



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DA ENERGIA SOLAR EM
DOMICÍLIOS DISTANTES DA REDE
ELÉTRICA**

Fábio Tomohiro Nagahara

Abril de 2009

APLICAÇÃO DA ENERGIA SOLAR EM DOMICÍLIOS
DISTANTES DA REDE ELÉTRICA

Fábio Tomohiro Nagahara

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por :

Jorge Luiz do Nascimento, Dr.Eng.

Ivan Herszterg, M.Sc.

Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Abril de 2009

Resumo do Projeto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Aplicação da Energia Solar em Domicílios Distantes da Rede Elétrica

Fábio Tomohiro Nagahara

Abril/2009

Orientador : Jorge Luiz do Nascimento

Departamento de Engenharia Elétrica

O projeto apresenta a aplicação da energia solar e dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico e térmico para um domicílio distante da rede elétrica, mostrando os seus custos, comparando com a extensão de rede, e analisando a sua viabilidade nos aspectos técnico, ambiental, social e econômico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai e minha mãe, por estarem sempre ao meu lado me apoiando e incentivando em todas as fases da minha vida.

Agradeço aos meus irmãos, pela ajuda dada e companhia nesta caminhada.

Agradeço à paciência e ao grande apoio do Professor Jorge Luiz do Nascimento me orientando neste projeto de graduação.

Por fim, agradeço a todos os amigos e pessoas que sempre tiveram ao meu lado me apoiando nesta vida.

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do Trabalho	2
2	Energia Solar Térmica	3
2.1	Coletores Solares	4
2.2	Sistema de Aquecimento Solar	4
3	Energia Solar Fotovoltaica	6
3.1	Célula Fotovoltaica e o Efeito Fotovoltaico	6
3.2	Módulo Fotovoltaico	7
3.2.1.	Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos	9
3.2.2.	Temperatura e Intensidade de Radiação Solar	11
3.3.	Sistemas Fotovoltaicos	13
3.3.1.	Sistemas Autônomos ou Isolados	13
3.3.2.	Sistemas Ligados à Rede	15
3.4.	Acessórios de um Sistema Fotovoltaico	16
3.4.1.	Baterias	16
3.4.1.1.	Baterias de Chumbo-Ácido	17
3.4.1.2	Baterias de Níquel-Cádmio	17
3.4.2.	Controladores de Carga	18
3.4.3	Inversores	19
4.	Dimensionamento de um Sistema Solar Fotovoltaico para Domicílios Isolados	21
4.1	Características da Carga	21
4.2	Quantidade de Radiação Solar	23
4.3	Dimensionamento do Acumulador	25
4.4	Dimensionamento do Gerador	26
4.5	Dimensionamento do Controlador	27
4.6	Dimensionamento do Inversor	28
5.	Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar	29
6	Custos	31

7	Eletrificação Convencional (Extensão de Rede)	32
8	Desenvolvimento Sustentável	34
9	Programas de Incentivo	35
10	Conclusão	36
	Bibliografia	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 : Sistema de Aquecimento Solar por Termossifão	5
Figura 3-1 : Conexão das Células em Paralelo	8
Figura 3-2 : Conexão em Série	8
Figura 3-3 : Painel Fotovoltaico	8
Figura 3-4 : Curva Característica IxV Mostrando a Corrente Isc e a Tensão Voc	10
Figura 3-5 : Curva Típica de Potência	10
Figura 3-6 : Parâmetros de Potência Máxima	11
Figura 3-7 : Efeito Causado pela Variação de Intensidade Luminosa	12
Figura 3-8 : Efeito Causado pela Temperatura na Célula	12
Figura 3-9 : Exemplo de um Sistema Isolado	13
Figura 3-10 : Sistema de Bombeamento Solar	14
Figura 3-11 : Gerador Fotovoltaico para Telecomunicação	15
Figura 3-12 : Sistema de Iluminação Solar	15
Figura 3-13 : Exemplo de um Sistema Conectado à Rede	16
Figura 4-1 : Radiações Solares para o Período de Um Ano na Cidade do Rio de Janeiro (Fonte : Programa RADIASOL)	25

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1 : Consumo Diário de Energia de um Domicílio Isolado	22
Tabela 4-2 : Radiações Solares Horárias para o Período de Um Ano	24
Tabela 6-1 : Custos de um Sistema Solar Fotovoltaico de um Domicílio Isolado	31
Tabela 7-1 : Custo da Eletrificação em Função do Número de Domicílios e Distância da Rede Elétrica	32

1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O Brasil apresenta ótimos índices de radiação solar o ano inteiro em grande parte do seu território, principalmente no Nordeste brasileiro. Sendo o terceiro no ranking de insolação solar no Mundo, possui as condições ideais para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica e térmica no país.

O custo da implementação de um sistema solar fotovoltaico e térmico ainda continuam altos, assim como a sua tecnologia, mas que com o passar dos anos tem cada vez mais diminuído e se mostrado bastante viável em certas condições, como em regiões distantes e isoladas.

O modelo energético centralizado adotado pelo país tornou-se um grande problema para as regiões afastadas dos grandes centros urbanos, principalmente as zonas rurais, onde a rede de distribuição de energia elétrica nem sempre é viável economicamente, sendo de pouco interesse para as concessionárias de energia.

Os programas de incentivos federais como o “Luz para Todos” e o “Proodem”, através de incentivos fiscais e ajuda governamental, vem trazendo energia elétrica a regiões desassistidas de energia não somente através da rede convencional, como também, através da energia proveniente das fontes renováveis.

As questões ambientais com o desenvolvimento sustentável e a recente alta do petróleo e seus derivados que mexem com as economias de países industrializados tem trazido uma elevada preocupação na busca cada vez maior de fontes de energias alternativas e não poluidoras como a energia solar fotovoltaica e a térmica.

1.2. Objetivos

Os objetivos do trabalho são:

Apresentar a aplicação da energia solar fotovoltaica e térmica em regiões distantes;

- O dimensionamento de um sistema fotovoltaico e de um sistema de aquecimento solar para domicílios isolados;
- A comparação com a extensão de rede;
- A sua viabilidade nas questões técnicas, ambientais, sociais e econômicas.

1.3. Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em nove capítulos: no segundo e terceiro capítulos são apresentadas as teorias da energia solar fotovoltaica e térmica, abordando o funcionamento das tecnologias e os seus principais componentes.

No quarto e no quinto capítulos são feitos os dimensionamentos solar e térmico para um domicílio isolado.

No sexto e no sétimo abordam os custos de um sistema solar e a comparação com a extensão da rede.

O oitavo e nono capítulos falam do desenvolvimento sustentável e dos programas de incentivos do governo.

Finalizando, o capítulo dez é a conclusão do trabalho, fazendo uma análise da viabilidade dos sistemas dimensionados.

2. Energia Solar Térmica

A energia solar é responsável pela origem de uma grande parte da energia que utilizamos todos os dias. A ação de aquecimento direto, o vento e as ondas, e até mesmo os combustíveis fósseis, obtêm a sua energia dos raios solares.

Ela é sem dúvida uma fonte de energia inesgotável, limpa e de um futuro muito promissor.

No país, como o Brasil, onde a radiação solar apresenta ótimos índices, as suas principais formas de aproveitamento são para o aquecimento térmico e para a geração de eletricidade.

