



FELIPE TOZZI BITTENCOURT

**ESTUDO COMPARATIVO DO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA EM RELAÇÃO À REDE DE
DISTRIBUIÇÃO NA ELETRIFICAÇÃO RURAL
DO ESTADO DE TOCANTINS**

LAVRAS - MG

2011

FELIPE TOZZI BITTENCOURT

**ESTUDO COMPARATIVO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA EM RELAÇÃO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO
NA ELETRIFICAÇÃO RURAL DO ESTADO DE TOCANTINS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Formas alternativas de energia, para a obtenção do título de Especialista em Formas alternativas de energia.

Orientador

Prof. Carlos Alberto Alvarenga

LAVRAS – MG

2011

FELIPE TOZZI BITTENCOURT

**ESTUDO COMPARATIVO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA
SOLAR FOTOVOLTAICA EM RELAÇÃO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO
NA ELETRIFICAÇÃO RURAL DO ESTADO DE TOCANTINS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Formas alternativas de energia, para a obtenção do título de Especialista em Formas alternativas de energia.

APROVADA em 07 de julho de 2011.

Prof. Gilmar Tavares

Prof. Vitor Hugo Teixeira

Prof. Luciano Mendes dos Santos

Prof. Carlos Alberto Alvarenga
Orientador

LAVRAS – MG

2011

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida e para realização desta pós-graduação *lato sensu*.

A FAEPE - Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Lavras pelo apoio dedicado aos alunos.

Ao Professor Carlos Alberto Alvarenga pela orientação e dedicação ao meu trabalho de conclusão de curso.

Ao pessoal da Turma de FAE – 1/2010.

*"O uso da energia solar não decolou porque a indústria do
petróleo não possui o sol."*

Ralph Nader

RESUMO

Neste trabalho foram realizados estudos sobre energia renovável e não renovável que poderão ser utilizados para a alimentação de rede elétrica em comunidades da Amazônia (Tocantins) não atendidas pela rede elétrica convencional. A fonte de energia renovável que foi estudada foi o Sistema Fotovoltaico (SFV), e comparou-se o resultado com a construção de RDR (Rede de Distribuição Rural 7,9kV) que é a mais praticada no estado do Tocantins, e verificou-se que a energia através de SFV já é competitiva em relação às construções de RDR's.

Palavras Chaves: Paineis Fotovoltaicos. RDR (Rede de distribuição Rural). Sol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 Gráfico da Potência X tensão	25
Figura 1 Célula solar fotovoltaica.....	16
Figura 2 Característica I-V de uma célula fotovoltaica.....	24
Figura 3 Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura ...	26
Figura 4 Dependência da característica potência x tensão com a temperatura ...	27
Figura 5 Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação.....	28
Figura 6 Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação	29
Figura 7 Célula, módulo e conjunto fotovoltaico.....	30
Figura 8 Ilustração de uma bateria.....	32
Figura 9 Efeito da temperatura em relação à capacidade da bateria.	34
Figura 10 Efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria.....	35
Figura 11 Número de ciclos em função da profundidade de descarga	36
Figura 12 Sistema Fotovoltaico	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Radiação solar na cidade de Porto Nacional.....	39
Tabela 2 Cargas.....	41
Tabela 3 Preço equipamentos	44
Tabela 4 Preço dos serviços.....	46
Tabela 5 Preço dos materiais	47
Tabela 6 Custo da rede por km	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Tema da Pesquisa.....	10
1.2	Problema	11
1.3	Hipótese.....	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1	Energia Solar Fotovoltaica	15
4.1.1	Tecnologias Disponíveis	17
4.1.1.1	Silício cristalino (c-Si).....	19
4.1.1.2	Silício amorfo hidrogenado (a-Si).....	20
4.1.1.3	Telureto de Cadmio (CdTe)	22
4.1.1.4	Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).....	23
4.1.2	Característica de corrente X tensão e desempenho da célula fotovoltaica.....	23
4.1.3	Parâmetros que influenciam o comportamento básico das células fotovoltaicas	25
4.1.3.1	Influência da Temperatura	25
4.1.3.2	Influência da Intensidade da Radiação Solar	28
4.1.4	O módulo fotovoltaico.....	29
4.1.5	Principais Aplicações dos Sistemas Fotovoltaicos	31
4.2	Baterias	31
4.2.1	Efeitos que alteram o rendimento das Baterias	34
4.3	Rede de distribuição Rural.....	36
5	MÉTODO DA PESQUISA	37
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1	Dimensionamento de Sistemas com Painéis Fotovoltaicos e seus custos.....	38
6.2	Custos de uma RDR de 7,9kV (MRT)	45
6.3	Análise dos Resultados Obtidos.....	48
7	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é uma das formas de energia mais versáteis e que melhor se adaptam às necessidades da civilização no mundo atual. A sua utilização está tão popularizada que dificilmente se concebe uma sociedade tecnologicamente avançada que não faça o seu uso em larga escala. Pode-se dizer que todo o parque tecnológico, com exceção feita em grande medida ao transporte, está baseado na eletricidade. No contexto mundial, a estrutura energética atual de geração de eletricidade está essencialmente baseada no consumo massivo de combustíveis não renováveis, o que conduz, inevitavelmente, a um esgotamento das reservas e supõe uma ameaça real ao meio ambiente, que se manifesta principalmente através da acidificação do ciclo da água, do provável aquecimento global do Planeta e de outros problemas relacionados à saúde dos seres vivos. No caso brasileiro, a situação é menos preocupante devido ao peso da hidroeletricidade na matriz energética nacional, que é de cerca de 90%. Por outro lado, os grandes empreendimentos hidroelétricos têm provocado enormes transtornos ambientais tanto no alagamento de terras como também com as linhas de transmissão e de distribuição, com conseqüências devastadoras para as populações atingidas, provocando perdas patrimoniais, culturais, de identidade e a própria desestruturação das comunidades.

Ao considerarmos os fins para os quais muitos dos grandes empreendimentos hidroelétricos foram construídos, observa-se as gritantes contradições de um país que não distribui suas riquezas, pois há no Brasil inúmeros casos nos quais as linhas de transmissão passam por centenas de quilômetros de terras habitadas onde seus moradores não têm eletricidade em suas propriedades. Estes são alguns dos problemas que tornam questionável a eficácia do sistema energético atual, sob a ótica do desenvolvimento sustentável com justiça social. Outro problema relacionado com o acesso a energia elétrica

está é decorrente das grandes distâncias existentes no território nacional. Os altos custos de distribuição, aliados muitas vezes ao baixo consumo por ligação em comunidades isoladas, tornam estas populações pouco atraentes aos investimentos privados. Por outro lado, a baixa representação política destes grupos dificulta o atendimento de suas reivindicações no sentido de que sejam alvos de investimentos sociais. Assim, tanto no Brasil como no mundo atual, há uma acentuada necessidade de “saldar um débito social” e solucionar muitos dos problemas de um grande contingente de desfavorecidos que vivem, de alguma forma, isolados e sem acesso à energia elétrica. A carência energética atinge também a saúde destas populações no que se refere ao acesso à água para consumo em maior quantidade e principalmente de melhor qualidade.

O Governo Federal, através do Programa Luz Para Todos, aparentemente vem tentando suprir este déficit social. No Estado do Tocantins, apesar de se estar investindo demasiadamente na rede elétrica convencional, não se observa a preocupação com a implementação de alternativas que impactem menos o meio ambiente e que sejam mais viáveis economicamente (não necessitando a construção de enormes redes de distribuição rural).

Em vista disso, torna-se necessário buscar soluções energéticas de geração autônoma para as populações isoladas, como as solares fotovoltaicas com armazenagem através de baterias, o que possivelmente possibilitaria o acesso à energia elétrica a toda a população, indistintamente de sua condição econômica ou localização geográfica.

1.1 Tema da Pesquisa

Estudo sobre as possibilidades de implantação de sistema Fotovoltaico/Bateria em regiões isoladas eletricamente do Tocantins por meio de simulações e de comparações dos resultados com os custos médios que são

necessários para se levar energia pelo método convencional (RDR), adotado atualmente pelo programa Luz Para Todos.

1.2 Problema

Com a implementação, feita pelo Governo Federal, do Programa Luz Para Todos, que visa a atender comunidades rurais isoladas eletricamente do sistema, observa-se o surgimento de gastos elevados em construções de novas redes de distribuição de energia elétrica, porém em alguns casos pode ocorrer em que o tamanho da extensão da rede pode ser grande, inviabilizando em termos financeiros a empreitada. Todavia, existem algumas soluções alternativas para se atender eletricamente estas comunidades mais distantes de redes existentes, como por exemplo, energia solar fotovoltaica, energia eólica, geradores a diesel, entre outros.

