprensa.

Com o advento da corrida espacial, as células fotovoltaicas ganharam mais uma aplicação, que se mantém até hoje. Para longos períodos de permanência no espaço e a necessidade de portabilidade, as células eram boas alternativas. Em missões não tripuladas, o uso de células fotovoltaicas se fez presente em satélites, garantindo sua operação.

3.2 RADIAÇÃO SOLAR

O Sistema Solar dentro do qual a Terra está inserida teve origem há cerca de 4,5 bilhões de anos atrás a partir de uma nuvem de gás e poeira. O Sol, originado também a partir desta nuvem, é composto principalmente de hidrogênio (74% de sua massa) e hélio (24% de sua massa). O hélio existente em sua superfície é produzido pela constante fusão dos núcleos de hidrogênio, liberando grandes quantidades de energia no processo. Uma pequena fração dessa energia atinge a Terra sob a forma de radiação eletromagnética. Anualmente, registra-se um recebimento de cerca de $1,5 \times 10^8$ quilowatt-hora (*kWh*), a qual é responsável tanto pela manutenção da vida terrestre quanto pela sua dinâmica e todos os seus fenômenos climáticos.

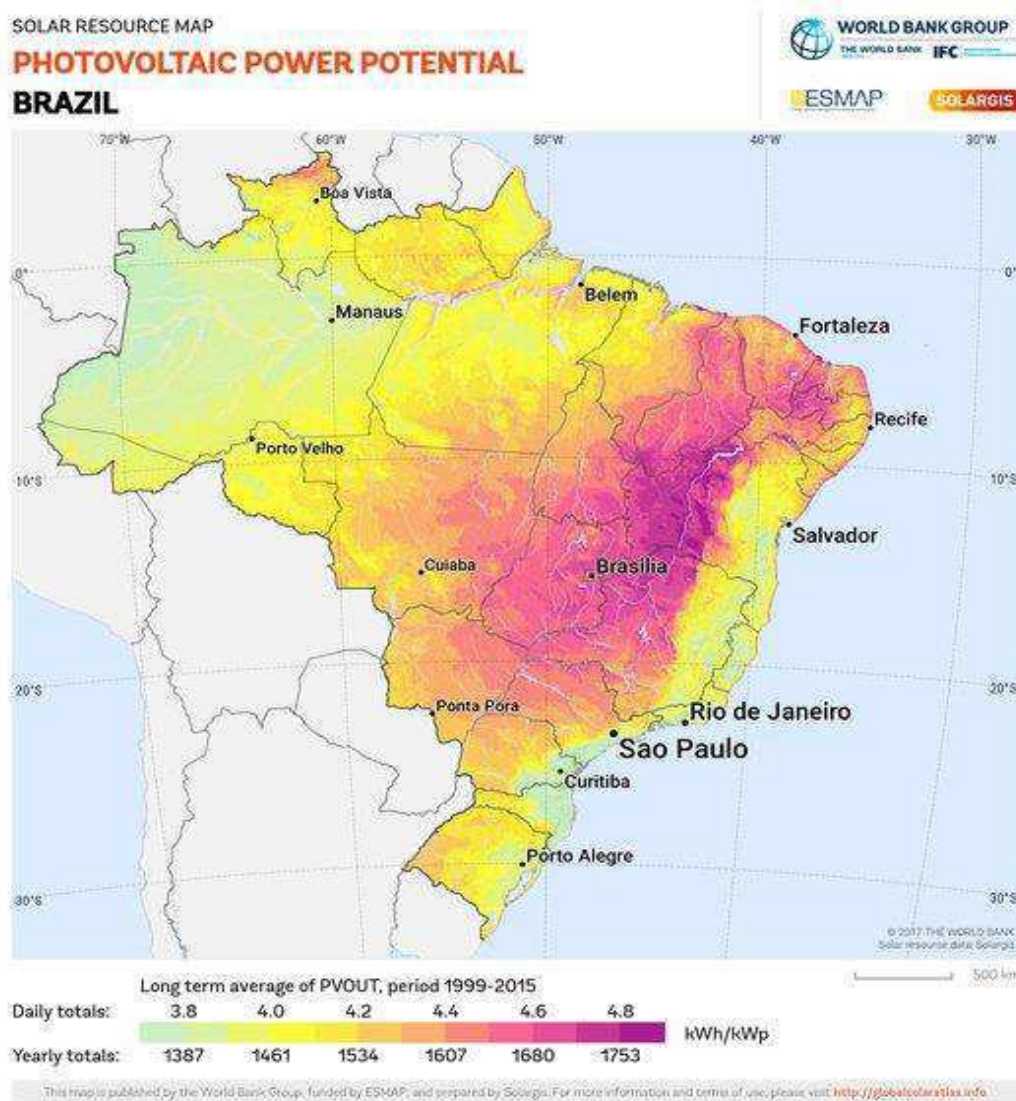
De toda a radiação que atinge nosso planeta, 42% se apresenta como radiação visível, 55% como raios infravermelhos, que possuem grande poder calorífico e 3% como radiação ultravioleta, que carrega grande quantidade de energia. Em termos de comprimento de onda, o espectro total abrange uma faixa entre 100 nanômetros (*nm*) e 3000 *nm*.

Através da teoria ondulatória, são definidas, para os diversos meios materiais, as propriedades na faixa solar de absorção e reflexão e, na faixa de 0,75 a 100 micrometros (μm) (correspondente ao infravermelho), as propriedades de absorção, reflexão e emissão. Por outro lado, pela teoria corpuscular ou fotônica, através da mecânica quântica, é determinada a potência emissiva espectral do corpo negro em termos de sua temperatura e do índice de refração do meio em que está imerso. A conversão direta da energia solar em eletricidade também é explicada por esta teoria. Nesta visão corpuscular, a potência de um feixe luminoso é descrita como o fluxo de fótons com energia unitária hf , onde f é a frequência da onda eletromagnética associada e h é a Constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$) (GTES; CEPELCRESESB, 2004).

Do montante de radiação incidente, estima-se que aproximadamente 51% é absorvida pela superfície do planeta, 19% pelas nuvens e atmosfera e 30% é refletido pela própria superfície, que pode ser considerada razoavelmente refletora, pela atmosfera e pelas nuvens. Assim, a radiação solar que atinge e é absorvida pela superfície possui uma componente direta, que não sofre alteração durante seu percurso, e uma componente difusa, resultante de reflexões e refrações em obstáculos.

Devido à dinâmica terrestre, a incidência solar ao longo do ano se apresenta extremamente variável, conforme a Figura 4. Estimativas apontam e aproximam um comportamento estocástico para tal grandeza. Para a instalação de sistemas fotovoltaicos, o conhecimento de dados de condições climáticas e atmosféricas é imprescindível, uma vez que impactam diretamente na rentabilidade da aquisição. Para auxiliar em tais levantamentos, alguns instrumentos são utilizados. A seção seguinte tratará desses instrumentos.

Figura 4 - Distribuição da incidência solar ao longo do território nacional no período 1999-2015.



Fonte: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/brazil>

3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para levantamento de dados de incidência solar, alguns instrumentos são utilizados. Enquanto uns fornecem apenas a mensuração da componente direta da radiação incidente, outros são capazes de estimar, com menor precisão, a intensidade total da radiação incidente. Esta seção tratará dos principais utilizados.

3.3.1 PIRELIÔMETRO

São instrumentos capazes de quantificar a componente direta da radiação solar. São constituídos de uma célula dotada de um grau de abertura capaz de absorver radiação solar segundo um ângulo de cerca de 6° (graus), conforme observado na Figura 5. Sendo assim, captam tanto radiação solar direta, caracterizada por um mínimo ângulo de abertura, quanto radiação proveniente do meio circumsolar. Tal fato promove discussões e equívocos, uma vez que o grau de abertura para absorção unicamente da radiação direta é menor que os 6° característicos do aparelho. São instrumentos de precisão e apresentam erro na casa dos 0,5%. Requer ajuste periódico, uma vez que o grau de declinação do sol é alterado ao longo das épocas do ano.

Figura 5 - Pireliômetro.



Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/prod/hukseflux-thermal-sensors-bv/product-88003-826371.html>

3.3.2 PIRANÔMETRO

É apresentado como uma estrutura de captação capaz de medir tanto a componente direta quanto a componente difusa da radiação incidente, conforme a Figura 6. Composto internamente de uma área preta e uma branca igualmente iluminadas por uma fenda, onde a medição da diferença de temperatura entre as áreas é efetuada. Além da diferença de temperatura, a radiação incidente gera uma diferença de potencial entre as áreas que também é captada. A partir de tais dados, o valor instantâneo de energia solar é estimado. Piranômetros construídos a partir de células fotovoltaicas são largamente utilizados devido ao seu custo reduzido. Contudo, para tais, o nível de sensibilidade solar é de apenas 60%, devido a limitações na própria captação da célula base que se apresenta sensível apenas à determinada faixa do espectro.

Figura 6 - Piranômetro.



Fonte: <https://www.kintech-engineering.com/pt-br/products/solar-pt/sr30-pyranometer/>

4 A CÉLULA FOTOVOLTAICA

Como exposto no Capítulo anterior, ao longo da história, diversos materiais foram utilizados na confecção de células fotovoltaicas. As primeiras, à base de ouro, prata e selênio não forneciam uma eficiência interessante para suas aplicações, fato que foi contornado, posteriormente, com a utilização do silício e das técnicas de purificação e dopagem. Neste Capítulo, serão abordados conhecimentos acerca do funcionamento da célula fotovoltaica assim como seu circuito elétrico equivalente e alguns parâmetros importantes que influenciam no seu desempenho.

4.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO

A célula fotovoltaica, como o próprio nome sugere, consiste na menor partícula capaz de efetuar a conversão da radiação eletromagnética solar para energia elétrica. A partir da década de 50, diversos materiais foram utilizados para a fabricação de células fotovoltaicas. Dentre muitos arranjos, o silício se apresenta como material base.

Materiais semicondutores, em sua estrutura celular, caracterizam-se pela presença de uma banda de valência e uma banda de condução separadas por uma banda proibida denominada *gap*. Quando um elétron é excitado, através do recebimento de energia na forma de fóton, suas ligações originais tendem a se desestabilizarem e há certa tendência no elétron de atravessar a banda proibida. Para que isso aconteça, o fóton absorvido deve possuir um nível mínimo de energia. Este nível é específico de cada material semicondutor, datando de alguns elétron-volts (eV), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Energia necessária para vencer a banda proibida em alguns semicondutores.

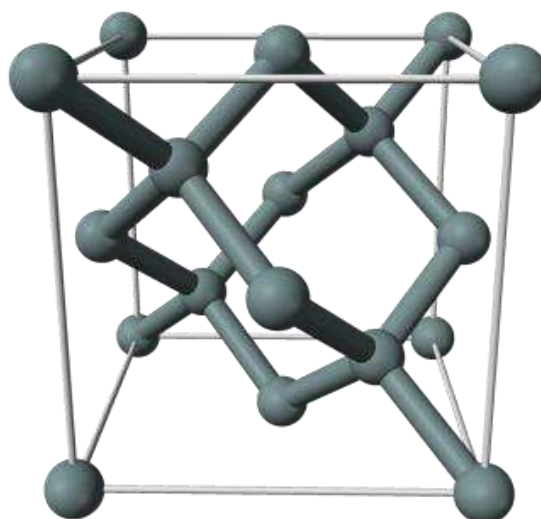
Parâmetro	Energia necessária para vencer a banda proibida (eV)
Telúrio (<i>Te</i>)	0,36
Germânio (<i>Ge</i>)	0,72
Boro (<i>B</i>)	1,10
Silício (<i>Si</i>)	1,12
Arsênio (<i>Ar</i>)	1,20
Iodo (<i>I</i>)	1,25
Fósforo (<i>P</i>)	1,50
Selênio (<i>Se</i>)	1,70
Enxofre (<i>S</i>)	2,50

Fonte: (FERREIRA, 2011).

O aproveitamento energético, no ato da conversão de energia, está diretamente atrelado a esse nível energético. Células fotovoltaicas à base de selênio, como as datadas do século XIX, tendem a fornecer uma eficiência menor que as de silício, uma vez que o selênio requer um maior nível energético.

Nos dias atuais, ao falar-se em custo-benefício, o silício mostra-se como uma alternativa promissora de insumo para construção base de células fotovoltaicas. Sua estrutura possui quatro elétrons na camada de valência. Em sua forma cristalina, cada elétron forma ligação covalente com o elétron de outro átomo adjacente, formando quatro ligações covalentes, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Estrutura cristalina do silício.



Fonte: <https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/modulo-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos/silicio-monocristalino>

Ao introduzir-se, nesta estrutura, átomos com apenas 3 elétrons em sua camada de valência, como o boro, cria-se uma estrutura rica em lacunas e suscetível ao

recebimento de elétrons. O boro, neste caso, é denominado aceitador de elétrons ou dopante tipo *p*.

Por outro lado, se se introduzem na estrutura átomos com 5 elétrons em sua camada de valência, a exemplo do fósforo, novas ligações serão estabelecidas e o elétron restante ficará fracamente ligado ao seu átomo original. Neste caso, diz-se que o fósforo é um dopante *n* ou doador de elétrons. Ao unirem-se ambas as estruturas, constitui-se uma junção *pn*.

Neste tipo de junção, durante o recebimento de fótons adequados, os elétrons fracamente ligados aos seus núcleos no lado *n* tendem a se deslocar para o lado *p*, formando pares elétron-lacuna. Ao mesmo tempo, um campo elétrico é gerado pela diferença de elétrons entre os lados. O processo se perpetua até que o campo elétrico gerado se oponha tão fortemente ao fluxo de elétrons que o interrompe. A esse fenômeno denomina-se efeito fotovoltaico.

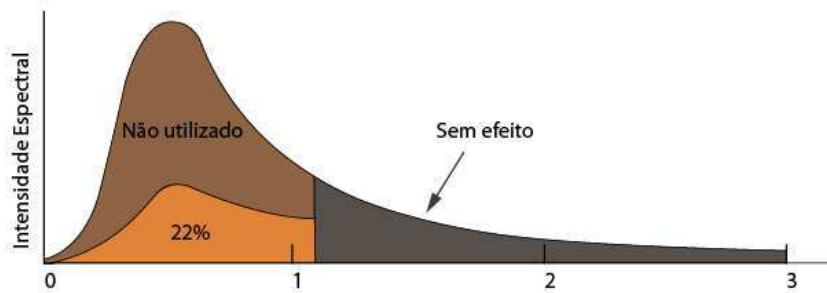
Como ressaltado, para que o efeito fotovoltaico aconteça, os elétrons devem ser excitados com uma energia superior à banda proibida. Tal nível de energia depende do comprimento de onda do fóton incidente e pode ser expresso da seguinte forma:

$$E = \frac{12400}{\lambda_c}, \quad (1)$$

uma vez que λ_c representa o comprimento de onda do fóton incidente. Se o comprimento de onda excede um valor crítico, o fóton não excita o elétron ao ponto de vencer a banda proibida. Sendo assim, define-se o comprimento de onda crítico do material (λ_{crit}) como sendo o valor de comprimento de onda acima do qual um fóton não consegue excitar um elétron, levando-o até a banda de condução.