A energia solar térmica é a energia captada e armazenada por determinados corpos, sob a forma de calor, a partir da radiação solar incidente no mesmo.

Esta energia captada e armazenada é utilizada para o aquecimento de fluidos.

Os fluidos aquecidos podem ser armazenados e utilizados para aquecimento de água de banho, produção de ar quente para secagem de grãos e na formação de vapor para acionamento de turbinas.

No Brasil a sua principal utilização é para o aquecimento de água para banho em residências, hospitais e edifícios.

2.1. Coletores Solares

Os coletores solares são os equipamentos mais difundidos na utilização da energia solar térmica para o aquecimento de fluidos.

Eles podem ser classificados em dois tipos de coletores. Os coletores concentrados, que apresentam dispositivos de concentração de radiação solar e os planos, sem os dispositivos.

Atualmente, os coletores planos são os mais utilizados, principalmente nos sistemas de aquecimento solar de água.

2.2. Sistema de Aquecimento Solar

Os sistemas de aquecimento são formados pelos seguintes equipamentos:

1. caixa d'água,
2. reservatório térmico,
3. coletores solares,
4. suspiro,
5. alimentação dos coletores,
6. retorno dos coletores,
7. alimentação de água fria e
8. consumo de água quente,

onde os principais equipamentos são os coletores solares e o reservatório térmico (QUINTEROS, 2000).

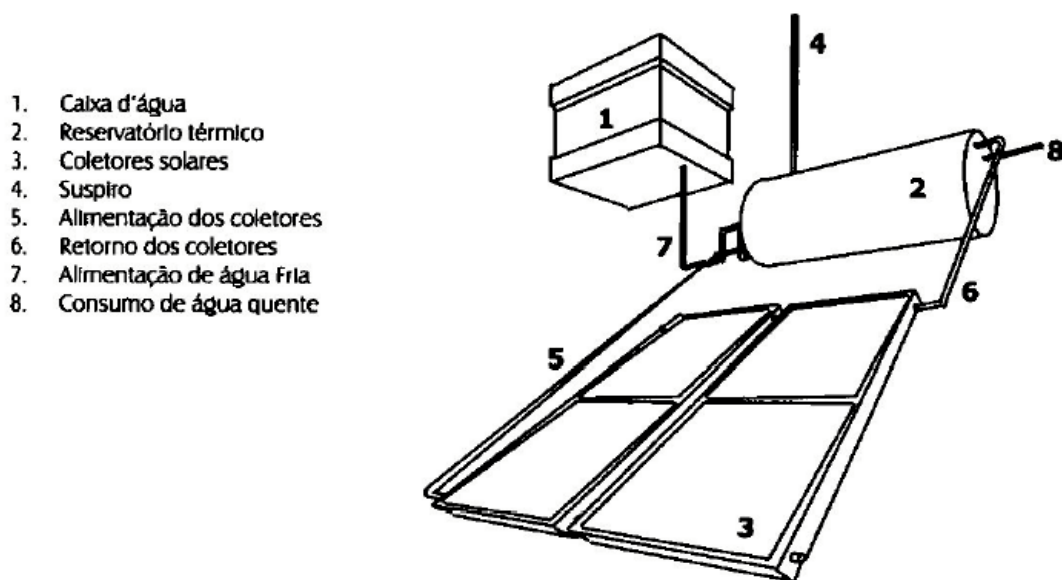


Figura 2-1 : Sistema de aquecimento solar por termosifão

O seu funcionamento é bastante simples: a radiação solar é recebida pelo coletor solar onde, sob forma de calor, é conduzida para a água do interior do coletor. A água é então transportada ao reservatório para ser utilizada. A forma como esta água é transportada serve para classificar os tipos de sistemas de aquecimento:

- Termossifão ou circulação natural. Nesses sistemas, como apresentado na Figura 2-1, a água circula através do coletor devido a diferença de densidade entre a água mais fria, contida no reservatório, e a água quente do coletor.
- Bombeamento ou circulação forçada. Nestas instalações, a circulação da água é promovida por meio de uma motobomba hidráulica, acionada por um controlador eletrônico.

3. Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida pela transformação direta da luz em eletricidade(efeito fotovoltaico).

Esta tecnologia é muito utilizada em regiões isoladas, onde apresentam condições ideais para sua aplicação (bombeamento de água, estações de telecomunicação, residências distantes da rede elétrica, etc).

A energia solar fotovoltaica apresenta diversas vantagens. Entre elas, a de não consumir nenhum tipo de combustível e de exigir pouca manutenção.

Já em relação às desvantagens, poder-se-á citar o custo de implementação associado às condicionantes inerentes à natureza da energia solar, as alterações de luz ao longo das 24 horas, a presença de condições climáticas desfavoráveis (chuva, nuvens) e a necessidade de substituição de baterias e outros acessórios com o tempo.

3.1. Célula Fotovoltaica e o Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico permite a geração de eletricidade diretamente a partir da luz solar, utilizando material semicondutor como elemento transformador, conhecido como célula fotovoltaica.

A célula fotovoltaica é um disco de material semicondutor, o qual foi dopado com uma pequena quantidade de impurezas, que irão gerar de um lado do disco carga positiva e do outro, carga negativa, (designado como tipo p ou tipo n) formando desta forma um grande diodo.

Quando a luz incide sobre a célula, a energia da luz toca os elétrons livres, que são forçados a se movimentar através da junção, estabelecendo um fluxo

destes elétrons livres através de um condutor ligado em ambos os lados do disco. Desta forma, determina-se a circulação de elétrons.

Para que uma célula solar seja eficiente, é preciso, por um lado, que a maioria dos fótons do espectro solar seja absorvida pelo semicondutor e, por outro, que os portadores de carga foto gerados sejam separados internamente e coletados em um circuito exterior.

A primeira condição depende do valor da faixa de energia proibida (ou hiato energético) do semicondutor, que separa no material a faixa eletrônica de condução da faixa eletrônica de valência. Fótons com energia menor que a desse hiato energético não são absorvidos pelo semicondutor.

A segunda condição depende da qualidade de fabricação. Em geral, a eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica, isto é, a relação entre a potência elétrica gerada e a potência de radiação incidente sobre o semicondutor é da ordem de 10%.

As células solares podem ser fabricadas usando-se diversos tipos de materiais semicondutores, porém os mais utilizados são os de silício. Estes estão divididos em silício monocristalino, policristalino e amorfo.

3.2. Módulo Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são formados pelo agrupamento de várias células solares ligadas em paralelo e em serie. Isto é feito devido a baixa saída de tensão e de corrente de uma célula solar (CRESESB, 2008).

Na ligação em paralelo temos a soma das correntes das células e a tensão do módulo é exatamente a da célula.