Como no Tocantins a ocorrência de ventos com frequência não é constante e a velocidade em média é pequena, descartaremos o estudo da energia eólica. Isso em virtude do alto custo dos geradores e motores de combustão, já que as comunidades eventualmente beneficiadas se localizam longe de centros urbanos, o que torna inviável a logística de fornecimento de combustível. Uma das alternativas que poderá ser viável tecnicamente e economicamente é a solar fotovoltaica, pois o Tocantins é um Estado que fica em zona tropical, o que acarreta maiores índices de insolação, outro benefício em que a Energia solar oferece é o não pagamento da conta de energia.

1.3 Hipótese

Sistemas Fotovoltaicos de energia, por serem autônomos, dispensam a construção de novas redes de distribuição rural, o que, em um dimensionamento

correto, poderá ser competitivo economicamente com as construções de novas RDR's.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar por, meio de simulações, as possibilidades técnicas e econômicas para implantação de sistemas fotovoltaicos em locais isolados da rede elétrica convencional, em comparação com a implantação da rede de distribuição rural.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise sobre energia solar fotovoltaica e RDR Rede de distribuição Rural;
- Estudar os componentes básicos de um sistema Fotovoltaico (Gerador Fotovoltaico, Controlador de carga, Bateria, Inversor de Frequência);
- Simular um sistema fotovoltaico e uma obra de Rede de distribuição Rural, comparando os resultados técnicos e econômicos, para averiguar qual é mais viável.

3 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica, por propor achar soluções energéticas para comunidades eletricamente isoladas, através de em um estudo comparativo entre energia fotovoltaica e os custos de uma obra de rede de distribuição mais os custos relativos à tarifa de energia elétrica.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Energia Solar Fotovoltaica

Os módulos fotovoltaicos são compostos de células fabricadas de silício, material caracterizado como semicondutor. Excetuando-se o hidrogênio, o silício é o elemento mais frequentemente encontrado na natureza, correspondendo em peso a aproximadamente 25% da crosta terrestre. Na forma natural, é encontrado em rochas e em minérios (quartzo, feldspato e mica). A areia é composta em parte por silício (SCHMIDT, 1983).

Através de métodos adequados, obtém-se o silício com alto grau de pureza de forma cristalino ou amorfo. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, é um mal condutor elétrico. Para alterar isso, acrescentam-se percentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. Mediante a dopagem do silício com o fósforo, obtém-se um material com elétrons livres, ou materiais com portadores de cargas negativas (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas acrescentando Boro ao em vez de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, com déficit de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

Cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (Figura 1). Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas, ao serem unidas, exatamente na união P-N, gera-se um campo elétrico devido aos elétrons do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P.

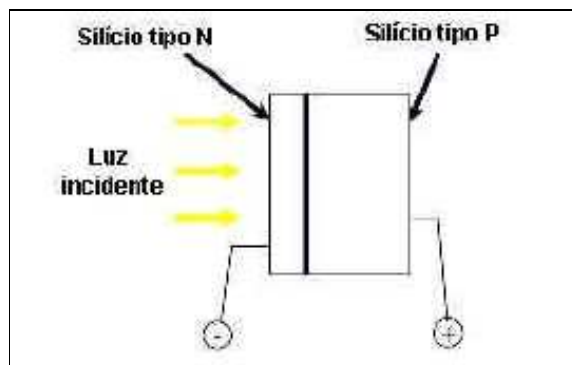


Figura 1 Célula solar fotovoltaica
Fonte: Lorenzo (1994)

Ao incidir a luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons que a integram chocam-se com os elétrons da estrutura do silício dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na união P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada "P" para a camada "N". Por meio de um condutor externo, liga-se a camada negativa à positiva. Gera-se assim um fluxo de elétrons (corrente elétrica) na ligação. Enquanto a luz continua a incidir na célula, o fluxo de elétrons manter-se-á. A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente. Cada módulo fotovoltaico é formado por uma determinada quantidade de células ligadas em série. Como se viu anteriormente, ao unir-se a camada negativa de uma célula com a positiva da seguinte, os elétrons fluem através dos condutores de uma célula para a outra. Este fluxo repete-se até chegar à última célula do módulo, da qual fluem para a carga ou para um acumulador de energia (bateria). Cada elétron que abandona o módulo é substituído por outro que regressa do acumulador ou da bateria. O cabo da interligação entre módulo e carga ou bateria, contém o fluxo, de modo que quando um elétron abandona a última célula do módulo e, se encaminha para a carga, outro elétron entra na primeira célula a partir da bateria. É por isso que se considera inesgotável um

dispositivo fotovoltaico, que produz energia elétrica em resposta à energia luminosa que entra no mesmo.

Deve-se esclarecer que uma célula fotovoltaica não pode armazenar energia elétrica.

4.1.1 Tecnologias Disponíveis

Em termos de aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se, por ordem decrescente de maturidade e utilização: o silício cristalino c-Si, o silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si, o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e ao índio CuInSe₂ ou CIS. Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, In, Cd), ou ambos, o que inicialmente se mostrou um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias. Com relação à toxicidade, convém mencionar que lâmpadas fluorescentes – que contêm mercúrio - e telas de computador – que contêm chumbo, são classificadas da mesma maneira. O descarte desse material deve ser feito de forma apropriada, o que também deverá ocorrer com painéis solares de CdTe e CIS. O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25 % da crosta terrestre é formada por silício) e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima (RÜTHER, 1993).

A tecnologia fotovoltaica baseada no c-Si é a mais tradicional e a única, dentre as mencionadas acima, que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro 10cm) relativamente espessas (espessura 300 - 400µm), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura

da ordem de 1µm) de material ativo semicondutor, e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm. Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a geração de potência elétrica, o que ocorre por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, pelas pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção e pelo elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e pelo seu baixo custo de capital (RÜTHER, 1993). Devido ao fato de que a luz solar contém relativamente pouca energia se comparada a outras fontes energéticas, painéis solares fotovoltaicos têm de ter um baixo custo para poder produzir energia elétrica a preços competitivos.

A eficiência do processo de fotossíntese, no qual toda a vida em nosso planeta está baseada, é da ordem de 0.2% em média. Em termos de eficiência de conversão fotovoltaica, a tecnologia do c-Si é, entre as tecnologias utilizadas em aplicações terrestres para gerar potência elétrica, a que apresenta a maior eficiência, ao redor de 15% para painéis disponíveis no mercado. As tecnologias de filmes finos, por serem inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, apresentam, na atualidade, um rendimento ao redor de 8% para painéis comerciais, o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos painéis de c-Si. Apesar de que painéis solares de filmes finos têm já hoje um preço menor por Wp (ou seja, \$/potência, ou \$/energia) que os de c-Si, a área ocupada para uma determinada potência instalada deve ser levada em consideração na análise econômica quando da opção por uma ou outra tecnologia fotovoltaica. As principais características de cada uma destas tecnologias serão abordadas a seguir (RÜTHER, 1993).

4.1.1.1 Silício cristalino (c-Si)

A mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção a nível comercial, o c-Si (figura 2) se consolidou no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade. O custo de produção destes painéis solares é, no entanto, bastante elevado, como mostraremos a seguir, e as possibilidades de reduzi-lo já foram praticamente esgotadas, razão pela qual esta tecnologia é desconsiderada por muitos analistas como séria competidora com formas convencionais de geração de potência em larga escala. O c-Si segue sendo, no entanto, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala.

No caso de células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si), o monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora), sendo que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400 °C. Nesse processo, o consumo de energia é extremamente intenso e o chamado “*energy pay-back time*” (tempo necessário para que o painel gere energia equivalente à utilizada em sua fabricação) é superior a três anos. Etapas complementares ao crescimento do monocristal envolvem usinagem do tarugo; corte de lâminas por serras diamantadas; lapidação, ataque químico e polimento destas lâminas (processos estes todos em que ocorrem consideráveis perdas de material); processos de difusão/dopagem, deposição da máscara condutora da eletricidade gerada e finalmente a interconexão de células em série para a obtenção do painel fotovoltaico.

O recorde de eficiência para células de c-Si individuais em laboratório é atualmente de 24%, bastante próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado, porém, têm eficiência ao redor de

15% (diferenças entre a eficiência da melhor célula de laboratório e painéis comerciais incluem perdas de interconexão entre células no painel, área ativa do painel e rendimento do processo produtivo). O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, tendo também um mais baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do c-Si e o processamento mais simples. O material de partida é o usado para o m-Si, que é fundido e, posteriormente, solidificado direcionalmente, o que resulta num cristal com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica. Os processamentos posteriores até se obter um painel fotovoltaico são semelhantes aos utilizados no caso do m-Si.

Em termos de custo final por potência (\$/Wp), no entanto, a diferença entre p-Si e c-Si é pouco significativa.