Assim, o próprio espectro eletromagnético torna-se um fator limitante para o rendimento da célula, conforme a Figura 8. Além disso, uma vez que cada fóton excita apenas um elétron, para fótons com energia superior à banda proibida, a energia residual é convertida em calor, elevando a temperatura de operação. Por último, nem todos os elétrons adequadamente excitados são transportados até a banda de condução. Dessa forma, estabelece-se uma série de preceitos que limitam a eficiência da célula.

Figura 8 - Faixa aproveitável do espectro eletromagnético.

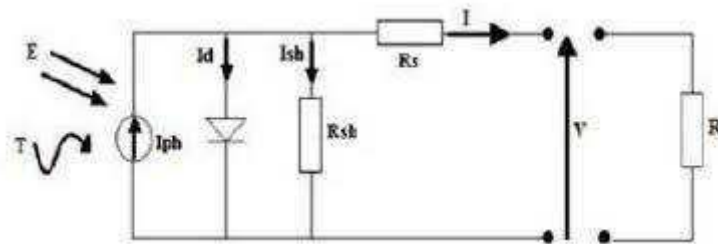


Fonte: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>

4.2 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Pode-se aproximar o comportamento de uma célula fotovoltaica segundo um circuito elétrico equivalente, em concordância com a Figura 9.

Figura 9 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-1-Circuito-eletrico-equivalente-da-celula-solar-fotovoltaica-Fonte-BOUNECHBA-et_fig1_317737636

Onde:

I_{ph} - Corrente gerada pelo efeito fotovoltaico;

O diodo representa a junção pn , com sua respectiva corrente I_d ;

R_{sh} - Resistência paralela do circuito;

R_s - Resistência série do circuito, relacionada ao tamanho da junção;

V - Tensão nos terminais na carga;

I - Corrente fornecida à carga.

Para uma célula ideal, não há resistência considerável nos contatos da junção, portanto. Analogamente, não há fuga de corrente para o solo, ou seja:

$$R_s = 0$$

$$R_{sh} = \infty.$$

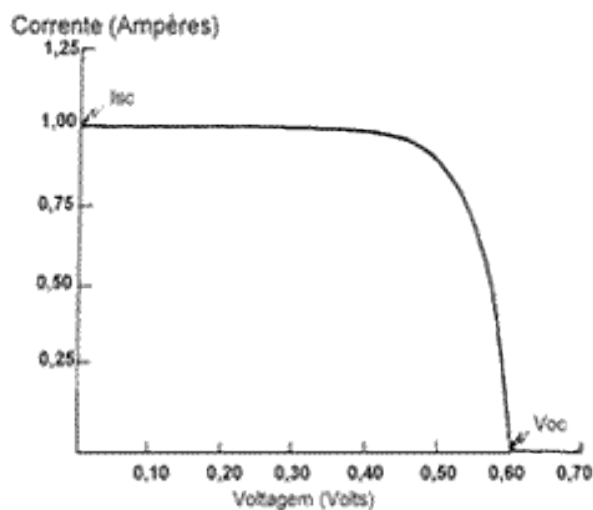
Expondo a célula à radiação excitante e estabelecendo um curto-circuito nos terminais de carga, juntamente com a inserção de um amperímetro, consegue-se medir a corrente de curto-circuito. Nesta situação, as correntes no diodo e na resistência paralela são desprezíveis face à corrente de carga.

Analogamente ao ensaio de curto-circuito, ao excitar-se a célula agora com seus terminais de carga em aberto, obtém-se um valor de tensão de circuito aberto, da conexão de um voltímetro. Neste arranjo, por sua vez, a corrente produzida pela conversão da radiação eletromagnética divide-se entre o diodo e a impedância paralela. Assim, pode-se definir que:

$$V_{ca} = V + I.R_{sh}. \quad (2)$$

Ao traçar-se o gráfico ($I \times V$) da célula, a partir dos valores de tensão e corrente obtidos com a variação da carga, obtém-se um comportamento em conformidade com a Figura 10.

Figura 10 – Comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica.

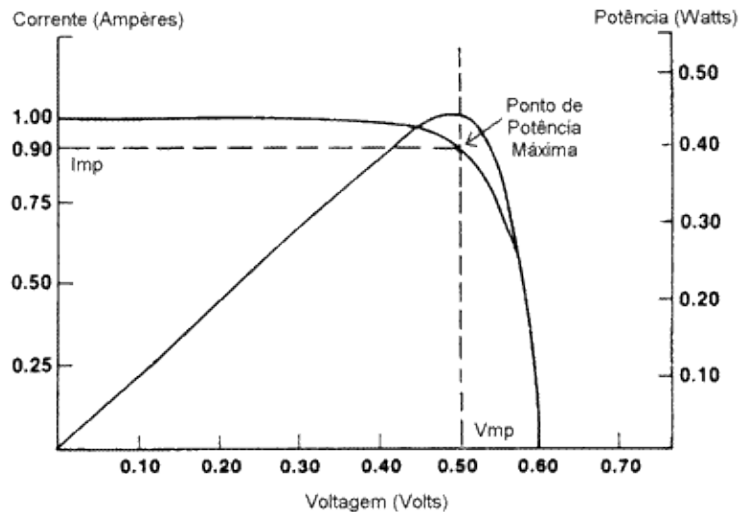


Fonte: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331

Os pontos correspondentes às medidas de 0,6 ampères (A) e 1 volt (V) correspondem sequencialmente aos pontos de circuito aberto (I_{cc}) e curto-circuito (V_{ca}). Até a faixa de aproximadamente 0,5 V, o comportamento da corrente é aproximadamente constante, seguido de uma queda acentuada. Nesta faixa, a corrente no diodo cresce abruptamente, proporcional à queda acentuada do gráfico, uma vez que a carga se opõe fortemente à passagem de corrente.

Em termos de potência transmitida à carga, o perfil seguido está conforme a Figura 11. Para melhor localização do ponto de máxima tensão, os gráficos são sobrepostos. Nos pontos correspondentes a V_{ca} e I_{cc} , observa-se potência zero pela nulidade de corrente ou tensão. Exatamente no joelho da curva é que se apresenta o ponto de máxima potência.

Figura 11 - Curva de potência para uma célula fotovoltaica característica.



Fonte: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331

O ponto de operação correspondente a (V_{mp}, I_{mp}) corresponde ao ponto de máxima potência. Para regulação deste ponto de operação, verifica-se uma relação com a temperatura de operação da célula e do nível de radiação incidente. Em uma célula de 1 centímetro quadrado (cm^2), à base de silício, sob uma incidência de 1000 watts por metro quadrado (W/m^2), obtém-se uma tensão de circuito aberto de aproximadamente 6 V e uma corrente de curto-circuito entre 20 e 30 miliampère (mA). A potência fornecida no ponto de máxima potência situa-se entre 80 e 85 miliwatts (mW).

Analisando o circuito, pode-se extrair a seguinte expressão para a corrente de saída:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (3)$$

A corrente I_{ph} é originada através do processo de conversão da radiação eletromagnética em energia elétrica. Ela obedece à seguinte relação:

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

Onde I_{sc} representa a corrente de curto-circuito na temperatura e radiação padrões, S a radiação incidente, em W/m^2 , e α_t o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito da célula.

A corrente pelo diodo depende da sua corrente de saturação reversa, aqui representada por I_o , que é característica do material de fabricação do componente e tem dependência com a temperatura de operação da célula. Tal dependência pode ser verificada da seguinte forma:

$$I_o = I_o' \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (5)$$

Onde T_r representa uma temperatura de referência, T representa a temperatura de operação da célula e E_g a energia da banda proibida do material de construção da célula.

4.3 PARÂMETROS RELEVANTES

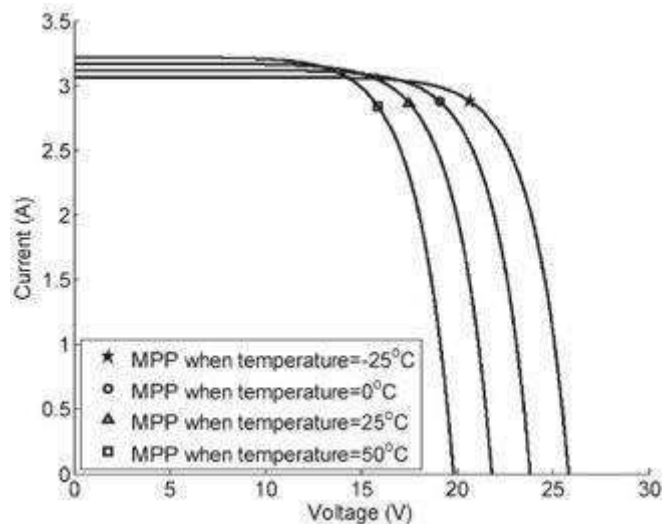
Como já comentado, alguns parâmetros como o tamanho da junção pn , a quantidade de impurezas no material dopado e a resistência de contato são características intrínsecas ao sistema que acabam por limitar o rendimento da célula. Para mais, fatores não sistêmicos acabam por influenciar também no comportamento da célula. Dentre eles, destaca-se a temperatura de operação da célula e a radiação incidente.

4.3.1 TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

A incidência solar, ao longo do dia, é um parâmetro variável tanto pela influência de nuvens quanto do próprio movimento de rotação da Terra. Como já comentado anteriormente, fótons incidentes possuem quantidades variáveis de energia. Os que possuem energia superior à banda proibida acabam por converter esta energia residual em calor. É verificado que, com o aumento de temperatura, a tensão de circuito aberto (V_{ca}) tende a diminuir, enquanto a corrente de curto-circuito (I_{cc}) tende a

aumentar, conforme a Figura 12. Tal alteração nos perfis de tensão e corrente acaba por alterar também o perfil de potência entregue à carga.

Figura 12 - Comportamento de uma célula fotovoltaica para diferentes temperaturas.



Fonte: https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html

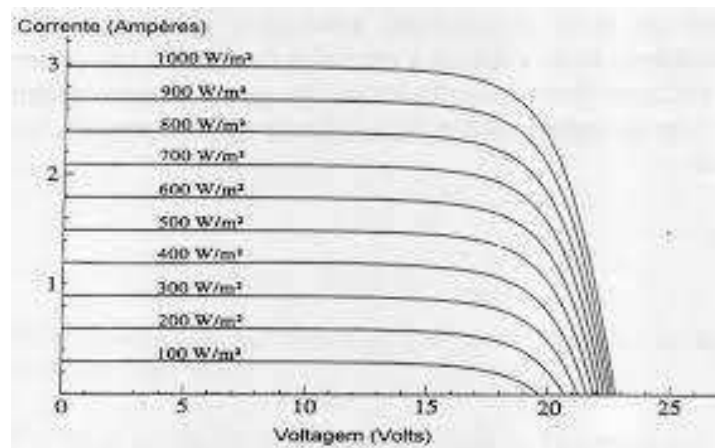
Com o leve crescimento da corrente de operação, seguido de um substancial decréscimo na tensão, justifica-se que o rendimento a baixas temperaturas seja superior ao rendimento a altas.

Para manutenção do ponto de operação do sistema, a fim de mantê-lo sempre em potência máxima, um componente chamado seguidor de máxima potência é utilizado. Tal componente é parte integrante de controladores de carga e será abordado nos próximos capítulos.

4.3.2 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR

Desde o amanhecer até o pôr-do-sol, graças aos movimentos de rotação e translação da Terra, um sistema fotovoltaico experimenta diferentes níveis de intensidade solar. Tem seu pico em torno do meio dia, com valores acerca de 1000 W/m^2 para um dia com poucas ou nenhuma nuvem, ao nível do mar. Verifica-se um aumento progressivo das grandezas tensão e corrente com o aumento da incidência solar, conforme Figura 13.

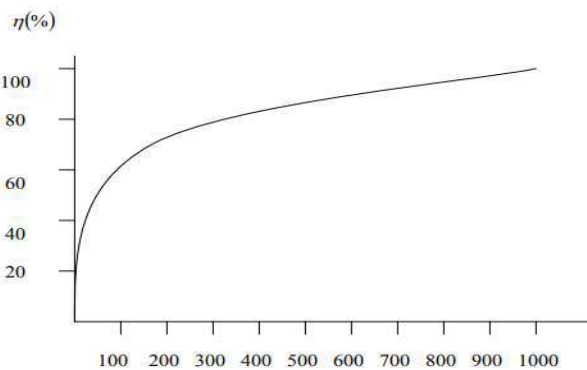
Figura 13 - Variação nos perfis de tensão e corrente para diferentes valores de incidência solar.



Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4649643/mod_resource/content/1/Apostila_solar.pdf

Percebe-se que, com o aumento da intensidade de incidência solar, há um aumento quase linear da tensão, enquanto a corrente segue um aumento irregular, aproximadamente logarítmico. A partir de tais valores, pode-se traçar o gráfico de rendimento em função da intensidade de incidência solar, em conformidade com a Figura 14.

Figura 14 - Rendimento em termos de intensidade de radiação solar.



Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4649643/mod_resource/content/1/Apostila_solar.pdf

Verifica-se que, para a faixa de radiação abordada nas curvas, de 100 a 1000 W/m^2 , o rendimento não sofre alterações abruptas, mas indica maiores rendimentos para maiores intensidades de radiação.

4.4 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO

Dos primórdios do descobrimento e da fabricação dos primeiros dispositivos capazes de realizar o efeito fotovoltaico, materiais como o arsênio, o ouro e a prata eram utilizados. Na década de 50, com o estudo de novos materiais e o advento das técnicas de purificação e dopagem, verificou-se que o silício se apresentava como uma boa opção. Desde então, a partir de suas formas cristalina e policristalina, este semiconductor têm sido utilizado como insumo principal na fabricação de células e módulos solares. Como uma forma de elevar o rendimento, outrora baixo, entra em cena os procedimentos de purificação e dopagem:

4.4.1 PURIFICAÇÃO

Após a extração do material, processos químicos que envolvem a retirada de impurezas devido à extração, armazenagem ou a própria situação na natureza são realizados. Objetiva-se obter um exemplar de material com alto grau de pureza.

4.4.2 DOPAGEM

Representa um significativo avanço no que tange ao rendimento das células produzidas. Corresponde à inserção de átomos, em quantidade controlada, de outro material no retículo cristalino do material base. Para a célula de silício, largamente utilizada, utiliza-se com frequência o boro e o fósforo como dopantes. Assim, compõe-se um retículo de silício com adição de átomos de boro, que possui 3 elétrons em sua camada de valência, e outro adicionado de fósforo, que possui 5. Da sobreposição dos retículos, surge a junção *pn*, estritamente necessária ao acontecimento do efeito fotovoltaico.

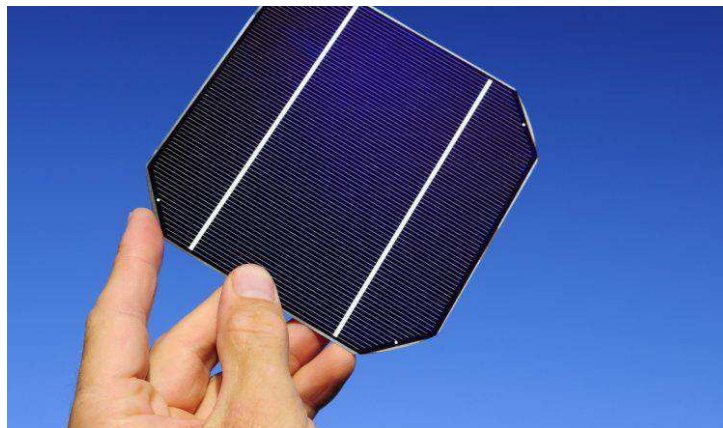
4.5 MATERIAIS EMPREGADOS

Até a atualidade, variações do próprio silício e outros materiais vêm sendo empregados na confecção de células fotovoltaicas. Alguns são elencados a seguir.