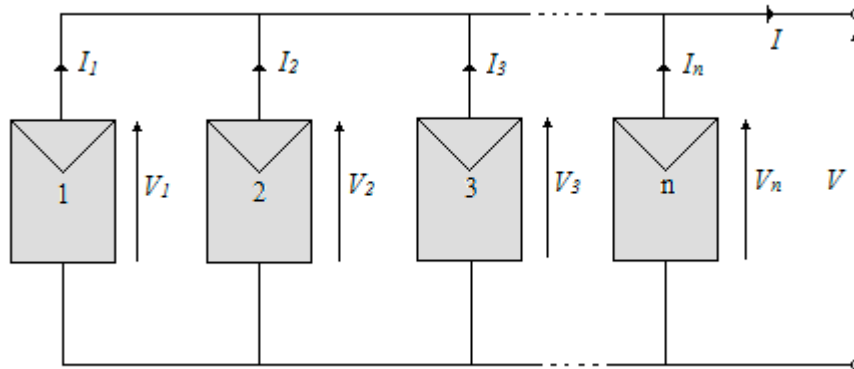


Figura 3-1 : Conexão das células em paralelo

Já na ligação em série temos a soma das tensões e a corrente do módulo passa a ser a da célula solar.

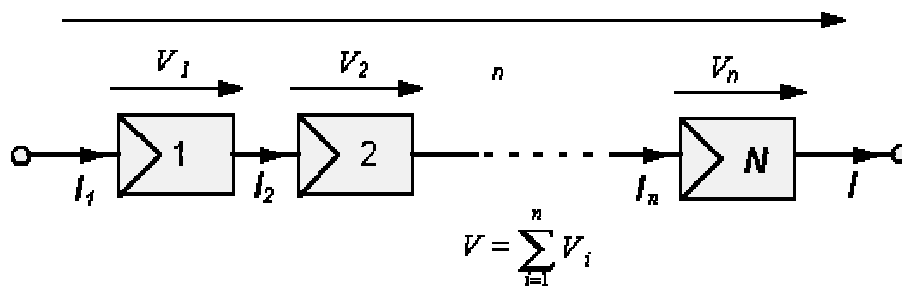


Figura 3-2 : Conexão das células em série

Geralmente temos a associação de células em série e paralelo obtendo assim módulos com saídas de tensões e correntes adequados para uso.

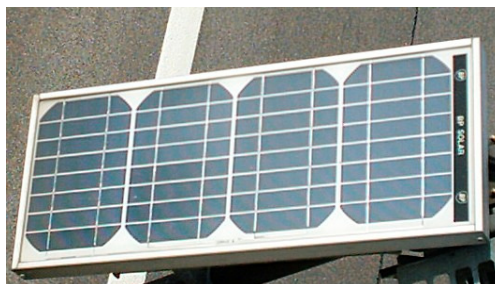


Figura 3-3 : Painel fotovoltaico

3.2.1. Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Os módulos apresentam parâmetros elétricos que, em determinadas condições de radiação solar, temperatura ambiente e massa de ar, caracterizam a sua funcionabilidade (CRESESB , 2008).Dentre esses parâmetros, os cinco principais são:

- Voltagem de Circuito Aberto (V_{oc}) : Máxima tensão que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo à circulação de corrente nula e conseqüentemente a potência nula.
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc}) : Máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo à tensão nula e conseqüentemente a potência nula.
- Potência Máxima (P_m) : É o valor máximo de potência que o dispositivo pode entregar. Corresponde ao ponto da curva no qual o produto $V \times I$ é máximo.
- Voltagem de Potência Máxima (V_{mp}) : tensão sob qual o dispositivo entrega a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como tensão nominal do mesmo.
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp}) : corrente sob qual o dispositivo entrega a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo.

As curvas características dos módulos, obtidas sob condições padrões (radiação solar de $1000W/m^2$ e temperatura de $25^{\circ}C$), também podem ser vistas nas Figuras 3-4, 3-5 e 3-6.

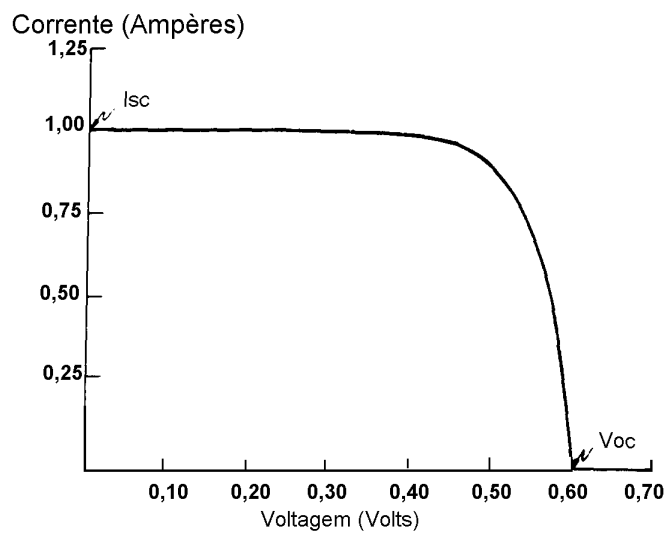


Figura 3-4 : Curva característica IxV mostrando a corrente Isc e a tensão Voc

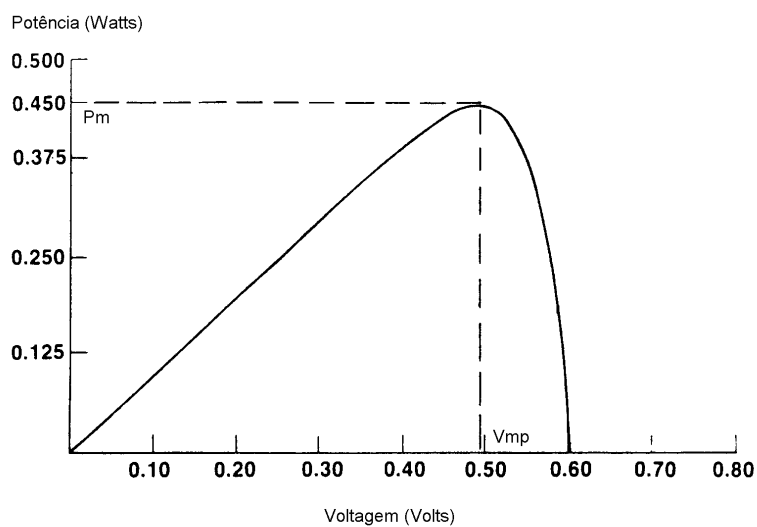


Figura 3-5 : Curva típica de potência versus tensão

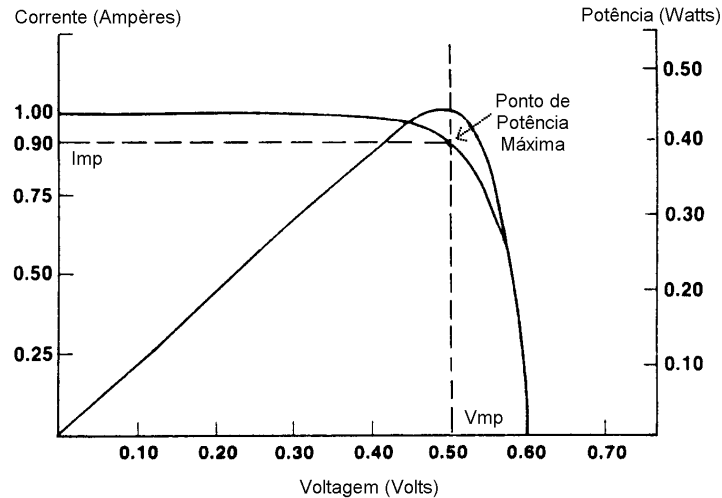


Figura 3-6 : Parâmetros de potência máxima

3.2.2. Temperatura e Intensidade de Radiação Solar

A intensidade de radiação solar e a temperatura são os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel (CRESESB, 2008).