4.1.1.2 Silício amorfo hidrogenado (a-Si)

No início dos anos 80, o a-Si era visto como a única tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas) comercialmente viável, tendo sido pela primeira vez empregada em células solares em meados da década de 70, imediatamente despontou como tecnologia ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo. Por apresentar uma resposta espectral mais voltada para o azul, tais células se mostraram extremamente eficientes sob a iluminação artificial (principalmente sob lâmpadas fluorescentes), com eficiência nestes casos superior à do c-Si.

Os processos de produção de a-Si ocorrem a temperaturas relativamente baixas (<300°C), em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Desta forma, foram desenvolvidos painéis solares hoje

disponíveis no mercado que são flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, com superfícies curvas e que estão ampliando o mercado fotovoltaico por apresentarem maior versatilidade. Por sua aparência estética mais atraente, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil (RÜTHER, 1993).

O recorde de eficiência em células de a-Si individuais em laboratório é inferior a 15% e os melhores painéis de a-Si disponíveis no mercado estão na faixa de 8-9%. Em algumas aplicações arquitetônicas como materiais de revestimento é que o a-Si leva grande vantagem sobre o c-Si, pois o custo por m² - e não o custo por Wp - é a grandeza de interesse e, neste aspecto, já hoje o a-Si tem custo inferior à metade do custo do c-Si. O a-Si apresenta uma característica que a princípio se mostrou uma limitação para esta tecnologia. Painéis de a-Si sofrem um decréscimo intrínseco mas reversível no seu desempenho e que se estabiliza após um declínio em eficiência de 15 a 20%, o que é o chamado efeito Staebler-Wronski. Em termos práticos, no entanto, esta diminuição de rendimento é assumida pelo fabricante, que já na especificação do painel inclui a margem de degradação. Desta forma, logo que adquirido, um painel solar de a-Si apresenta um desempenho superior à especificada para o produto. Após aproximadamente um ano em operação é que a performance estabiliza nos níveis da garantia do produto (RÜTHER, 1993).

O “*energy pay-back time*” para o a-Si é outro atrativo desta tecnologia e está em torno de um ano (devido principalmente à energia utilizada na fabricação do substrato de vidro, ou aço inox), consideravelmente menor que o do c-Si.

4.1.1.3 Telureto de Cadmio (CdTe)

O mais recente competidor do c-Si e a-Si no mercado fotovoltaico para geração de potência é o CdTe, também na forma de filmes finos. Para aplicações em calculadoras este material já vem sendo usado há quase uma década, mas nas chamadas “aplicações terrestres” somente agora é que começam a ser comercializados painéis solares de grandes áreas (o maior disponível no momento tem uma área de $\sim 0,67 \text{ m}^2$). Estes painéis, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro, também apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si e as empresas envolvidas com esta tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas como um nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliam seus volumes de produção e reduzem custos (RÜTHER, 1993).

Assim como no caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala, e esta tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção (RÜTHER, 1993).

Com o recorde de eficiência de células individuais de pequenas áreas em laboratório ao redor de 16%, painéis solares encontrados no mercado internacional apresentam eficiência entre 7 e 9%.

4.1.1.4 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

Outro sério competidor no mercado fotovoltaico no futuro próximo são os compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CuInSe_2 , ou simplesmente CIS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas.

Células de CIS de pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiências em torno dos 18%. Painéis de grande área (atualmente em escala piloto com $\sim 0.38 \text{ m}^2$) devem estar disponíveis no mercado dentro em breve (depois de vários anos de pesquisa e desenvolvimento), com eficiências ao redor de 9 – 10% inicialmente (RÜTHER, 1993).

Painéis solares de CIS apresentam, como o a-Si e o CdTe, uma ótima aparência estética e devem surgir no mercado com grandes superfícies, já que encontram aplicações arquitetônicas diversas. Assim como no caso do CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção (RÜTHER, 1993).

4.1.2 Característica de corrente X tensão e desempenho da célula fotovoltaica

A característica corrente X tensão ($I \times V$) de uma célula fotovoltaica tem a forma padrão mostrada na figura 2.

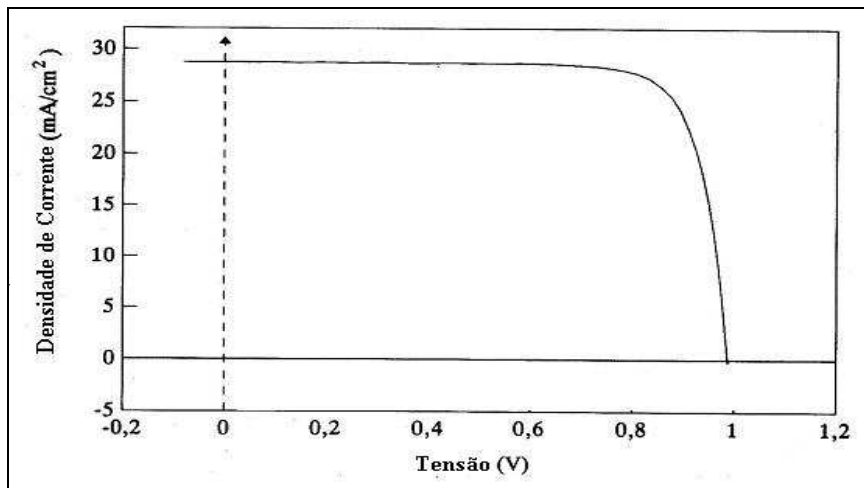


Figura 2 Característica I-V de uma célula fotovoltaica
Fonte: Lorenzo (1994)

Como se pode observar na figura 2, o maior valor da corrente de geração se obtém para condições de curto-circuito, ou $V = 0$.

Se o dispositivo se mantém em circuito aberto ($I = 0$), este se auto-polarizará com uma certa tensão. Trata-se da tensão de circuito aberto V_{OC} e seu valor é tal que a fotocorrente fica apenas como a corrente de polarização (LORENZO, 1994).

Como já dito anteriormente, a região da curva característica compreendida entre I_{SC} e V_{OC} corresponde ao funcionamento da célula como gerador. Se a energia é fornecida a uma carga, como é mostrada na figura 3, a potência fornecida é dada pelo produto $P = VI$, e existirá um ponto de funcionamento (I_M , V_M) em que a potência será máxima, o qual é denominado ponto de potência máxima, como mostra a figura 3 (LORENZO, 1994).

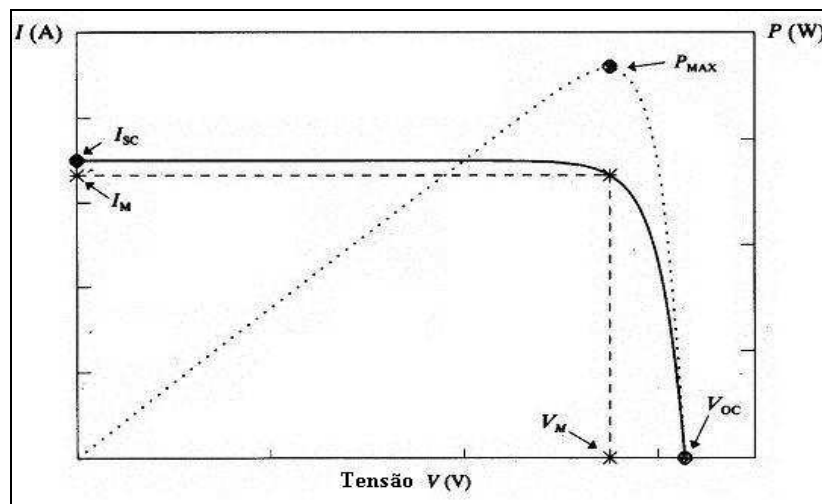


Gráfico 1 Gráfico da Potência X tensão
 Fonte: Messenger (1999)

O produto $I_M * V_M$ determina a potência máxima entregue à carga, mostrado no gráfico 1 pela área do retângulo pontilhado.

4.1.3 Parâmetros que influenciam o comportamento básico das células fotovoltaicas

A temperatura e a intensidade de radiação solar são os fatores mais importantes quando se considera a utilização das células solares para a geração de eletricidade. Assim, este item tem por objetivo apresentar a influência destes fatores para o desempenho de uma célula fotovoltaica (MESSENGER, 1999).

4.1.3.1 Influência da Temperatura

O desempenho de uma célula fotovoltaica com a variação da temperatura é apresentado na figura 3, onde se verifica um pequeno aumento na corrente e uma considerável diminuição na tensão de circuito aberto quando ocorre a elevação da temperatura.