4.5.1 SILÍCIO MONOCRISTALINO

Módulos à base de silício monocristalino são facilmente distinguíveis pela sua homogeneidade colorífica, conforme a Figura 15. Deriva-se do fato de que os retículos utilizados em sua composição são oriundos do mesmo cristal de silício. Enquanto, na teoria, módulos dessa categoria atingiriam rendimentos de 27%, módulos comerciais atingem de 12 a 16%. Devido a limitações nos processos de fabricação e montagem, tais módulos se encontram praticamente consolidados no mercado. Seu processo de fabricação é relativamente caro.

Figura 15 - Célula de silício monocristalino.



Fonte: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>

4.5.2 SILÍCIO POLICRISTALINO

Caracterizado por uma heterogeneidade em seus tons, têm seus retículos constituídos por uma composição de cristais de silício, de acordo com a Figura 16. Ao contrário do silício monocristalino, pela pluralidade de cristais, origina interfaces no mesmo retículo que ocasiona resistências internas e, conseqüentemente, perdas sistêmicas. Na teoria, tais perdas influenciariam diretamente no rendimento dos módulos, obtendo valores inferiores aos monocristalinos. Na prática, os módulos possuem rendimento parecido. Suas estruturas têm um custo de fabricação mais barato que o silício monocristalino.

Figura 16 - Células de silício policristalino.

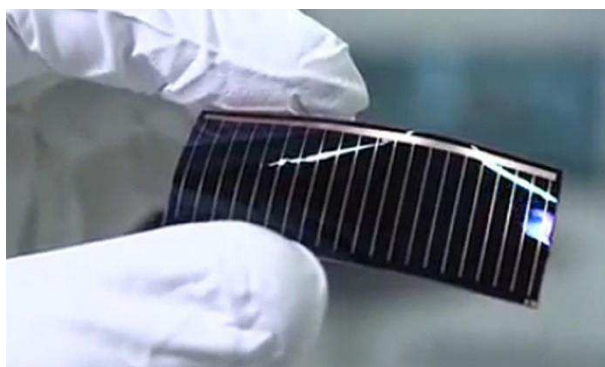


Fonte: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>

4.5.3 ARSENETO DE GÁLIO (GAAR)

Constitui o principal insumo de células utilizadas em aplicações e sistemas espaciais. Módulos comerciais atingem rendimentos em torno de 20%, enquanto testes em laboratório fornecem eficiências de 26% para células sem concentração e 28% para células em concentração (GREENPRO, 2014). Conforme a Figura 17, os módulos são caracterizados por possuírem maleabilidade, sendo boas opções para aplicações que requeiram tal comportamento.

Figura 17 - Módulo de Arseneto de Gálio.



Fonte: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>

4.5.4 FILMES FINOS (*THIN-FILM*)

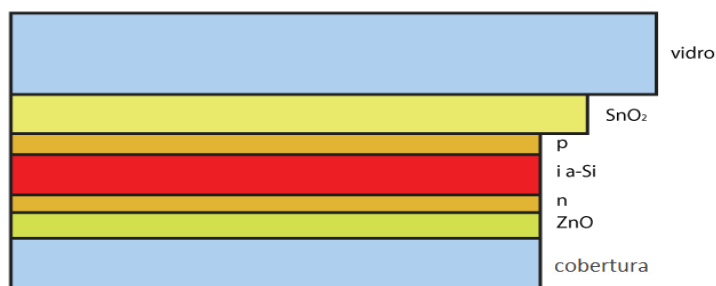
São constituídos por retículos de material amorfo com espessura da ordem de micrômetros. Este tipo de material, ao contrário do material cristalino, não apresenta ordenação em sua estrutura atômica, o que dificulta o processo de conversão. Em condições ideais, o rendimento de tais estruturas não supera os 13%. Em produtos comerciais, verifica-se algo em torno de 9%. Possuem custo reduzido se comparado a células policristalinas ou monocristalinas. As quantias de material utilizado são reduzidas, assim como a complexidade de sua fabricação. Além disso, o material

amorfo por si só consegue absorver radiação solar de forma mais eficiente que o cristalino. Tais fatores tornam-no o tipo de material mais estudado atualmente. Destacam-se os seguintes tipos:

4.5.4.1 SILÍCIO AMORFO

Devido à pequena extensão da difusão do silício amorfo hidrogenado ($a\text{-Si:H}$) dopado, os elétrons e buracos livres na junção pn não sobrevivem tempo suficiente para gerar uma corrente elétrica externa. Por isso uma camada de $a\text{-Si:H}$ intrínseco (não dopado) é colocada entre camadas de $a\text{-Si:H}$ do tipo n e do tipo p , na qual as cargas elétricas duram mais tempo. É nessa camada que acontece a absorção da luz e liberação dos elétrons. Como contatos frontais, podem ser utilizados o Óxido de Estanho (SnO_2), o Óxido de Estanho e Índio (ITO – do inglês: *Indium Tin Oxide*) ou o Óxido de Zinco (ZnO). Se os materiais forem depositados na parte frontal do vidro será criada uma estrutura do tipo $p-i-n$. Os materiais podem ser depositados em uma sequência inversa ($n-i-p$) na parte traseira do substrato. Isso permite que sejam criados módulos fotovoltaicos flexíveis em substrato leves não transparentes, como plástico ou metal, que são mais adequados à colocação em telhados (Blue Sol Educacional, 2012). Dessa forma, baseando-se no princípio de utilização de variedades do silício e demais componentes, conforme Figura 18, consegue-se células de maior eficiência a partir da união de características favoráveis de todos os componentes.

Figura 18 - Estrutura em camadas de uma célula de silício amorfo.



Fonte: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>

A principal desvantagem do silício amorfo está na sua baixa eficiência, que diminui ainda mais durante os primeiros 6 a 12 meses de operação, devido à degradação induzida pela luz (através do efeito *Staebler-Wronsky*), antes de se estabilizar e alcançar

a potência nominal de operação (Blue Sol Educacional, 2012). A degradação induzida pela luz tornou-se o maior problema da célula de silício amorfo. Para trabalhar dentro dos limites da espessura da camada intrínseca (300 nm) e fazer uso de diferentes mecanismos de captura de luz, o conceito de células com dupla e tripla junção foi exaustivamente prosseguido em todo o mundo. Células solares de junção única de silício amorfo (*a-Si*) são pouco utilizadas nos dias de hoje por causa da baixa eficiência e problemas de estabilidade. As células solares de dupla e tripla junção são utilizadas para o melhor aproveitamento do espectro solar e para melhorar a estabilidade das células solares de uma única junção. A eficiência da célula para uma junção única é de 9,3%, enquanto que 12,4% para a de dupla junção e 13,0% para a de tripla junção (MESSENGER, 2007).

A técnica em produzir células com mais de uma junção consiste em empilhar as estruturas *p-i-n* umas sobre as outras. Com essa técnica, é possível criar células que aproveitam uma parte maior do espectro da radiação solar, otimizando cada camada para uma banda de cor específica, através da mistura com outros materiais, por exemplo o germânio (*a-SiGe*). Além disso, células empilhadas sofrem menos os efeitos de envelhecimento, e as camadas de *a-Si:H* do tipo *i* são mais finas e, conseqüentemente, menos susceptíveis à degradação pela luz (Blue Sol Educacional, 2012).

Figura 19 - Módulo de silício amorfo.



Fonte: <http://materialfotovoltaico.com.mx/tecnologias/c%C3%A9lula-de-silicio-amorfo.html>

4.5.4.2 TELURETO DE CÁDMIO (*CdTe*)

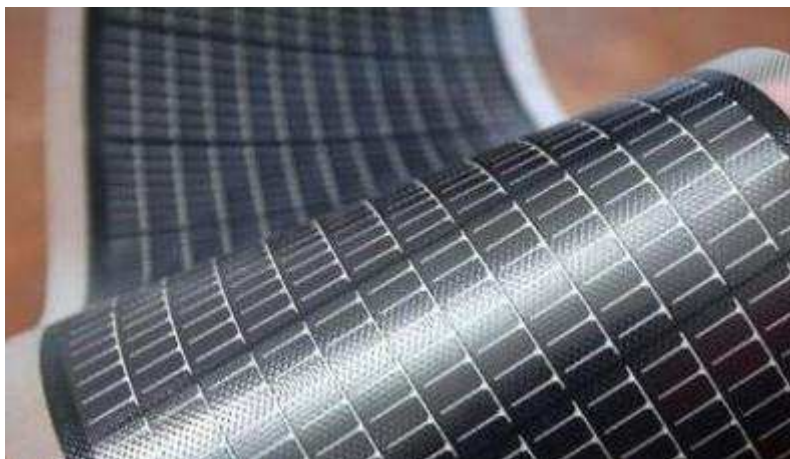
As células fotovoltaicas de *CdTe* são fabricadas em um substrato de vidro, com uma camada de condutor transparente como contato frontal, onde geralmente é utilizado

o Óxido de Estanho e Índio (*OTI*). O contato frontal é revestido com uma finíssima camada de Sulfeto de Cádmio (*CdS*), que é um semicondutor do tipo *n*, depois com uma camada de Telureto de Cádmio (*CdTe*), que é do tipo *p*. Esse procedimento pode ser feito por uma espécie de impressão em tela (*silk-screen*) (Blue Sol Educacional, 2012).

Para fabricar módulos maiores, ou com maior eficiência, pode-se utilizar de disposição por vaporização em uma câmara de vácuo com temperaturas de aproximadamente 700 °C. A junção *pn* de *CdS-CdTe* é ativada quando entra em contato com uma atmosfera com cloro (Blue Sol Educacional, 2012).

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 (Blue Sol Educacional, 2012).

Figura 20 - Filme de telureto de cádmio.



Fonte: <https://petronoticias.com.br/archives/tag/telureto-de-cadmio>

4.5.4.3 DISSELENETO DE COBRE ÍNDIO/GÁLIO(*CIS/CIGS*)

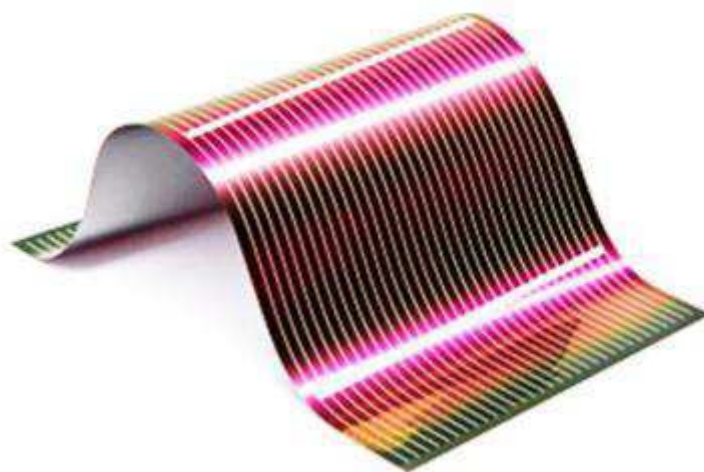
Para a fabricação das células, o substrato de vidro é inicialmente revestido com uma fina camada de molibdênio em um processo de pulverização catódica. A camada do tipo *p* de *CIGS*, pode ser fabricada pela vaporização simultânea dos elementos (cobre, índio, gálio e selênio) em uma câmara de vácuo, sob temperaturas entre 500 graus Celsius (°C) e 600 °C; ou pela pulverização dos elementos em camadas individuais em temperatura ambiente, com posterior cozimento rápido em temperatura de 500 °C (Blue Sol Educacional, 2012).

Como contato frontal transparente, é utilizado o óxido de zinco dopado com alumínio ($ZnO:Al$), que é do tipo n . Entre os dois tipos (p e n) de semicondutor é colocada uma camada de óxido de zinco intrínseco e uma camada de sulfato de cádmio para ajudar a reduzir perdas provocadas pela combinação entre o óxido de zinco e o CIS (Blue Sol Educacional, 2012).

Diferentemente do silício amorfo, as células de CIS não sofrem de degradação sob a ação da luz. Mas é necessário um selamento robusto, para evitar a degradação do óxido de zinco, o que inutilizaria o módulo (Blue Sol Educacional, 2012).

Os módulos fotovoltaicos de CIS são os mais eficientes entre as tecnologias de película fina de única junção, com até 11% de eficiência. Infelizmente o seu custo não está tão baixo quanto o do silício, além do uso de índio, que é um material raro, altamente requisitado pela indústria de smartphones. O índio é o componente principal das telas táteis (*touchscreen*) capacitivas (Blue Sol Educacional, 2012).

Figura 21 - Filme de disseleneto de cobre índio/gálio.



Fonte: (BLUESOL EDUCACIONAL, 2012).

4.5.5 CÉLULAS HÍBRIDAS

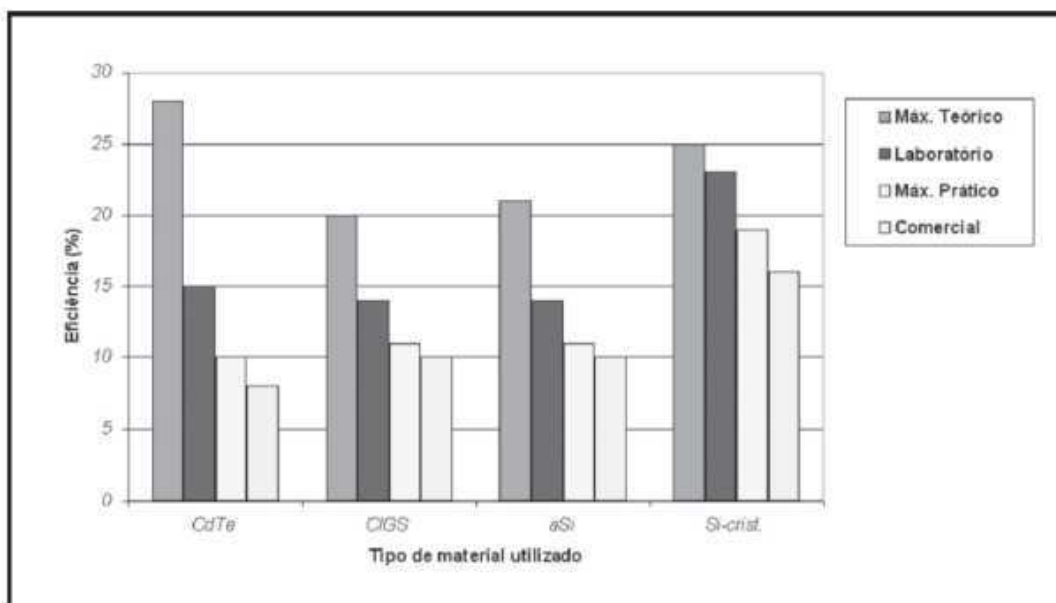
Esta técnica combina as formas cristalina e amorfa de utilização do silício. Uma base de silício monocristalino ($m-Si$) tipo n é revestida, em ambas as faces, por películas de silício amorfo ($a-Si$) tipo i (silício intrínseco, sem agentes dopantes). Na face superior, é sobreposta à camada de silício tipo i outra camada de silício amorfo, mas de tipo p , compondo assim uma junção $p-i-n$. Na parte inferior da célula é acrescentada

uma camada de silício amorfo altamente dopado com pureza n , evitando a recombinação de cargas no eletrodo superior.

