



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ  
OTACILIO JOSÉ DE MACÊDO NUNES

ESTUDO DA VIABILIDADE DA ELETRIFICAÇÃO  
ALTERNATIVA DE UMA UNIDADE DE CONSUMO  
RESIDENCIAL DE FORTALEZA-CE A PARTIR DE  
UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

FORTALEZA – CEARÁ  
2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ  
OTACILIO JOSÉ DE MACÊDO NUNES

ESTUDO DA VIABILIDADE DA ELETRIFICAÇÃO  
ALTERNATIVA DE UMA UNIDADE DE CONSUMO  
RESIDENCIAL DE FORTALEZA-CE A PARTIR DE  
UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Monografia submetida à Coordenação do Curso de  
Licenciatura em Física da Universidade Estadual do  
Ceará, como requisito parcial para a obtenção do  
grau de Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Ms. José Stênio Rocha

FORTALEZA - CEARÁ  
2011

N972e

Nunes, Otacilio José de Macêdo Nunes

Estudo da viabilidade da eletrificação alternativa de uma unidade de consumo residencial de Fortaleza a partir de um sistema fotovoltaico / Otacilio José de Macêdo Nunes. – Fortaleza, 2011.

59 p. : il.

Orientador: Prof. Ms. José Stênio Rocha

Monografia (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências Tecnológicas.

1. Sistemas fotovoltaicos. 2. Energia solar. 3. Energias renováveis. 4. Geração fotovoltaica. I. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências Tecnológicas.

CDD: 530

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ - UECE  
LICENCIATURA EM FÍSICA

Título do Trabalho: ESTUDO DA VIABILIDADE DA ELETRIFICAÇÃO  
ALTERNATIVA DE UMA UNIDADE DE CONSUMO RESIDENCIAL DE  
FORTALEZA-CE A PARTIR DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Autor: Otacilio José de Macêdo Nunes

Defesa em: 05/05/2011

Conceito obtido: \_\_\_\_\_

Nota: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ms. José Stênio Rocha (Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

---

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

---

Prof. Ms. Francisco Anderson de Sousa Lima  
Faculdade Católica Rainha do Sertão - FCRS

A meu orientador pela compreensão  
e apoio.

A meus pais, meus irmãos e minha  
noiva.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

A meus pais, irmãos, noiva e amigos pelo apoio familiar.

Agradeço ao Prof. Ms. José Stênio Rocha pela orientação e apoio que tanto contribuiu para realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva e Prof. Ms. Francisco Anderson de Sousa Lima por terem aceitado o convite para participar da Banca Examinadora desta Monografia.

"O que sabemos é uma gota, o que não sabemos é um oceano."

Isaac Newton

## RESUMO

Esta monografia tem por objetivo pesquisar a viabilidade técnica e financeira da aplicação da energia solar para geração de energia elétrica como fonte alternativa de uma unidade de consumo residencial na cidade de Fortaleza Ceará, através da utilização de sistemas fotovoltaicos. Será apresentado um breve referencial teórico sobre a energia, uma fonte energética abundante, limpa e renovável, com potencial de competir em produtividade e rentabilidade, com outras formas de energias tradicionais, no mercado de energia. Também será apresentada a tecnologia fotovoltaica, seus benefícios, aplicações e respectivos custos, potencialidades e algumas limitações tecnológicas. Diante do desenvolvimento tecnológico de sistemas fotovoltaicos de elevado custo em relação a outras fontes de energia, no atual contexto mercadológico de energias, espera-se que em breve, seja possível se conseguir com sistemas fotovoltaicos, uma maior autonomia, melhor desempenho e menores custos da energia gerada incluindo equipamentos, operações e manutenção, ou seja, tudo que está envolvido com a implementação do projeto proposto por esta monografia. Em seguida serão analisados as perspectivas de utilização, o processo desenvolvimento tecnológico, considerações sobre o mercado atual e sua possível expansão, fatores que influenciarão. Ao longo do tempo, a substituição total ou parcial dos métodos convencionais, alguns já saturados, de eletrificação de unidades de consumo, possivelmente por projetos a partir de energia solar.

Palavras-chaves: Sistemas fotovoltaicos, Energia solar, Energia renováveis, Geração fotovoltaica.

## **ABSTRACT**

This monograph aims to search the technical and financial viability of the application of solar energy for generation electric energy as alternative supply of an unit of residential consumption in the city of Fortaleza Ceará, through the use of photovoltaic systems. It will be presented a brief theoretical referential about solar energy, an abundant energetic source, clean and renewable with potential to compete in productivity and profitability with other forms of traditional energy sources in the energy market. Also it will be presented photovoltaic technology, its benefits, applications, potential, technological limitations and its costs. Given the technological development of photovoltaic systems with a high cost compared to other energy sources, in the current context of energy marketing, the hope is soon we being able to achieve, with photovoltaic systems, greater autonomy, better performance and lower cost energy generated including equipments, operations and maintenance, that is, everything involved with the implementation of the project proposed by this monograph. Then will be analyzed the use perspective, the technological development process, considerations about the current market and its possible expansion, factors that will influence, over time, the total or partial replacement of conventional methods, some already saturated, of electrification of consumed units, possibly by projects from solar energy.

