



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE
DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**



Igor Pinheiro de Oliveira

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO LABORATÓRIO DE
ENGENHARIA DE ENERGIA - UFGD**

Orientador: Prof. Dr. Etienne Biasotto

Dourados

2014



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE
DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**



Igor Pinheiro de Oliveira

**ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA
DE ENERGIA - UFGD**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal da Grande Dourados, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Etienne Biasotto

Dourados

2014

FOLHA DO JUGAMENTO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por ter me guiado nessa trajetória.

Aos meus pais Joelito e Izabel e os meus irmãos Everton e Helliton, por todo o carinho, o incentivo e por me acompanharem em todos os momentos.

A minha namorada Yasmim, pela amizade, paciência, e apoio em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Etienne Biasotto pela orientação e ensinamentos durante as diversas etapas deste trabalho.

A todos meus amigos que criei ao longo da graduação.

Sumário

AGRADECIMENTOS	VII
Lista de Siglas	XI
Lista de Tabelas	XV
Lista de Figuras	XVII
Resumo	XIX
Abstract	XXI
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	1
2. Pesquisas e Assuntos Correlacionados	3
2.1 Fontes renováveis.....	4
2.2 Energia Solar	5
2.2.1. Energia solar térmica	11
2.2.2. Energia solar fotovoltaica.....	13
2.2.2.1. Impactos Socioambientais da energia fotovoltaica.....	13
2.2.2.2. A energia solar fotovoltaica no Brasil	13
2.2.2.3. Obstáculos	17
2.3. Geração e uso de eletricidade no mundo e no Brasil	18
3. Sistemas Fotovoltaicos e dispositivos	21
3.1. Células e módulos fotovoltaicos	21
3.2. Células fotovoltaicas	22
3.3. Módulo, placa ou painel fotovoltaico	25
3.4. Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos	25
3.5. Tipos de conexão dos módulos.....	27
3.5.1. Conexão dos módulos em série	27
3.5.2. Conexão dos módulos em paralelo	28
3.6. Acumuladores	28

3.7. Inversor.....	29
4. Metodologia de dimensionamento.....	31
4.1. Consumo de energia elétrica	31
4.2. Cálculo do Inversor	32
4.3. Cálculo dos módulos fotovoltaicos.....	32
4.4. Cálculo dos Acumuladores	34
4.5. Cálculo dos Reguladores.....	35
4.6. Cálculo da seção do condutor.....	36
5. Estudo de caso.....	37
5.1. Orçamento do projeto	45
5.2. Taxa de retorno.....	45
6. Conclusão.....	47
7. Referências	49

Lista de Siglas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;

BEM - Balanço Energético Nacional;

CA - Corrente alternada;

CC - Corrente contínua;

C_{Banco} - Capacidade de carga do banco de baterias em ampère-hora [Ah];

C_{Bat} - Capacidade de carga de cada bateria utiliza [Ah];

D - Número de dias de autonomia do banco de baterias;

D_1 = Número de dias de funcionamento do local por mês [dia/mês];

E - Consumo por aparelho [Wh/dia];

E_T - Consumo mensal [kWh/mês];

E_t - Consumo diário [kWh/dia];

E_G - Energia gerada pelo módulo diariamente [Wh];

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

H_S - Horas diárias de insolação [h];

I_t - Corrente total [A];

I_c – Corrente do circuito [A];

I_D – Corrente interna unidirecional [A];

I_s – Corrente gerada pelo feixe de radiação solar no painel [A];

I_0 – Corrente inicial [A];

I_{cc} - Corrente de curto-circuito [A];

I_{mp} – Intensidade no ponto de potência máxima [A];

I_r – Intensidade máxima do regulador [A];

IEA - International Energy Agency;

kWp – Kilo Watts pico;

L_c – Comprimento do circuito [m];

MME - Ministério de Minas e Energia;

MWh – Mega watts hora;

N - Número de aparelhos;

N_p - Número de módulos fotovoltaicos a instalar;

N_{BS} - Número de baterias ligas em série;

N_{BP} - Número de conjunto de baterias ligadas em paralelo;

N_r – Número de reguladores;

N_{pp} - Número de módulos conectados em paralelo;

NiCd - Níquel-Cádmio;

NiMH - Níquel-Metal-Hidreto;

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica;

P_{ac} - Perdas de rendimento no sistema de acumulação [%];

P_d - Profundidade máxima de descarga do sistema acumulador [%];

P_t - Potência total a instalar [W];

P_{max} - Potência máxima do módulo fotovoltaico [W];

$P_{aparelho}$ - Potência do aparelho [W];

Rn - Radiação solar liquida;

Rd - Radiação difusa;

S_c – Seção mínima do condutor [mm²];

t - Tempo que o(s) aparelho (s) ficam ligados por dia [h/dia];

UFGD - Universidade Federal da Grande Dourados;

V – Tensão elétrica [V];

V_{Banco} - Tensão do sistema de acumulação [V];

V_{Bat} - Tensão da bateria utiliza [V];

V_{ff} – Tensão entre fases [V];

V_{fn} – Tensão entre fase e neutro [V];

V_t - Tensão total;

V_{ff} – Tensão entre fases [V].

ΔV_c – Queda de tensão máxima admitida em projeto [%];

ρ – Resistividade do material condutor (cobre): 1/56 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$];

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Escolha do ângulo de inclinação.....	27
Tabela 2 - Dados do consumidor.	37
Tabela 3 - Consumo médio para equipamentos em CA.....	37
Tabela 4 - Características elétrica do inversor.	38
Tabela 5 – Especificações elétricas.	40
Tabela 6 - Energia gerada.....	40
Tabela 7 – Cálculo do número de módulos fotovoltaicos, conexão e potência instalada.	41
Tabela 8 – Cálculo do sistema de acumulação.	42
Tabela 10 – Especificações técnicas regulador.	43
Tabela 9 – Cálculo do número de reguladores.....	43
Tabela 11 – Cálculo da seção mínima do condutor.	44
Tabela 12 – Orçamento do projeto.....	45
Tabela 13 – Retorno do projeto.....	46

Lista de Figuras

Figura 1 - Composição do espectro da radiação solar.	6
Figura 2 - Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.....	7
Figura 3 - Balanço de Radiação Solar.....	8
Figura 4 - (a) Piranômetro modelo SP-LITE. (b) Dimensões do sensor. ...	9
Figura 5 - Estação meteorológica instalada no campus II da UFGD.....	10
Figura 6 - Piranômetro no campus da UFGD.	10
Figura 7 - Coletor solar.....	12
Figura 8 - Detalhamento funcional de sistema solar térmico.....	12
Figura 9 - Mapa Solarimétrico do Brasil em 2006.	15
Figura 10 - Mapa de insolação diária.	16
Figura 11 - Dados de R_n no Campus da UFGD para um dia típico.	17
Figura 12 - Subsídios globais de energia renovável por fonte.....	18
Figura 13 – Consumo final no setor residencial.	19
Figura 14 – Fluxo energético BEM 2013 ano base 2012.	20
Figura 15 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.	21
Figura 16 - Materiais semicondutores em três diferentes situações.....	23
Figura 17 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z	24
Figura 18 - Célula fotovoltaica para painel fotovoltaico.	25
Figura 19 - Comportamento da radiação em relação a inclinação do módulo.	26
Figura 20 - Conexão dos módulos em série.....	27
Figura 21 - Conexão dos módulos em paralelo.....	28
Figura 22 - Inversor Studer XPC 2200-60.....	39
Figura 23 – Módulo fotovoltaico SPR - 345NE-WHT - 345W - X21.....	40
Figura 24 – Gráfico de Corrente versus Tensão para diversas radiações solares global.....	41
Figura 25 – Baterias Rolls.	42
Figura 26 - Regulador OutBack FM80-150VCC.....	43
Figura 27 - Esquema unifilar simplificado do projeto fotovoltaico.....	44

Resumo

OLIVEIRA, I. P. **Energia solar fotovoltaica no laboratório de Engenharia de Energia - UFGD**. 2014. 55 f. Trabalho de conclusão de curso (TCC) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.

O aumento da demanda por energia ocasionada pelo crescimento da população humana e desenvolvimento tecnológico, acompanhado da diminuição da oferta de combustíveis fósseis e uma preocupação com o meio ambiente tem levado a busca por novas fontes de energia que sejam renováveis e/ou permitam a resiliência do ambiente, e que também sejam viáveis do ponto de vista técnico e econômico. Diante de tal cenário o aproveitamento da energia proveniente do sol mostra-se uma excelente alternativa uma vez que se trata de uma fonte abundante que oferece um potencial bastante superior ao consumo humano. Neste trabalho, foi estudado a inserção de um sistema fotovoltaico autônomo no laboratório de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). Foi considerado que a edificação seria autossuficiente energeticamente somente com o recurso solar como fonte de geração. A partir do dimensionamento foi estimado a geração de energia elétrica anual para suprir a demanda local. Foram estimados os custos dos equipamentos do sistema, sendo feita uma pesquisa com os fornecedores dos mesmos. E assim, foi realizado uma análise econômica simplificada para verificação da taxa de retorno da tecnologia solar fotovoltaica.

Palavras-chaves: Energia solar fotovoltaica, Dimensionamento de sistema fotovoltaico, Geração de energia elétrica.

Abstract

OLIVEIRA, I. P. **Photovoltaic solar energy in the Power Engineering Laboratory - UFGD**. 2014. 55 f. Completion of course work (TCC) - Federal University of Grande Dourados, Dourados, 2014.

The increased demand for energy caused by the growth of human population and technological development, together with the decreasing supply of fossil fuels and concern about the environment has led to the search for new sources of energy that are renewable and / or facilitate resilience environment, and are feasible from a technical and economic standpoint. Given such a scenario, harnessing energy from the sun proves an excellent alternative since it is an abundant source that offers a potential much higher than human consumption. In this paper, the inclusion of a standalone photovoltaic system in the laboratory of Power Engineering of the Federal University of Great Golden (UFGD) was studied. It was considered that the building would be energy self-sufficient with only the solar resource to power generation. From the sizing was estimated annual generation of electricity to meet the local demand. Equipment costs of the system, being made a search with the same suppliers were estimated. Therefore, a simplified economic analysis was conducted to check the rate of return of photovoltaic technology.

Keywords: Photovoltaics, Sizing of photovoltaic system, Generation of electricity.

1. Introdução

No Brasil, o consumo da energia solar até 2010 se resume ao aquecimento de água. “O segmento conta com cerca de 200 empresas que fornecem principalmente para empreendimentos residenciais de alto padrão e shoppings. Quase metade do que hoje está instalado é usado para aquecer piscina. Nos últimos 5 (cinco) anos, o setor cresceu em taxas anuais de 15%, mas sobre uma base muito pequena [...]. O preço da energia solar vem criando expectativas aos empresários do setor. O megawatt hora (MWh) é negociado a preços entre R\$170,00 e R\$262,00 no leilão de energia de reserva de 2014.” (ANÁLISE ENERGIA, 2014).

O diretor da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), André Pepitone, disse que os investidores em energia solar sinalizam que seria possível oferecer energia em leilões públicos a menos de R\$ 200,00/MWh. (NEO SOLAR, 2014)

1.1. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo dimensionar uma instalação de energia solar fotovoltaica para o prédio de laboratórios do curso de Engenharia de Energia na Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), levando em consideração o maior consumo mensal calculado, apresentando os conceitos de energia solar fotovoltaica, dimensionamento e os equipamentos necessários para sua instalação.

2. Pesquisas e Assuntos Correlacionados

Neste capítulo, tem-se uma breve revisão bibliográfica abordando sistemas de energia fotovoltaicos, além de expor conceitos teóricos relacionados às fontes renováveis e aos sistemas fotovoltaicos que subsidiarão o entendimento da metodologia e do estudo aplicado.

Marini & Rossi (2002) descrevem que o projeto de um sistema fotovoltaico consiste basicamente na determinação da quantidade necessária de módulos para atender uma determinada solicitação de carga elétrica. Sendo que o número de módulos sempre depende de dois fatores fundamentais: Quantidade de energia elétrica demandada e o comportamento da radiação solar no local da instalação. Ou seja, deve-se buscar otimizar a demanda e a oferta.

Conforme Costa (2006) no Brasil os maiores projetos de energia solar fotovoltaica estão localizados na região Nordeste, sendo o Estado de Pernambuco líder no número de instalações. Existem aproximadamente, 700 residências, 250 escolas e 150 sistemas de bombeamento de água, totalizando aproximadamente 250 kWp instalados em mais de 80 municípios. Em seu trabalho relata um diagnóstico realizado sobre o estado de funcionamento de 64 instalações de bombeamento de água após um ano de operação, em poços com profundidades entre 30 e 60 metros, os quais são acionadas por painéis fotovoltaicos, com potências entre 300 a 1.600 Wp, fornecendo vazões entre 200 l/h a 2.000 l/h. Apesar do grande número de instalações, o trabalho tem mostrado que o comportamento destas instalações não tem apresentado bom desempenho. As principais falhas encontradas foram o aumento dos custos de operação, insatisfação dos usuários devido as falhas na instalação e barreiras à introdução da tecnologia fotovoltaica, como o custo de aquisição, suporte técnico especializado, peças de reposição, entre outras.

Jardim et. al. (2004) relatam que desde a década de 70, o Brasil vem sofrendo períodos de restrições financeiras e de crises no setor elétrico nacional. Assim, estratégias no sentido de controlar a curva de carga principalmente nas horas de pico começaram a ser prioridades no setor elétrico. Uma das alternativas de deslocamento dessa carga foi a utilização de painéis fotovoltaicos interligados à rede de energia elétrica. A geração solar fotovoltaica integrada à

edificação e à rede elétrica pública traz inúmeros benefícios à concessionária, tanto de caráter energético quanto financeiro. Pelo fato de o sistema ser instalado no próprio ponto de consumo, as perdas por transmissão e distribuição da geração centralizada convencional são eliminadas, fazendo com que aumente a eficiência energética da concessionária e dos consumidores. Os estudos foram em dois setores distintos da cidade de Florianópolis e mostraram dois casos de potencialidades de geração. O setor central da cidade mostrou ter uma área de cobertura bem restrita para a implementação do sistema de geração, mas por ter picos de geração fotovoltaica e de consumo energético coincidentes, qualquer geração neste setor, por mais que não consiga suprir a demanda total, trará benefícios significativos à rede, pois estará ajudando a diminuir a sobrecarga da rede local num horário crítico que corresponde ao horário de pico. Os picos de demanda representam um problema para o setor elétrico; e o trabalho apresentou uma estratégia afim de controlá-los.