Como o silício amorfo não sofre degradação induzida pela luz, este novo formato têm melhores rendimentos para altas temperaturas. Enquanto verificava-se, por grau Célsius, uma queda de 0,45% para o silício cristalino, alcança-se agora uma queda de 0,33%, além da economia de material em sua fabricação.

Assim, fica evidente o grande leque de utilização de materiais e suas variações, principalmente no caso do silício, na produção de células fotovoltaicas, obtendo uma faixa de rendimentos, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Comparação, em termos de rendimento, de vários tipos de materiais.



Fonte: (GTES; CEPEL-CRESESB, 2004).

5 COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA

FOTOVOLTAICO ISOLADO

De forma geral, um sistema fotovoltaico isolado é composto por: arranjo dos módulos, controlador de carga, banco de baterias e dispositivo inversor. A depender da potência instalada do sistema, mais de um componente de cada categoria pode ser utilizado, como uma alternativa de menor custo e/ou maior confiabilidade. O seu correto dimensionamento permite um controle preciso do fluxo de energia, otimizando a energia armazenada e permitindo um menor desgaste dos equipamentos.

5.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Cada módulo fotovoltaico é composto por um arranjo de 30 a 36 células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas constituem a unidade básica do sistema, fornecendo uma tensão de aproximadamente 0,6 V e uma densidade de corrente de aproximadamente 30 miliampères por centímetro quadrado (mA/cm^2). Do arranjo em série e em paralelo das células compõem-se os módulos. Para alcançar a tensão de referência de um acumulador de carga, cuja energia armazenada deriva dos próprios módulos, faz-se necessário o arranjo em série e em paralelo de tais estruturas. Da condição de carregamento dos bancos, na prática, é necessária uma tensão levemente superior à especificada.

Dispositivos à base de filmes finos são construídos por células que entregam uma tensão superior aos 0,6 V das células usuais. Assim, é possível constituir arranjos com menos de 30 células.

5.1.1 ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS

Para a obtenção dos patamares de corrente e tensão requeridos na confecção de módulos, a associação de células isoladas é utilizada. Tal associação pode ser feita de

duas formas distintas: em série e em paralelo. Para obtenção dos valores de referência, ambas as técnicas são utilizadas.

Na conexão de células fotovoltaicas em série, obtém-se a soma das tensões de cada célula, assim como uma permanência do patamar de corrente ao longo do ramo, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Curva característica da conexão em série de células fotovoltaicas.

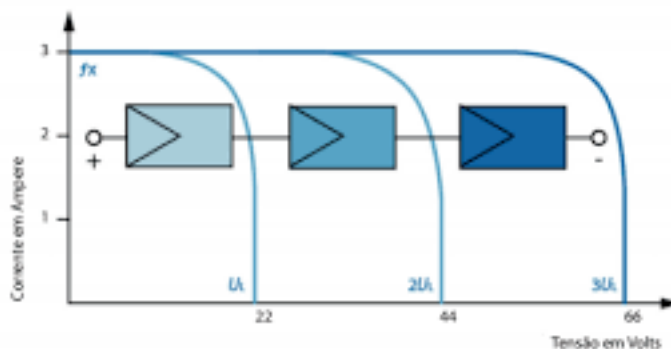


Figura 17 - Curva característica V-I ligação em série: aumento da tensão.

Fonte: <http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/2-celulas-e-modulos-fotovoltaicos/concepcao-aplicacao-e-funcionamento-de-modulos-fotovoltaicos/>

Tal ligação é caracterizada pela junção de terminais contrários das células que compõem o módulo. As curvas indicam o comportamento para uma célula, duas e três, assim como o esquema de ligação.

Outra forma de interligação das células fotovoltaicas é a ligação em paralelo. Tal ligação é caracterizada pela junção de todos os terminais positivos em um terminal final, assim como os terminais negativos. O resultado é um aumento na corrente total, assim como a manutenção do patamar de tensão, conforme Figura 24.

Figura 24 - Curva característica da conexão em paralelo de células fotovoltaicas.

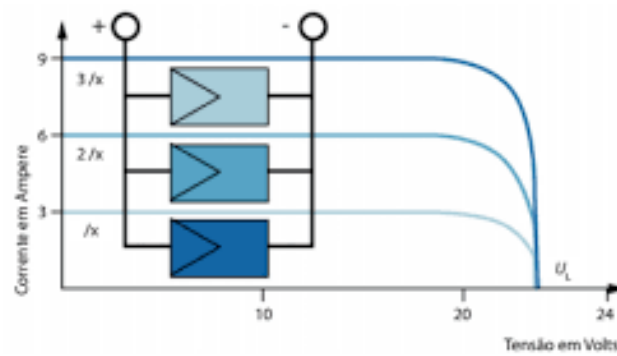


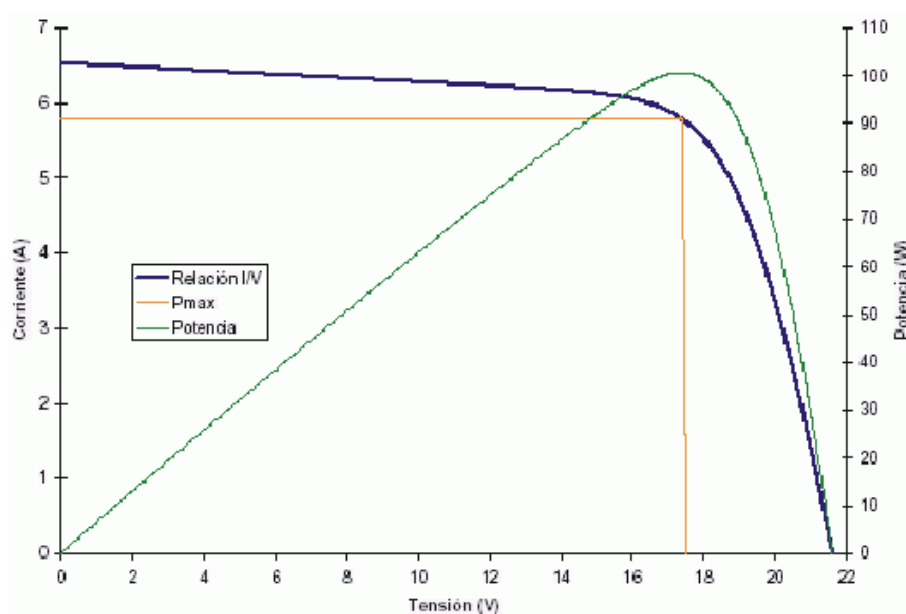
Figura 21 - Associação de módulos em paralelo.

Fonte: <http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/2-celulas-e-modulos-fotovoltaicos/concepcao-aplicacao-e-funcionamento-de-modulos-fotovoltaicos/>

Tais formas de ligação podem ser utilizadas na grande maioria dos componentes do sistema fotovoltaico, desde que a especificação de cada componente seja observada e que a decisão de ligação de mesmos componentes esteja de acordo com o dimensionamento estipulado.

A característica geral da associação de células fotovoltaicas, como sugerido pelas Figuras 23 e 24, se assemelha às de módulos, a menos de um fator de escala nos eixos, conforme a Figura 25.

Figura 25 - Curva característica de um módulo fotovoltaico.



Fonte: <https://www.solenerg.com.br/sistemas-fotovoltaicos-conceitos-basicos/>

Assim como o esquema apresentado para as células, o gráfico de potência, aqui denotado em verde, apresenta um ponto de pico, onde se deseja que o sistema opere continuamente. Para tal, um componente presente em controladores de carga e alguns inversores é utilizado, denominado *maximum power point tracking (MPPT)*

5.1.2 PARÂMETROS DE FÁBRICA

Ao adquirir um módulo fotovoltaico, alguns parâmetros de fábrica são fornecidos. Estes se baseiam tanto em condições ideais de operação (intensidade de radiação de 1000 W/m^2 , temperatura de operação de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar de 1,5), chamadas *Standard Test Conditions (STD)*, quanto em parâmetros próximos à realidade (800 W/m^2 , $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e velocidade do vento de 1 metro por segundo (m/s)) denominados *Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)*.

A partir da utilização de tais valores nas equações descritas na seção 4.2, alguns parâmetros podem ser levantados. Entre eles estão:

- **Tensão de circuito aberto (V_{ca}):** Valor máximo de tensão nos terminais do módulo, quando nenhuma carga está conectada.
- **Corrente de curto-circuito (I_{cc}):** Máxima corrente, em carga, quando os terminais do módulo estão em curto-circuito.
- **Ponto de máxima potência (MPP):** Ponto onde o produto tensão-corrente é máximo.
- **Tensão e corrente de máxima potência:** No gráfico $I \times V$, representam as coordenadas cartesianas do ponto de máxima potência.
- **Temperatura normal de operação:** Temperatura estimada a partir das condições estipuladas para o NOCT.
- **Fator de Forma:** Representa a proximidade do comportamento real do módulo com um retângulo. É obtido através do quociente entre a potência máxima do módulo e o produto entre a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto.

5.1.3 FATORES EXTERNOS

Assim como as células fotovoltaicas, os módulos, uma vez compostos pela associação de células, também sofrem influências dos mesmos fatores. Para levantamento de tais dados, faz-se necessário o teste de um fator enquanto o outro permanece constante. Para o estudo da radiação, a temperatura fixada é de 25 °C e para estudo da temperatura, a incidência fixada é de 1000 W/m². A seguir discutir-se-á a influência de ambos os fatores.

10.1.3.1 TEMPERATURA

Assim como na célula fotovoltaica, um aumento na temperatura de operação do módulo acaba por diminuir substancialmente a tensão de operação nos seus terminais, conforme Figuras 26 e 27. Conseqüentemente, o perfil de potência também é alterado.

Figura 26 - Influência da temperatura na característica de um módulo fotovoltaico.

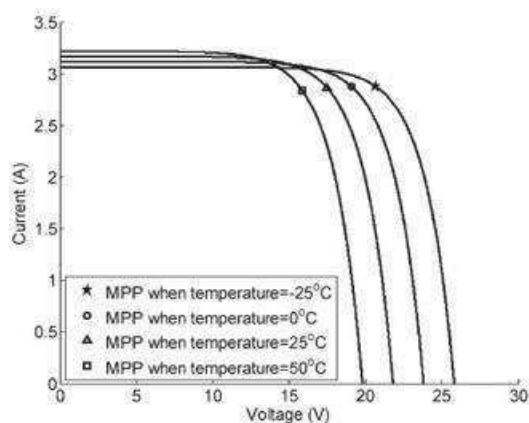
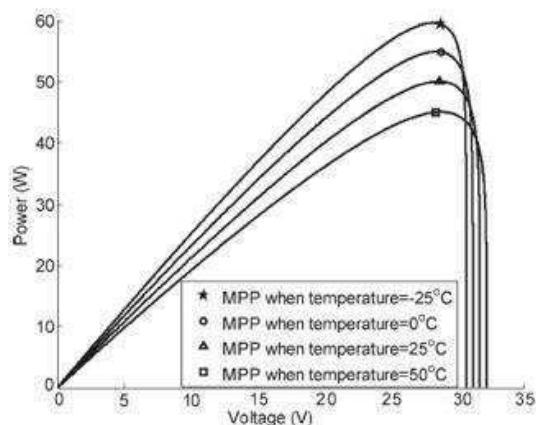


Figura 27 - Influência da temperatura na curva de potência de um módulo fotovoltaico.



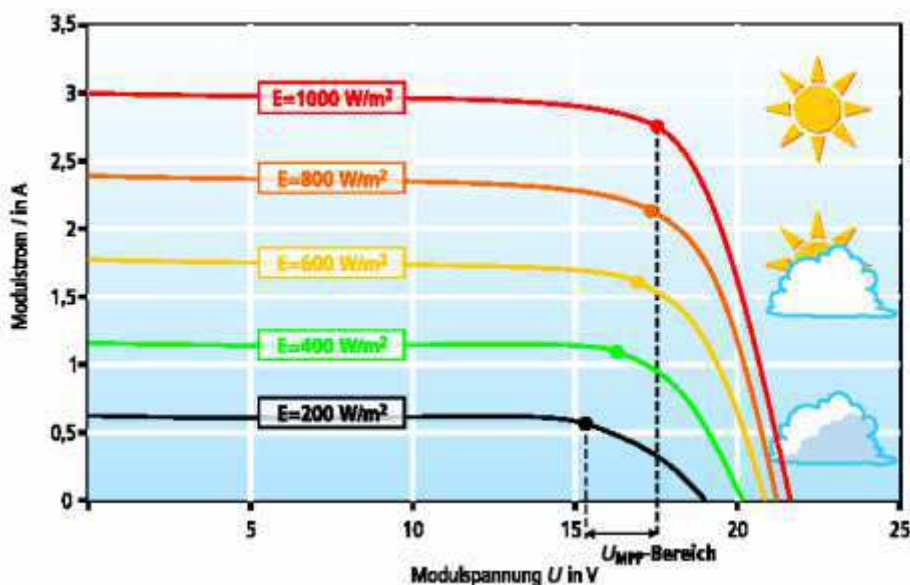
Fonte: https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html

Com o aumento da temperatura de operação, a tensão nos terminais do módulo também diminui. Consequentemente, a curva correspondente de potência tem uma diminuição em todos os seus pontos. Isso acarreta uma diminuição na potência gerada, mesmo da utilização de um seguidor de máxima potência (*MPPT*).

10.1.3.2 RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

Uma vez que a radiação solar é a fonte primária de energia para conversão, pode-se afirmar que quanto maior a radiação, maior o fator de conversão do módulo, conforme Figura 28. Consequentemente, maiores serão as grandezas tensão e corrente produzidas em seus terminais.

Figura 28 - Comportamento das grandezas para diferentes níveis de radiação incidente.



Fonte: Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação (2004), p. 92.

A corrente produzida pelo módulo é proporcional à intensidade da radiação incidente. Já a tensão apresenta-se praticamente constante com as variações diárias de radiação. A temperatura de operação foi mantida constante, fixada em 25 °C.

5.2 INVERSORES

As grandezas geradas pelos módulos fotovoltaicos são de caráter constante, ou *direct current* (*DC*). Para a correta interligação do sistema à rede e posterior

aproveitamento dessa energia, há a necessidade de um elemento que faça a conversão para o tipo alternado de energia, ou *alternate current* (AC). Tal elemento, denominado conversor *DC-AC* ou inversor, é o responsável.

Para a correta especificação de um inversor, as seguintes grandezas devem ser observadas: potência de operação, tensões de operação, tanto do lado *DC* quanto do *AC*, capacidade de surto, monofásica ou trifásica, eficiência, forma de onda, frequência e fator de potência.