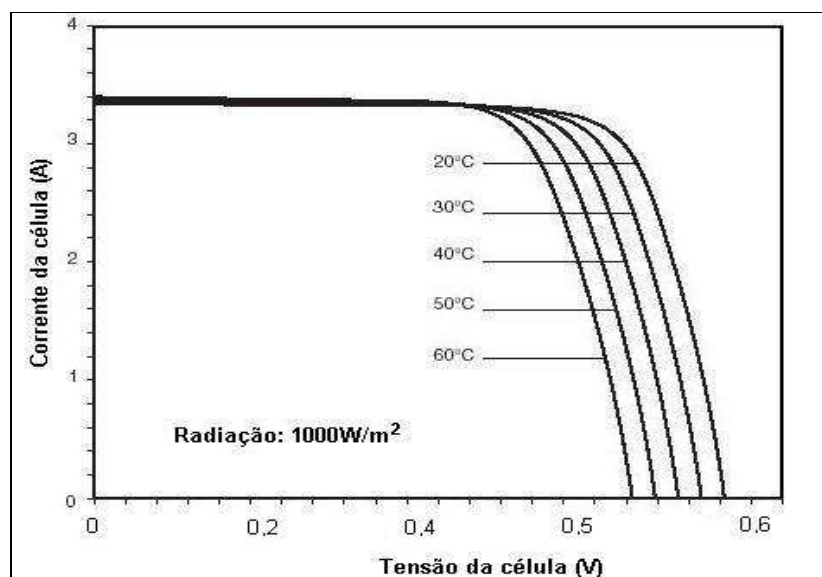


Figura 3 Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura
Fonte: Lorenzo (1994)

Observa-se também através da figura 4 que, com o aumento da temperatura, a potência máxima da célula sofre um decréscimo considerável.

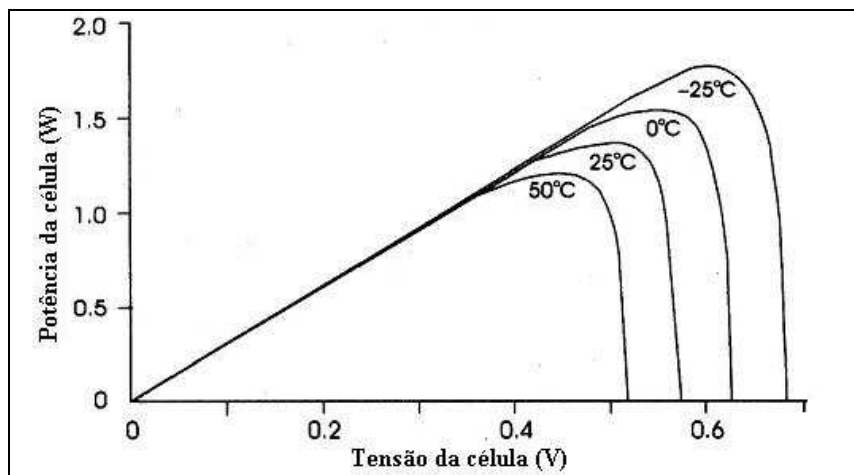


Figura 4 Dependência da característica potência x tensão com a temperatura
 Fonte: Messenger (1999)

É importante salientar que quando a célula é iluminada, geralmente será convertida menos que 20% da radiação solar em energia elétrica. A outra parte é convertida em calor, resultando no aquecimento da célula. Como resultado, é esperado à célula operar em uma temperatura acima da ambiente. Assim, quando as células fotovoltaicas são montadas no módulo, elas devem ser caracterizadas como tendo uma Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT). O NOCT é a temperatura que as células irão alcançar quando são operadas em circuito aberto e em temperatura ambiente de 20°C, densidade atmosférica (AM) de 1,5, condições de radiação com 0,8 kW/m² e com uma velocidade do vento menor que 1 m/s. Para variações na temperatura ambiente e na radiação, a temperatura da célula (°C) pode ser estimada com boa precisão com a aproximação linear, como mostra a equação 1 (MESSENGER, 1999).

$$T_c = T_A + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) G \quad (1)$$

Onde:

T_c = Temperatura da célula;

T_a = Temperatura ambiente;

G = Índice de radiação solar.

Da equação (1) verifica-se que, por exemplo, se um módulo de 36 células tem um NOCT de 40°C com $V_{OC} = 21$ V, quando $G = 0,8$ Kw/m², então a temperatura da célula irá aumentar para 55°C quando a temperatura ambiente aumentar para 30°C e G aumentar para 1 kW/m². Este aumento de 15°C na temperatura da célula resultará em uma diminuição para 19,76 V na tensão de circuito aberto.

4.1.3.2 Influência da Intensidade da Radiação Solar

Como mostra a figura 5, com o aumento do índice de iluminação a corrente aumenta linearmente e a tensão de circuito aberto logaritmicamente.

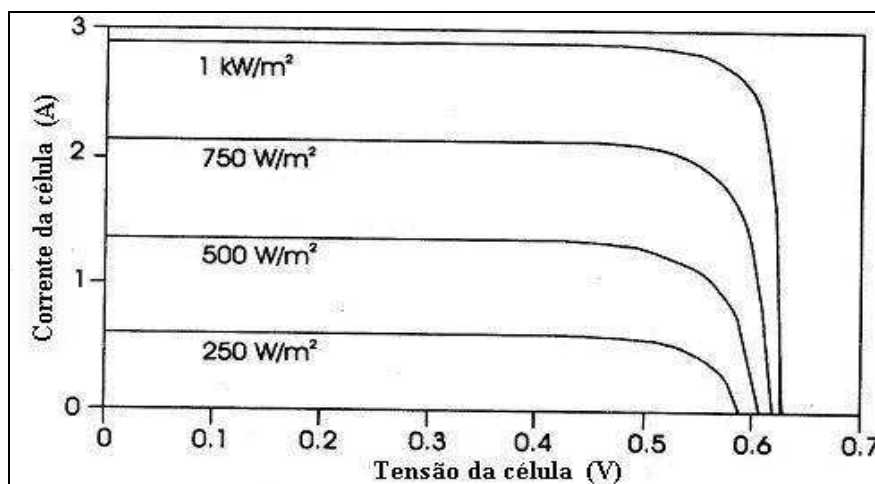


Figura 5 Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação

Fonte: Lorenzo (1994)

Observa-se também, através da figura 6, que a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico aumenta linearmente com o aumento do índice de iluminação.

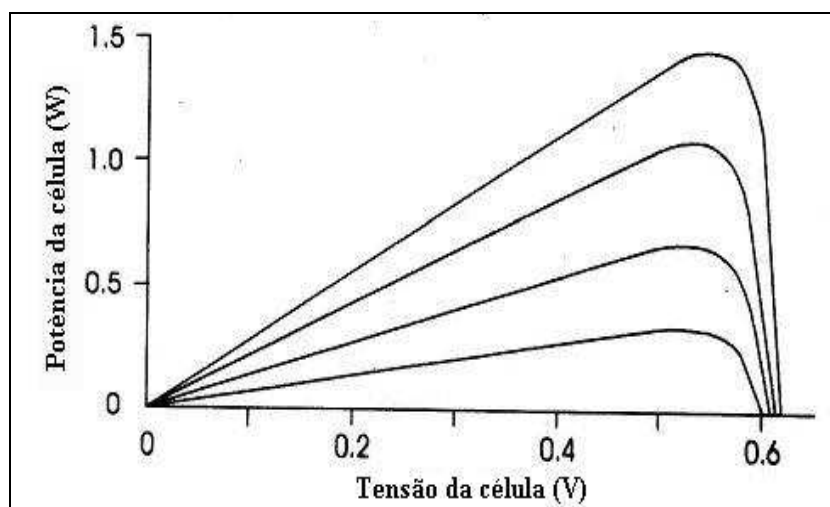


Figura 6 Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação
Fonte: Messenger (1999)

4.1.4 O módulo fotovoltaico

Para obter uma tensão de saída adequada, as células fotovoltaicas são conectadas em série para formar o módulo fotovoltaico. Como os sistemas fotovoltaicos são comumente operados com valores próximos de 12 V, os módulos são normalmente projetados para uma operação ótima neste valor, pois estes são apropriados para a carga de baterias em sistemas autônomos que possuem este valor de tensão. A meta do projeto é conectar um número

suficiente de células em série para manter V_M com uma confortável variação de tensão do sistema para as condições médias de insolação. Se isso for feito, a potência de saída do módulo pode ser mantida bem próxima do máximo. Isto significa que abaixo das condições de insolação total, V_M deve estar aproximadamente entre 16 e 18 V. Como V_M é normalmente cerca de 80% de V_{OC} , sugere-se projetar o módulo com um V_{OC} de aproximadamente 20 V. Como as células de silício monocristalino possuem tensão de circuito aberto variando de 0,5 a 0,6 V, os módulos devem consistir de 33 a 36 células conectadas em série. A figura 8 mostra como as células são configuradas no módulo, e como os módulos são conectados para formar um sistema. Os módulos podem ter pequena potência de saída, como poucos watts, dependendo da necessidade de aplicação, até mais de 300 W. Sistemas fotovoltaicos (PV) típicos variam de centenas de watts de potência a até kilowatts. Porém, sistemas com megawatts de potência já existem.