Segundo Rossi (2000) na maioria dos países em desenvolvimento, alguns aspectos como as características da demanda de energia no setor rural, especialmente baixa densidade populacional e limitado poder aquisitivo, grandes investimentos em rede de distribuição e pequeno consumo de energia, dificultam a ampliação desta forma mais convencional de suprimento de energia elétrica. Desta maneira foi elaborado um procedimento e estudos visando a geração descentralizada de energia elétrica, através de pequenos sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, desenvolvido e implementado por meio de um modelo computacional próprio. Este programa determina os parâmetros das fontes, da carga e o esquema operativo da metodologia. Com o algoritmo de cálculo empregado, pode-se determinar, dentre outras, o fator de capacidade, o fator de utilização, a potência instalada, a energia anual gerada e a probabilidade de déficit.

2.1 Fontes renováveis

O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar nas formas de luz e calor, capaz de suprir milhares de vezes a demanda mundial durante o mesmo período. Apenas uma parte dessa energia é aproveitada. Mesmo assim, com poucas

exceções, praticamente toda a energia usada pelo ser humano tem como origem o Sol (VILLALVA; et al., 2012).

As fontes renováveis de energia são aquelas consideradas inesgotáveis para os termos humanos de utilização. Alguns exemplos são as energias solar, aproveitada diretamente para aquecimento ou geração de eletricidade, a hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica e da biomassa.

2.2 Energia Solar

Energia solar é uma denominação dada a qualquer tipo de colheita de energia luminosa, e em determinado sentido, de energia térmica, provenientes do sol, e depois uma transformação dessa energia colhida em alguma forma utilizável, seja diretamente para o aquecimento de água ou ainda como energia elétrica ou mecânica

A energia solar é transmitida para a Terra pelo espaço na forma de radiação eletromagnética. A radiação solar é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem frequências e comprimentos diferenciados. A energia que uma onda pode transmitir está interligada com sua frequência, quanto maior a frequência, maior a energia transmitida. (VILLALVA; et al., 2012)

Denomina-se espectro da radiação solar o grupo de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol, como pode-se observar na Figura 1. Todo o espectro de radiação, incluindo as ondas visíveis e não visíveis ao olho humano, transportam energia que pode ser captada na forma de calor ou energia elétrica. (LOPEZ, 2012)

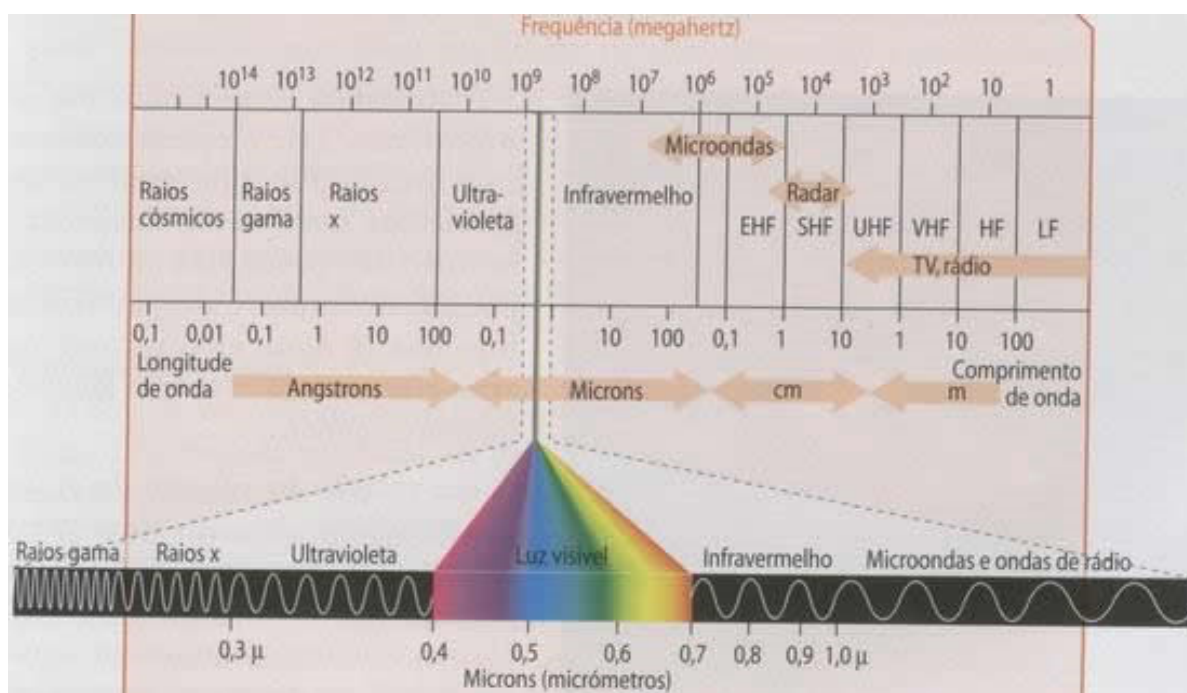


Figura 1 - Composição do espectro da radiação solar.

Fonte:(UFMG, 2014).

A captação do calor solar é a transformação da energia eletromagnética em energia térmica pelos corpos e materiais que recebem tal radiação. Quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre um corpo que tem a capacidade de absorver radiação (painéis solares), a energia eletromagnética é transformada em energia cinética e transmitida para as moléculas e átomos que compõem esse corpo. Quanto maior o estado de agitação das moléculas e átomos, maior será a temperatura do corpo. (VILLALVA; et al., 2012).

As ondas eletromagnéticas, ao incidirem sobre determinados materiais, em vez de transmitir calor, podem produzir alterações nas propriedades elétricas ou originar tensões e correntes elétricas. Existem diversos efeitos elétricos da radiação eletromagnética sobre os corpos, sendo dois deles o efeito fotovoltaico e o fotoelétrico, os quais estão ilustrados na Figura 2.

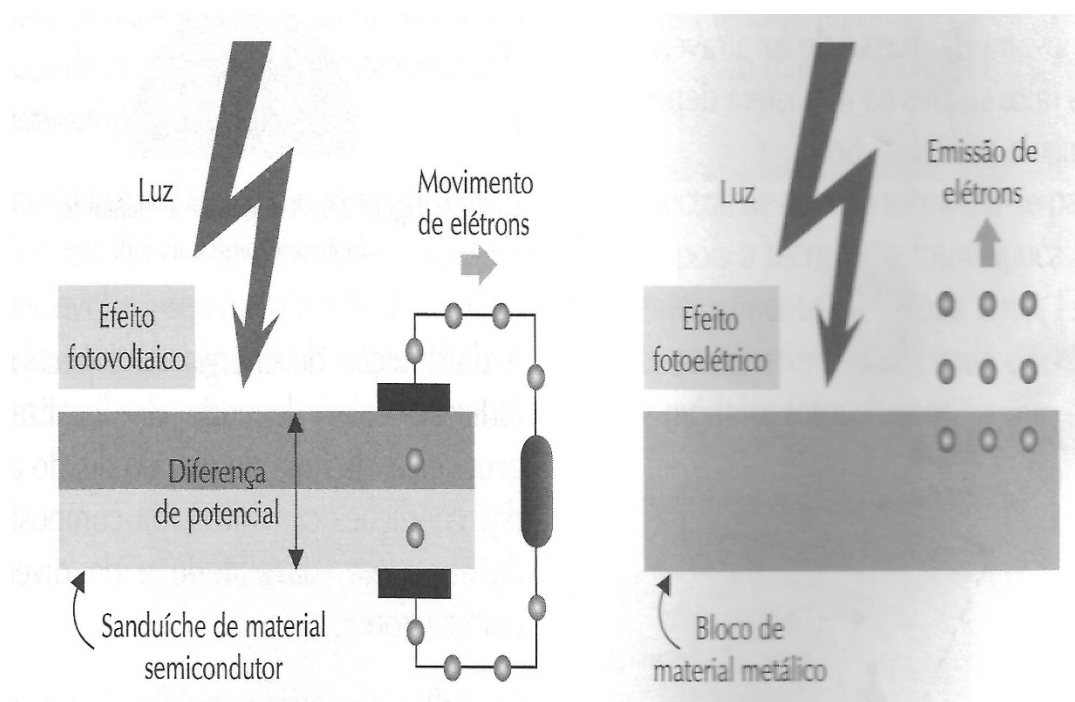


Figura 2 - Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.

Fonte:(VILLALVA; et al., 2012).

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por várias camadas de materiais semicondutores. Quando a célula é ligada em dois eletrodos, terá tensão elétrica neles e se houver um caminho elétrico entre eles, surgirá uma corrente elétrica.

Já o efeito fotoelétrico, ocorre em materiais metálicos e não metálicos sólidos, líquidos ou gasosos. Este efeito promove a remoção de elétrons, mas não é capaz de criar uma tensão elétrica sobre o material. Tal efeito é demasiadamente confundido com o efeito fotovoltaico, embora estejam relacionados, são fenômenos distintos.

A disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve ao movimento de rotação e translação da Terra. (ANEEL, 2014)

A radiação que atinge uma superfície horizontal do solo é composta por raios solares que chegam de todas as direções e são absorvidos, espelhados e refletidos pelas moléculas de ar, vapor, poeira e nuvens. Dessa forma, são divididos basicamente em dois tipos, a radiação direta e a radiação difusa.

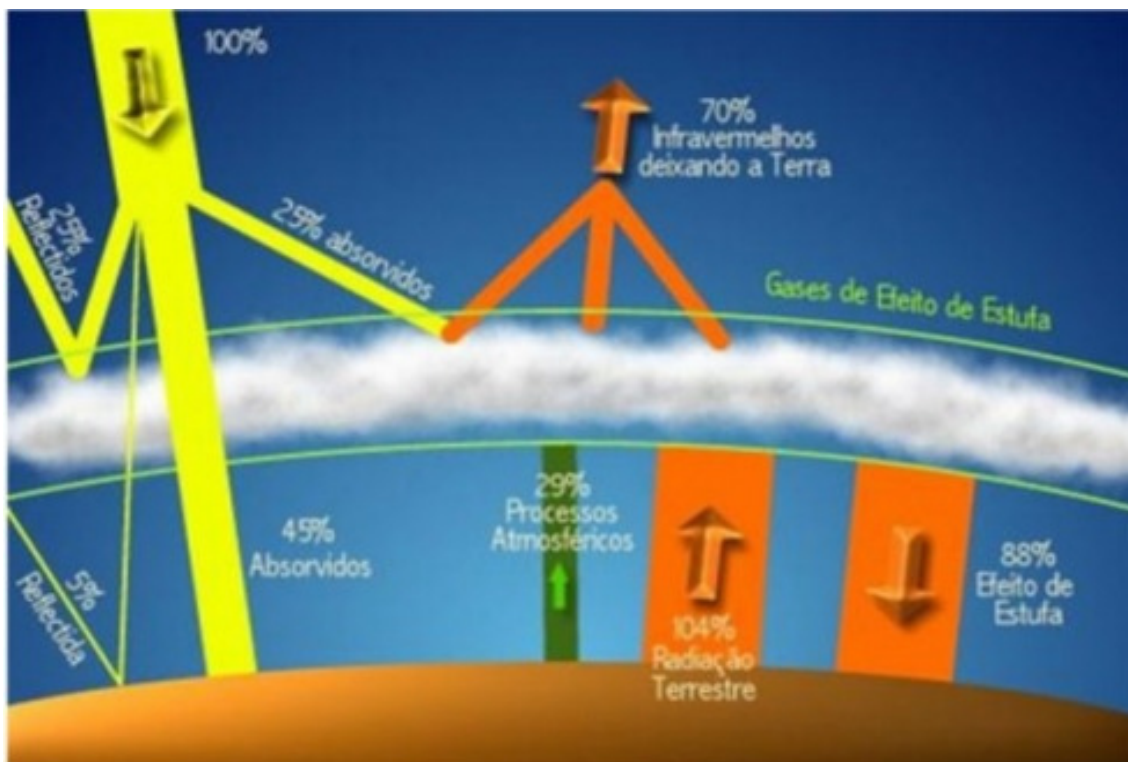


Figura 3 - Balanço de Radiação Solar.

Fonte:(BORTHOLIN, 2014).

A radiação solar líquida (R_n) corresponde aos raios solares que chegam, diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital do Sol. Já a radiação solar difusa (R_d) corresponde aos raios solares que chegam indiretamente ao plano. É o resultado da difração na atmosférica e da reflexão da luz na poeira, nas nuvens e em outros objetos como pode-se observar na Figura 3. Ressalta-se que a soma de R_n com R_d fornece a radiação solar global (R_s). (BORTHOLIN, 2014)

A radiação solar líquida e a radiação solar difusa podem ser medidas utilizando sensores, ou podem ser estimadas utilizando modelos que levam em consideração as características óticas dos sensores e geográficas do local.

O equipamento utilizado para as medições é o piranômetro, equipamento modelo SP-LITE representado na Figura 4. Este instrumento de medição é um sensor que mede a densidade de fluxo da radiação solar (W/m^2) de um campo de visão de 180° .

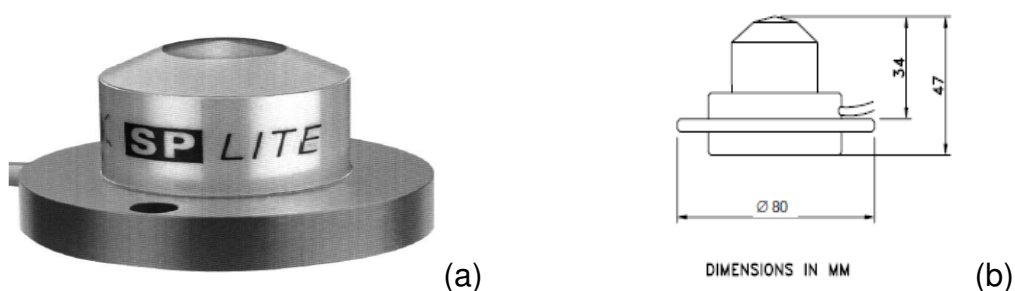


Figura 4 - (a) Piranômetro modelo SP-LITE. (b) Dimensões do sensor.

Fonte: (Campbell Scientific, 2004).

O piranômetro tem o seguinte princípio de funcionamento:

“Fornece uma corrente elétrica proporcional à radiação solar recebida do hemisfério, centrado na direção perpendicular ao eixo de montagem do dispositivo sensor. O sensor é um fotodiodo de silício que responde à absorção de energia, gerando uma corrente elétrica proporcional à irradiância global” (DIAS, 2007).



Figura 5 - Estação meteorológica instalada no campus II da UFGD.

Fonte: (SILVA; et al.,2011)



Figura 6 - Piranômetro no campus da UFGD.

Fonte: (SILVA; et al.,2011)

Na Figura 5 temos a estação meteorológica e, na Figura 6, o piranômetro utilizado para a medição da radiação solar líquida e global.

Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiação, expressa em W/m^2 (Watts por metro quadrado). Aborda uma potência por área, sendo a potência uma certa quantidade de energia num certo espaço de tempo. Assim quanto maior a potência da radiação solar, mais energia ela transporta em um determinado intervalo de tempo.

O sensor de radiação solar mostrado na Figura 4 fornece medidas de irradiância. Em geral, na superfície terrestre a irradiância da luz solar é em torno de 1000 W/m^2 . Tais medidas são de fundamental importância para uma avaliação da eficiência dos dispositivos e sistemas fotovoltaicos. (VILLALVA; et al., 2012)

Outra grandeza bastante utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um determinado intervalo de tempo é a insolação e sua unidade é Wh/m^2 (Watt-hora por metro quadrado).

As medidas de insolação são de fundamental importância para um bom dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, e normalmente estações meteorológicas com sensores de radiação solar são empregadas para realizar o levantamento de insolação.

2.2.1. Energia solar térmica

A energia do sol pode ser aproveitada como fonte de calor para aquecimento ou para a geração de eletricidade. Nos sistemas de aquecimento solar o calor é captado por coletores solares instalados nos telhados de prédios ou residências para aquecer a água. Dentro dos coletores existem tubos por onde circula a água que é aquecida e depois armazenada em reservatórios.

O objetivo desses sistemas é aquecer a água utilizada diretamente com o calor proveniente do Sol, de forma simples, limpa e eficiente, economizando outros recursos energéticos como o gás natural, o carvão e a energia elétrica. A Figura 7 mostra uma residência que emprega coletores solares instalados em seu telhado para o aquecimento de água. Já a Figura 8, mostra um detalhamento das tubulações e fluxos de um sistema solar térmico em uma residência.



Figura 7 - Coletor solar.

Fonte: (Energia Solar, 2014).

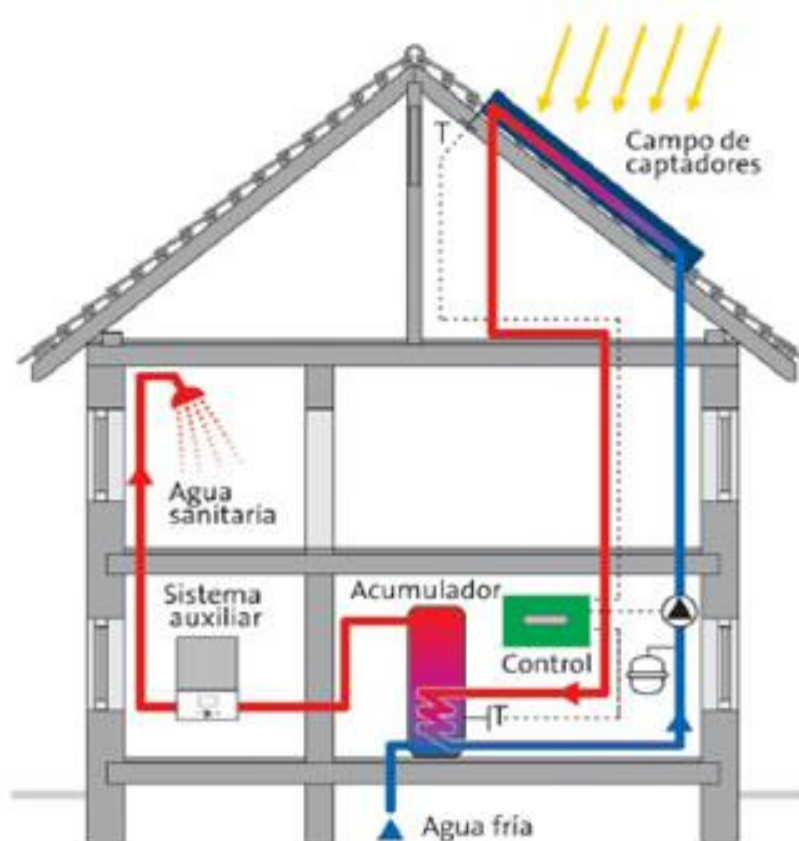


Figura 8 - Detalhamento funcional de sistema solar térmico.

Fonte: (ENERGY, 2014).

2.2.2. Energia solar fotovoltaica

A energia oriunda do Sol também pode ser utilizada para gerar eletricidade pelo efeito fotovoltaico, o qual consiste na conversão direta da luz em energia elétrica.

Diferente dos sistemas solares térmicos, que são empregados para aquecimento ou para produzir eletricidade a partir da energia térmica procedente do Sol, os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de converter radiação solar em corrente elétrica. Tal corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica.

Através desse trabalho pretende-se dimensionar um sistema fotovoltaico para suprir a demanda energética do prédio de laboratórios do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD e, para um melhor entendimento, o capítulo 3 abordará os aspectos voltados a esses sistemas e os dispositivos utilizados.

2.2.2.1. *Impactos Socioambientais da energia fotovoltaica*

Uma das restrições técnicas à difusão de projetos de aproveitamento de energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, o que torna necessário o uso de grandes áreas para a captação de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável. Comparada, a outras fontes, como a energia hidráulica, por exemplo, que muitas vezes requer grandes áreas inundadas, observa-se que a limitação de espaço não é tão restritiva ao aproveitamento da energia solar. (FREITAS, 2008)

2.2.2.2. *A energia solar fotovoltaica no Brasil*

Atualmente a energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada principalmente em sistemas autônomos instalados em locais onde não há rede elétrica, em regiões de difícil acesso ou onde a construção de redes de distribuição de energia elétrica não é viável economicamente.

O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede está aumentando no Brasil e seu emprego devera-se elevar nos próximos anos, principalmente depois de abril de 2012 quando foi homologada pela ANEEL a Resolução

Normativa 482, que define os conceitos de micro geração (≤ 100 KW) e mini geração (≤ 1 MW) distribuída e o sistema de compensação de energia. Essa resolução regulamenta e viabiliza a conexão de sistemas de geração fotovoltaico de pequeno porte a rede de distribuição, o que permite ao consumidor cativo instalar pequenos geradores em sua propriedade e trocar energia com a distribuidora local (ANEEL, 2014).

A energia solar fotovoltaica apresenta maior regularidade no fornecimento de eletricidade do que a energia eólica e pode ser empregada em todo o território nacional, pois o Brasil apresenta elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões, como pode ser visto no mapa Solarimétrico entre alguns meses do ano demonstrado na Figura 9.

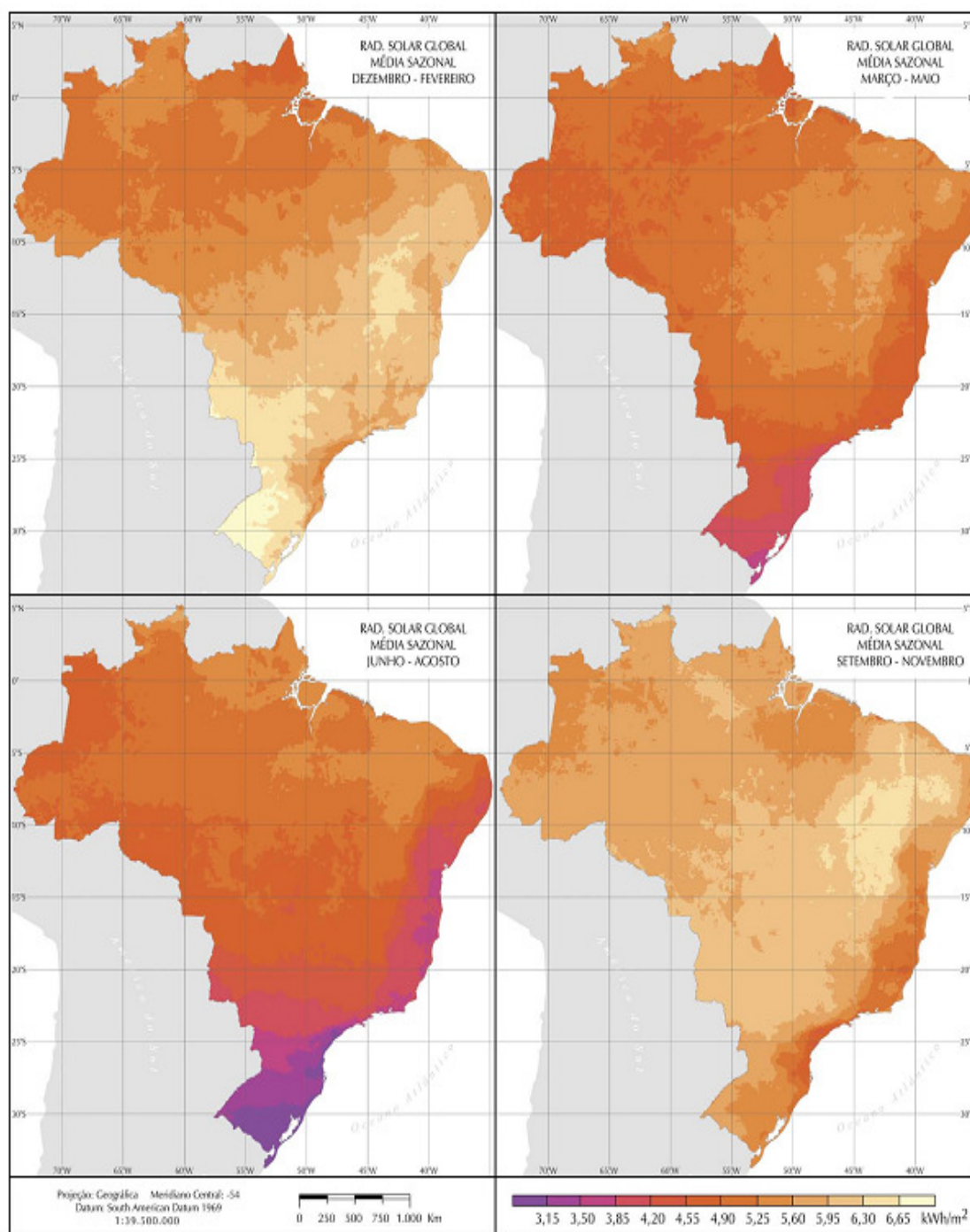


Figura 9 - Mapa Solarimétrico do Brasil em 2006.

Fonte: (PEREIRA; et al., 2006).

Além da excelente radiação solar diária, o Brasil também apresenta alta insolação diária, como pode ser visto na Figura 10, o qual representa a insolação diária média em horas de pleno sol no Brasil.

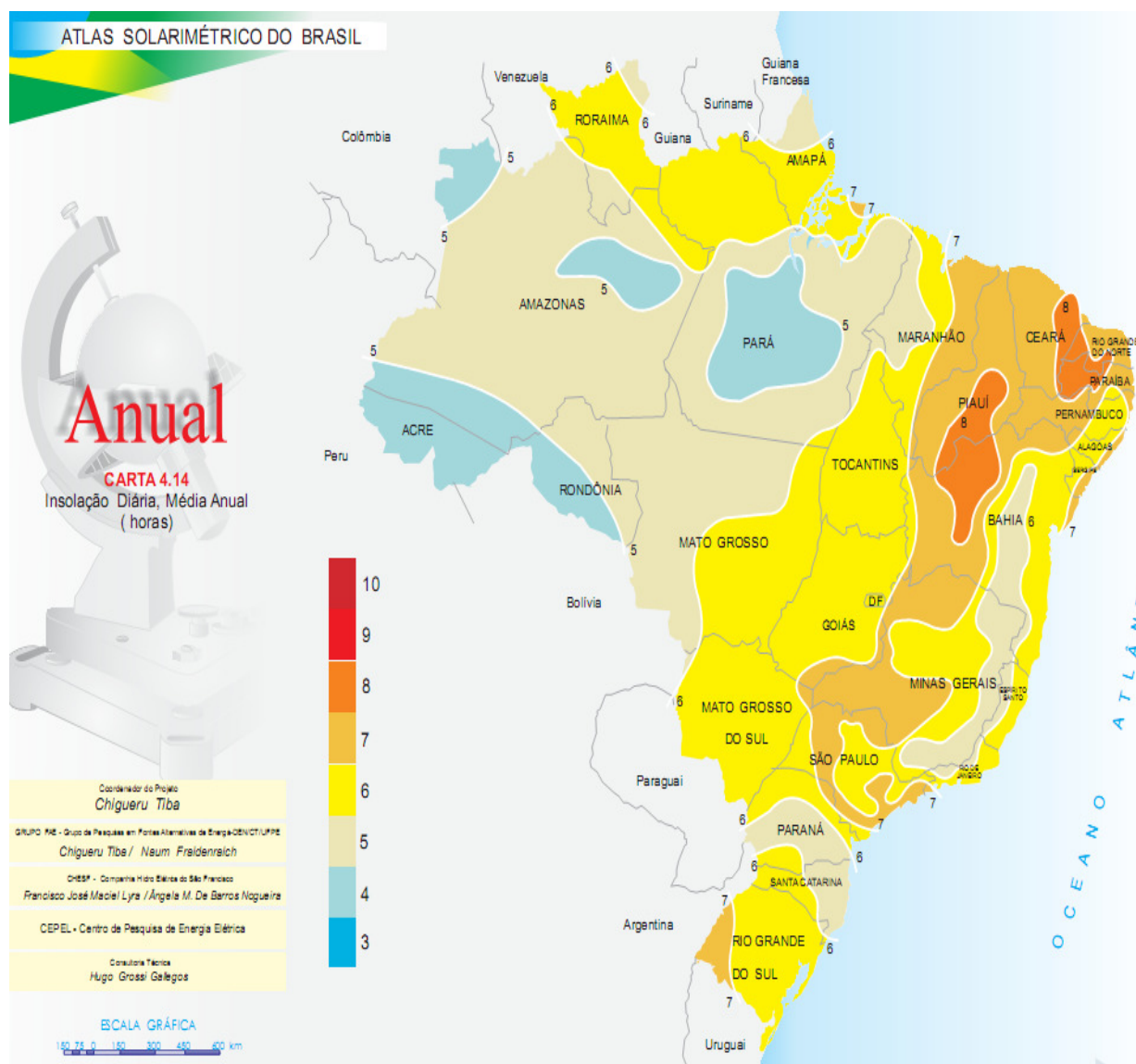


Figura 10 - Mapa de insolação diária.

Fonte: (CRESESB, 2000).

A Figura 11 mostra o comportamento da radiação solar líquida (R_n) no Campus II da UFGD, em Dourados (MS), local do estudo do presente projeto fotovoltaico, sendo a curva em azul uma média horária de um mês típico, e os demais pontos os respectivos valores de R_n ao longo das horas de um dia típico. Pode-se verificar um fotoperíodo de 11 horas de insolação (8h - 19h).