- **Potência de Operação:** A potência nominal de um inversor expressa a potência que o dispositivo é capaz de fornecer a uma carga continuamente. Na especificação de potência, deve-se especificar sempre um inversor com potência levemente superior a da carga, abrindo possibilidades para aumentos de demanda e atenuando picos isolados como no caso do acionamento de motores e sobrecargas sustentadas ocasionais.
- **Tensões de Operação:** As tensões de entrada e saída são funções da potência total fornecida pelo inversor às cargas. 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 (GTES; CEPTEL-CRESESB, 2004). As tensões fixadas devem prever pequenas oscilações no sistema, normalmente causadas por cargas como reatores e motores. A tensão na saída do componente normalmente é fixada em 120 ou 240 V, enquanto a tensão de entrada é mantida nos patamares de 12, 24, 48, 60 ou 120 V, a depender do esquema de ligação dos painéis no sistema.
- **Capacidade de Surto:** Compreende a capacidade que o equipamento tem de suprir adequadamente exigências pontuais de grande potência. Tais exigências são verificadas principalmente no acionamento de motores e demais cargas com fator de potência demasiado indutivo ou capacitivo.
- **Monofásico ou Trifásico:** A depender da potência e da natureza da carga, a forma de ligação do sistema deva ser trifásico. Nestes casos, o sistema fotovoltaico deve "injetar" potência em todas as fases, a fim de

manter o balanceamento. Para tal, deve-se especificar um inversor trifásico. No caso monofásico, como apenas um conjunto fase-neutro é responsável pelo abastecimento de toda a carga, a injeção de potência é feita de forma direta.

- **Eficiência:** Inversores, nos dias atuais, possuem uma eficiência entre 50 e 90%. A escolha de um inversor eficiente está diretamente ligado à qualidade do sistema instalado. A eficiência exibida pelo fabricante no produto representa a máxima eficiência que o equipamento pode alcançar.
- **Forma de Onda:** No mercado, apresentam-se 4 tipos: Inversores de onda quadrada, inversores de onda quadrada modificada, inversores senoidais e inversores *pulse width modulation (pwm)*. Inversores de onda quadrada são os mais baratos e funcionam muito bem para cargas resistivas, possuindo alta carga harmônica na sua saída. Inversores de onda quadrada modificada são uma versão melhorada dos inversores de onda quadrada. O formato mantém formas quadradas, mas mais próximas ao formato senoidal ao acrescentarem-se mais níveis de chaveamento. Apresentam menos harmônicos que o tipo anterior, sendo mais adequados à variedade de cargas encontradas no dia-a-dia. Inversores senoidais consistem no mais refinado e caro tipo de inversor. Produzem as melhores eficiências, com menos harmônicos e compõem a maior parte dos inversores trifásicos. Inversores *pwm* possuem distorções harmônicas baixas e são compatíveis com a maioria das cargas AC.
- **Frequência:** Além de regular o nível de tensão e suprir adequadamente a potência da carga, o inversor também possibilita ajustes na frequência da onda de saída. No Brasil, padroniza-se 60 hertz (Hz), podendo alguns conversores possuir configuração para 50 Hz.
- **Fator de potência:** Inversores atuais possuem fator de potência entre 0,95 e 0,99.

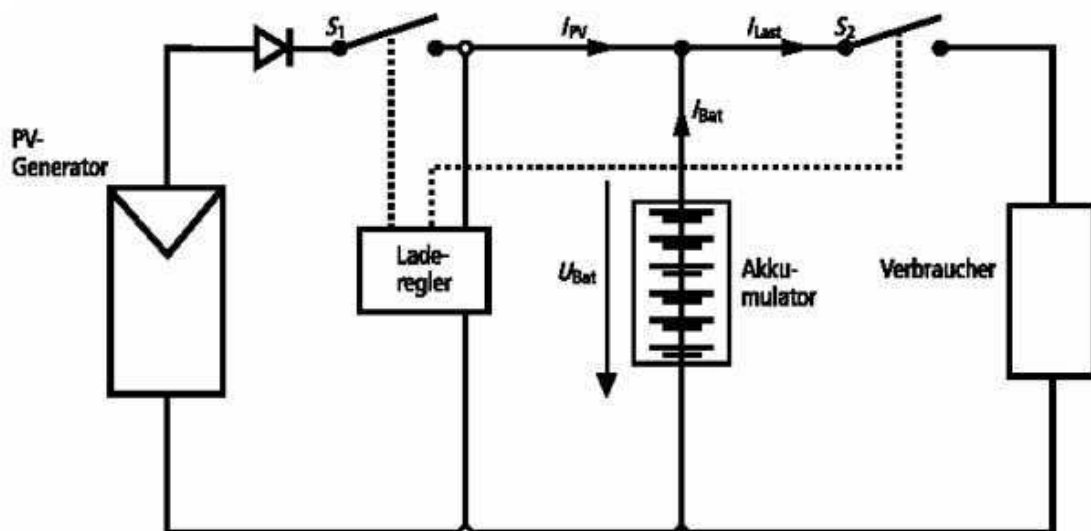
5.3 CONTROLADORES DE CARGA

Visando proteger os acumuladores de carga contra vazamentos ou danos às cargas conectadas, controladores de carga são utilizados para prolongar a vida útil da bateria através do controle dos seus ciclos. São componentes indispensáveis em sistemas fotovoltaicos isolados. A seguir, são apresentados alguns tipos de controladores de carga, desde o mais simples até o mais complexo.

5.3.1 CONTROLADOR SÉRIE

O sistema de funcionamento é simples: O controlador é conectado a duas chaves, conforme Figura 29. Uma interrompe a ligação entre os módulos e a bateria e a outra interrompe a ligação das baterias à carga. Em caso de sobrecarga das baterias, os módulos são desconectados do barramento e em caso de baixo nível de carga, os módulos são conectados. O controle é feito através do nível de tensão da bateria, que diminui com a diminuição do seu nível de carga. A tensão de referência é otimizada para um desgaste mínimo das baterias. Uma chave também é destinada à conexão com a carga.

Figura 29 - Esquema elétrico de um controlador série.

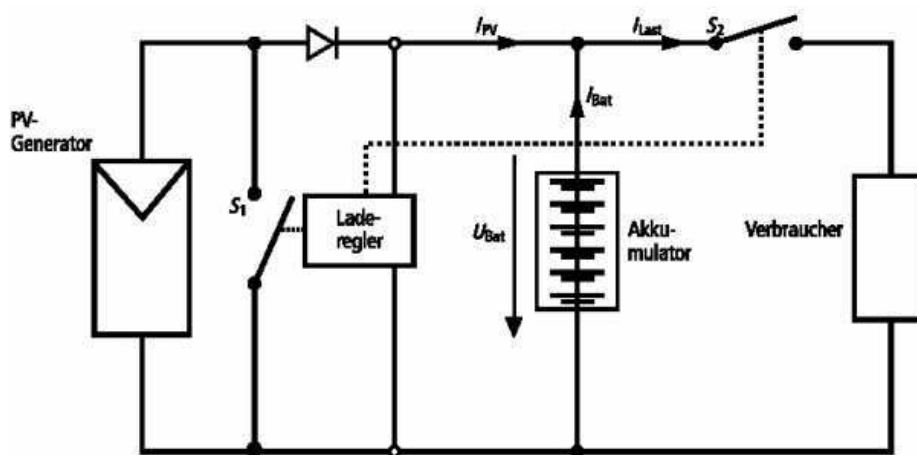


Fonte: Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação (2004), p. 139.

5.3.2 CONTROLADORES *SHUNT*

Aqui, o processo de otimização da bateria é priorizado. O sistema de controle atua sobre a chave que leva à carga e sobre uma chave *shunt*, responsável por estabelecer um curto-circuito nos terminais do módulo, conforme Figura 30. Segundo tal esquema, a manutenção da energia da bateria em torno de um valor de referência é preciso, mas estabelece-se um curto-circuito nos terminais do módulo, o que causa um ligeiro aquecimento em sua estrutura.

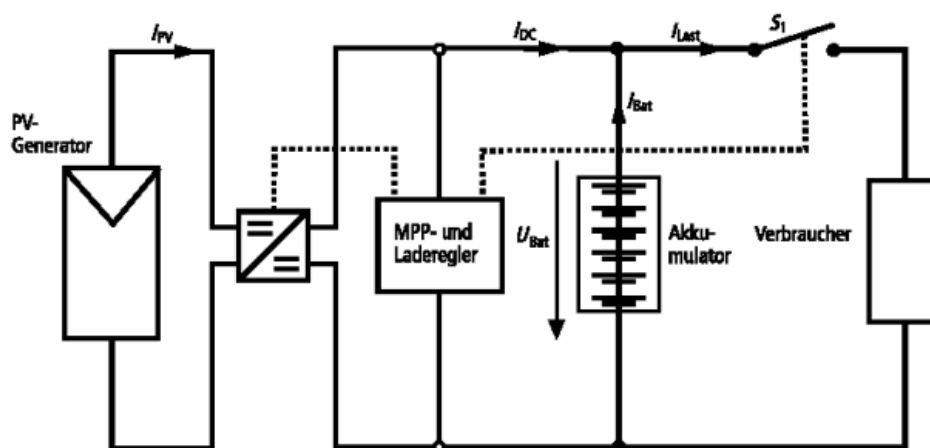
Figura 30 - Esquema de um controlador *shunt*.



Fonte: Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação (2004), p. 140.

5.3.3 CONTROLADOR PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (*MPP*)

Controladores do tipo *MPP* são projetados para regular a tensão nos terminais dos módulos em um intervalo de tempo, de forma a extrair sempre o máximo valor de potência possível. O seguidor do ponto de máxima potência nada mais é do que um conversor *DC-DC* que é regulado segundo um rastreador *MPP*, que executa varreduras ao longo da curva $I \times V$ do módulo gerador em um intervalo de tempo e localiza seu ponto de máxima potência, conforme Figura 31. O conversor é então regulado e ajustado para tomar a máxima potência do módulo.

Figura 31 - Esquema de um controlador *MPP*.

Fonte: Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação (2004), p. 141.

Com a complexidade do circuito, o valor de aquisição também sobe. Para sistemas de baixa potência, tais conversores não são indicados, pois a potência dissipada no conversor *DC-DC* (com eficiência da ordem de 90%) supera a parcela que seria ganha com o circuito extra. Sendo assim, o aparato se torna viável para sistemas com potências instaladas mais elevadas, normalmente superiores a 500 watts (W).

5.4 BANCOS DE BATERIAS (ACUMULADORES DE CARGA)

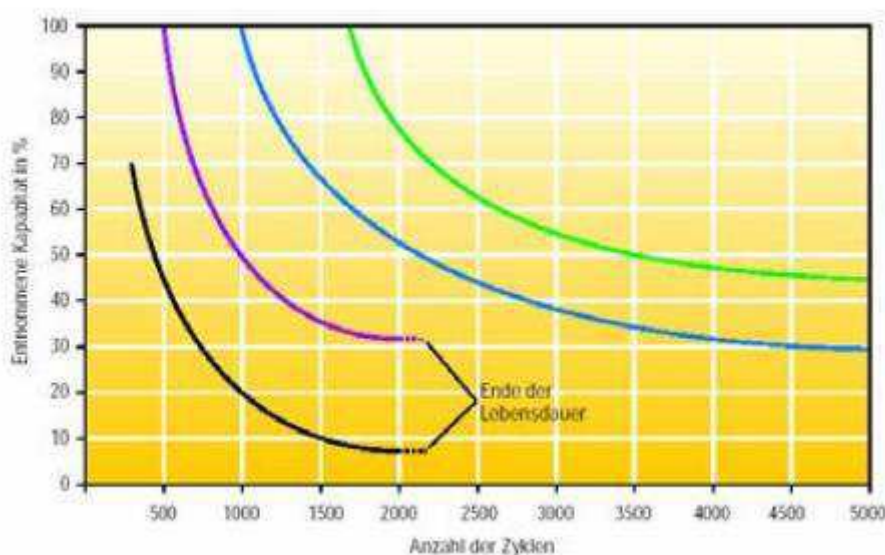
No que tange a sistemas fotovoltaicos, as formas de acumulação de energia ainda são um assunto central de discussão. Principalmente para sistemas isolados, tais acumuladores devem possuir eficiência capaz de superar a atuação de nuvens, mudanças temporais e demais fatores que prejudiquem a perpetuação de incidência solar.

O sistema usual de baterias consiste em módulos recarregáveis cuja carga e descarga são controladas. Diferentes materiais são utilizados na fabricação de tais componentes, tendo como base a conversão de energia química em energia elétrica. Para sistemas fotovoltaicos, as baterias à base de ácido de chumbo são largamente utilizadas. Tal modelo possui um custo-eficiência interessante, sendo capaz de conservar níveis interessantes de carga por períodos de tempo suficientes. São fabricadas com uma tensão nominal de 12 V, sendo compostas por 6 células ligadas em série de 2 V cada.

Uma bateria consiste basicamente num recipiente que contém duas placas de diferentes polaridades (positiva e negativa), isoladas por separadores e imersas num eletrólito de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído. As placas atuam como eletrodos e consistem fundamentalmente em grelhas de chumbo que têm a função de reter a matéria ativa e conduzir a corrente elétrica. A matéria ativa porosa é, na realidade, quem armazena a energia. A sua estrutura esponjosa fornece suficiente área superficial para a reação eletroquímica. Com a bateria carregada, a massa ativa no eletrodo negativo é feita de chumbo (Pb), e no eletrodo positivo de dióxido de chumbo (PbO_2) (ALTENER, 2004).

Os custos em torno de um sistema fotovoltaico, levando-se em consideração seu tempo de vida, tem grande parcela pertencente aos custos de manutenção e troca de baterias. Especialmente na geração isolada, em função dos ciclos de carregamento e descarregamento, o desgaste de tais componentes é substancial, necessitando de substituição periódica, conforme a Figura 32. Um ciclo de trabalho corresponde ao carregamento e descarregamento da bateria segundo determinada variação de carga, normalmente mais ampla do que o que acontece segundo o permitido pelo controlador de carga.

Figura 32 - Gráfico de capacidade de uma bateria em termos do número de ciclos.



Fonte: Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação (2004), p. 127.

Um fator que influencia na capacidade da bateria é a velocidade de carga ou descarga. Quanto mais lento for o descarregamento, ligeiramente maior será a sua disponibilidade de carga e vice-versa. Os fabricantes normalmente fornecem a

capacidade para cada regime de descarga. Outro fator que influencia na capacidade é a temperatura de operação da bateria. As baterias são projetadas para trabalharem a 25 °C. Assim, temperaturas mais baixas reduzem significativamente sua capacidade e temperaturas mais altas resultam em uma capacidade ligeiramente maior acarretando, contudo, aumento da perda de água e diminuição do número de ciclos, durante a vida útil da bateria (GTES; CEPTEL-CRESESB, 2004).

Teoricamente, uma bateria de 100 *ampère-hora* (*Ah*) de capacidade deve ser capaz de fornecer corrente de 100 A durante 1 hora, ou 25 A por 4 horas, ou 2 A por 50 horas, ou ainda, 1 A por 100 horas. Porém, o comportamento das baterias não é linear, isto é, não se deve falar em uma bateria de 100 *Ah*, pois quanto maior a corrente de descarga menor será a autonomia e a capacidade. Deve-se falar em uma bateria de 100 *Ah* padrão de descarga de 20 horas, com tensão de corte 10.5 V (SEGUEL, 2009).

O tipo de bateria mais utilizado em sistemas fotovoltaicos é a bateria à base de ácido de chumbo. Dentre os demais tipos de bateria à base de ácido de chumbo, este modelo se caracteriza por permitir ciclos rasos, com pequenas taxas de descarga, além de descargas profundas esporádicas, quando necessário. Este tipo é extremamente adequado a sistemas *on-grid*, onde a descarga não é acentuada.