Os efeitos de uma mudança na intensidade luminosa sobre o módulo é uma variação na corrente de saída para qualquer valor de tensão. A corrente varia com a radiação de forma diretamente proporcional, enquanto que a tensão mantém-se praticamente constante.

Já o aumento da temperatura do painel provoca uma redução da tensão de forma diretamente proporcional, ocasionando a diminuição da eficiência do módulo, e conseqüentemente, a dos pontos de operação para potência máxima gerada.

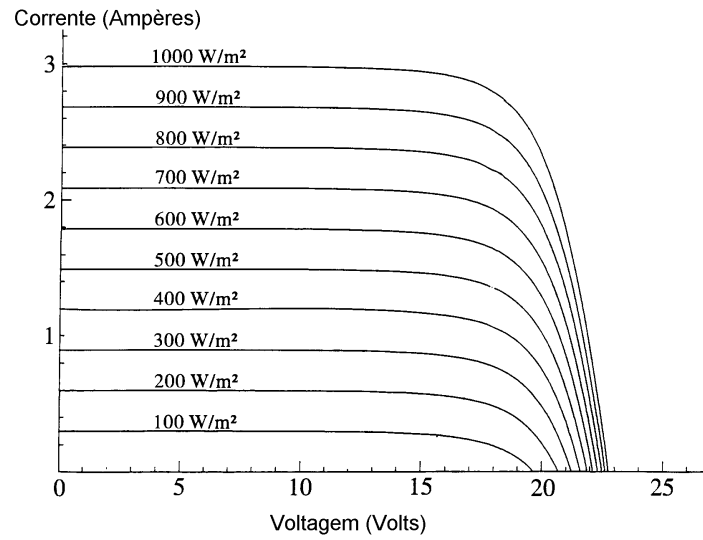


Figura 3-7 : Efeito causado pela variação de intensidade luminosa

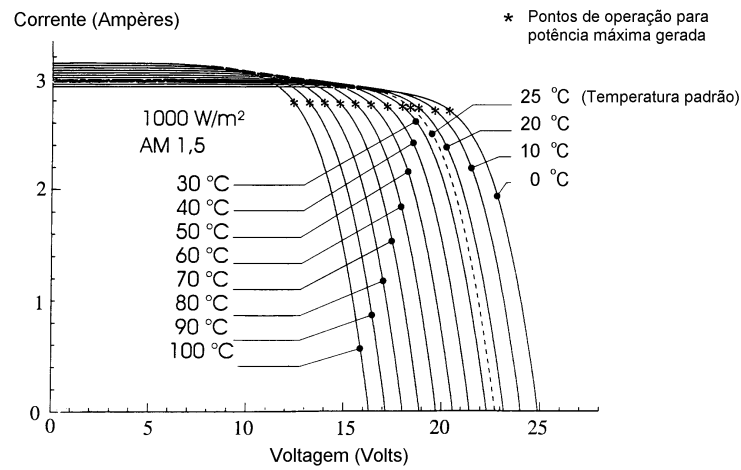


Figura 3-8 : Efeito causado pela temperatura na célula

3.3. Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são formados pelos módulos solares e pelos seus acessórios. Eles podem ser divididos em 2 tipos de sistemas.

3.3.1. Sistemas Autônomos ou Isolados

Neste tipo de sistema o aproveitamento da energia solar precisa ser ajustado à demanda energética. Uma vez que a energia produzida não corresponde (na maior parte das vezes) à procura pontual de energia de um consumidor, torna-se necessário um sistema de armazenamento (bateria) e meios de apoio complementar de energia (sistemas híbridos).

Na Figura 3-9, temos um exemplo de um sistema autônomo formado pelos módulos, pelo controlador de carga, pelo inversor e pela bateria, na alimentação de cargas isoladas.

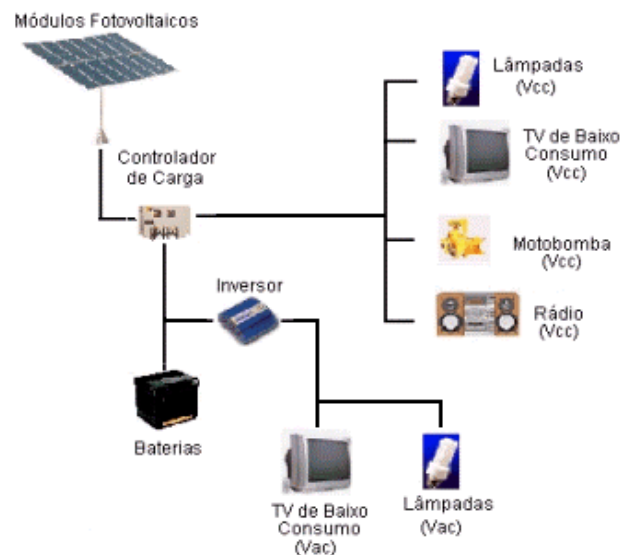


Figura 3-9 : Exemplo de um sistema isolado

Os sistemas autônomos constituíram o primeiro campo de operação econômica da tecnologia fotovoltaica.

A aplicação deste tipo de sistema autônomo, observa-se onde o fornecimento de energia através da rede pública de distribuição de energia elétrica não se verifica por razões técnicas e/ou econômicas, como por exemplo, em sistemas de bombeamento solar (Figura 3-10), em casos de estações de telecomunicação isoladas (Figura 3-11) e em sistemas de iluminação isolado da rede de energia (Figura 3-12).

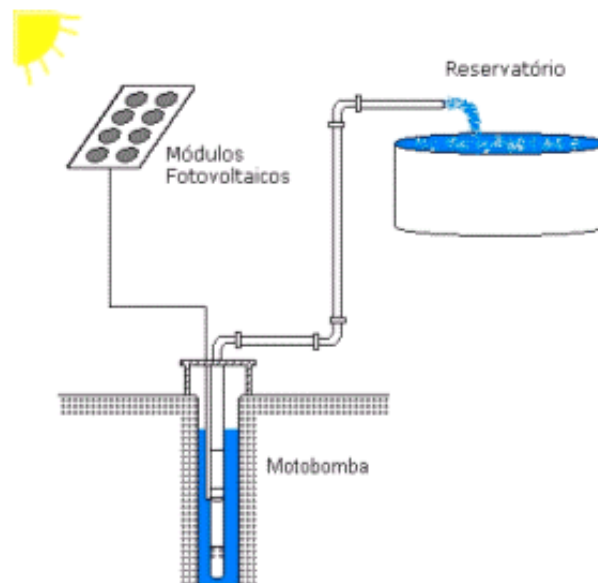


Figura 3-10 : Sistema de bombeamento solar



Figura 3-11 : Gerador fotovoltaico para telecomunicação

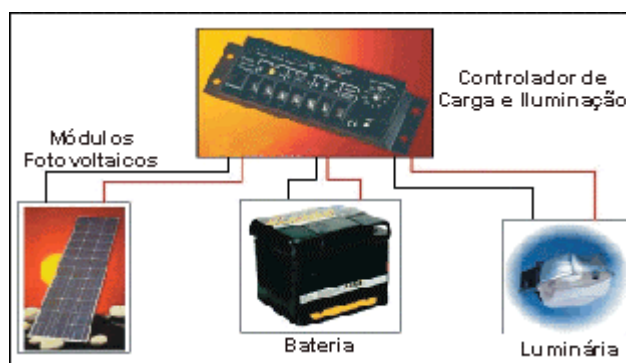


Figura 3-12 : Sistema de iluminação solar

3.3.2. Sistemas Ligados à Rede

Os sistemas conectados à rede (Figura 3-13) são aqueles que estão diretamente ligados à rede de energia através de um inversor, no qual este deve satisfazer algumas exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada, não necessitando assim da presença de um sistema de armazenamento (baterias).