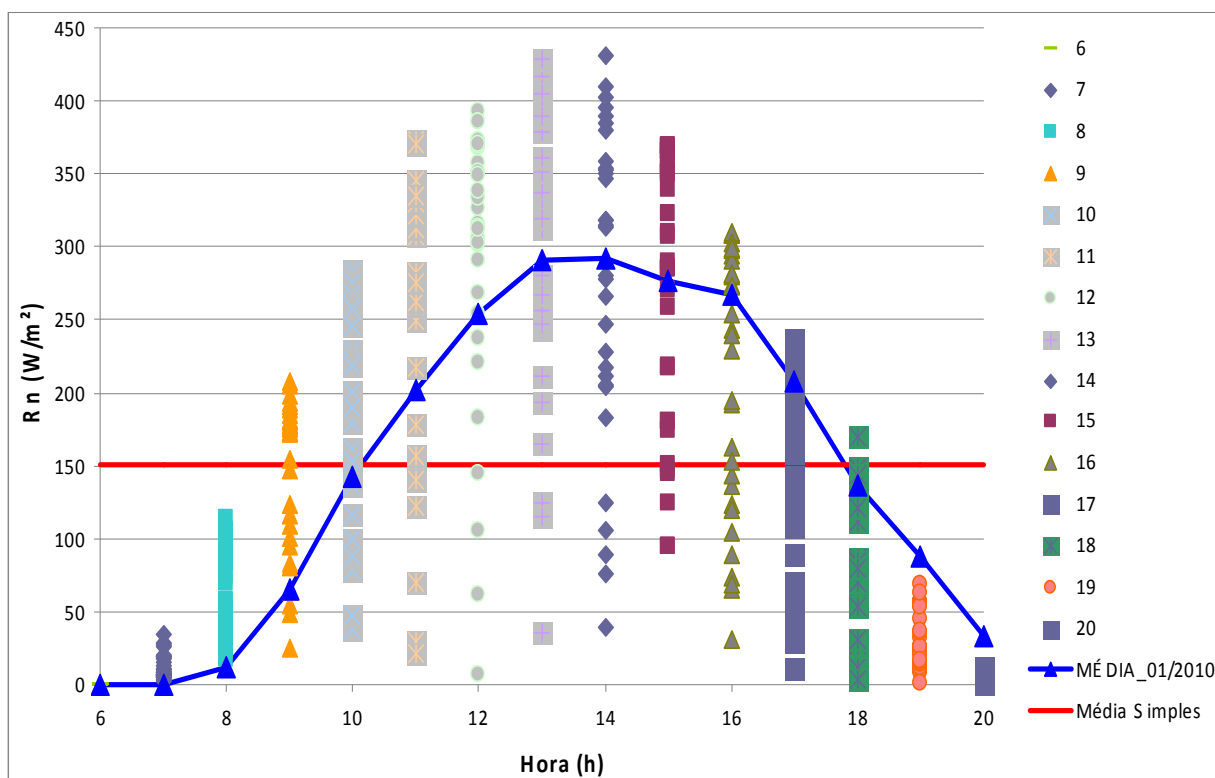


Figura 11 - Dados de R_n no Campus da UFGD para um dia típico.

Fonte: (SILVA; et al.,2011).

2.2.2.3. Obstáculos

Apesar de ser valorizada nos países mais desenvolvidos do mundo e do Brasil apresentar luz solar em abundância, a energia fotovoltaica ficou esquecida durante muitos anos e pouco foi feito para estimular esta fonte de energia antes do ano de 2011.

A exemplo do que ocorreu com a energia eólica e outras fontes alternativas, esperam-se ações para promover a inserção da energia fotovoltaica no Brasil. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado pelo Governo Federal para promover o uso de fontes alternativas de energia, não incluiu a energia fotovoltaica. Além disso, a energia fotovoltaica ficou fora do Plano Decenal de Energia 2020 do Ministério de Minas e Energia (MME). (EPE, 2013)

2.3. Geração e uso de eletricidade no mundo e no Brasil

A energia elétrica é a forma de energia mais flexível que existe. Pode ser transmitida a longas distâncias, desde o ponto de geração até o ponto de consumo, sendo convertida em luz, calor, movimento, trabalho e informação.

O ser humano depende da energia elétrica para quase tudo, seja no trabalho, em casa, no lazer e em diversos lugares, o modo de vida contemporâneo apoia-se cada vez mais na energia elétrica. Porém, esse conforto custa caro para o planeta. (VILLALVA; et al., 2012)

A Figura 12 mostra dados da *International Energy Agency* (IEA) de investimentos feitos de 2008 a 2012 no setor de energia renovável, e também representa uma estimativa até 2035. Pode-se observar que a energia solar fotovoltaica é a energia renovável que terá maiores investimentos, como também os biocombustíveis e bioenergia. Isto causará um menor custo de implantação e melhor tecnologia de aproveitamento, o que diminuirá o tempo de retorno do investimento e maximizará os possíveis lucros na venda e economia de energia elétrica.

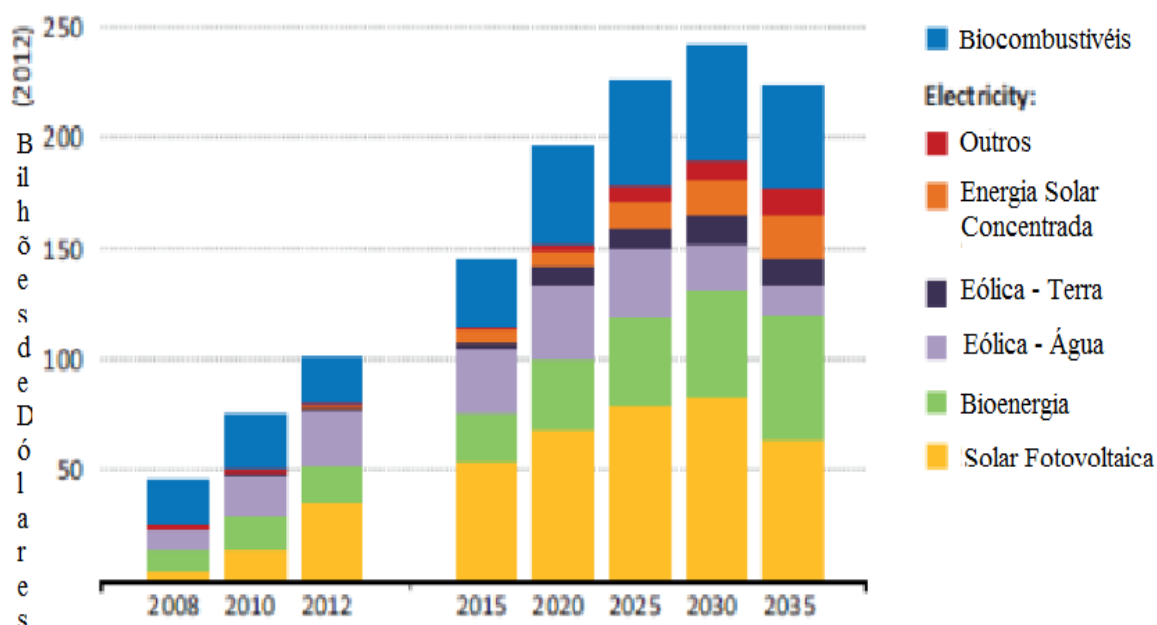


Figura 12 - Subsídios globais de energia renovável por fonte.

Fonte:(IEA, 2014).

No Brasil o Balanço Energético Nacional (BEN) do ano de 2013, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostrou que no setor residencial há maior utilização de eletricidade, em comparação as outras fontes de energia, como pode ser visto na Figura 13,

Além do GLP e lenha usado para o aquecimento, a energia solar térmica e fotovoltaica, seria uma boa iniciativa de economia e ainda existe a perspectiva do comércio de energia elétrica (Sistema On Grid).

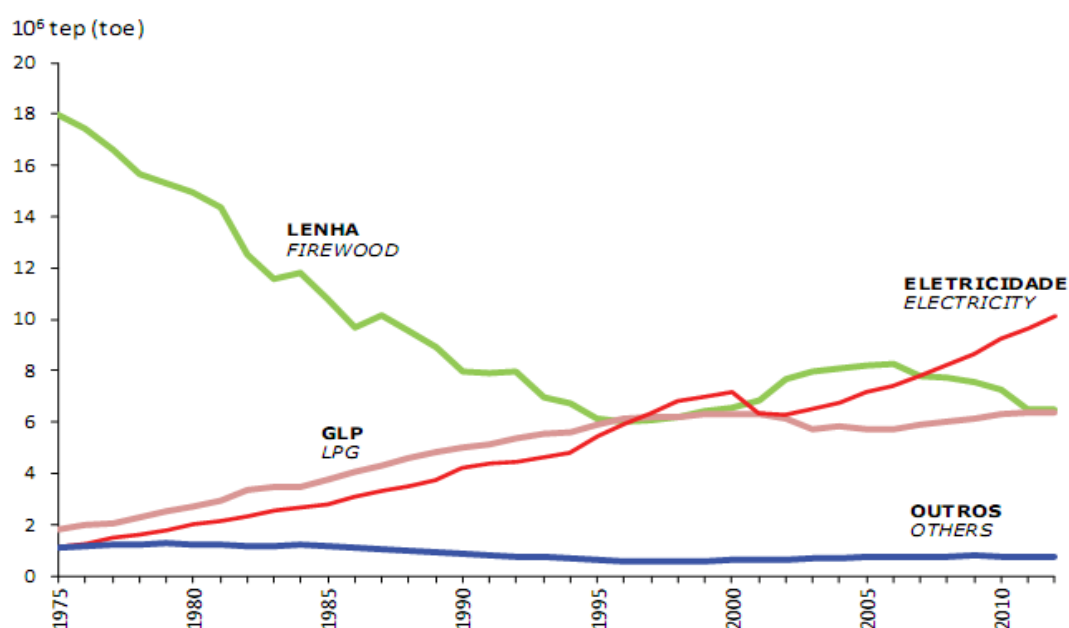


Figura 13 – Consumo final no setor residencial.

Fonte: (EPE, 2013)

A Figura 14 representa o balanço de energia elétrica do que é gerado no Brasil e os setores de consumo. Pode-se observar que a energia solar ainda não tem geração significativa dentro do mercado brasileiro e que a geração hidráulica é predominante. Porém, verifica-se a baixa ocorrência de chuva (desde o final de 2013 a abril de 2014), trazendo uma certa insegurança com o sistema hidráulico. Neste contexto a energia solar fotovoltaica seria uma boa opção, ao invés de ligar as termoeletricas, que são movidas a combustíveis fósseis. Além disso, alguns projetos fotovoltaicos podem vir a representar uma taxa de retorno

do investimento de 9 a 15 anos e alguns sistemas apresentam vida útil de 25 anos, o que significa cerca de 10 anos de lucro.

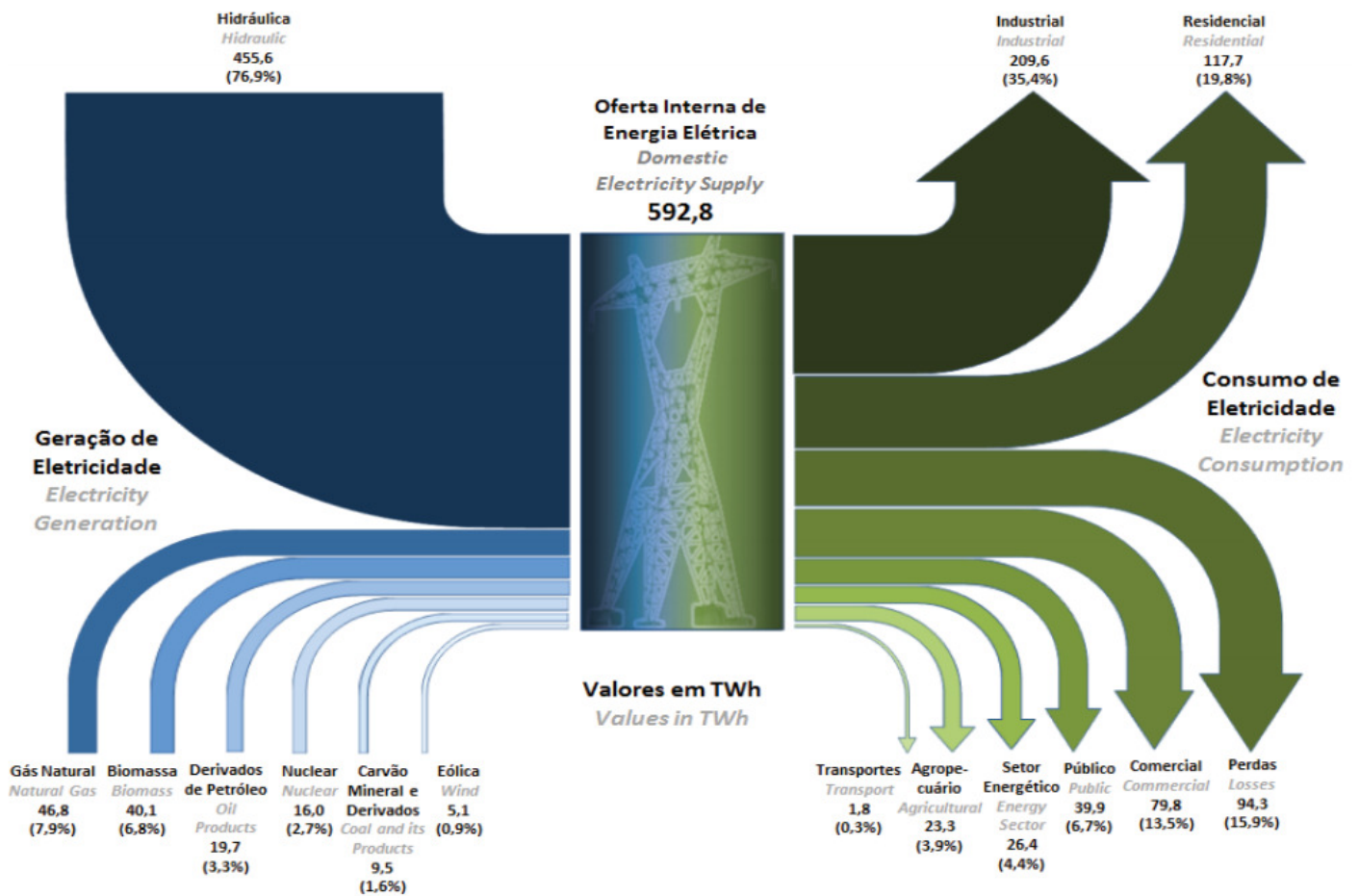


Figura 14 – Fluxo energético BEM 2013 ano base 2012.