6 DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO

Este capítulo tem como objetivo o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado para um canteiro de obras localizado na zona rural da cidade de Juazeiro, Bahia. O canteiro está em operação e foi montado no âmbito do projeto para expansão da subestação de energia elétrica Juazeiro III, de 500 quilovolts (kV), de propriedade da CYMI. O canteiro é de posse da Energy Eletricidade LTDA.

6.1 ESTUDO SOLARIMÉTRICO

Verifica-se que, para a cidade de Juazeiro, o mês com menor entrada de energia é junho, com uma média de 6,8 horas de insolação direta, com uma taxa de insolação média de aproximadamente $155,4 W/m^2$. Isso corresponde a 3,7 quilowatt-hora por dia metro quadrado ($kWh/dia.m^2$) de insolação. Como se visa suprir toda a carga do canteiro com energia solar, usar-se-á tal valor no dimensionamento.

6.2 DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS

Conforme a Tabela 3, todas as cargas presente no canteiro atualmente são mensuradas em kW e convertidas posteriormente em ampére-hora por dia (Ah/dia) de acordo com as horas de utilização para cada carga.

Tabela 3 - Quantificação da potência das cargas para uma tensão de barramento de 48 V.

Equipamento	Quantidade	Horas/dia	Potência Total (W)	Potência Total (Ah/dia)
Ar Condicionado	7	10	9800	2041,7
Impressora Multifuncional	1	0,67	700	9,8
Ponto de Iluminação	17	17	255	53,1
Notebook	14	7	630	91,9
Serra de Bancada	1	2	1500	62,5
Betoneira	2	1	3000	62,5
Serra de Corte de Aço	1	2	1675	69,8
Serra de Mão	1	2	1800	75
Expansão do Canteiro	-	10	3000	625

Fonte: O Autor.

A conveniência em se expressar a potência dos equipamentos em *Ah* reside no fato de que a tensão de operação dos módulos é variável, sendo sua corrente uma grandeza mais estável e passível de dimensionamento. Neste dimensionamento, prevendo possível expansão no canteiro, dimensionou-se uma folga de potência de 3000 W. Tal valor, convertido em *Ah* pelo barramento e taxa de utilização diária estipulada, converte-se em 625 *Ah*.

Além do ajuste na forma de quantificação, a perda de energia dos elementos também é inclusa, remetendo a um fator de correção de 0,9 aplicado ao total obtido, decorrente da média das eficiências dos equipamentos utilizados. Para cada equipamento, tal média é obtida segundo o quociente entre a corrente de saída e a corrente de entrada. Obtém-se assim 3434,7 *Ah/dia* no final.

6.3 DIMENSIONAMENTO DOS ACUMULADORES

Principalmente em sistemas isolados, o correto dimensionamento dos acumuladores garante a eficiência no abastecimento dos equipamentos. Dois parâmetros

devem ser observados: a profundidade de descarga das baterias e a autonomia do sistema. O mercado brasileiro é composto em quase sua totalidade por baterias de ciclo raso, com especificações que as permitem atingir 1 ou 2 anos de durabilidade com uma profundidade de descarga de 30%. Já no mercado internacional, alguns modelos de ciclo profundo são encontrados. Para este tipo, a vida útil se estende até 10 anos, para uma profundidade de descarga de 50%. Para o sistema, a bateria escolhida pertence à fabricante canadense *Rolls*, conforme as Tabelas 4 e 5. A profundidade de descarga adotada foi de 50%.

Tabela 4 - Características da bateria escolhida.

<i>Rolls Surrette 12CS11P 12 V 357 Ah</i>	
Células	6
Corrente sob uma Taxa de 50 horas (A)	8,78
Tensão Nominal (V)	12
Capacidade (Ah)	357

Fonte: O Autor.

Tabela 5 - Quantificação dos acumuladores de carga.

Consumo diário corrigido (Ah/dia)	Autonomia (dias)	Prof. Máx. de descarga	Cap. Necessária (Ah)	Cap. Da Bateria (Ah)
3434,7	2	0,5	13738,8	357
	Baterias em série	Baterias em paralelo	Total de baterias	
	4	38	152	

Fonte: O Autor.

De acordo com a resolução normativa nº 493 de 5 de junho de 2012, da ANEEL, deve ser determinada uma autonomia mínima de 48 horas para sistemas isolados desta categoria. Sendo assim, a quantidade de baterias em paralelo é determinada a partir do quociente entre a demanda total corrigida em *Ah* e o fornecido por uma bateria. O dimensionamento das baterias em série é feito de acordo com a tensão escolhida, que para o caso é de 48 V, obtendo-se 4 baterias. O total de baterias necessário é de 152. Contudo, em função da simetria do sistema e do dimensionamento dos demais

equipamentos, apoiado em fatores de correção já estipulados, usar-se-á 144 baterias. Estas serão divididas em 12 grupos de 12 baterias cada.

6.4 DIMENSIONAMENTO DO ARRANJO DOS MÓDULOS

6.4.1 CORRENTE DE PROJETO

Para a estimativa do arranjo dos módulos, a quantificação é feita a partir do conceito de sol pleno. Para uma taxa de $3,7 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ na cidade de Juazeiro, dividindo-se tal número por 1 quilowatt por metro quadrado dia ($\text{kW/m}^2.\text{dia}$), que representa a taxa de radiação quando o sol está em pico, sem nuvens (denominado sol pleno), obtém-se 3,7 horas. Tal número traduz a média de insolação na região para uma quantificação a sol pleno. A corrente de projeto é obtida segundo o quociente entre a demanda corrigida das instalações, em Ah , e o número de horas de sol pleno, obtendo-se, assim: $3434,7/3,7 = 928,30 \text{ A}$.

6.4.2 CORREÇÃO DOS FATORES DE MÁXIMA POTÊNCIA

Uma vez que o módulo escolhido não operará segundo suas condições nominais de funcionamento, há a necessidade de se estimar os novos parâmetros de máxima potência, de forma a regular adequadamente os demais componentes, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Características do módulo escolhido.

<i>CanadianSolar CS6K-305MS</i>	
Potência Nominal (W)	305
Tensão de Máxima Potência (V)	32,7
Corrente de Máxima Potência (A)	9,33
Tensão de Circuito Aberto (V)	39,9
Corrente de Curto-Circuito (A)	9,91
Coefficiente de Temperatura para Tensão (%/C)	-0,29
Coefficiente de Temperatura para Corrente (%/C)	0,05
Nominal de Operação (°C)	42

Fonte: O Autor.

Uma vez observados os dados do módulo escolhido, deve-se recalculer a temperatura de operação do módulo na localidade de instalação. A temperatura média na cidade de Juazeiro, durante o dia, é de 31 °C. A partir deste dado e da equação que rege tal comportamento, exposta a seguir, pode-se estimar a nova temperatura:

$$T_C = T_A + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) \cdot S \quad (6)$$

Para o caso, $T_A = 31$ °C, $S = 1000$ W/m² e *NOCT* representa a temperatura nominal de funcionamento do módulo, de 42 °C. Dessa forma, estima-se que, na nova localidade, a temperatura de funcionamento do módulo é de 58,5 °C.

Uma vez conhecida a nova temperatura de funcionamento do módulo, deve-se estimar, em seguida, os novos parâmetros de máxima potência, que sofrem influência da temperatura de operação. Para tal, baseia-se na seguinte equação:

$$V_{\max_p'} = V_{\max_p} [1 + \beta(T_c - 25)] \quad (7)$$

Onde $V_{\max_p'}$ é a tensão de máxima potência corrigida, V_{\max_p} é a tensão de máxima potência nominal, β é o fator de correção e T_c é a nova temperatura de operação dos módulos, conforme Tabela 7. A mesma equação pode ser utilizada para a estimativa da corrente de máxima potência, sendo necessário apenas trocar os fatores de tensão para corrente e utilizar o fator de correção da corrente.

Tabela 7 - Dimensionamento das novas tensão e corrente de máxima potência.

Tensão Nominal de Máxima Potência (V)	Corrente Nominal de Máxima Potência (A)	Temperatura de Funcionamento dos Módulos Corrigida (°C)	Tensão de Máxima Potência Corrigida (V)	Corrente de Máxima Potência Corrigida (A)
32,7	9,33	58,5	29,52	9,49

Fonte: O Autor.

6.4.3 DIMENSIONAMENTO DO NÚMERO DE MÓDULOS

De posse de tais valores, pode-se agora dimensionar o número de módulos fotovoltaicos a serem instalados. O dimensionamento dos módulos em série depende da tensão do banco de baterias. Para que haja um carregamento efetivo, a tensão nos terminais dos módulos em série deve ser superior em pelo menos 25% à tensão nominal do banco de baterias. Para uma tensão de 48 V no banco, deve-se ter pelo menos 57,6 V na saída do arranjo dos módulos em série. Para o dimensionamento do número de módulos em paralelo, o fator decisivo é a corrente de projeto, corrigida de um fator, assim como a corrente de máxima potência corrigida. A determinação é feita através de um quociente entre ambas as correntes. O fator de correção deve-se ao desgaste dos módulos, acúmulo de poeira e resistência nos contatos entre módulos. O valor de 0,9 para módulos cristalinos foi retirado de (GTES; CEP-EL-CRESESB, 2004).

Tabela 8 - Dimensionamento do número de módulos fotovoltaicos.

Corrente de Projeto (A)	Fator de Correção do Módulo	Corrente de Projeto Corrigida (A)	Corrente de Máxima Potência (A)	Tensão de Máxima Potência Corrigida (V)
928,3	0,9	1031,4	9,49	29,52

Módulos em série	Módulos em paralelo	Total de módulos
2	109	218

Fonte: O Autor.

Em função da simetria do sistema, utilizar-se-á 216 módulos, dividido em 12 grupos de 18 módulos, ao invés dos 218 módulos aproximados pelo cálculo teórico. Os motivos para tal decisão envolvem não somente o dimensionamento do banco de baterias quanto do controlador de carga, que será especificado na seção seguinte. Os 216 módulos serão distribuídos em arranjos de 2 módulos em série e 9 módulos em paralelo.

6.5 CONTROLADOR DE CARGA

Para o dimensionamento do controlador de carga, deve-se levar em consideração a corrente de curto-circuito do arranjo dos módulos conectados. A corrente de curto-circuito para cada arranjo é obtida através do produto entre a corrente de curto para um módulo e o número de módulos em paralelo. Assim sendo, $9,91 \times 9 = 89,19$ A. Superdimensionando-se tal corrente em 25%, para situações de radiação intensa: $89,19 \times 1,25 = 111,49$ A. O controlador escolhido tem corrente nominal de 60 A e, com isso, usar-se-á dois em paralelo. Sendo assim, a corrente para cada controlador é da ordem de: $111,49/2 = 55,75$ A. Para o esquema, serão necessários 24 controladores de carga.

O controlador é da marca *SRNE SOLAR* e tem algumas de suas especificações conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Características do controlador de carga escolhido.

MPPT 60A SRNE SOLAR 12/24/26/48 V	
Tensão de operação (V)	12, 24, 36 e 48
Corrente nominal (A)	60
Máxima Tensão nas Baterias (V)	70
Corrente Nominal de Saída (A)	20
Máxima Tensão nos Módulos em Circuito Aberto (V)	150

Fonte: O Autor.

Conforme já citado, serão utilizados 24 controladores de carga, conectados a arranjos de módulos fotovoltaicos de 18 módulos cada. A forma de ligação dos controladores de carga aos bancos de baterias consiste em uma forma distribuída. Os pares de controladores serão conectados, cada, a um arranjo de 4 baterias em série e três em paralelo, totalizando 12 baterias por arranjo.

6.6 CONVERSOR *DC-DC*

A tensão na saída do controlador de carga é de 48 V, mas a especificação do inversor escolhido aceita tensões de entrada na faixa entre 80 e 1000 V. Sendo assim, para adequada conexão, usar-se-á um conversor *DC-DC* para elevar o nível de tensão na saída dos controladores, cuja especificação está conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Informações sobre o conversor *DC-DC* escolhido.

<i>AlphaFontes DC-DC 48/250 V</i>	
Faixa de Tensão de Entrada CC (V)	36-60
Tensão CA de saída (V)	250 V
Faixa de Temperatura de Operação (°C)	0-60

Fonte: O Autor.

A faixa de tensão escolhida para a saída do equipamento é de 250 V. A potência do equipamento, segundo o fabricante, pode ser escolhida no momento da aquisição, assim como a tensão de saída. Para o caso, estabeleceu-se 48 V na tensão de entrada e 250 V na saída.

6.7 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

De forma geral, a especificação de um inversor gira em torno da tensão de entrada, da potência nominal e das características requisitadas na saída, conforme a Tabela 11. Para o sistema, foram especificados 3 inversores da marca *Fronius*. Tais inversores operam em paralelo e fornecem uma saída monofásica em 220 V, tensão referência para a região onde o sistema será instalado, segundo a norma nº 493, de 5 de junho de 2012, da ANEEL.

Tabela 11 - Informações sobre o inversor escolhido.

<i>Fronius Primo 8.2-1</i>	
Faixa de Tensão de Entrada CC (V)	80-1000
Tensão CA de saída (V)	220 V
Frequência de Saída (Hz)	50/60
Potência Nominal (W)	8200
Corrente Máxima de Saída (A)	35,70
Eficiência Máxima de Conversão (%)	98,10
Forma de Onda de Saída	Senóide Pura

Fonte: O Autor.

Tais inversores serão conectados diretamente à caixa de junção dos conversores.

6.8 ESPECIFICAÇÃO DOS CONDUTORES

A categoria escolhida para todos os condutores foi A1, uma vez que todo o sistema é monofásico e a forma de disposição dos eletrodutos no canteiro é embutida no chão. A disponibilidade e uniformidade de cabos ao longo do sistema foram levadas em consideração, trazendo facilidade e praticidade na aquisição do material e na instalação. As seguintes seções foram adotadas: 6, 10 e 35 milímetros quadrados (mm^2). Optou-se, também, por padronizar a forma de isolamento dos cabos, com o PVC 70 °C.

Cabos de Fileira: A norma europeia IEC 60364-7-712 sugere que o cabo de fileira deve suportar uma corrente 1,25 vezes maior que a corrente de curto-circuito para uma sequência de módulos em série, além de ter proteção contra falhas de terra e curto-circuito. É o cabo que interliga os módulos entre si e a sua caixa de junção. Para o caso, a corrente de curto-circuito é de: $9,91 \times 1,25 = 12,39$ A. Para tal corrente, dimensionou-se um cabo flexível de 4 mm^2 , satisfazendo, também, o critério de queda de tensão.

Contudo, em função da larga utilização mais adiante no dimensionamento, além de evitar a compra de mais um tipo de cabo que seria utilizado apenas neste momento, utilizar-se-á 6 mm^2 .

Condutores Principais DC: São os condutores que ligam a caixa de junção dos módulos aos controladores de carga. De acordo com a corrente nominal em cada condutor: $9,49 \times 9 = 85,41 \text{ A}$. Superdimensionando-se em 1,25 tal corrente, para situações de intensa radiação, obtém-se: $85,41 \times 1,25 = 106,76 \text{ A}$. Para tal corrente, dimensiona-se um condutor flexível de 35 mm^2 .

Condutores do Banco de Baterias: Uma vez que a canalização de energia para carregamento das baterias se dá através do condutor principal DC, deve-se dimensionar este condutor de acordo com o mesmo nível de corrente do anterior. Sendo assim, escolhe-se um condutor flexível de 35 mm^2 . Este condutor fará a ligação entre os controladores de carga e o banco de baterias.