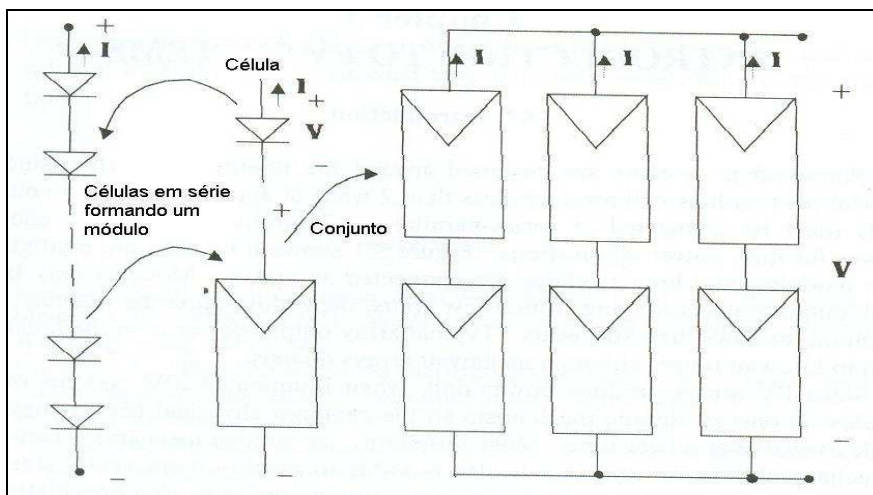


Figura 7 Célula, módulo e conjunto fotovoltaico
Fonte: Lorenzo (1994)

4.1.5 Principais Aplicações dos Sistemas Fotovoltaicos

O desenvolvimento deste tipo de sistemas iniciou-se com o objetivo de alimentar unidades autônomas para aplicações espaciais, e, em particular, dos satélites artificiais terrestres. Atualmente, os sistemas fotovoltaicos são utilizados essencialmente em locais isolados, onde outros tipos de produção clássicos são muito caros e onde são exigidos sistemas silenciosos e não poluidores (COCIAN, 1999).

Segundo explica COCIAN, de um modo geral, os sistemas fotovoltaicos são utilizados nas seguintes situações:

- ✓ Eletrificação rural com sistemas individuais ou em mini-rede;
- ✓ Bombeamento de água (irrigação e abastecimento);
- ✓ Sistemas de telecomunicações: retransmissores de TV, telemóveis e rádio;
- ✓ Sinalização ferroviária (passagens de nível);
- ✓ Sinalização marítima (bóias, faróis);
- ✓ Sinalização nas estradas (sinais de aviso de perigo: existência de gelo, escola);
- ✓ Telefones para socorro nas estradas;
- ✓ Parquímetros;
- ✓ Dessalinização (osmose inversa);
- ✓ Proteção catódica, vedações elétricas, candeeiros PV, lanternas;
- ✓ Aplicações de micro-potência (relógios, calculadoras);
- ✓ Sistemas conectados à rede elétrica convencional: Centrais PV (>100kWp) ou “Sistemas em Telhados Residenciais” PV (1- 10kWp).

4.2 Baterias

Hoje em dia as baterias possuem muitas aplicações. De uma maneira em geral, elas podem ser recarregáveis ou não. Alguns exemplos de aplicações de baterias são: fonte portátil de energia elétrica, alimentação de sistemas automotivos, supridora de sistemas com curtos períodos de demanda, armazenadora de energia elétrica gerada por fontes renováveis e intermitentes, como solar e a eólica, dentre outras (FURLAN, 2008).

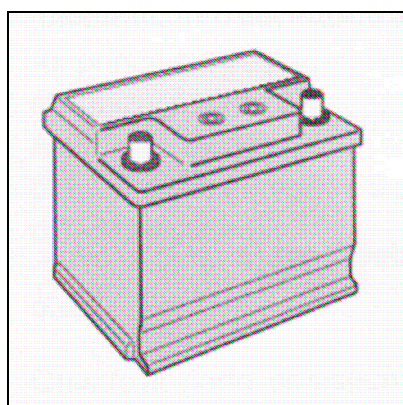


Figura 8 Ilustração de uma bateria
Fonte: Barbosa (2007)

As baterias que hoje são muito utilizadas para sistemas isolados de energia têm como função básica armazenar energia e não produzir energia. Este processo pode ser descrito da seguinte maneira: se uma bateria está conectada a um circuito elétrico, há fluxo de corrente devido a uma transformação eletroquímica, ou seja, há conversão de energia química em energia elétrica (GTES, 1999).

As baterias podem ser divididas em dois grupos, que são: *células primárias*, que são as baterias que podem ser utilizadas apenas uma vez (não-recarregáveis) e que quando se descarregam totalmente sua vida útil termina e elas são inutilizadas; e *células secundárias*, que são baterias recarregáveis, ou seja, podem ser recarregadas com auxílio de uma fonte externa de tensão ou corrente, podendo ser reutilizadas várias vezes (GTES, 1999).

Para sistemas automotivos, as baterias necessitam de uma elevada corrente por um curto intervalo de tempo para a ignição do veículo, e elas possuem como característica uma descarga de 1% a 5% de sua capacidade total, podendo danificar se for superior. Já para sistemas isolados de energia, as baterias são projetadas para operar em ciclos diários rasos, com taxas reduzidas de descarga e para suportar descargas profundas esporadicamente, e ela devem agüentar descargas até 80% de sua capacidade máxima sem se danificar (FURLAN, 2008).

Existem diversos tipos de bateria que variam de acordo de sua composição química e também de acordo com sua construção, as baterias mais utilizadas em sistemas de armazenamento de energia em sistemas isolados são de chumbo-ácido e alcalina (ALDABÓ, 2002).

Das duas baterias citadas acima podemos destacar, segundo Barbosa (2007):

Bateria de Chumbo-Ácido: é a mais utilizada devido ao seu baixo custo e ampla disponibilidade comercial. Porém, tem o inconveniente de, ao ser totalmente descarregada, sofrer uma redução significativa no seu tempo de vida.

Bateria de níquel-cádmio (alcalina): é mais dispendiosa, mas tem uma longevidade superior à de chumbo-ácido e pode ser descarregada completamente sem ser afetada.

A capacidade de uma bateria é medida em Ah (Ampère-hora), ou seja, fornece 1A por uma hora. Um sistema de baterias 12V, com capacidade de 800Ah, pode drenar 100A de corrente durante 8 horas. Isso equivale a 1200W de potência por 2 horas (ALDABÓ, 2002).

Existem as baterias abertas e as baterias fechadas. A diferença básica entre elas é que uma precisa de verificação periódica do nível de eletrólito e, por esta razão, deve trabalhar na posição vertical (bateria aberta), e a outra contém o eletrólito confinado no separador ou sob a forma de gel. As duas não necessitam

de manutenção, pois não requerem reposição de água (bateria selada) (GTES, 1999).

4.2.1 Efeitos que alteram o rendimento das Baterias

Existem diversos elementos que alteram a vida útil e sua operação normal de funcionamento. Iremos ver neste capítulo alguns desses elementos.

Com o aumento da temperatura a capacidade de armazenamento da bateria aumenta como podemos verificar na figura 9.

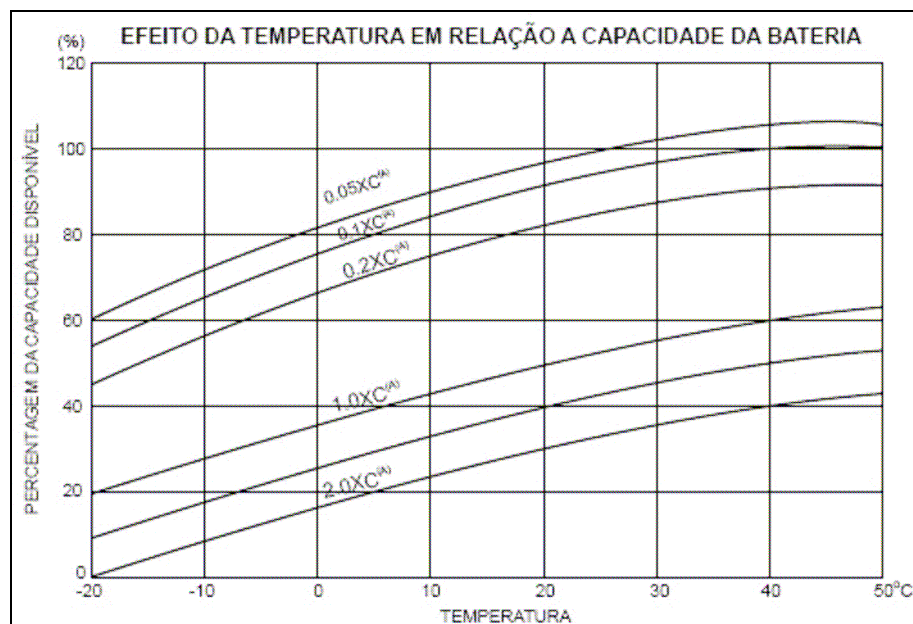


Figura 9 Efeito da temperatura em relação à capacidade da bateria.