Fonte: (EPE, 2013)

3. Sistemas Fotovoltaicos e dispositivos

3.1. Células e módulos fotovoltaicos

O fenômeno físico que permite a transformação direta de luz em eletricidade é o efeito fotovoltaico. O mesmo ocorre quando uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas recebe incidência da radiação eletromagnética do Sol.

A Figura 15 demonstra uma estrutura de célula fotovoltaica composta por duas camadas de material semicondutor P e N, juntamente com uma grade de coletores metálicos, formadas por um enorme conjunto de finos condutores e três condutores principais ligados a eles na parte superior, e uma base metálica, os quais servem de terminais elétricos para fazerem a coleta/transporte da corrente elétrica produzida pela ação da radiação eletromagnética do Sol.

As camadas semicondutoras da célula podem ser fabricadas com diversos materiais, sendo o mais comum o silício. Cerca de 95% das células produzidas no mundo são de silício, pois é um material abundante e barato. (VILLALVA; et al., 2012)

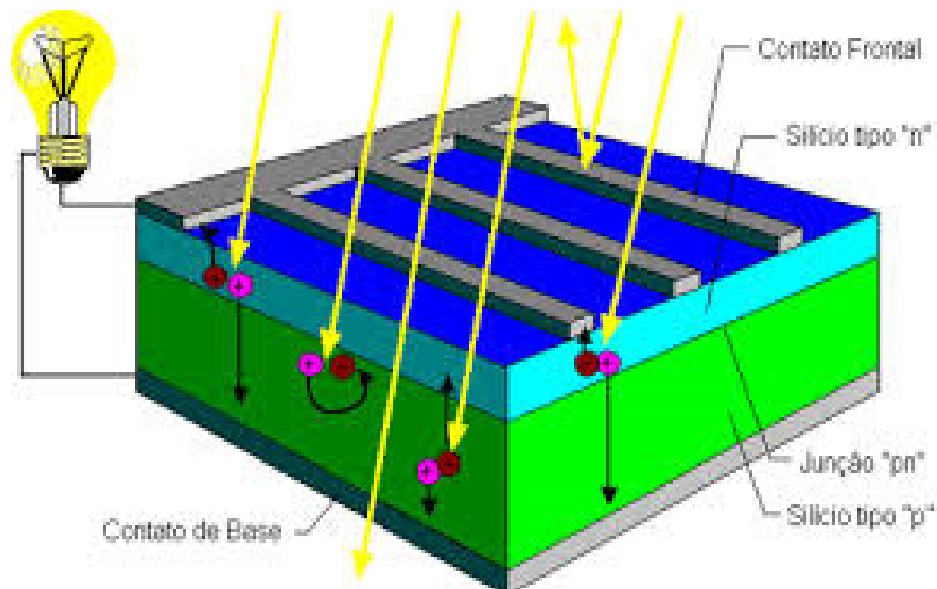


Figura 15 - Estrutura de uma célula fotovoltaica.

Fonte:(CRESESB, 2000).

3.2. Células fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica é composta normalmente pela ligação de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N. Atualmente existem células de múltiplas ligações que possuem um maior número de camadas, porém tem o mesmo princípio.

A Figura 16 ilustra o que ocorre quando as duas camadas P e N são unidas. A mudança dos elétrons e lacunas de uma camada para outra origina um campo elétrico e cria uma barreira de potencial entre as camadas. Os elétrons e lacunas permanecem presos atrás dessa barreira quando a célula não está com incidência solar. (VILLALVA; et al., 2012)

A camada superior de material N de uma célula fotovoltaica é tão fina que a radiação solar pode penetrar nesse material e descarregar sua energia sobre os elétrons, fazendo com que eles tenham energia suficiente para vencer a barreira de potencial e movimentar-se da camada N para a camada P.

Os elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos. Se houver um circuito fechado os elétrons vão acabar circulando em direção aos eletrodos da camada N, formando uma corrente elétrica.

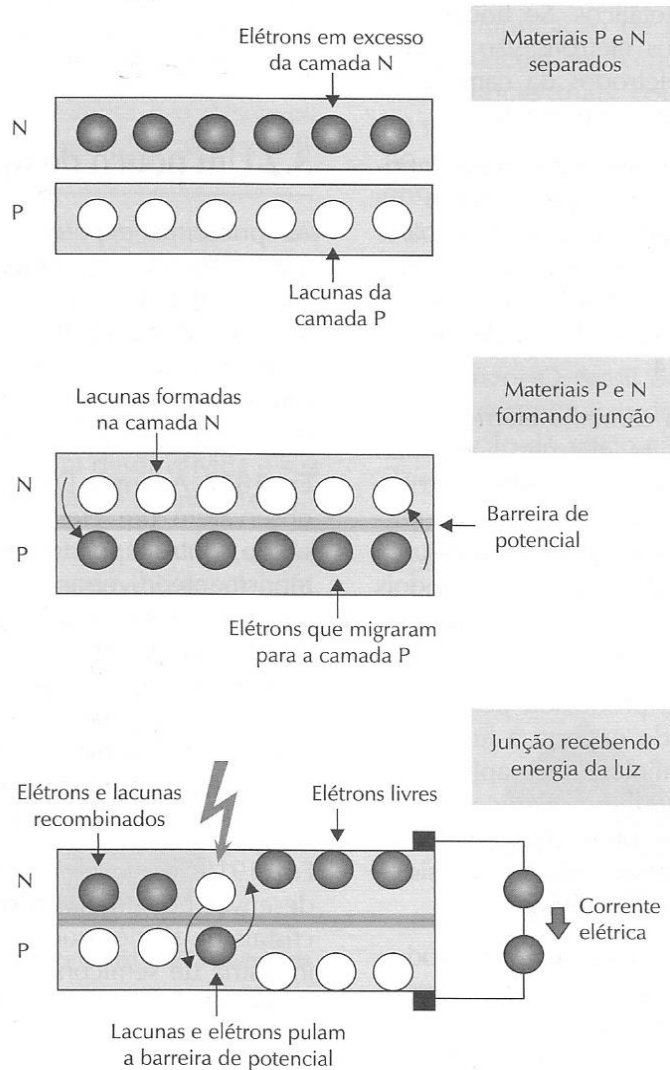


Figura 16 - Materiais semicondutores em três diferentes situações.

Fonte: (VILLALVA; et al., 2012).

Para se poder analisar detalhadamente o comportamento de um sistema eléctrico de energia é necessário que sejam desenvolvidos modelos matemáticos para os componentes representados do sistema.

Conforme Freitas (2008), uma célula fotovoltaica pode ser descrita através do circuito eléctrico equivalente simplificado representado na Figura 17. A fonte de corrente I_s representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fótons, ao atingir a superfície ativa da célula (efeito fotovoltaico). Já a junção $p-n$ funciona como um diódo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V aos terminais

da célula. Por fim, a corrente I_D que se fecha através do díodo é calculada através da Equação 1, e a potência da célula pela Equação 2.

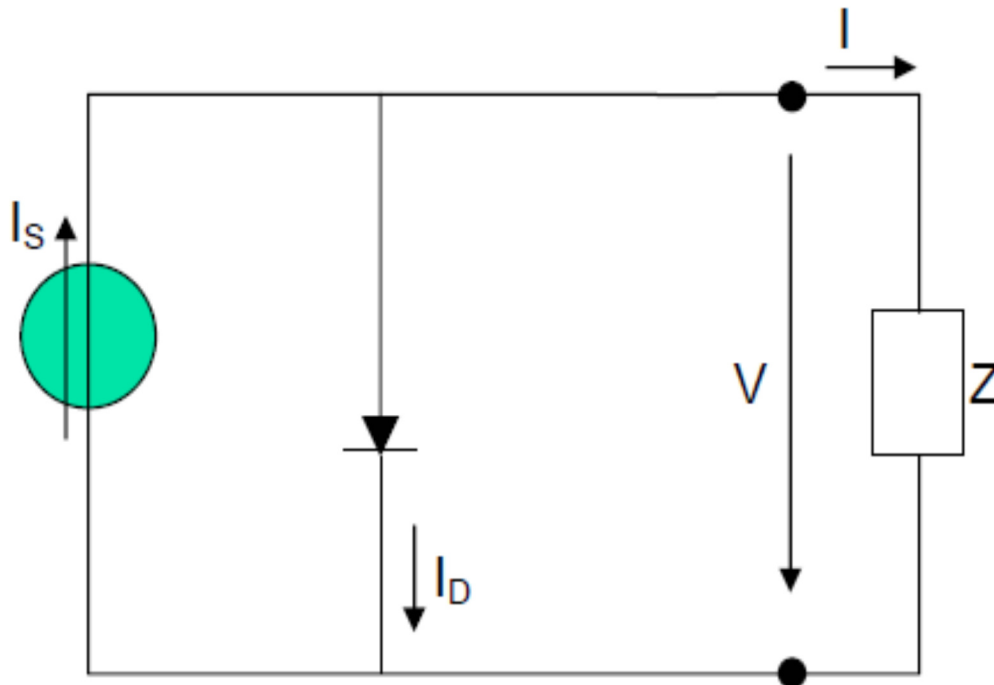


Figura 17 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z.

Fonte: (FREITAS, 2008).

O curto-circuito e circuito aberto são dois pontos de operação da célula que merecem atenção especial. No caso de curto-circuito, a corrente de curto-circuito é o valor máximo da corrente de carga, igual à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura. No caso de circuito aberto, A tensão em vazio é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio. (FREITAS, 2008)

$$\text{Equação 1} \quad I = I_s - I_D = I_s - I_0 \left(e^{\frac{V}{mVt}} - 1 \right)$$

$$\text{Equação 2} \quad P = VI = V \left[I_{cc} - \left(I_0 \left(e^{\frac{V}{mVt}} - 1 \right) \right) \right]$$

3.3. Módulo, placa ou painel fotovoltaico

A célula fotovoltaica é um dispositivo básico, somente uma célula seria capaz de gerar pouca eletricidade então foram criados os painéis, placas ou módulos fotovoltaicos, que são um conjunto de células fotovoltaicas. Esse conjunto pode ser observado na Figura 18.

Os termos *módulo*, *placa* ou *painel* têm o mesmo significado e são indistintamente usados na literatura para descrever um conjunto de células fotovoltaicas disponíveis comercialmente.

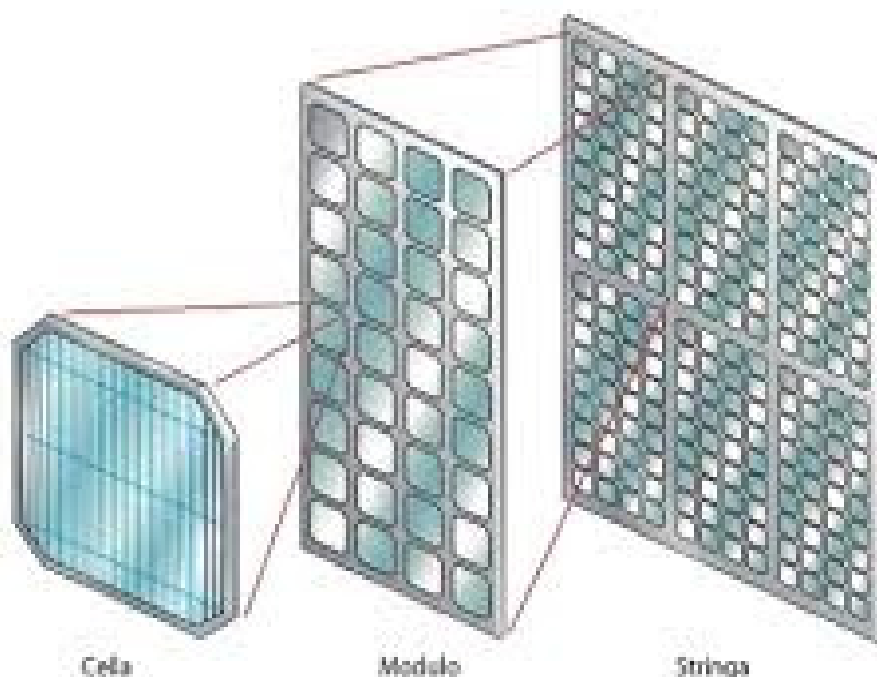


Figura 18 - Célula fotovoltaica para painel fotovoltaico.

Fonte:(GEOPOWER, 2014)

3.4. Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos

O modo como os raios solares incidem na superfície terrestre depende da posição do Sol no céu e, sabe-se que esta posição varia ao longo do dia e do ano. Desta maneira deve ser escolhido um ângulo, já que a maioria dos sistemas fotovoltaicos possuem ângulo de inclinação fixo.

A Figura 19 mostra o comportamento da radiação solar para quatro diferentes ângulos de inclinação em relação ao solo onde foi instalado o módulo.

Segundo Villalva et.al. (2012) no primeiro caso (Ângulo ótimo) é maximizada a captação da radiação solar direta. No segundo caso, é mostrado o módulo com uma inclinação um pouco menor, e pode-se perceber que há uma pequena perda na captação de radiação.

Para a instalação do módulo na posição horizontal a captação de radiação é prejudicada nos meses de inverno, e maximizada nos meses de verão. E quando o módulo é instalado na posição vertical, acontece o inverso da posição horizontal, a produção de energia é maior no inverno e menor no verão.