Condutores entre os Controladores de Carga e os Conversores: De acordo com a especificação do controlador de carga, mais especificamente da sua corrente nominal de saída, de 20 A , como o sistema conta com dois controladores em paralelo, tem-se uma corrente de 40 A "chegando" no conversor. Assim, especifica-se um cabo flexível de 10 mm^2 para esta ligação.

Condutores entre os Conversores e sua Caixa de Junção: Para uma corrente de 40 A de entrada no Conversor, como a tensão de saída no mesmo é de 250 V , especifica-se um fator de $250/48 = 5,21$ de crescimento para o nível de tensão. Para o nível de corrente, com eficiência de 0,9 no conversor, têm-se: $48/250 = 0,192$. $0,192 \times 40 = 7,68 \text{ A}$. $7,68 \times 0,9 = 6,91 \text{ A}$. Pode-se especificar um cabo de menor seção reta, contudo, como citado no início da seção, usar-se-á cabos de 6 mm^2 aqui.

Condutores de chegada no Inversor: São os condutores que ligam a caixa de junção dos conversores ao inversor. A corrente nominal nesse trecho é dada por: $6,91 \times 4 = 27,64 \text{ A}$. Para esse nível de corrente, usar-se-á condutores de 10 mm^2 .

Condutores de Ligação ao Ponto de Fornecimento: De acordo com os dados do fabricante do inversor, cada exemplar entrega $35,7 \text{ A}$ de corrente máxima em sua saída. Dimensionam-se cabos flexíveis de 10 mm^2 de seção reta para a conexão de cada inversor ao terminal de fornecimento.

Condutores de Saída do Ponto de Fornecimento: Tendo como base a corrente de saída de cada inversor, estima-se: $35,7 \times 3 = 107,1 \text{ A}$ na saída do ponto. Para este nível de corrente e usabilidade no sistema, recomenda-se condutores flexíveis de 35 mm^2 .

6.9 FUSÍVEIS DE FILEIRA

A norma europeia IEC 60364-7-712 sugere que o cabo de fileira, além de suportar uma corrente maior que a de curto-circuito, tenha também proteção contra surtos. Neste âmbito, recomenda-se a instalação de fusíveis de 15 A, da *Bussmann*, modelo *LP-CC*.

De forma geral, a norma brasileira NBR – 5410 estabelece que o dispositivo de proteção deva ter valor nominal compreendido entre a corrente nominal do circuito e a máxima capacidade de condução de corrente do condutor dimensionado. Na especificação do fusível, satisfazem-se ambas as normas.

6.10 DISJUNTORES E INTERRUPTOR DIFERENCIAL RESIDUAL

(IDR)

Disjuntores serão utilizados na proteção tanto do banco de baterias quanto dos módulos fotovoltaicos. De acordo com o critério estabelecido na seção anterior, dimensionam-se disjuntores de 125 A para ambas as localidades.

Além dos disjuntores, dimensionou-se um interruptor diferencial residual (IDR), posicionado após os inversores. Tal dispositivo impede que correntes de fuga retornem aos controladores de carga e baterias. Dimensionou-se um IDR de 30 mA.

6.11 DETALHES E OBSERVAÇÕES

O sistema é destinado ao abastecimento de um canteiro de obras na cidade de Juazeiro, Bahia. Pela mobilidade das instalações e constante mudança na organização, o sistema deve possuir máxima portabilidade a fim de facilitar seu deslocamento e possibilitar o seu uso em mais canteiros após o fim das atividades e desmobilização. A especificação do trabalho ficará por conta apenas do dimensionamento dos principais equipamentos que comporão o sistema. A utilização de quadros de medição, caixas de comandos e demais equipamentos complementares ficará por conta do proprietário do canteiro. No que tange a caixas de comando, algumas recomendações foram

especificadas visando aumentar a segurança e confiabilidade das instalações, da escolha do uso. Os Apêndices ilustram detalhes sobre a forma de ligação dos componentes dimensionados, assim como recomendações de uso. Enquanto o Apêndice A fornece uma visão ampla de ligação do sistema, os Apêndices B, C e D fornecem detalhes. O barramento de equipotencialização deve ser composto pela conexão dos equipamentos às hastes já presentes no canteiro. A conexão deve ser feita através de condutores de 25 mm² de cobre nu e estabelecidos em eletrodutos flexíveis corrugados em PVC enterrados no chão. Sugerem-se grampos para haste de aterramento para conexão dos cabos às hastes, conforme seção adequada, já presentes em quantidade no canteiro. O mesmo dispõe de 5 pontos de aterramento, cada um constituído de uma haste de aterramento revestida em cobre.

6.12 RESULTADOS OBTIDOS

Conforme a Tabela 12, os principais custos envolvendo o dimensionamento efetuado foram mensurados. Levou-se em consideração apenas custos de equipamentos essenciais, desprezando-se custos de condutores, caixas de comando e eletrodutos, que correspondem a uma pequena porcentagem do valor total.

Tabela 12 – Custos estimados dos principais componentes do sistema fotovoltaico.

EQUIP.	Módulos	Baterias	Controlador de Carga	Inversor	Conversor
MODELO	Canadian Solar CS6K-305M	ROLLS SURRETTE 12CS11P 12V 357 AH	Mppt 60A - SRNE Solar 48v	Fronius Primo 8.2-1	AlphaFontes 48/250 V
QTD	216,00	144	24	3	12
PREÇO UNIT.	R\$ 612,87	R\$ 2.918,30	R\$ 1.745,00	R\$ 13.199,00	R\$ 131,00
TOTAL	R\$ 132.379,92	R\$ 420.235,20	R\$ 41.880,00	R\$ 39.597,00	R\$ 1.572,00
%	20,83%	66,11%	6,59%	6,23%	0,25%
TOTAL					R\$ 635.664,12

Fonte: O Autor.

O abastecimento do canteiro, atualmente, é feito através de um gerador a diesel. Foram mensurados os valores arcados pelo proprietário do canteiro, conforme a Tabela 13, para manutenção do gerador até o final da obra, partindo do pressuposto que apenas

este gerador será suficiente para abastecimento do canteiro até o fim das atividades e que a obra durará mais 18 meses a partir desta data.

Tabela 13 – Custo total do abastecimento para situação atual do canteiro.

	DIESEL		GERADOR	
PREÇO UNITÁRIO	R\$ 3,70		-	
QUANTIDADE MENSAL	1440		1	
ALUGUEL GERADOR	-		R\$ 2.000,00	
PERÍODO DE TEMPO (meses)	18		18	
VALOR LÍQUIDO -R\$ 503.760,12	SUBTOTAL	R\$ 95.904,00	SUBTOTAL	R\$ 36.000,00
			TOTAL	R\$ 131.904,00
			VALOR LÍQUIDO	-R\$ 503.760,12

Fonte: O Autor.

O valor do sistema fotovoltaico é superior ao que seria gasto com o gerador deste momento ao final estipulado para a obra, fator que é expresso através do valor líquido negativo.

O sistema fotovoltaico, contudo, tem durabilidade aproximada de 10 anos, guiada pelo componente de maior desgaste, as baterias. O ato de adquirir sistemas desse tipo dá a liberdade ao cliente de utilizar sua capacidade inteira ou parcial em mais canteiros, uma vez da simetria e disposição de ligação dos equipamentos durante o período de vida útil. Assim, da utilização do equipamento, de forma parcial ou total, durante 10 anos e padronizando-se o valor do aluguel de um gerador e do diesel utilizado, realizou-se um novo cálculo de valor líquido, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Balanço financeiro levando-se em consideração a vida útil do sistema fotovoltaico.

TEMPO: 10 ANOS (120 MESES)	GERADOR	DIESEL	SISTEMA FOTOVOLTAICO	
PREÇO UNIT.	-	R\$ 3,70	-	
QTD/MÊS	1	1440	-	
ALUGUEL	R\$ 2.000,00	-	-	
PERÍODO (Mês)	120	120	-	
SUBTOTAL	R\$ 240.000,00	R\$ 639.360,00	-	
	TOTAIS	R\$ 879.360,00	R\$ 635.664,12	
			VALOR LÍQUIDO	R\$ 243.695,88
			LUCRO (%)	38,34

Fonte: O Autor.

Observa-se que, para o tempo de vida estimado do sistema fotovoltaico, o valor líquido é positivo, indicando uma boa alternativa de investimento. O lucro, com base no valor inicial investido, é aproximado em 38,34%.

Sendo assim, observa-se que a energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma boa alternativa de investimento, mas que seu retorno é de médio a longo prazo. Garantir o bom funcionamento dos aparelhos através de manutenções preventivas constitui uma boa prática para assegurar o lucro previsto. A vida útil aqui adotada destina-se ao banco de baterias, sendo que, a partir de sua substituição, consegue-se elevar a vida útil do conjunto.

Em relação ao país, o panorama se encontra de forma instável. Uma vez da aprovação da tarifa proposta pela ANEEL, no terceiro semestre deste ano, a adesão à tal forma de geração é dificultada, uma vez da diminuição do lucro e aumento do tempo de retorno.

7 CONCLUSÕES

Através desse estudo pôde-se mensurar o quão grandiosas são as aplicações envolvendo a energia solar. A utilização de diversos tipos de materiais, os estudos desenvolvidos e diversos campos de atuação permearão a estadia e a evolução deste tipo de energia. Em algumas localidades, desponta como a forma de tecnologia mais atrativa enquanto em outros é posta em pauta e sua situação é deveras avaliada. Nacionalmente, ainda constitui uma fonte atrativa para investidores de médio porte pelo custo de seus equipamentos. Contudo, se aprovada a medida que está em pauta pública, o número de investimentos e investidores diminuirão drasticamente e esta opção, já rentável, se tornará menos atrativa.

O material de maior comércio mundial ainda é o silício cristalino. Pelo seu rendimento, constitui o principal insumo na confecção de módulos fotovoltaicos, de larga comercialização mundial.

Vários fatores influenciam no dimensionamento de um sistema isolado. Desde o nível médio de incidência solar na localidade até a especificação e quantificação dos componentes escolhidos de forma a compor um sistema versátil, balanceado e bem dimensionado. O mercado nacional, por ser composto quase que completamente por baterias de ciclo raso, que compõem sistemas *on-grid*, acaba dificultando a composição de sistemas isolados, sendo necessária a importação de componentes, a exemplo das baterias utilizadas.

Assim, conclui-se que o sistema fotovoltaico é, de fato, viável. Os preços obtidos com as pesquisas de mercado são para componentes isolados, obtendo desconto a partir da aquisição conjunta em local especializado, uma vez da garantia do mesmo tempo de vida útil do sistema aqui dimensionado. Além disso, a taxa a ser imposta pela ANEEL recai apenas sobre sistemas ligados à rede, diferente do sistema aqui abordado, fornecendo mais uma garantia de viabilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 217 p. 2004.

AGÊNCIA EFE – Edição Brasil. 2019. Cazaquistão inaugura maior usina de energia solar da Ásia Central. Disponível em <<https://www.efe.com/efe/brasil/mundo/cazaquist-o-inaugura-maior-usina-de-energia-solar-da-asia-central/50000243-3876390>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

BOUNECHBA et al., 2014. Comparison of perturb & observe and fuzzy logic in maximum power point tracker for PV systems. Energy Procedia, v.50, p.677-684, 2014. Disponível em <https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-1-Circuito-eletrico-equivalente-da-celula-solar-fotovoltaica-Fonte-BOUNECHBA-et_fig1_317737636>. Acesso em 15 de setembro de 2019.

BLUE SOL EDUCACIONAL. Energia solar. Célula fotovoltaica – o guia técnico absolutamente completo. Blue Sol Energia Solar, 23 de fevereiro de 2017. Disponível em <<https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em 15 de setembro de 2019.

BLUE SOL EDUCACIONAL. Energia solar. Energia solar cresce nos Estados Unidos. Blue Sol Energia Solar, 8 de maio de 2018. Disponível em <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-cresce-nos-eua/>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

CRESESB. Módulos Fotovoltaicos. CRESESB – CEPTEL, 2008. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331>. Acesso em 21 de setembro de 2019.

COFACE FOR TRADE. Lisboa. Futuro da energia solar na Europa. Disponível em <<https://www.coface.pt/Noticias-e-Publicacoes/Noticias/O-futuro-da-energia-solar-na-Europa-energia-fotovoltaica>>. Acesso em 19 de outubro de 2019.

CONEXÃO PLANETA. Energia Solar é o setor que mais gerou empregos no Estados Unidos. Disponível em <<http://conexaoplaneta.com.br/blog/energia-solar-e-o-setor-que-mais-gerou-empregos-nos-estados-unidos/>>. Acesso em 19 de outubro de 2019.

MME – Ministério de Minas e Energia. Energia solar no Brasil e no mundo. Brasil, 2016. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

ENERGIA SOLAR. Silício Monocristalino. Disponível em <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/modulo-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos/silicio-monocristalino>>. Acesso em 15 de setembro de 2019.

ÉPOCA NEGÓCIOS. 2019. Investimento em Energia Renovável na Ásia. Disponível em <<https://epocanegocios.globo.com/Economia/noticia/2019/05/epoca-negocios-investimento-em-renovaveis-na-asia-deve-ultrapassar-oleo-e-gas-em-2020-diz-consultoria.html>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. São Paulo, 71 p. Escola Politécnica, Universidade de São

Paulo. Disponível em
<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4649643/mod_resource/content/1/Apostila_solar.pdf
>.

FERREIRA, Ricardo Jorge de Araújo. Carro a energia solar. Portugal, 2008, 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major automação) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

GREENPRO. Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação. Holanda, Alemanha, Itália, Reino Unido e Portugal (União Europeia), 2004.

KINTECH ENGINEERING. Piranômetro. 2019. Disponível em <<https://www.kintech-engineering.com/pt-br/products/solar-pt/sr30-pyranometer/>>. Acesso em 5 de outubro de 2019.

Manual e guia técnico de energia solar fotovoltaica – Tecnologia, Projeto e Instalação. Brasil, 2004. 368 p. Disponível em <<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>.

PETRO NOTÍCIAS. Telureto de Cádmio. 2014. Disponível em
<<https://petronoticias.com.br/archives/tag/telureto-de-cadmio>>. Acesso em 28 de setembro de 2019.

PORTAL ENERGIA ENERGIAS RENOVÁVEIS. Maior central solar fotovoltaica da Europa. Disponível em <<https://www.portal-energia.com/maior-central-solar-fotovoltaica-europa-147920/>>. Acesso em 19 de outubro de 2019.

PORTAL SOLAR. São Paulo, 2019. Complexo flutuante no Japão. Disponível em
<<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/usina-de-energia-solar-flutuante-mais-potente-do-mundo-e-concluida-no-japao.html>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

SOLARGIS. Distribuição anual de energia solar no território brasileiro. 2019. Disponível em
<<https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/brazil>>. Acesso em 28 de setembro de 2019.