Fonte: Furlan (2008)

Mas este aumento de temperatura, que ocasiona o aumento da capacidade, acarreta em outro problema, pois com isso diminui e muito o

número de ciclos da bateria reduzindo a sua vida útil, conforme mostra a figura 10.

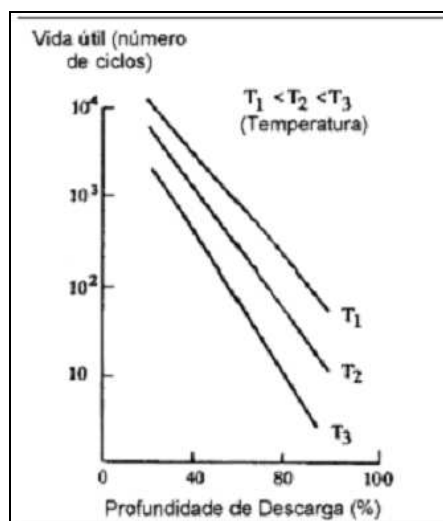


Figura 10 Efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria
Fonte: Gtes (1999)

Outro fator que interfere na vida útil de uma bateria é o número de ciclos de descarga profunda que a bateria pode fornecer. A seqüência de descarga e posterior carga de uma bateria são denominadas ciclo. O número de ciclos alcançado por uma bateria até que sua capacidade seja reduzida a 80% é chamado ciclo de vida da bateria. Esse número depende da profundidade da descarga, que pode ocorrer antes que ela tenha atingido sua carga completa, da corrente de descarga fornecida (FURLAN, 2008).

A vida útil de uma bateria está ligada diretamente ao número de ciclos e a maneira como ela é descarregada nestes ciclos, conforme podemos ver na figura 12, que compara duas famílias distintas de bateria da marca Moura.

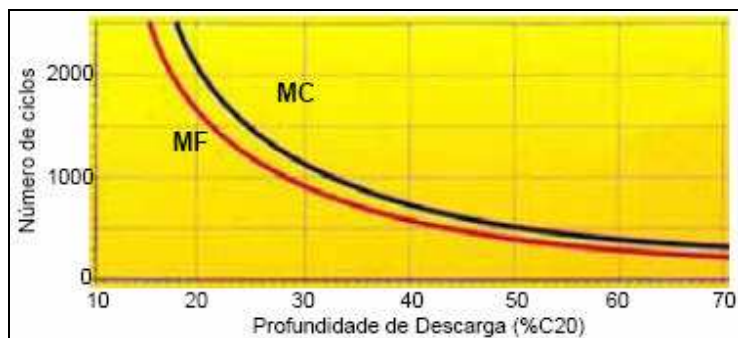


Figura 11 Número de ciclos em função da profundidade de descarga
Fonte: Furlan (2008)

4.3 Rede de distribuição Rural

Para melhor conhecermos as características construtivas das Redes de Distribuição Rural no Estado do Tocantins, iremos tomar por base a NTD 015 da Companhia Energética do Estado do Tocantins, que trata sobre Montagem de Redes de Distribuição Aérea Rural Trifásica e Monofásica.

Esta norma estabelece condições para execução de obras, e é em cima dela que toda obra no estado deve se pautar para construção de redes.

5 MÉTODO DA PESQUISA

A metodologia adotada consiste de pesquisa bibliográfica, de pesquisa documental sobre sistemas fotovoltaicos com utilização de baterias para armazenagem de energia e de análise técnica e financeira de uma obra de RDR e um sistema fotovoltaico.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão descritas e desenvolvidas situações possíveis para alimentação de cargas em áreas eletricamente isoladas. Essas situações são alimentação por rede de distribuição rural e por meio de células fotovoltaicas com armazenagem a bateria.

6.1 Dimensionamento de Sistemas com Painéis Fotovoltaicos e seus custos

Para dimensionar sistemas envolvendo energia elétrica fornecida por painéis fotovoltaicos, inicialmente deve-se conhecer a incidência da radiação solar do local correspondente, bem como as informações referentes às características do consumo energético a ser atendido. O dimensionamento consiste no balanço entre a energia disponível e a consumida, levando em conta os rendimentos dos diferentes componentes envolvidos na transformação (FURLAN, 2008).

O dimensionamento requer saber os níveis de incidência solar no local. Para o Estado do Tocantins, utilizaremos os dados do censo solar de 1993 da cidade de Porto Nacional, que fica próxima ao centro do Estado.

O município de Porto Nacional está localizado no Estado do Tocantins nas seguintes coordenadas: 10,708° Sul e 48,417° Oeste. A inclinação dos painéis fotovoltaicos deve seguir a latitude dada, só que para o lado oposto, neste caso 10° para o norte. A Tabela 5 apresenta a característica de incidência solar durante o ano de 1993 na cidade de Porto Nacional.

Tabela 1 Radiação solar na cidade de Porto Nacional

Mês	Radiação
	Solar kWh/m ² /dia
Janeiro	4,67
Fevereiro	4,34
Março	4,64
Abril	4,69
Mai	5,20
Junho	5,64
Julho	6,12
Agosto	6,19
Setembro	5,28
Outubro	4,99
Novembro	5,00
Dezembro	4,75
Média diária anual	5,12

Fonte: Severino (2008)

Podemos reparar que no mês de fevereiro é registrado o menor índice. Este fato se deve pelos altos níveis de incidências de chuvas na região nesta época, que interferem diretamente na radiação solar. Já o mês de agosto tem o maior índice, pois é um mês de estiagem e quando praticamente não há nuvens no céu, o que faz com que este índice seja elevado. Para efeito de cálculo usou-se o menor índice para uma maior confiabilidade.

Para a configuração PV – Bateria são necessários os seguintes componentes: Painel Fotovoltaico, Baterias, Controlador de carga e Inversores de Frequência para a geração de energia. A figura 12 apresenta o esquema que utiliza este tipo de sistema.

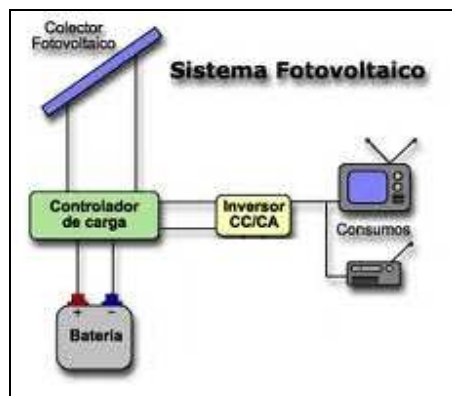


Figura 12 Sistema Fotovoltaico
Fonte: Lorenzo (1994)

A sua operação é da seguinte maneira: durante o dia, quando há inserção de luz solar sobre os painéis fotovoltaicos, o mesmo produz energia elétrica, que a manda para a barra CC. À barra CC está conectado o controlador de carga, o qual é ligado às baterias e ao inversor de frequência. No inversor, são ligadas todas as cargas do sistema.

Para o cálculo de dimensionamento do sistema solar adotou-se como padrão uma residência rural de uma família de cinco pessoas. Assim, fez-se todo o projeto conforme a necessidade dos moradores. Deve-se lembrar que cada residência é analisada como um caso em particular ou como um grupo de residências (comunidade), observando-se o consumo de seus moradores. Iremos simular uma situação de uma residência se encontra a 200 km de Palmas, capital do Tocantins, e a 20 km da rede de distribuição mais próxima, para depois podermos simular qual é mais viável tecnicamente e economicamente.

A residência utilizada, conforme citada anteriormente, é composta de cinco cômodos, os quais são divididos em: 2 quartos, 1 sala, 1 banheiros, 1 cozinha. As cargas foram distribuídas nos cômodos conforme a utilização de cada equipamento elétrico. Assim, estas cargas foram divididas em: 4 lâmpadas

fluorescentes compactas de 20W, 1 lâmpada de 15W para o banheiro, 1 TV a cores 14” de 60W, 1 rádio de 15W, 1 geladeira 120W.

Para o cálculo da potência total dos equipamentos basta somente somar a potência de todos eles. Para o cálculo do consumo total diário dos equipamentos, deve-se obter o valor da potência de cada equipamento, multiplicar pelo seu tempo de uso diário e, por final, somar o consumo de todos os equipamentos, totalizando o consumo diário da residência.

Tabela 2 Cargas

Cômodo	Equipamento	Potência P(W)	Horas de uso	Consumo Ec(Wh/dia)
Quartos	2 lâmpadas de 20 W	40	2	80
Sala	1 lâmpada de 20 W	20	4	80
	1 TV a cores 14”	60	3	180
Cozinha	1 lâmpada de 20 W	20	5	100
	1 geladeira de 120W	120	10	1.200
	1 rádio	15	4	60
Banheiro	1 lâmpada de 20 W	15	2	30

Total: Ec = 1.730 Wh/dia, P=290W.