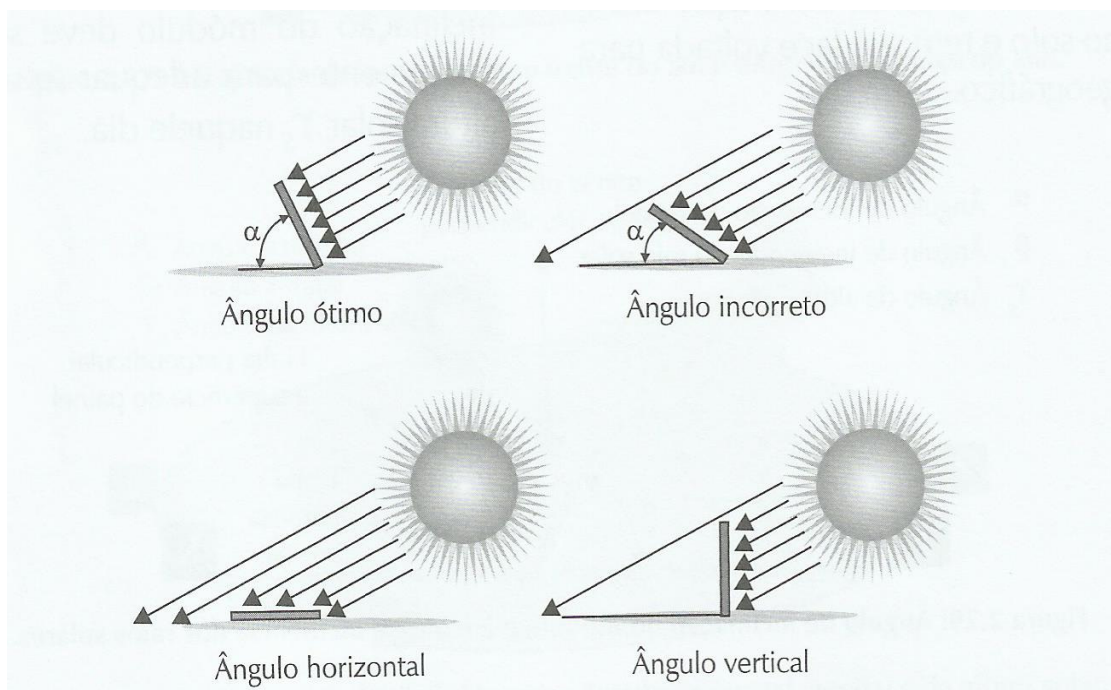


Figura 19 - Comportamento da radiação em relação a inclinação do módulo.

Fonte: (VILLALVA; et al., 2012).

É possível determinar conforme a latitude geográfica, de onde serão instalados os módulos fotovoltaicos, um ângulo de inclinação, o qual permite uma boa produção média de energia ao longo do ano. Sendo uma regra simples apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Escolha do ângulo de inclinação.

Latitude geográfica do local (^o)	Ângulo de inclinação recomendado (^o)
0 a 10	10
11 a 20	Latitude
21 a 30	Latitude + 5
31 a 40	Latitude + 10
41 ou mais	Latitude + 15

Fonte: (Villalva et. al., 2012)

3.5. Tipos de conexão dos módulos

Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados através de ligações em série, em paralelo ou em uma combinação série-paralelo, de modo a se obter os valores desejáveis de tensão e corrente.

3.5.1. Conexão dos módulos em série

Quando os módulos são conectados em série, conforme visto na Figura 20, a tensão total (V_t) do conjunto, corresponde à soma da tensão produzida por cada um dos módulos. Já a corrente total (I_t) que circula pelo conjunto é a mesma em todos os módulos. A Equação 3 e a Equação 4 representam o que foi dito anteriormente.

Equação 3 $V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$

Equação 4 $I_t = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$

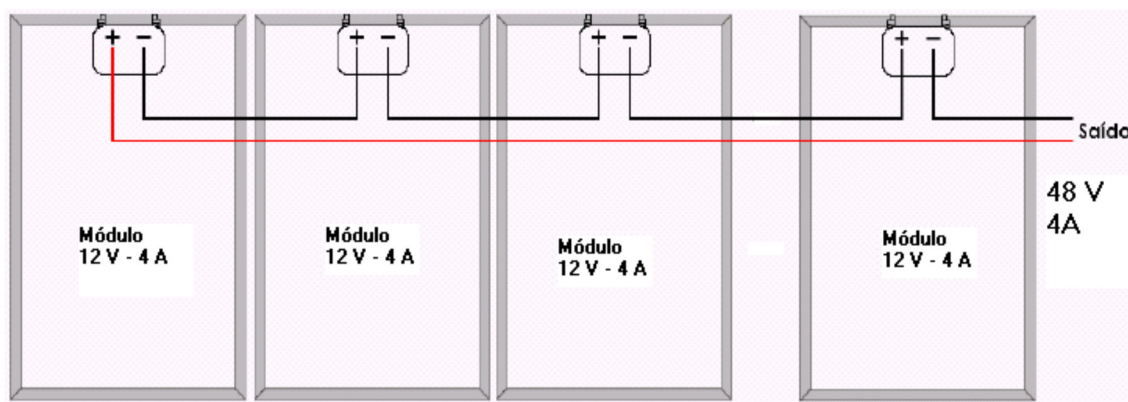


Figura 20 - Conexão dos módulos em série.

Fonte: (FREITAS, 2008).

O número de módulos ligados em série determina a tensão do sistema, que por sua vez determina a tensão de entrada do inversor.

3.5.2. Conexão dos módulos em paralelo

Quando os módulos são conectados em paralelo, conforme visto na Figura 21, a tensão total (V_t) do conjunto, é a mesma fornecida por um módulo individual. Já a corrente total (I_t) que circula pelo conjunto é a soma das correntes dos módulos. A Equação 5 e a Equação 6 representam o que foi dito anteriormente

$$\text{Equação 5} \quad V_t = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

$$\text{Equação 6} \quad I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

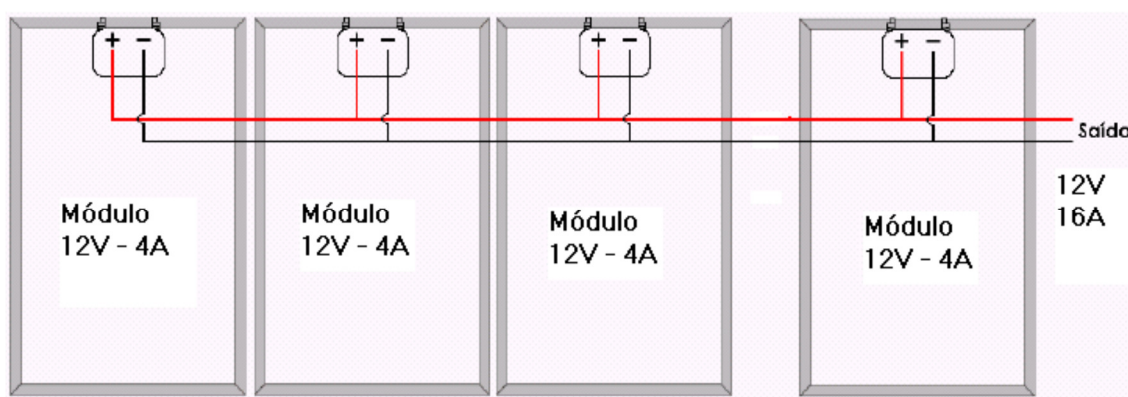


Figura 21 - Conexão dos módulos em paralelo.

Fonte: (FREITAS, 2008).

3.6. Acumuladores

Segundo Villalva et.al. (2012) existem diversos tipos de acumuladores (baterias), sendo os mais utilizados os acumuladores de chumbo ácido, Níquel-Cádmio (NiCd) e Níquel-Metal-Hidreto (NiMH). Tais acumuladores podem ser de ácido líquido ou em gel, como também podem ser abertas ou seladas.

Os acumuladores selados não requerem manutenção, sendo assim uma alternativa para sistema remotos, ou para maior segurança de funcionamento. Porém tem um custo inicial mais elevado que os demais.

Os acumuladores estacionários têm aspectos semelhantes aos de uma bateria automotiva, porém há diversas e importantes diferenças entre esses dois tipos. Nas aplicações fotovoltaicas não se recomenda o uso de baterias automotivas convencionais.

Os acumuladores de NiCd e NiMH são mais caros do que os de chumbo ácido, porém tem como principais características um baixo coeficiente de auto descarga, suportam elevadas variações de temperatura e permitem descargas mais profundas, cerca de 90%. Além disso, um acumulador de mesma carga de níquel tem menor tamanho do que um acumulador de chumbo. (VILLALVA et.al. (2012))

Apesar dos benefícios, os acumuladores NiCd são pouco usados em sistemas fotovoltaicos devido ao seu alto custo. Porém, neste trabalho será usado esse acumulador pela sua alta confiabilidade, pouca manutenção, por serem projetados para suportar ciclos profundos, além de apresentarem maior vida útil.

3.7. *Inversor*

A maioria dos aparelhos eletrodomésticos que conhecemos são projetados para trabalhar com a tensão alternada de 127 V ou 220 V, por exemplo. Para fornecer energia para esses aparelhos com um sistema fotovoltaico é necessária a realização da conversão dessa energia de tensão e corrente contínuas (CC) para tensão e corrente alternadas (CA).

Estão disponíveis no mercado diversos tipos de inversores, sendo o mais utilizado o modelo de Inversor PWM de onda senoidal pura. Estes modelos produzem tensões com o formato de ondas senoidais quase perfeitas, com baixíssima distorção harmônica. São equipamentos ideais para alimentar todos os tipos de consumidores com elevada confiabilidade e excelente qualidade de energia. (VILLALVA; et al., 2012)

4. Metodologia de dimensionamento

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para o dimensionamento do sistema de energia fotovoltaica para alimentação do Laboratório de Engenharia de Energia da UFGD. A primeira etapa para a realização do dimensionamento é a determinação das informações necessárias sobre o consumidor, como o tipo de consumo, a alta temporada de consumo, o tipo de instalação, entre outras.

4.1. Consumo de energia elétrica

Para fazer o cálculo do consumo de energia elétrica é preciso fazer um levantamento dos aparelhos usados e qual o tempo de uso por dia.

Esse consumo diário para o projeto pode ser calculado pela Equação 7, conforme Torres (2012), utilizando a potência de cada aparelho, o tempo de uso e a quantidade de cada um.

$$\text{Equação 7} \quad E = P_{\text{aparelho}} \cdot N \cdot t$$

Onde:

E = Consumo por aparelho [Wh/dia];

P_{aparelho} = Potência do aparelho [W];

N = Número de aparelhos;

t = Tempo que o(s) aparelho (s) ficam ligados por dia [h/dia].

A tarefa de calcular o consumo de energia elétrica nem sempre é fácil, pois o uso de cada aparelho pode variar de um dia para outro, de acordo com a época do ano e de acordo com o usuário do sistema.

Deve-se levar em conta o uso médio dos aparelhos, e realizar um estudo sobre o consumo local, de maneira que se possa obter um bom dimensionamento.

O consumo diário de energia elétrica do local de estudo pode-se calcular através da Equação 8.

$$\text{Equação 8} \quad E_t = \frac{\sum E}{1000}$$

Onde:

E_t = Consumo diário [kWh/dia];

E = Consumo por aparelho [Wh/dia].

E finalmente o consumo mensal é calculado pela Equação 9.

$$\text{Equação 9} \quad E_T = E_t \cdot D_I$$

Onde:

E_T = Consumo mensal [kWh/mês];

E_t = Consumo diário [kWh/dia];

D_I = Número de dias de funcionamento do local por mês [dia/mês].

4.2. Cálculo do Inversor

Para o dimensionamento do inversor é necessário o conhecimento prévio das cargas de corrente alternada que estão instaladas no sistema, e quais podem estar ligadas simultaneamente. Assim pode-se determinar a potência necessária para suprir a demanda de corrente alternada.

Ressalta-se a necessidade de que a tensão de entrada do inversor tem que ser a mesma da tensão de saída do módulo fotovoltaico.

4.3. Cálculo dos módulos fotovoltaicos

No dimensionamento de sistemas fotovoltaicos é de fundamental importância saber determinar a quantidade de energia que pode ser gerada diariamente pelo módulo fotovoltaico.

O primeiro passo a fazer nesta etapa, conforme Villalva et al. (2012) e Torres (2012), é escolher um módulo fotovoltaico e, com as especificações técnicas do fabricante como potência de pico, tensão e corrente, realizar o cálculo da energia gerada pelo mesmo através da Equação 10, onde as horas diárias de insolação é um dado da Figura 11.

$$\text{Equação 10} \quad E_G = P_{max} \cdot H_S$$

Onde:

E_G = Energia gerada pelo módulo diariamente [Wh];

P_{max} = Potência máxima do módulo fotovoltaico [W];

H_S = Horas diárias de insolação [h].

Após a definição da capacidade de geração de energia por módulo, pode-se calcular a quantidade de módulos fotovoltaicos a serem instalados para suprir a demanda do local em estudo. Conforme Villalva et al. (2012) o número de módulos fotovoltaicos a instalar é encontrado a partir da Equação 11.

$$\text{Equação 11} \quad N_p = \frac{E_t}{E_G}$$

Onde:

N_p = Número de módulos fotovoltaicos a instalar;

E_t = Consumo diário [kWh/dia];

E_G = Energia gerada pelo módulo diariamente.

Com o número de módulos fotovoltaicos é possível saber, através da Equação 12, a potência total a instalar.

$$\text{Equação 12} \quad P_t = P_{max} \cdot N_p$$

Onde:

P_t = Potência total a instalar [W];

P_{max} = Potência máxima do módulo fotovoltaico [W];

N_p = Número de módulos fotovoltaicos a instalar.

4.4. Cálculo dos Acumuladores

O dimensionamento dos acumuladores (baterias) do sistema fotovoltaico consiste em determinar os tipos, a quantidade e a forma de organização dos acumuladores utilizados.

A partir do consumo diário calculado e a profundidade de descarga permitida na bateria, é possível encontrar a capacidade de acumulação necessária no projeto.

Além da energia armazenada, expressa em watt-hora (Wh), é necessário conhecer e estabelecer a tensão de acumulação do banco de baterias, que pode ser 12 V, 24 V, 48 V ou 60 V, de acordo com o tipo de módulo e do sistema fotovoltaico desejados.

As baterias de um banco podem ser organizadas em série e paralelo. A tensão das baterias empregadas e a tensão desejada para o banco determinam o número de baterias as quais devem ser ligadas em série, conforme a Equação 13. (VILLALVA; et al., 2012)

$$\text{Equação 13} \quad N_{BS} = \frac{V_{Banco}}{V_{Bat}}$$

Onde:

N_{BS} = Número de baterias ligadas em série;

V_{Banco} = Tensão do banco de baterias [V];

V_{Bat} = Tensão da bateria utilizada [V].

Depois que definir o valor da tensão de operação, dias de autonomia, profundidade de descarga e as perdas no sistema de acumulação, é possível determinar a capacidade de carga do banco de baterias, conforme a Equação 14, e assim determinar a quantidade de baterias em paralelo conforme a Equação 15.

$$\text{Equação 14} \quad C_{Banco} = \frac{E_t \cdot D}{P_d \cdot V_{Banco} \cdot P_{ac}}$$

Onde:

C_{Banco} = Capacidade de carga do banco de baterias em ampère-hora [Ah];

E_t = Consumo diário [kWh/dia];

D = Número de dias de autonomia do banco de baterias [Dia];

P_{ac} = Perdas de rendimento no sistema de acumulação [%];

P_d = Profundidade máxima de descarga do sistema acumulador [%];

V_{Banco} = Tensão do sistema de acumulação [V].