Estes sistemas podem ser de pequena dimensão, para alimentação de pequenas cargas residenciais ou não residenciais, ou de média e grande dimensão constituindo centrais fotovoltaicas com potências instaladas entre as dezenas de kW de pico e alguns MW de pico.

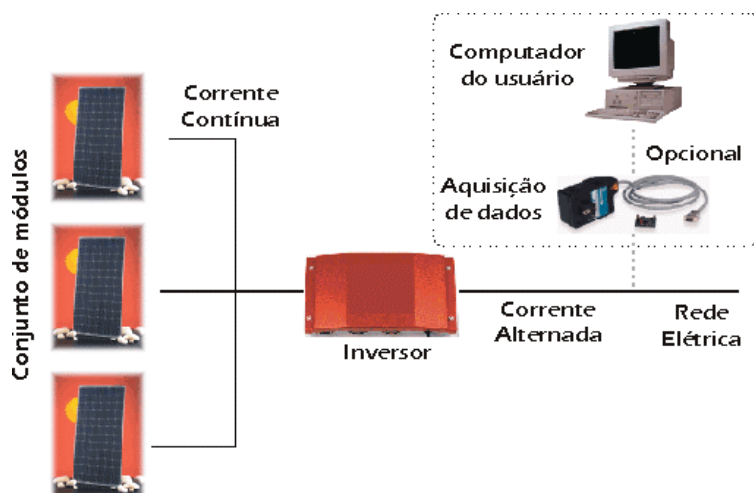


Figura 3-13 : Exemplo de um sistema conectado à rede

3.4. Acessórios de um Sistema Fotovoltaico

Além dos painéis solares, as baterias, os controladores e os inversores são os principais acessórios presentes em um sistema solar fotovoltaico. Eles são utilizados de acordo com a sua aplicação, seja ela para uso isolado ou conectado à rede.

3.4.1. Baterias

A função prioritária das baterias num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que se produz durante as horas de luminosidade a fim de poder ser utilizada à noite ou durante períodos prolongados de mau tempo.

Outra função das baterias é para a estabilização de corrente e tensão na hora de alimentar cargas elétricas, suprindo transitórios que possam ocorrer na geração.

Ela também tem a função de prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar. É o caso de um motor, que no momento do arranque pode exigir uma corrente de 4 a 6 vezes sua corrente nominal durante uns poucos segundos.

As baterias podem ser classificadas em duas categorias, primária e secundária. As baterias primárias não podem ser recarregadas, ou seja, uma vez esgotados os reagentes que produzem energia elétrica, devem ser descartadas. As secundárias podem ser recarregadas através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais. Os sistemas fotovoltaicos utilizam acumuladores secundários, dentre as mais comuns, as chumbo-ácido e as níquel-cádmio.

3.4.1.1 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido aplicam-se amplamente nos sistemas de geração fotovoltaicos. Elas são as mais usadas devido a sua variedade de tamanhos, custo baixo e características de desempenho bem estabelecidas. Dentro da categoria chumbo-ácido temos as baterias com eletrólito líquido e as seladas.

3.4.1.2 Bateria de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio (Ni-Cads) possuem inúmeras vantagens relativamente às baterias de chumbo-ácido, o que as faz atrativas para utilização em sistemas fotovoltaicos isolados. Algumas dessas vantagens são: o seu longo tempo de vida, pequena manutenção, sobrevivência a excessivas sobrecargas, excelente capacidade de retenção a baixas temperaturas e a não necessidade de

ter uma tensão de regulação de carga. As desvantagens mais críticas das baterias de níquel-cádmio são o seu elevado custo e a sua limitada utilidade comparativamente com as baterias de chumbo-ácido. Tal como as baterias de chumbo-ácido, elas também podem ser obtidas nas duas versões: standard e seladas.

3.4.2. Controladores de Carga

Quando um equipamento é ligado à bateria, a quantidade de energia elétrica armazenada nela vai diminuindo à medida que o tempo vai se passando. Para evitar que a bateria se descarregue por completo nos períodos longos sem insolação e de grande consumo, ou seja, tenha uma descarga profunda, é conveniente instalar um controlador de carga.

Este acessório monitora a carga da bateria e impede que a mesma se descarregue completamente, aumentando a sua vida útil.

Já em períodos de grande insolação e pequeno consumo de energia, a bateria tende a se carregar em excesso, aumentando a sua tensão e reduzindo a sua vida útil. O controlador de carga evita este excesso desconectando o módulo.

Os reguladores de carga podem dividir-se em 3 grandes grupos principais:

- Os reguladores séries, desconectam os painéis das baterias quando a tensão atinge um determinado valor pré-fixado, voltando a fechar o circuito após uma redução de tensão. O interruptor utilizado pode ser um dispositivo eletromecânico, como um relé, ou estático, por exemplo, um transistor.
- Os reguladores shunt (derivação), reduz continuamente a potência do módulo, a partir do momento em que é atingida a tensão máxima de carga da bateria. Neste caso, como o gerador continua a gerar energia, a corrente

é regulada e curto-circuitada através de um elemento shunt (elemento controlador). A energia não aproveitada é assim dissipada sob a forma de calor.

- Os reguladores de ponto de potência máxima (MPPT ou Maximum Power Point Tracking), dado que a tensão da bateria determina o ponto operacional da curva característica do gerador fotovoltaico, e que por esse motivo o gerador fotovoltaico raramente funciona no ponto MPP, os controladores de carga shunt e série nem sempre conseguem fazer o melhor aproveitamento da energia solar disponível. Isto pode ser evitado utilizando um sistema de rastreamento MPP, que consiste essencialmente num conversor DC/DC regulado. A regulação é executada pelo rastreador MPP, que em cada cinco minutos varre a curva característica I-V do gerador fotovoltaico e determina o ponto MPP. O conversor DC/DC é então regulado de modo a tomar a máxima potência disponível do gerador fotovoltaico, ajustando por outro lado o sinal de saída em função da tensão de carga da bateria.

A escolha da tecnologia do regulador, shunt, série ou MPPT, é feita em função da potência do sistema e do tipo de bateria a carregar. O regulador shunt que dissipa a energia dos painéis em caso de sobrecarga da bateria, está melhor adaptado aos sistemas de menor potência, enquanto o regulador série se aplica mais a sistemas de maior potência.

3.4.3. Inversores

Os conversores DC/AC são, normalmente, denominados de inversores. Eles podem ser utilizados para alimentar uma carga isolada e também para interligar um gerador fotovoltaico à rede.