Para determinarmos o dimensionamento correto dos equipamentos, foi utilizado o método que a Universidade Federal de Lavras utiliza em seus cursos de pós-graduação.

Banco de baterias (Ampère hora): Calcular a capacidade do banco de baterias levando em conta o consumo e a confiabilidade requerida para o sistema. Esta capacidade em Ah é calculada usando uma das duas expressões abaixo (considerar a que resulta na maior capacidade):

$$\text{Capacidade (Ah)} = \frac{\text{Consumo total (Wh/dia)} \times \text{Autonomia (dias)}}{\text{Tensão da bateria (V)} \times \text{Profundidade da descarga no final da autonomia (pu)}}$$

$$\text{Capacidade (Ah)} = \frac{\text{Consumo total (Wh/dia)}}{\text{Tensão da bateria (V) x Profundidade descarga no final de cada noite (pu/dia)}}$$

$$Ah = \frac{1730Wh * 3dias}{12V * 0,6} = 720,83Ah$$

$$Ah = \frac{1730Wh}{12V * 0,2} = 720,83Ah$$

Para primeira equação tem-se:

Consumo total (Wh/dia): retirar da tabela de levantamento de consumo de eletricidade.

Autonomia (dias): Prever um período sem insolação de 3 a 5 dias de acordo com o clima local e a confiabilidade desejada. Normalmente, em residências, trabalha-se com 3 dias, em sistemas de telecomunicação, com 5 dias.

Tensão da bateria: 12V (em sistemas muito grandes recomenda-se o uso de 24 V).

Profundidade da descarga no final da autonomia (pu) - 0,6 (descarga mais profunda significa vida útil menor para a bateria, e menos profunda um investimento inicial maior). Quando usar baterias automotivas em vez de estacionárias (recomendadas) considerar 0,5.

Para segunda equação têm-se:

Consumo total (Wh/dia): retirar da tabela de levantamento de consumo de eletricidade.

Tensão da bateria: 12V (em sistemas muito grandes recomenda-se o uso de 24 V).

Profundidade da descarga no final de cada noite (pu/dia) – No máximo 0,20. Valores menores aumentam a vida útil da bateria: 0,15 (vida útil

da bateria 5 anos) a 0,20 (vida útil da bateria 4 anos). Com baterias automotivas usar valores menores.

Foram utilizadas 5 baterias de 150Ah totalizando 750Ah.

Tensão da bateria utilizada, de 12V, da profundidade da descarga no final da autonomia (pu) - 0,6 e profundidade da descarga no final de cada noite (pu/dia) 0,20.

No dimensionamento do gerador fotovoltaico deve-se usar a seguinte expressão:

$$\text{Potencia mínima do gerador (Wp)} = \frac{\text{Consumo total (Wh/dia)}}{\text{Horas equivalentes de sol pleno (h/dia) x Fpp x Fps}}$$

Potência mínima do gerador (Wp): Potência mínima total do conjunto de módulos necessária para produzir a energia solicitada pela carga.

Consumo Total (Wh/dia): Retirar da tabela de levantamento de consumo de eletricidade. Horas equivalentes de sol pleno (horas/dia)

Fpp-Fator de perda de potência: $12V / V_{mp} = 0,69$; deve-se ao fato da tensão da bateria (12V) ser inferior à tensão de máxima potência do módulo a ser utilizado.

Fps-Fator de perdas e segurança: Para levar em conta a redução da geração do módulo devido à tolerância na fabricação, temperatura de trabalho, poeira, degradação, sombras, desalinhamentos e também as perdas elétricas na bateria, no controlador, na instalação além de incertezas sobre os dados utilizados e o consumo previsto. Valor típico: 0,8.

E para o caso estudado têm:

$$Wp = \frac{1730}{4,34 * 0,69 * 0,8} = 722,13Wp$$

Foi escolhido utilizar 6 painéis de 135Wp, totalizando 810Wp.

Para o cálculo da corrente do controlador de carga, usamos a fórmula abaixo considerando a corrente de curto circuito total do arranjo de séries de módulos utilizados.

$$\text{Corrente do Controlador de Carga (A)} = \text{Potencia final do gerador fotovoltaico escolhido (Wp)} \times 0,06 \text{ (A/Wp)} \times 1,1$$

$$\text{Corrente(A)} = 810\text{Wp} * 0,06 * 1,1 = 53,46\text{A}$$

Pode-se estimar para sistemas de 12 V que a corrente de curto circuito de um gerador fotovoltaico é de 0,06 A/Wp. Foi adotado um controlador de carga 60A.

Para o dimensionamento do inversor de frequência, se pega a potência total das cargas, e adiciona no mínimo 10%, então, temos a potência mínima que o inversor deve ter. Para o caso estudado temos no mínimo de 319W, mas para aguentar a partida da geladeira utilizou de 1000W.

Com os equipamentos calculados, adicionam-se mais um poste para servir como sustentação dos painéis solares e mais a armação teremos a tabela abaixo com custos dos equipamentos do sistema fotovoltaico.

Tabela 3 Preço equipamentos

Equipamento	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Placa Fotovoltaica - KD 135SX	6	R\$ 1.350,00	R\$ 8.100,00
Controlador de Carga – 60A	1	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
Inversor de Frequência – 1000W	1	R\$ 1600,00	R\$ 1600,00
Bateria – 150Ah	5	R\$ 615,00	R\$ 3.075,00
Poste Dt 10/150	1	R\$ 495,00	R\$ 495,00
Suporte	1	R\$ 600,00	R\$ 600,00

Também temos que considerar a mão-de-obra e a logística para implantação do sistema, sendo assim necessário o trabalho de um eletricista e um auxiliar de eletricista, que terão a remuneração de duas diárias para realizar o serviço. Foi considerada a diária do eletricista em R\$ 150,00, a do auxiliar de eletricista R\$ 75,00. Estes valores, somados ao custo do projeto – de R\$ 500,00 – totaliza R\$ 950,00. Além desses custos, é preciso considerar a aquisição e implantação do poste, que ficou em R\$ 600,00, somados ao preço da diária do hotel e ao valor do transporte dos trabalhadores, temos R\$750,00. Como Palmas não tem local para venda dos equipamentos é necessário, então, pagar uma transportadora para trazer o equipamento (sem o poste que está embutido na implantação) num custo de R\$ 800,00, além das despesas diversas como ART, taxa administrativa e etc. totalizando R\$ 200,00. Assim sendo se adiciona mais R\$ 2.700,00 ao preço do equipamento, que fica no final R\$ 18.170,00.

6.2 Custos de uma RDR de 7,9kV (MRT)

Como foi dito anteriormente, essa localidade objeto de estudo fica a 200 km de Palmas e a 20 km da rede de distribuição mais próxima. Assim, para se construir uma rede para atender esta residência eletricamente isolada, é necessário a construção de 20 km de rede de distribuição de 7,9kV (MRT - Monofilar com retorno por terra).

Para calcular o custo de uma obra deste porte, iremos adotar o modelo que a concessionária de energia local utiliza (que são os serviços realizados, o material aplicado na obra e os custos administrativos) para obtermos um valor aproximado do real.

Na tabela abaixo, se encontram os serviços necessários para a construção de uma rede de 20 km. Foi considerado vão entre postes de 100m,

totalizando 200 postes para se conseguir os 20 km. O transporte é pago de acordo com o peso e a distância percorrida dado em tonelada x km. Nesta situação, consideramos o peso do poste de 500 kg e a distância da cidade maior (Palmas) que é de 200 km.

Tabela 4 Preço dos serviços

DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS	R\$	NORMAL	VALOR TOTAL
ABRIR, CAVA, EM TERRA NORMAL	R\$ 29,54	200	R\$ 5.907,00
INSTALAR, ESTRUTURA, PRIMARIA MRT(U1,U2)	R\$ 19,69	200	R\$ 3.938,00
DISTRIBUIR, POSTE, NA OBRA	R\$ 59,07	200	R\$ 11.814,00
LANCAR, CONDUTOR DE ALUMINIO, ATE 2/0 AWG (INCLUSIVE)	R\$ 452,87	20	R\$ 9.057,40
INSTALAR, TRANSFORMADOR, MONOFASICO	R\$ 216,59	1	R\$ 216,59
TRANSPORTAR MATERIAL DO ALMOXARIFADO ATÉ A OBRA	R\$ 0,98	20300	R\$ 19.985,35
INSTALAR, ATERRAMENTO, POR EQUIPAMENTO ATÉ NOVE HASTES	R\$ 88,61	1	R\$ 88,61
INSTALAR, POSTE, NA REDE COM USO DE GUINDAUTO ATÉ 13 METROS	R\$ 103,37	200	R\$ 20.674,50
INSTALAR, CHAVE, FUSIVEL	R\$ 25,60	2	R\$ 51,19
TOTAL			R\$ 71.732,64

A tabela de preço dos serviços é a praticada pela concessionária de energia local, somando 10% dos custos administrativos, projeto e taxas, fica R\$78.905,90. Abaixo se visualiza o custo relativo aos materiais que serão necessários para a construção da rede.