E por fim, a Equação 15 determina a quantidade de conjuntos de baterias que devem ser ligados em paralelo para ter o banco de baterias com a capacidade desejada em projeto.

$$\text{Equação 15} \quad N_{BP} = \frac{C_{Banco}}{C_{Bat}}$$

Onde:

N_{BP} = Número de conjunto de baterias ligadas em paralelo;

C_{Banco} = Capacidade de carga do banco de baterias [Ah];

C_{Bat} = Capacidade de carga de cada bateria utiliza [Ah].

Sendo o total de baterias a multiplicação do número de conjunto em série com o número de conjuntos em paralelo.

4.5. Cálculo dos Reguladores

O passo seguinte é calcular o número de reguladores necessários na instalação, isso é possível graças a corrente do módulo fornecido de fábrica. A partir dessa informação e conforme Freitas (2008) e Torres (2012), com a Equação 16 é calculado o número de reguladores necessários.

$$\text{Equação 16} \quad N_r = \frac{N_{pp} \cdot I_{mp} \cdot 1,1}{I_r}$$

Onde:

N_r – Número de reguladores;

N_{pp} – Número de módulos conectados em paralelo;

I_{mp} – Intensidade de corrente no ponto de potência máxima [A];

I_r – Intensidade de corrente máxima do regulador [A]

4.6. Cálculo da seção do condutor

Os condutores elétricos têm sua seção calculada para o dimensionamento na instalação segundo a norma NBR 5410 (ABNT,) e Mamede Filho (2012), e a partir da Equação 17, para o circuito trifásico na saída do inversor.

$$\text{Equação 17} \quad S_c = \frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \rho \cdot \sum L_c \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot V_{ff}}$$

Onde:

S_c – Seção mínima do condutor [mm²];

ρ – Resistividade do material condutor (cobre): 1/56 [Ω.mm²/m];

L_c – Comprimento do circuito [m];

I_c – Corrente do circuito [A];

ΔV_c – Queda de tensão máxima admitida em projeto [%];

V_{ff} – Tensão entre fases [V].

E para o circuito do módulo fotovoltaico ao acumulador, a seção é calculada a partir da Equação 18.

$$\text{Equação 18} \quad S_c = \frac{200 \cdot \rho \cdot \sum L_c \cdot I_c}{\Delta V_c \cdot V_{fn}}$$

Onde:

S_c – Seção mínima do condutor [mm²];

ρ – Resistividade do material condutor (cobre): 1/56 [Ω.mm²/m];

L_c – Comprimento do circuito [m];

I_c – Corrente do circuito [A];

ΔV_c – Queda de tensão máxima admitida em projeto [%];

V_{fn} – Tensão entre fase e neutro [V].

5. Estudo de caso

O estudo de caso foi realizado conforme os dados da Tabela 2, onde observa-se as características do consumidor.

Tabela 2 - Dados do consumidor.

Dados de Identificação	Titular	UFGD	
	Localização	Cidade Universitária - Dourados - MS	
Tipo de Instalação			
Tipo de Consumo	Médio - 5 dias/semana	Alta temporada de consumo	Verão – Mês de dezembro

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Conforme a metodologia proposta foi estimado o perfil de carga diária para o projeto de instalação do laboratório de uso intermitente, através de levantamento realizado, como representa a Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo médio para equipamentos em CA.

Elementos de Consumo	Local	$P_{aparelho}$ (W)	N	t (h/dia)	E (Wh/dia)
Iluminação	Energia Aplicada	64	21	0,007	9,60
	Maq.Sist.Termico	64	18	0,007	8,23
	Inst.Flui.Mecan	64	17	0,286	310,86
	Energias renováveis	64	17	0,286	310,86
	Sala Apoio	64	3	6,000	1152,00
	WC	64	8	0,007	3,66
	Maq.Acio.Elét.	64	12	0,286	219,43
	Iluminação Oficina	64	12	0,007	5,49
	Efici.Energetica	64	8	0,007	3,66
	Processos Ind.	64	8	0,007	3,66
	Maq. Flu.	64	12	0,007	5,49
	RAVI	64	12	0,007	5,49
	Corredor	64	9	6,000	3456,00
Condicionador de ar / Climatizador	Energia Aplicada	350	3	0,429	450,00
	Maq.Sist.Termico	350	3	0,429	450,00
	Inst.Flui.Mecan	3600	2	0,429	3085,71
	Energias renováveis	3600	2	0,429	3085,71
	Sala Apoio	1600	1	6,000	9600,00
	Maq.Acio.Elét.	3600	2	0,429	3085,71
	Efici.Energetica	2800	1	0,429	1200,00
	Processos Ind.	2800	1	0,429	1200,00
	Maq. Flu.	350	3	0,429	450,00
	RAVI	350	3	0,429	450,00

Outros	Geladeira	500	1	5,000	2500,00
	Computador	300	20	3,000	18000,00
Motores	1/2 CV	375	2	0,143	107,14
	1/4 CV	190	3	0,143	81,43
	3/4 CV	560	1	0,143	80,00
E_t				49,32	kWh/dia
Potência Instalada				51428	W
Eficiência do Inversor				95	%
Total Inversor				51,91	kWh/dia
Potência Total Inversor				54,13	kW

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Observado os dados da Tabela 3, foi dimensionado o Inversor com base nas potências dos aparelhos que podem estar ligados simultaneamente e com o conhecimento da eficiência do inversor. Desta maneira a potência total foi de 54134,74 W, então determinou-se 20 Inversores Studer XPC 2200 VA-60 V, os quais serão ligados em 10 conjuntos de 2 inversores em paralelo, devido a tensão de acumulação nas baterias. As características do equipamento são mostradas na Tabela 4 e na Figura 22, uma imagem ilustrativa do mesmo. Os critérios de escolha desse modelo de equipamento foi a potência, a tensão de entrada e de saída, e a eficiência de conversão.

Tabela 4 - Características elétrica do inversor.

Temperatura de Funcionamento	-20°C ~ 55°C
Tipo de Isolamento	IP 20
Potência nominal de entrada CC	20A
Máxima potência de entrada CC	20A
Tensão de entrada CC	38 - 64V
Nº de entrada	1
Tensão de saída CA	230V
Potência nominal de saída CA	1600VA
Potência máxima de saída CA	2200VA
Taxa de Eficiência Máxima (%)	95
Nº de linhas de saída	1

Fonte: (HCF, 2014).

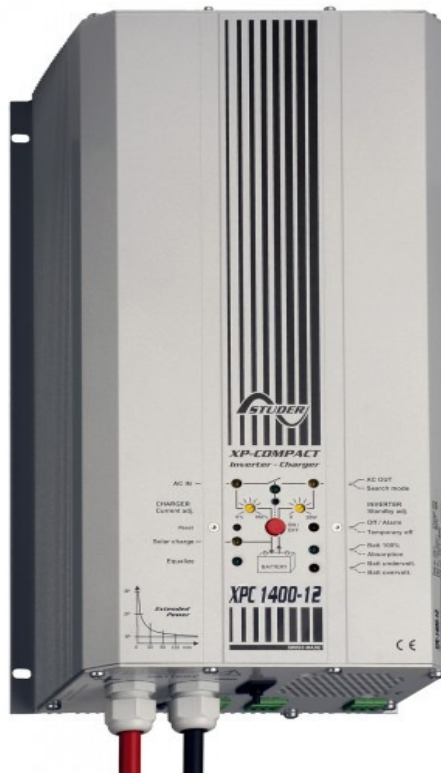


Figura 22 - Inversor Studer XPC 2200-60.

Fonte: (HCF, 2014).

Após o dimensionamento do Inversor, analisou-se o consumo mensal (E_T) do laboratório, considerando que o local funciona 22 dias por mês no período diurno, o qual totalizou em média de 1085,0 kWh/mês.

Depois de pesquisar por módulos fotovoltaicos de maior eficiência e potência, foi escolhido o módulo SunPower - SPR - 345NE-WHT - 345W - X21, que é um módulo Monocristalino SPR, e possui potência máxima especificada pelo fabricante em 345W (Figura 23).

Com as especificações técnicas do fabricante do módulo (Tabela 5) e as horas de insolação diária, retirada da Figura 11, pode-se calcular a energia gerada diariamente por um único módulo. Assim, apresenta-se os dados calculados na Tabela 6.

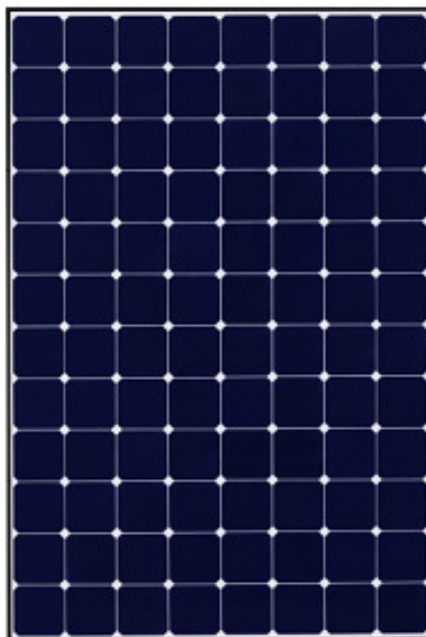


Figura 23 – Módulo fotovoltaico SPR - 345NE-WHT - 345W - X21.

Fonte: (SUNPOWER, 2014)

Tabela 5 – Especificações elétricas.

Modelo	X21-345
Potência Nominal (W)	345
Tolerância de potência (%)	5
Eficiência (%)	21,5
Tensão de curto-circuito (V)	57,3
Corrente de curto-circuito (A)	6,02

Fonte: (SUNPOWER, 2014)

Tabela 6 - Energia gerada.

P_{max} (W)	345
H_S (h)	6
E_G (Wh)	2070

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Na Figura 24 é possível verificar o comportamento da corrente e da tensão elétrica, desde modo, a potência de saída aumenta com o aumento da radiação incidente. A corrente de curto-circuito aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento da radiação incidente ao passo que o valor de tensão de circuito

aberto pouco varia com a variação da radiação solar global, do módulo fotovoltaico escolhido.

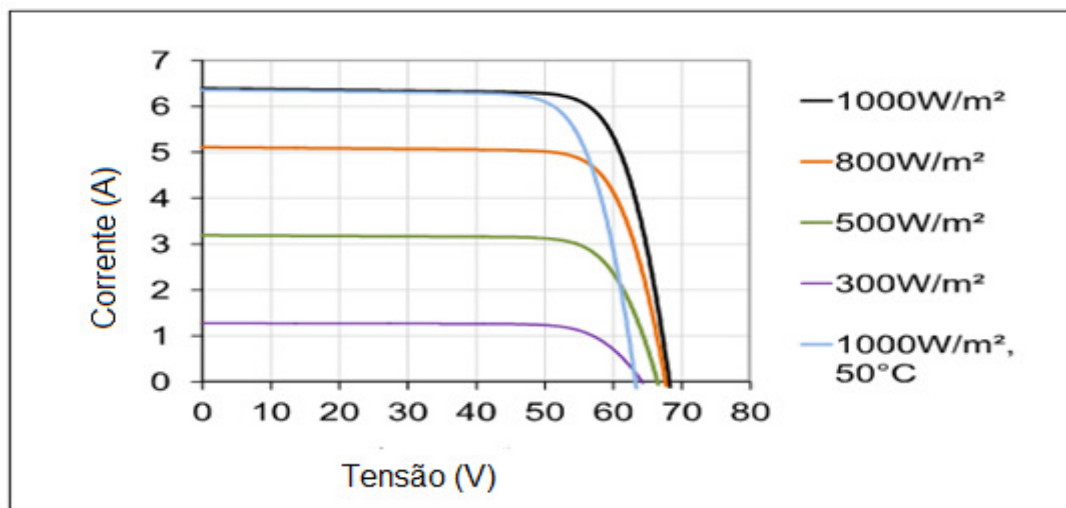


Figura 24 – Gráfico de Corrente versus Tensão para diversos R_s .
Fonte: (SUNPOWER, 2014)

A Tabela 7 mostra o resultado do cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para suprir a demanda de energia do local em estudo. Como N_p nem sempre será um número inteiro, deverá sempre ser aproximado para o próximo valor acima do encontrado, e este será o total de módulos a instalar, neste caso 24 módulos, totalizando 8280 Wp de potência instalada.

A parte de conexão dos módulos relatados na Tabela 7, se dá pela tensão escolhida para o sistema de acumulação e tendo o módulo uma tensão de saída de 60 V, adquiriu a tensão de 120 V para o sistema de acumulação, logo os módulos estarão ligados em conjunto de dois em série e 12 conjuntos desses em paralelo, totalizando 24 módulos.

Tabela 7 – Número de módulos fotovoltaicos, conexão e potência instalada.

N_p	23,83	Módulos
Conexão dos módulos	Em paralelo	Em Série
	12	2
P_t	8280	Wp

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Para o cálculo dos valores para o sistema de acumulação (banco de baterias) mostrados na Tabela 8, considera-se o modelo de acumulador escolhido a ser utilizado o Rolls Série AGM S-12-503AGM - 12V - 503Ah/100h (Figura 25), que possui uma tensão de 12 V e uma capacidade de 503 Ah a uma descarga de 100 horas, ciclo profundo de descarga (NiCd - 80%), e a tensão de acumulação de 120 V.

Também é importante ressaltar que foi desconsiderada a potência dos computadores para o cálculo de C_{Banco} , pois todos eles tem nobreaks para própria alimentação de energia elétrica. Sendo então desnecessárias baterias para estes aparelhos.

Tabela 8 – Cálculo do sistema de acumulação.

V_{Bat}	V_{Banco}	N_{BS}	D	P_{ac}	P_d	C_{Banco}	C_{Bat}	N_{BP}	Total
12	120	10	2	10%	80%	652,20	503	1	10

Fonte: (Próprio autor, 2014).



Figura 25 – Baterias Rolls.
Fonte: (WINDANSUN, 2014)

O número calculado de reguladores foi de duas unidades, devido à tensão de 60 V do regulador e do sistema de acumulação 120 V, então os dois estarão ligados em paralelo. Os valores do cálculo dos reguladores podem ser vistos na Tabela 10. O modelo utilizado foi o Regulador OutBack FM80-150VCC (Figura 26), com as especificações técnicas na Tabela 9.



Figura 26 - Regulador OutBack FM80-150VCC.
Fonte: (OUTBACK, 2014)

Tabela 9 – Especificações técnicas regulador.