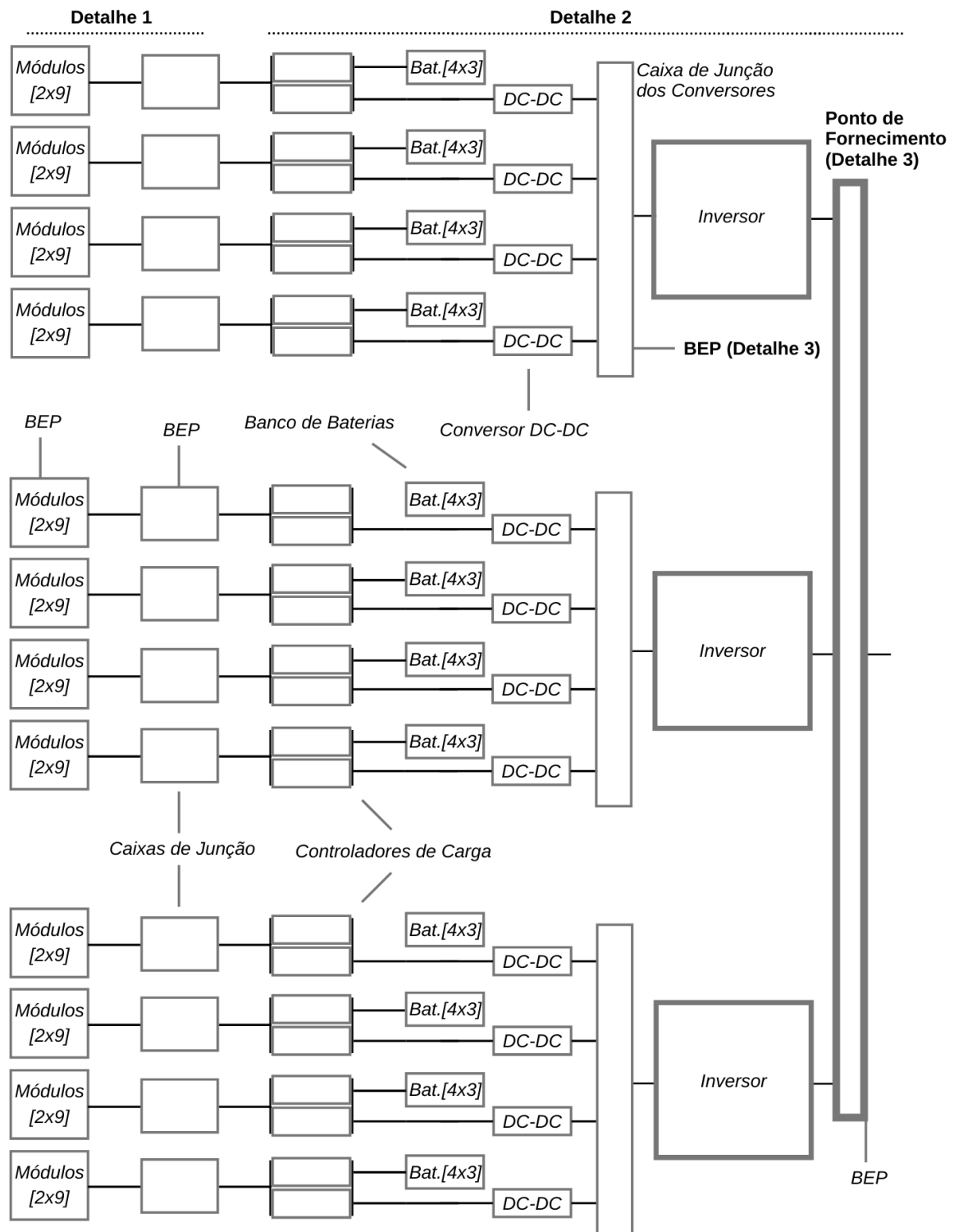
STROM BRASIL. Efeito fotovoltaico. Brasília, 2014. Disponível em
<<http://www.strombrasil.com.br/efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em 15 de setembro de 2019.

GTES; CEPEL-CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Edição Especial PRC-PRODEEM, 2004

CRESESB. Energia Solar - Princípios e aplicações. CRESESB - CEPEL, 2008. Disponível em:
<<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 25 Outubro 2019

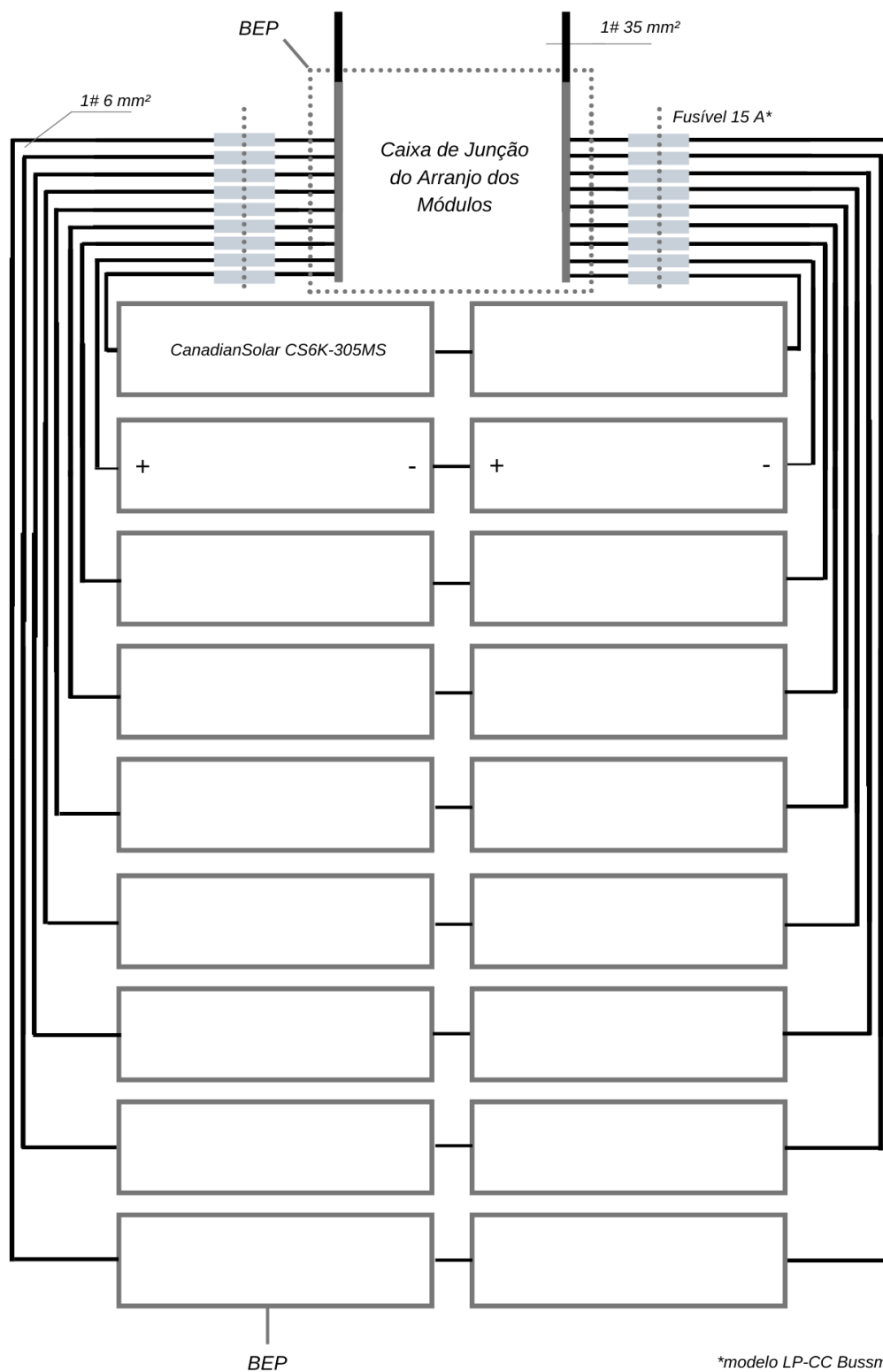
APÊNDICE A

Visão Ampla do Sistema



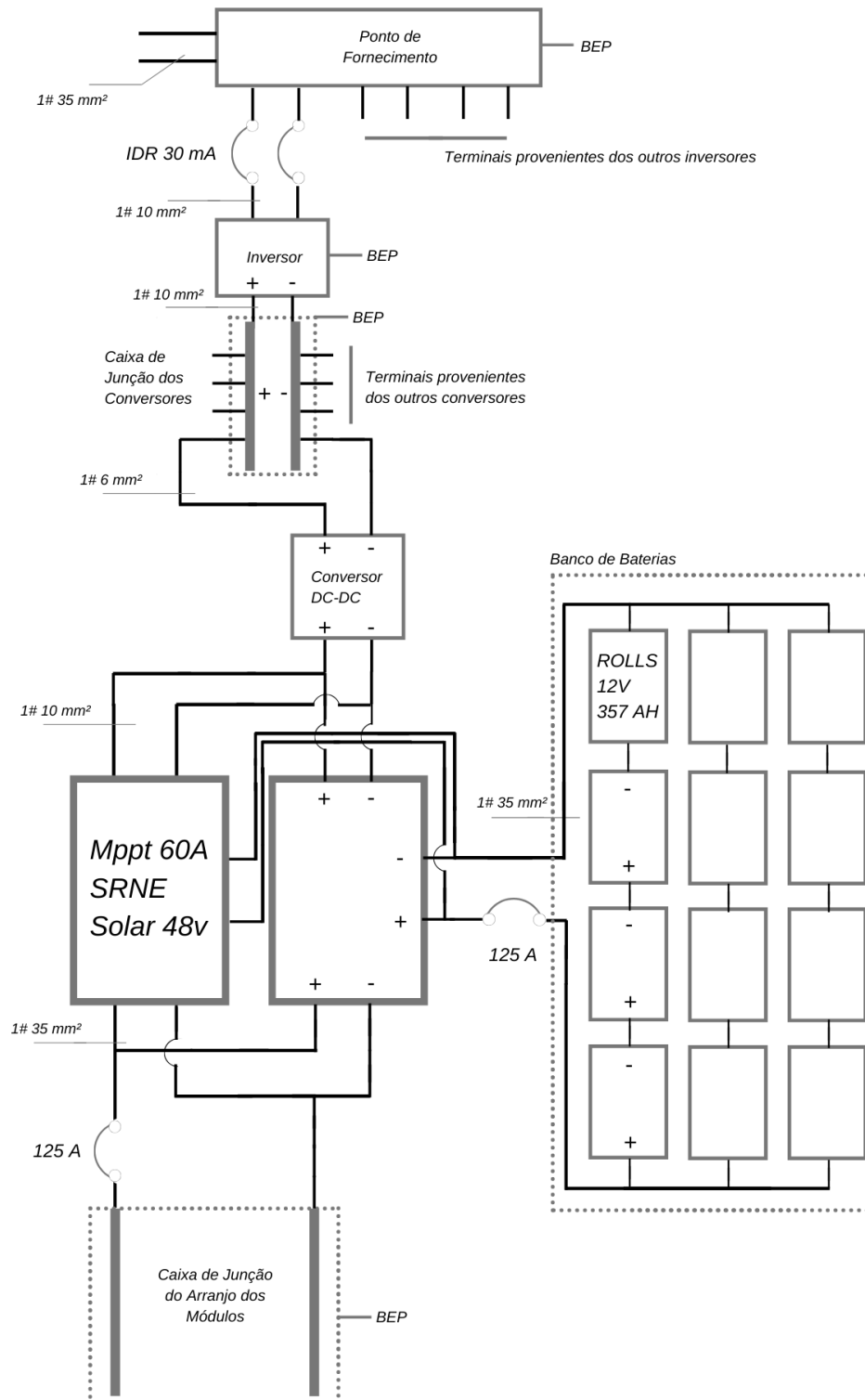
APÊNDICE B

Detalhe 1 - Ligação dos Módulos



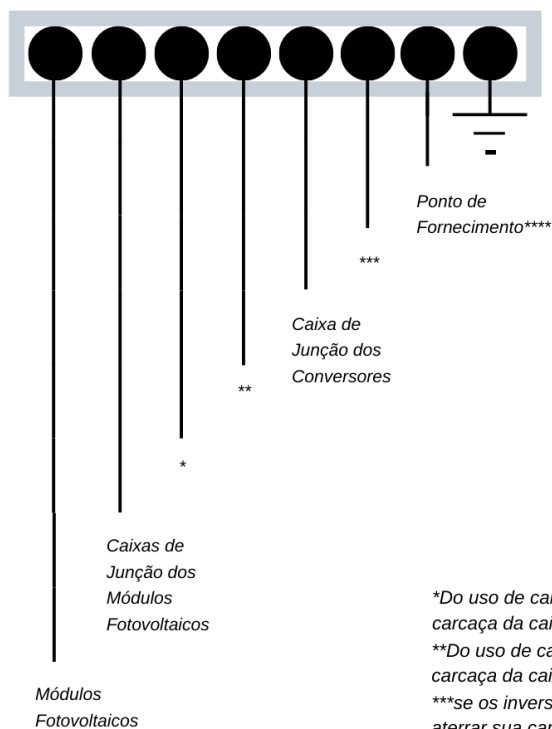
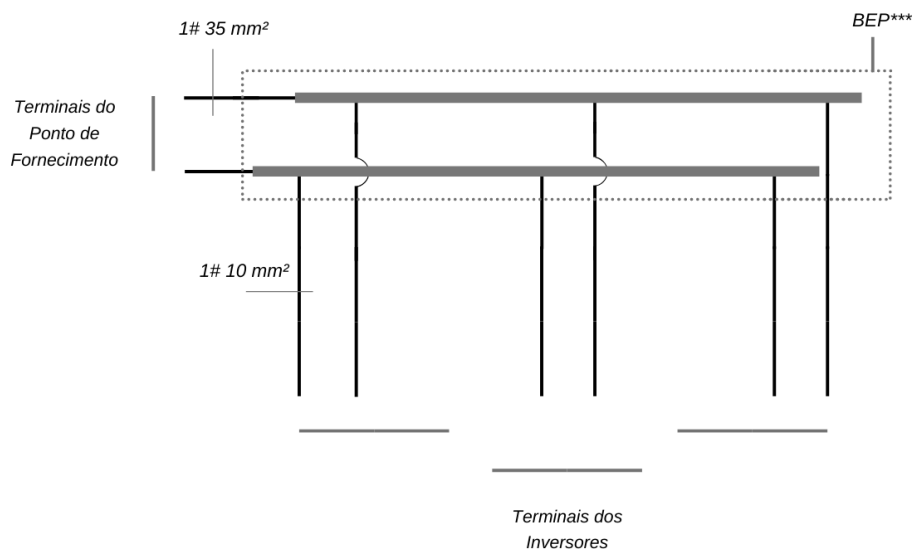
APÊNDICE C

Detalhe 2: Ligação dos Controladores de Carga



APÊNDICE D

Detalhe 3: Barramento de Equipotencialização e Ponto de Fornecimento



Ponto de Aterramento: É recomendado a utilização de condutores de cobre nu com seção reta de 25 mm² para a conexão de todas as estruturas aos pontos de aterramento. Sugere-se a conexão às hastes já existentes no canteiro através de grampos para hastes de aterramento. Os condutores devem ser estabelecidos em eletrodutos enterrados no chão de 32 mm².

**Do uso de caixas de comando para os controladores de carga, aterrar a carcaça da caixa.*

***Do uso de caixas de comando para os conversores DC-DC, aterrar a carcaça da caixa.*

****se os inversores possuírem caixa de comando própria, recomenda-se aterrar sua carcaça.*

*****se o ponto de fornecimento possuir caixa de comando própria, recomenda-se aterrar sua carcaça.*