Tabela 5 Preço dos materiais

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	UNI D.	QUAN T.	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
ALÇA PREF DISTRIB P/ CABO CA OU CAA 2 AWG FORM 7 OU 6X1 FIOS	PC	200	R\$ 3,85	R\$ 770,00
ARRUELA, QUADRADA, FERRO GALVANIZADO, 50 X 3 MM, FURO DIAMETRO 18 MM	PC	400	R\$ 0,76	R\$ 304,00
CABO, ALUMINIO NU, COM ALMA DE ACO (CAA), 2 AWG, 6 X 1 FIOS, SPARROW, ROLO	KG	1700	R\$ 17,14	R\$ 29.138,00
ELO, FUSIVEL, DISTRIBUICAO, 5 A, H	PC	2	R\$ 1,55	R\$ 3,10
EMENDA, PREFORMADA, CONDUTORA METALIZADA, 2 AWG, CA, 7 FIOS	PC	15	R\$ 19,48	R\$ 292,20
HASTE, ATERRAMENTO, SIMPLES, ACO CARBONO 1010-1020 COBREADO, 16.00 MM, 2.400 MM,	PC	9	R\$ 21,00	R\$ 189,00
ISOLADOR, PINO, PORCELANA, DIAM PESCOCO 57 MM, CLASSE 15 KV	PC	200	R\$ 121,64	R\$ 24.328,00
PARAFUSO, CABECA ABAULADA, M16 X 2, 45 MM, FERRO GALVANIZADO, PORCA	PC	200	R\$ 1,91	R\$ 382,00
POSTE, CONCRETO, DUPLO "T", 10 M, 150 DAN, D, 550 KG	PC	200	R\$ 495,00	R\$ 99.000,00
SUORTE PARA TRAFÓ EM POSTE DUPLO T 185 X 95 MM, ACO CARBONO 1010-1020	PC	1	R\$ 84,22	R\$ 84,22
PARA RAIÓ DISTRIBUICAO ,VÁLVULA, C/ DISPARADOR, CLASSE 34,5KV, NOMINAL 30KV, 5KVA	PC	1	R\$ 299,00	R\$ 299,00
TRANSFORMADOR, DISTRIBUICAO, MONOFASICO, POTENCIA NOMINAL 5 KVA, 36 KV	PC	1	R\$ 2.350,00	R\$ 2.350,00
FIO, COBRE NU, 4 AWG	KG	4	R\$ 55,00	R\$ 220,00
PLACA, CONCRETO, ESTAI, 200 X 100 X 600 MM, C/ FURO DIAMETRO 18 MM	PC	24	R\$ 30,00	R\$ 720,00
SUORTE, PARA ISOLADOR PILAR DIMENSOES: 5 X 107 X 640 MM	PC	200	R\$ 25,00	R\$ 5.000,00
PINO, ISOLADOR PILAR, AUTOTRAVANTE, 66.5 MM, M16 X 2	PC	200	R\$ 6,24	R\$ 1.248,00
CHAVE, FUSIVEL, MONOPOLAR, C, DISTRIBUICAO, 15 KV, 300 A, 100 A, 10 KA, 95 KV	PC	2	R\$ 181,44	R\$ 362,88
TOTAL			R\$ 164.690,40	

Para o preço dos materiais foi feita uma pesquisa de mercado para se saber os valores de cada um dos materiais. As lojas pesquisadas foram: Jode Materiais Elétricos, Geoserv pré-moldados e Intel transformadores. O custo final da empreitada relativo à construção desta RDR fica em R\$164.690,40, mais R\$78.905,90, totalizando de R\$243.596,30. Pode-se considerar que o km da rede monofásica com retorno por terra sai por R\$12.179,81, para atender uma carga pequena de uma família simples.

6.3 Análise dos Resultados Obtidos

Com o estudo técnico e financeiro feito das duas tecnologias analisadas, constata-se que para implantar uma rede rural monofásica é necessário que se leve em conta vários fatores, pois o investimento, dependendo da distância se eleva muito, tornando inviável a sua implantação em comparação ao sistema fotovoltaico. Na tabela abaixo se pode perceber o investimento da rede por km de construção.

Tabela 6 Custo da rede por km

km (RDR 7,9kV)	1	2	3	5	10	20	50
Preço (R\$)	R\$ 12.179,81	R\$ 24.359,62	R\$ 36.539,43	R\$ 60.899,05	R\$ 121.798,10	R\$ 243.596,30	R\$ 608.990,50

O sistema fotovoltaico estudado teve um investimento inicial estimado em R\$ 18.170,00. Se fosse para analisar somente os investimentos em capital, o SFV seria muito mais vantajoso, pois teria que se aplicar apenas 7% do que se aplicaria da construção da rede. Porém, deve-se levar em conta outros aspectos como ordenamos abaixo.

Desvantagens do SFV em comparação a RDR:

- Troca de baterias a cada quatro anos;
- Para se aumentar a carga tem que se aumentar o SFV aumentando seu custo;
- Manutenção constante (Limpeza dos equipamentos);
- Tecnologia nova (difícil acesso de mão-de-obra especializada);
- Implantação de uma cultura de racionalidade de energia para pessoas com baixo grau de instrução (para evitar, de se consumir mais do que o sistema agüenta);
- Impossibilidade de usar a rede como tomada de corrente para outros consumidores.

As vantagens são:

- Nesse caso, investimento menor;
- Impacto ambiental quase nulo (baterias têm que ter tratamento diferenciado para diminuir o impacto);
- Rápida implantação (tempo de obra menor).

O SFV para comunidades isoladas já está competitivo em termos econômicos em comparação a rede elétrica convencional. Porém, é necessário fazer uma análise de custo benefício para se implantar ele, por exemplo, se a propriedade que será atendida ficar a 1 km de distância da RDR, não compensa implantar o SFV, pois o custo da rede é menor. Se for implantar um sistema fotovoltaico em uma localidade distante que tem um potencial de crescimento de carga muito elevado também não compensa, pois a cada acréscimo de carga aumenta o investimento no SFV e pode haver outros consumidores que podem ser ligadas nesta rede.

Outro ponto de vista que deve ser analisado é a quantidade de pessoas que será atendida, pois existem comunidades isoladas com um número considerável de pessoas. Nessas comunidades, preciso que seja feita uma análise mais profunda para se evitar gastos desnecessários.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que Sistema Fotovoltaico já é competitivo com a Tecnologia que predomina no mercado para a energização de comunidades isoladas no estado do Tocantins (RDR). Porém, é preciso que se faça uma análise profunda para sua implantação, para evitar desperdício de dinheiro, pois ainda existem alguns entraves técnicos, como por exemplo, para cada aumento de carga tem-se que aumentar também o investimento. Isso porque não é possível atender outras propriedades, à média distância, com o mesmo sistema entre outros citados no trabalho.

Os impactos ambientais causados pelas SFV são bem inferiores aos da Rede de Distribuição Rural, pois o mesmo não precisa abrir área de servidão para redes, não lança gases de efeito estufa para a atmosfera e nem precisa de enormes represas para gerar energia elétrica. Sua fonte de energia é puramente o sol, tendo apenas que tomar cuidado com a bateria que se não tiver os cuidados necessários pode causar impacto ambiental.

O Programa Luz Para Todos, para atender às comunidades tem que levar em consideração vários fatores. Na atualidade, a energia solar já é competitiva, o que a torna assim mais uma opção para eletrificação rural.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R.. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

BARBOSA, W. A., BORGES, L. E. P., CORREIA, J. C. Soluções Energéticas para a Amazônia, Eletrificação de Comunidades Isoladas. **Sistemas Híbridos**. MME, 2007

COCIAN, L. F. E., SANTOS, J. C. V.; Sistemas Fotovoltaicos: Uma alternativa para a geração de energia elétrica. **Revista Lumière**, julho de 2000.

FURLAN, A. L.. **Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaico por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento em Sistemas Energéticos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008

GTES (Grupo de Trabalho de Energia Solar). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 1999.

LORENZO, E., **Electricidade Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos**. Madri: Editora Artes Gráficas Gala, 1994.

MESSENGER, R. A., VENTRE, J., **Photovoltaic Systems Engineering** CRC Press, 1999.

NTD – 15 **Norma Técnica de Distribuição N°15**, Celtins, Palmas, 2009.
RÜTHER, R.; **Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e O Trabalho do Labsolar nesta Área**. LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar; Departamento de Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 1993.

SCHMIDT, W., **Materiais Elétricos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1983.

SEVERINO, M. M. **Avaliação Técnico-Econômico de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia**. 2008. 335 p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.