O principal papel dos inversores num sistema de geração fotovoltaico é o de criar corrente AC a partir de corrente DC, visto que uma célula fotovoltaica gera corrente DC.

Para gerar esta corrente AC existe um dispositivo no inversor chamado de comutador cujo papel é o de “quebrar” a corrente continua em pulsos. Estas deformações, que são provocados na onda devido às comutações dos interruptores do inversor, podem produzir perturbações mais ou menos importantes nas células fotovoltaicas (Distorções Harmônicas).

Existem vários tipos de comutadores, entre os quais: os comutadores retificadores controlados de silício, transistores darlington, mosfet's (metal oxide semiconducting field effect transistor), IGBT's (insulated gate bipolar transistor), etc.

Os inversores podem ser divididos em três categorias:

- Onda Quadrada: uso não recomendado;
- Onda Senoidal Pura: para aplicações especiais com distorção menor que 5%. Utilizados em sistemas ligados à rede.
- Onda Senoidal Modificada: aceitável para a maioria das aplicações. Por não produzir energia com a mesma qualidade dos inversores de onda senoidal pura seu uso fica restrito aos sistemas independentes e de custo inferior.

4. Dimensionamento de um Sistema Solar Fotovoltaico para Domicílios Isolados

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para cargas isoladas requer o equilíbrio entre o consumo e a produção de energia elétrica. Já que a energia solar é uma fonte de energia limitada e aleatória, o consumo de energia elétrica, o nível de radiação e a capacidade do acumulador, devem ser calculados com rigor e equilibrados entre si.

4.1. Características da Carga

As cargas isoladas são na maioria das vezes de baixo consumo, localizadas em zonas rurais, distantes da rede de energia, apresentando características similares.

Para que o sistema seja mais eficiente é preferível que todas as cargas sejam alimentados diretamente por corrente contínua, sem a necessidade do inversor. Porém, certas cargas do tipo CC possuem custos mais elevados do que a normal (CA), para isso devemos projetar e dividir a carga em circuitos CC e CA levando em consideração a necessidade da presença mínima de iluminação e equipamentos elétricos para o conforto de uma família.

Para isso, temos:

- A captação da água em rios e riachos feito através de uma bomba d'água que pode ser do tipo CC ou CA, sendo a de corrente contínua a mais indicada pelo fato de não necessitar de um inversor;
- A iluminação feita por lâmpadas assim como a presença de uma TV como meio de lazer ambas alimentadas diretamente por corrente contínua;

- Já a geladeira, o eletrodoméstico indispensável tem que se utilizar um inversor, pois o custo de uma geladeira de corrente contínua é muito elevado;
- Os chuveiros elétricos podem ser substituídos pelos aquecedores solares.

Para um domicílio simples de uma sala, dois quartos, um banheiro e uma cozinha, temos a seguinte carga:

Consumidor	Potencia nominal em W	Nº de horas de serviço	Consumo em Wh
1 lâmpada sala	15	4	60
2 lâmpadas dos quartos	2x9 = 18	4	72
1 lâmpada banheiro	9	2	18
1 lâmpada cozinha	9	4	36
Geladeira	80	12	960
Bomba de água	60	1	60
TV	50	3	150
		Total	1356

Tabela 4-1 : Consumo diário de energia de um domicílio isolado

Os dados dos equipamentos foram obtidos através do site do PROCEL (<http://www.eletronbras.gov.br/procel/>) e em sites de vendas na internet, como o Ponto Frio (<http://www.pontofrio.com.br>).

4.2. Quantidade de Radiação Solar

A quantidade de radiação solar varia com a movimentação do Sol em relação à Terra. Conforme as estações do ano temos os dados de posicionamento do Sol e com este posicionamento podemos obter o nível médio de radiação no local.

A potência apresentada nos painéis fotovoltaicos é referenciada em um nível de radiação de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Este valor pode ser maior ou menor dependendo da localização geográfica.

O nível médio de radiação local pode ser obtido através de instrumentos específicos ou obtidos através de programas computacionais como o RADIASOL, desenvolvido pela UFRGS.

Utilizando o software RADIASOL(disponível para *download* na página da internet <http://www.ufrgs.br>),temos um exemplo para a cidade do Rio de Janeiro. Considerando-se uma inclinação de valor igual à latitude local, ou seja, de 22° , podemos obter a radiação para cada mês do ano expressos em Wh/m^2 , mostrada na Tabela 4-2.

Hora	Radiações Solares Horárias Mensais (Wh/m ²)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
0:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:30	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	17	3
6:30	125	101	69	27	0	0	0	16	43	79	108	125	58
7:30	274	257	225	158	139	105	137	155	172	215	245	265	196
8:30	438	434	412	320	319	260	325	332	326	372	397	418	363
9:30	581	590	584	482	504	427	519	511	477	515	531	551	523
10:30	677	695	701	600	644	559	666	643	583	612	623	642	637
11:30	729	750	759	658	716	628	742	709	635	662	671	690	696
12:30	729	750	759	658	716	628	742	709	635	662	671	690	696
13:30	677	695	701	600	644	559	666	643	583	612	623	642	637
14:30	581	590	584	482	504	427	519	511	477	515	531	551	523
15:30	438	434	412	320	319	260	325	332	326	372	397	418	363
16:30	274	257	225	158	139	105	137	155	172	215	245	265	196
17:30	125	101	69	27	0	0	0	16	43	79	108	125	58
18:30	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	17	3
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	5.670	5.654	5.500	4.490	4.644	3.958	4.778	4.732	4.472	4.910	5.154	5.416	4.948