Tensões	12,24,36,48 ou 60 VCC
Corrente de saída máxima	80 A
Tensão de circuito aberto	150 VCC
Consumo	<1 W
Eficiência	97,5%

Fonte: (OUTBACK, 2014)

Tabela 10 – Cálculo do número de reguladores

I_{mp}	6,02
N_{pp}	12
I_r	80
N_r	0,99

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Por fim, dimensionou-se as bitolas de cada parte da fiação desse projeto, conforme metodologia proposta, os dados são relatados na Tabela 11. Cabe ressaltar que foram calculadas as bitolas mínimas (S_{min}) dos condutores, mas também foram calculadas as bitolas dos condutores em relação a capacidade de corrente. Então foi escolhido a bitola comercial conforme a capacidade de corrente e/ou superior a bitola mínima.

Tabela 11 – Cálculo da seção mínima do condutor.

Local	Vc %	Potência W	Vff	Ic (A)	Lc (m)	Smin (mm²)	S (mm²)
Módulo - Acumulador	7	4140	120	79,46	25	8,45	10
Acumulador - Inversor	7	56841,47	120	473,68	8	16,11	150
Inversor - Quadro Geral	7	54134,74	220	142,07	10	2,85	35

Fonte: (Próprio autor, 2014).

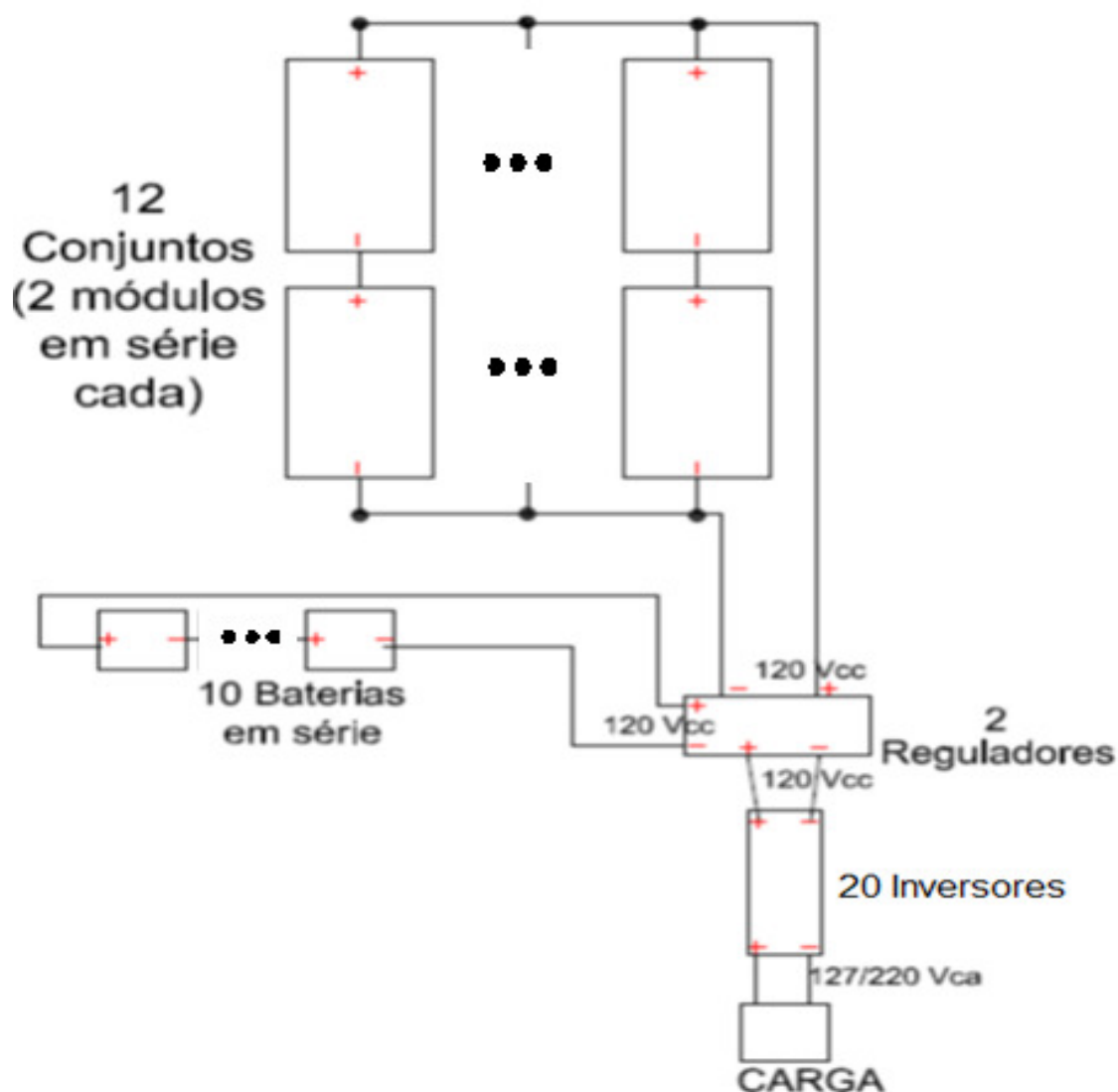


Figura 27 - Esquema unifilar simplificado do projeto fotovoltaico.

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Conforme a Figura 27, pode-se observar esquema da disposição dos componentes do sistema fotovoltaico em estudo.

5.1. Orçamento do projeto

Depois de todo o projeto dimensionado, foi realizado um levantamento de preço de cada item, os quais são apresentados na Tabela 12. Os preços podem variar ao longo do tempo, conforme o aprimoramento da tecnologia de conversão fotovoltaica, e fabricações nacionais, visto que alguns equipamentos, como os módulos, os inversores e os reguladores, foram cotados na Europa.

Com os valores de quanto cada conjunto de equipamento representa no preço total (porcentagem), observou-se que o inversor é o equipamento de maior investimento, seguido do módulo fotovoltaico e dos acumuladores.

Tabela 12 – Orçamento do projeto.

Descrição	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Subtotal (R\$)	Porcentagem (%)
Módulo Fotovoltaico SunPower Monocristalino SPR - 345NE-WHT	24	1.658,50	39.804,00	23,83
Estrutura e suporte para 24 módulos	1	3.500,00	3.500,00	2,10
Inversor - Studer XPC 2200-60	20	4.185,00	83.700,00	50,11
Acumulador - AGM S-12-503AGM - 12V - 503Ah/100h	10	2.480,00	24.800,00	14,85
Quadro elétrico com disjuntores termomagnéticos e disjuntor diferencial	1	1.000,00	1.000,00	0,60
Regulador - OutBack FM80-150VCC	2	1.996,40	3.992,80	2,39
Condutor cobre 10mm² XLPE	50	4,25	212,50	0,13
Condutor cobre 35mm² XLPE	50	8,45	422,50	0,25
Condutor de cobre 150mm² XLPE	20	36,00	720,00	0,43
Montagem e instalação	-	-	6.000,00	3,59
Eletroduto PVC 1"	7	5,88	41,16	0,02
Parafusos	-	200,00	200,00	0,12
Bornes de conexão de acumulador	7	5,80	40,60	0,02
Chapas de conexão entre acumuladores	26	3,36	87,36	0,05
Transporte do material			2.500,00	1,50
Total sem imposto			167.020,92	100
Taxa e impostos	17%		28.393,56	
TOTAL			195.414,48	

Fonte: (Próprio autor, 2014).

5.2. Taxa de retorno

Desta maneira pode-se calcular a taxa de retorno (*Payback*) do investimento do projeto conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Retorno do projeto.

Et médio	1085,04	kWh/mês
Preço	0,44	R\$/kWh
Consumo	R\$ 5.729,02	R\$/ano
Preço Projeto	R\$ 195.414,48	R\$
Retorno	34,11	anos

Fonte: (Próprio autor, 2014).

Sabe-se que a vida útil de um sistema fotovoltaico é de aproximadamente 25 anos, considerando que ao longo de sua vida útil diminui a capacidade de produção de energia elétrica e a taxa de retorno desse projeto foi de aproximadamente 34,11 anos.

Sendo assim, pode-se dizer que o projeto de energia solar fotovoltaica no Laboratório de Engenharia de Energia na UFGD é inviável. Desta maneira deve-se buscar e estudar alternativas para o uso da energia solar fotovoltaica, como por exemplo a exclusão do sistema de refrigeração, o qual demanda de cerca de 48% total de energia elétrica do laboratório em estudo, sistema interligado a rede de energia elétrica da concessionária, podendo retirar os acumuladores do projeto, diminuindo custos, conscientização sobre eficiência energética e o uso da energia elétrica, entre outros, os quais poderão ser abortados em trabalhos futuros.

Porém o projeto é conveniente considerando o uso de uma energia alternativa, pois a energia solar oriunda do sol é abundante. Também é considerável, observando no âmbito da geração distribuída, pois o centro consumidor está próximo da geração, fazendo assim com que o custo marginal de manutenção e operação seja menor do que das as fontes energéticas convencionais usadas atualmente.

6. Conclusão

Com base nos dados e estudos neste projeto pode-se observar que a instalação de um sistema de energia solar fotovoltaica no Laboratório de Engenharia de Energia da UFGD com essa configuração especificada, não é interessante, visto que o investimento não terá lucro, devido ao elevado preço dos equipamentos. Com as pesquisas tecnológicas e fabricações nacionais dos equipamentos poderá ser viável futuramente, como também, outras configurações de instalações para o local estudado, por exemplo, um sistema interligado a rede.

O aumento da tarifa da energia elétrica pode contribuir para viabilizar o sistema fotovoltaico, como no caso atual, quando as usinas hidrelétricas estão com os reservatórios em estado de alerta. Vale também lembrar, que a partir de 2015 quando começará a vigorar bandeiras tarifárias no sistema elétrico brasileiro, deste modo as tarifas poderão sofrer alterações mensais, dependendo das chuvas e dos níveis dos reservatórios, podendo refletir na diminuição do tempo de retorno do investimento ou o aumento do lucro do mesmo.

No Brasil, caso haja uma redução de custos mais significativa como por exemplo alguns incentivos fiscais, com os avanços tecnológicos no âmbito da energia fotovoltaica, e também, com as aplicações interligadas à rede, pode tornar-se possível um cenário de substituição de fontes térmicas não renováveis, diminuindo assim o tempo de retorno do investimento do projeto.

7. Referências

- ANÁLISE ENERGIA. **Brasil dá os primeiros passos**. São Paulo: Análise, 2014. Anual. p. 35-40.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia Solar**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em 16 abr. 2014.
- BORTHOLIN, Érica. **Efeito Estufa**. Disponível em: <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2003/ee/Efeito_Estufa.html>. Acesso em 09 mai. 2014.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. **Instruction Manual SP-LITE Silicon Pyranometer**. Logan: Copyright, 2004. 20 p.
- COSTA, Heitor Scalabrini. **Diagnóstico do estado de funcionamento de sistemas de bombeamento de água fotovoltaico (SBFV) instalados em Pernambucano**. In: 6º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. Anais eletrônicos.
- CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Atlas Solarimétrico do Brasil 2000**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em 18 Abr 2014.
- DIAS, C.A.A. **Procedimento de medição e aquisição de dados de uma torre micro meteorológica em Sinop – MT**. 2007. 89p. UFMT - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2007. Cap. 2.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. (Org.). **Balanço Energético Nacional – BEN - 2013**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2013.aspx>>. Acesso em: 5 abr. 2014.
- ENERGY, APJ. **Energia Solar Térmica**. Disponível em: <<http://www.apj.pt/est.html>>. Acesso em: 10 abr. 2014.
- ENERGY, APJ. **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.apj.pt/est.html>>. Acesso em: 10 abr. 2014.

ENERGIA SOLAR, **Fotos de coletor solar**. Disponível em:
<http://energiasolar.adm.br/energia-solar/>. Acesso em 9 abr. 2014.

FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. 2008. 104 f.
Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Instituto
Politécnico de Bragança, Bragança, 2008.

GEOPOWER, **Moduli Fotovoltaici**. Disponível em:<
http://www.geopower.it/219__Moduli_fotovoltaici>. Acesso em 10 mai. 2014.

HCF, Portugal. **Inversor/Controlador de Carga XPC 2200 - 48V**. Disponível
em:<
<http://www.hcfportugal.com/eshop/electricidade-e-iluminacao/inversores/inversor-controlador-de-carga-studer-xpc-2200-48.html>>. Acesso em 13 mai. 2014.

IEA, International Energy Agency. **World Energy Outlook Special Report 2013: Redrawing the Energy Climate Map**. Paris: OECD/IEA, 2013. Disponível
em:
<<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,38764,en.html>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

JARDIM, Carolina da Silva, SALAMONI, Isabel, RUTHER, Ricardo *et al.* **O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso**. In: 5º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2004, Campinas. Anais eletrônicos.

LOPEZ, R. A. **Energia solar para produção de eletricidade**. São Paulo, SP :
ArtLiber, 2012. 229p.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro:
LTC, 2012. 666 p.

MARINI, José Adriano e ROSSI, Luiz Antonio. **Projeto de sistemas fotovoltaicos para oferta de energia elétrica a comunidades rurais**. In:
4º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, Campinas. Anais eletrônicos.

NEO SOLAR. **Energia solar poderia ser ofertada a menos de R\$200/MWh em leilões**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/blog/energia-solar->

- poderia-ser-ofertada-a-menos-de-rs200mwh-em-leiloes/>. Acesso em 20 abr. 2014
- OUTBACK, Power. **FLEXmax 80**. Disponível em: <<http://www.outbackpower.com/outback-products/charge-controllers/item/flexmax-80>>. Acesso em 16 mai. 2014.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. - **Atlas brasileiro de energia solar**. – São José dos Campos: INPE, 2006. il. 60p. ;
- SILVA, R.L.; OLIVEIRA, I.P.; CACHUTÉ, L.O. **Energia solar térmica e disponibilidade local no campus da UFGD**. In: 6º CIBIO - Congresso Internacional de Bioenergia, 2011, Curitiba-PR. Tema 2: Geração de Energia Elétrica Alternativa. Curitiba-PR: UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2011. v. CD-ROM. p. 1-10.
- SUNPOWER. **Folhas de dados**. Disponível em: <<http://us.sunpower.com/support/datasheets/>>. Acesso em 7 abr. 2014.
- UFMG, DEPARTAMENTO DE QUIMICA. **Espectro da radiação solar**. Disponível em :<<http://zeus.qui.ufmg.br/~qgeral/?author=1&paged=2>>. Acesso em 9 mai. 2014.
- ROSSI, Luiz Antonio. **Sistema híbrido Eólico-Fotovoltaico: alternativa na geração descentralizada de eletricidade para áreas rurais isoladas**. In: 3º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2000, Campinas. Anais eletrônicos.
- TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. Ed. – São Paulo: Érica, 2012.
- WINDANSUN, Wind&Sun Powering the future. **Rolls Baterias**. Disponível em: <<http://www.windandsun.co.uk/products/Batteries/RollsBatteries#.U3YdBfldVps>>. Acesso em 7 abr. 2014.