Tabela 4-2 : Radiações solares horárias para o período de um ano

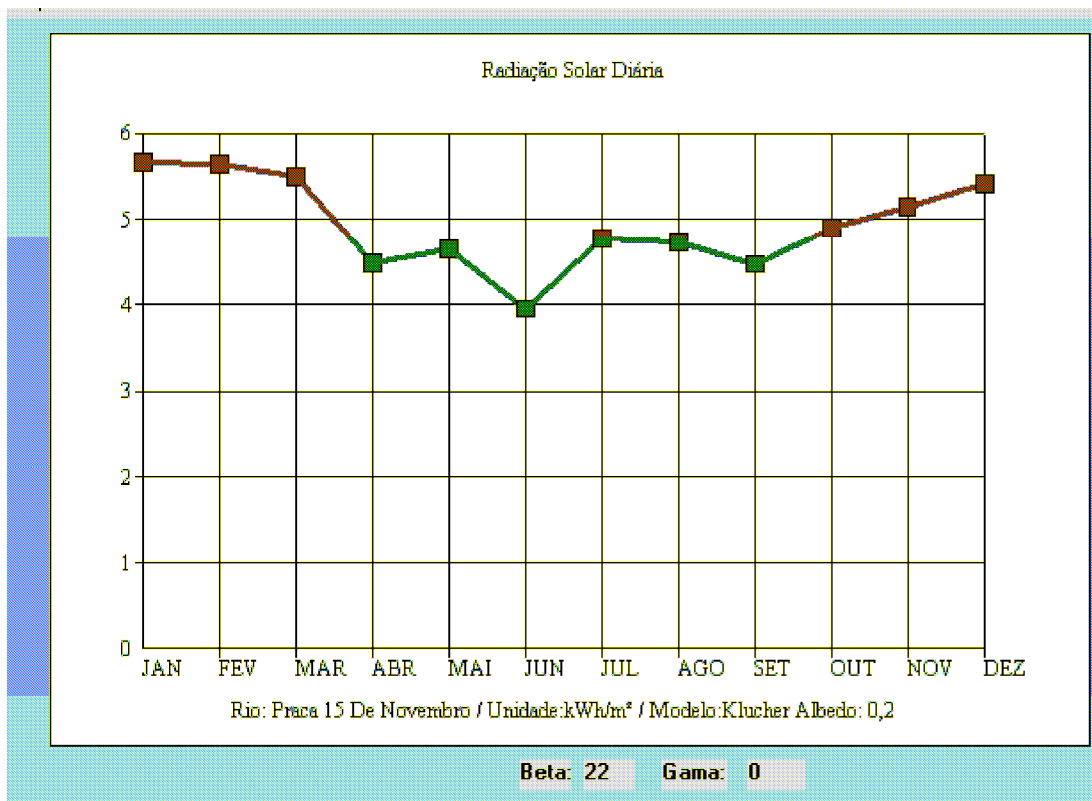


Figura 4-1 : Radiações solares para o período de um ano na cidade do Rio de Janeiro (Fonte: programa RADIASOL)

4.3. Dimensionamento do Acumulador

Para dimensionamento do acumulador, devemos levar em consideração o número de dias de reserva, em caso que tenhamos condições de pouca irradiação solar e a capacidade da bateria para uma descarga profunda sempre inferior a 50% da capacidade nominal da mesma (PRINCON, 2004).

Desta maneira devemos selecionar um acumulador com uma capacidade igual ao dobro da capacidade calculada a partir dos valores de consumo, vezes o número de dias de reserva necessário dividido pela tensão do sistema.

$$\Rightarrow C = \frac{2 * W * DIASRESERVA}{V}$$

Para um consumo de 1.356 Wh e 1 dia de autonomia, temos :

$$\Rightarrow C = \frac{2 * 1356 * 1}{12}$$

$$C = 226Ah$$

Para uma bateria de chumbo ácido de descarga profunda de 115 Ah, são necessário 2 baterias ligadas em paralelo para suprir esta carga.

4.4. Dimensionamento do Gerador

Existem varias maneiras de se dimensionar um gerador solar. Aqui apresentaremos o dimensionamento através da corrente requerida pela carga e pela bateria. Para isso é necessário que se leve em consideração o rendimento do conversor e as perdas do sistema (PRINCON, 2004).

$$\Rightarrow Ah = Ahcarga + Ahbateria$$

$$\Rightarrow Ah = \frac{W}{V * RENDCONV * FATPERDAS} + Ahbateria$$

Onde:

Ah – ampéres-hora;

W – potência consumida-hora;

V – tensão do sistema(12V ou 24V);

RENDCONV – rendimento do conversor;

FATPERDAS – fator de perdas.

Para um consumo de 1.356 Wh, banco de baterias de 226 Ah, rendimento do conversor de 0,9, perdas no sistema de 0,9 e tempo médio de insolação de 6 horas-dia, temos:

$$\Rightarrow Ah = \frac{1.356}{12 * 0,9 * 0,9} + 226$$

$$Ah = 356,5Ah$$

O resultado deve ser dividido pelo tempo médio de insolação local.

$$\Rightarrow A = \frac{356,5}{6}$$

$$A = 60A$$

Para um módulo de corrente nominal de 4 A são necessário 15 módulos fotovoltaicos para suprir este sistema.

4.5. Dimensionamento do Controlador

O controlador de carga é definido pela tensão de trabalho dos módulos e corrente. A sua capacidade deve superar a corrente total dos painéis a serem conectados. Caso a corrente supere o valor do controlador, deve ser considerada a possibilidade de dividir a instalação (PRINCON, 2004).

Para o valor calculado de corrente requirida pela carga e pela bateria de 60A no dimensionamento do gerador, o controlador de carga deve ter capacidade superior a esta corrente, logo será necessário um controlador de 70 A.

4.6. Dimensionamento do Inversor

Os Inversores possuem um fator de eficiência ou potência (FP) que é dado em proporção à perda do próprio circuito. Deve ser calculado o consumo em W e comparado com a capacidade REAL do inversor (Capacidade em W x FP). O inversor deve ter capacidade superior ao consumo (PRINCON, 2004).

Para uma geladeira de consumo de 80 W e rendimento do inversor de 0,9, um inversor de 100 W já seria adequado, pois teríamos um inversor de potência real de 90 W.

5. Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar

Para o dimensionamento do sistema de aquecimento solar é necessário que se conheça as características técnicas dos coletores solares e dos demais acessórios do sistema, as características de consumo, assim como as condições climáticas do local de instalação (QUINTEROS, 2000).

Podemos determinar a quantidade de energia utilizada diariamente pela equação:

$$\Rightarrow Q = P * L * r * c * (T_f - T_i)$$

onde:

Q é a quantidade de calor necessária ao sistema, Wh/dia;

P é o número de pessoas que utilizarão a água quente;

L é a quantidade de litros consumidos por pessoa por dia (p.ex: 50 a 100 litros);

r é a massa específica da água (1,0 kg/l);

c é o calor específico da água (1,1639 Wh/kg °C);

T_f é a temperatura final desejada da água, °C;

T_i é a temperatura inicial da água, °C.

Igualando Q ao ganho de energia, Q_s, que representa a diferença entre a radiação solar absorvida e as perdas térmicas no coletor, podemos dimensionar o sistema de aquecimento solar.

$$\Rightarrow Q_s = A_c * F_r * \Delta t * [S - U_L * (T_{mp} - T_A)]$$

onde:

Qs é o ganho de energia solar, Wh/dia;

Ac é a área total da placa coletora, m²;

Fr é o fator de remoção de calor do coletor solar (~0,6 a 0,8);

Δt é o período de tempo de radiação solar considerado, horas por dia;

S é a radiação solar absorvida por unidade de área de placa absorvedora (W/m²);

UL é o coeficiente global de transferência de calor entre a placa absorvedora e o ambiente, W/m² °C (~2 a 8);

Tmp é a temperatura média da placa absorvedora, °C;

TA é a temperatura ambiente nas vizinhanças do tanque, °C.

A maioria dos sistemas de aquecimento solar possui reservatório de 200 a 600 litros de água aquecida, utilizando placas de 2 a 10m².

Para residências isoladas onde o consumo de água é considerado baixo, utilizam-se placas coletoras populares e econômicas com presos acessíveis as condições da população.

6. Custos

Para o dimensionamento do sistema solar fotovoltaico isolado de consumo de 1.356Wh por dia, obtivemos os seguintes equipamentos (quantidade e modelo) com seus respectivos custos mostrado na Tabela 6-1.

Equipamento	Quantidade	Modelo	Custo Unitário	Total
Painel Fotovoltaico	15	Policristalino S-50	R\$ 1.127	R\$ 16.905
Bateria	2	Descarga Profunda 115 Ah	R\$ 534	R\$ 1.068
Controlador de Carga	1	SR70 - 70A	R\$ 1.000	R\$ 1.000
Inversor	1	Xantrex 12Vdc x 115 Vac (100 W)	R\$ 343	R\$ 343
Total				R\$ 19.316

Tabela 6-1 : Custos de um sistema solar fotovoltaico de um domicílio Isolado

Além do custo inicial total de R\$ 19.316 deve ser levada em consideração também à vida útil dos equipamentos que necessitam de reposição. Os painéis solares possuem vida útil de 30 anos, as baterias duram em média 5 anos e de 10 anos para os controladores e inversores segundo os fabricantes.

Porém não há nenhum tipo de consumo de combustível e sua manutenção é quase zero.

Para o sistema de aquecimento na substituição do chuveiro elétrico temos coletores solares populares com preços de R\$ 300.

7. Eletrificação Convencional (Extensão de Rede)

Como a maioria das cargas isoladas se caracterizam como de baixo consumo e baixa renda sem perspectiva de aumento da demanda de consumo, são utilizados linhas de distribuição monofásica com retorno pela terra (MRT – alumínio).

A Tabela 7-1 mostra os custos da eletrificação convencional em função do número de domicílios a serem atendidos e da distância à rede elétrica.

Número de Domicílios	Distância (km)						
	0,5	1	2	5	8	9	10
1	2,964.89	4,644.69	7,971.42	17,951.59	27,931.76	31,258.48	34,585.21
5	1,614.71	2,459.62	4,644.69	9,634.78	14,624.87	16,288.23	17,951.59
10	647.92	815.91	1,148.58	2,459.62	3,770.66	4,207.68	4,644.69
15	593.02	705.01	926.80	1,731.26	2,605.29	2,896.63	3,187.98
20	565.58	649.57	815.91	1,367.08	2,022.60	2,241.11	2,459.62
30	538.12	594.12	705.01	1,037.69	1,439.91	1,585.59	1,731.26
50	516.16	549.76	616.30	815.91	1,017.19	1,082.04	1,148.58

Valores em dólar

FONTE: (NAPER, 2006)

Tabela 7-1 : custo da eletrificação em função do número de domicílios e distância da rede elétrica

NOTA: NAPER (Núcleo de Apoio a Projeto de Energias Renováveis) da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE foi criado no final de 1995 por pesquisadores e técnicos da Universidade e educadores ligados a organizações Não-Governamentais - ONG's. Sua missão é incentivar e apoiar a disseminação do uso de energia solar nas áreas rurais do Nordeste brasileiro, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável da Região.

Podemos observar que quanto maior for o comprimento de rede e menor o número de domicílios atendidos temos uma elevação no custo da eletrificação convencional (extensão de rede).

Para uma cotação do dólar a R\$ 2,00, podemos verificar também que para o custo de investimento inicial de um sistema solar fotovoltaico de R\$ 19.316 calculado para um domicílio se tornar economicamente viável, segundo a Tabela, devemos ter uma distância igual ou superior a 5 Km da rede de energia elétrica.

8. Desenvolvimento Sustentável

O desenvolvimento sustentável, que se caracteriza pelo equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, tem o Protocolo de Kioto como um dos tratados mais importantes.

Ele visa estabelecer metas de redução na emissão de gases-estufa na atmosfera, principalmente por parte dos países industrializados, além de criar formas de desenvolvimento de maneira menos impactante àqueles países em pleno desenvolvimento.

Dentre as soluções para a redução de gases estufas temos a criação dos créditos de carbonos que são utilizados como moeda de troca pelos países industrializados investindo em fontes de energia não poluidoras em países em desenvolvimento, tendo a energia solar como uma das grandes soluções.

9. Programas de Incentivo

Os programas de incentivo são muito importantes para a disseminação da energia solar no país. Dentre elas, temos:

O Prodeem, que é o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios concebido e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, que visa levar energia elétrica às comunidades rurais desassistidas, utilizando recursos naturais, renováveis e não poluentes, disponíveis nas próprias localidades. Dentre as vantagens dessa iniciativa devem ser destacados o desenvolvimento social e econômico de áreas rurais, com impactos diretos no nível de emprego e a consequente redução dos ciclos migratórios em direção aos centros urbanos.

O Luz para Todos coordenado pelo Ministério de Minas e Energia com participação da Eletrobrás e de suas empresas controladas, que tem como objetivo levar energia elétrica para a população do meio rural para que elas utilizem como vetor de desenvolvimento social e econômico, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda família, onde o programa contempla o atendimento das demandas no meio rural através de uma das 03 (três) alternativas:

- Extensão de Rede
- Sistemas de Geração Descentralizada com Redes Isoladas
- Sistemas de Geração Individuais

10. Conclusão

Para o valor do custo de investimento inicial calculado para um domicílio isolado de R\$ 19.316 atendido por energia solar ser viável devem ser levados em consideração aspectos sociais, técnicos, ambientais e econômicos.

No caso em que a distância da rede seja muito grande e o número de domicílios atendidos seja pequena, a utilização da energia solar se torna economicamente viável.

Podemos ter também uma redução de cargas projetada para os consumidores, reduzindo assim os custo de investimento inicial.

No caso em que por questões técnicas e ambientais, locais de difícil acesso, terrenos irregulares, reservas ambientais, grande dispersão de residências, a necessidade de utilização de fontes não poluidoras a energia solar se torna viável.

No caso em que por questões sociais, locais de grande pobreza, carentes, distantes dos centros urbanos, onde há o apoio de programas de incentivo de fontes alternativas pode-se tornar viável a utilização da energia solar.

Concluindo, podemos dizer que a utilização da energia solar em regiões isoladas pode ser bastante viável quando levado em consideração os vários aspectos de interesse que envolve a sua aplicação.

Bibliografia

- [1] CEPEL, 2004, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Edição Especial PRC-PRODEEM ed. Rio de Janeiro: CRESESB.
- [2] QUINTEROS, ANDRÉ RICARDO, “Aquecimento de Água por Energia Solar”, Tecnólogo Mecânico, Professor do CEFET-SP SOLETROL. *Aquecedores Solares*. 2000. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico. 1969
- [3] MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., SILVA, S. A. B. et al., 2008, "Solar Energy Scenarios in Brazil, Part One: Resource Assessment", *Energy Policy*, n. 36, (Abril, 2008), p. 2843, pp. 12.
- [4] INPE, 2006, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos.
- [5] PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. São Paulo: Hemus, 1981. 358 p
Da Cunha, José Luiz A., *Eletrificação de Edificações Rurais Isoladas*, Minas Gerais, 2006. 53p
- [6] UFRGS, 2008, *RADIUSOL*. Software, Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/#radiusol>
- [7] PRINCON – Energia Fotovoltaica – “Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalações”, Portugal 2004 – Programa ALTENER
- [8] CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2008, *Energia Solar – Princípios e Aplicações*, Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/Publicacoes/download/Direng>
- [9] Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2008, *Programa Luz para Todos*, Disponível em : <http://www.eletobras.gov.br/>
- [10] NAPER – Núcleo de Apoio a Projetos de Energias Renováveis, 2008, *Análise Econômica Comparativa entre Diferentes Opções para a Eletrificação Domiciliar Rural*, Disponível em : <http://www.ufpe.br/naper/>
- [11] WWF – Brasil, *Desenvolvimento Sustentável*, Disponível em : http://www.wwf.org.br/informacoes/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/ - 14k -