Keywords: photovoltaic system, solar energy, renewable energy, photovoltaic generation

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIações**

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

COELCE – Companhia Energética do Ceará

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

EUA – Estados Unidos da América

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GEE – Gases de Efeito Estufa

IDER – Instituto de Desenvolvimento de Energias Renováveis

MACFA - Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas

SEMACE – Superintendência Estadual do Meio Ambiente

UECE – Universidade Estadual do Ceará

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

RAMS – Regional Atmospheric Modeling System

## LISTA DE SÍMBOLOS

a-Si – Silício amorfo

CA – Corrente Alternada

ca – O custo total anualizado do sistema

CC – Corrente Contínua

CdTe – Telureto de cádmio

CIS – Disseleneto de cobre-indio

CO – Monóxido de Carbono

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

cr – Energia elétrica total consumida da rede

c-Si – Silício Cristalino

eCA – Energia elétrica consumida por um período de tempo de um ano pelo somatório de cargas primárias em corrente alternada CA

eCC – Energia elétrica consumida por um período de tempo de um ano pelo somatório de cargas primárias em corrente contínua CC

ecm – Consumo de energia elétrica no mês

ep – Valor da tarifa da energia produzida pelo sistema

NOX – Dióxido de azoto

SOX – Dióxido de enxofre

r – Tempo de retorno

vi – Valor investido

vp – Valor pago

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Esquema de uma usina hidrelétrica.....	17
Figura 02 – Potencial da radiação solar no Ceará.....	19
Figura 03 – Exemplo de uma célula fotovoltaica.....	24
Figura 04 – Exemplo de módulo solar de c-Si.....	26
Figura 05 – Exemplo de uma célula fotovoltaica de c-Poli.....	27
Figura 06 – Exemplo de painel solar de a-Si.....	28
Figura 07 – Painel solar fabricado diretamente nas telhas de vidro.....	29
Figura 08 – Exemplo de painel solar flexíveis.....	29
Figura 09 – Primeira usina solar do Brasil em Tauá-ce.....	33
Figura 10 – Sistema fotovoltaico isolado.....	34
Figura 11 – Bóia flutuante em Valente-BA.....	34
Figura 12 – Exemplo de sistema híbrido.....	35
Figura 13 – Sistema conectado à rede.....	36
Figura 14 – Instalação de sistemas fotovoltaicos.....	37
Figura 15 – Especificação do consumo de cada hora do dia.....	46
Figura 16 – Dados de radiação solar.....	47
Figura 17 – Dados de radiação solar.....	48
Figura 18 – Representação do sistema.....	50
Figura 19 – Conta de energia elétrica da residência.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Especificação do consumo diário da residência.....	44
Tabela 02 – Consumo total diário de cada hora da residência.....	45
Tabela 03 – Especificação e orçamento do painel fotovoltaico.....	49
Tabela 04 – Especificação e orçamento do inversor.....	49
Tabela 05 – Sumário de custos do sistema fotovoltaico conectado à rede.....	50
Tabela 06 – Estimativa do tempo de retorno.....	51
Tabela 07 – Emissões de Gases de Efeito Estufa.....	52
Tabela 08 – Valores do custo do sistema, operação, manutenção e a tarifa da energia gerada com sistemas fotovoltaicos contendo até a 14 painéis.....	59

## LISTA DE EQUAÇÕES

1 – Tempo de retorno simples.....	39
2 – Custo total da energia consumida.....	39
3 – Custo da energia elétrica produzida pelo sistema.....	39

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE SBOLOS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE EQUACES.....</b>	<b>14</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TERICO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Energia solar.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Semicondutores.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Clula fotovoltaica.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Tipos de clulas fotovoltaicas.....</b>	<b>26</b>
2.4.1 Silício Cristalino (c-Si).....	26
2.4.2 Silício Cristalino (poli-Si).....	27
2.4.3 Silício Amorfo (a-Si).....	28
2.4.4 Telureto de Cadmio (CdTe).....	29
2.4.5 Disseleneto de Cobre e ndio (CIS).....	30
<b>2.5 Efeito fotovoltaico.....</b>	<b>30</b>
<b>2.6 Estado da arte e perspectivas para energia solar.....</b>	<b>31</b>
<b>2.7 Classificação dos sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>33</b>
2.7.1 - Sistemas Isolados.....	33
2.7.2 - Sistemas Híbridos.....	35
2.7.3 - Sistemas Conectado  Rede.....	36
<b>2.8 Introdução ao programa de simulação HOMER.....</b>	<b>37</b>
<b>2.9 Breve estudo de viabilidade financeira de sistemas.....</b>	<b>38</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSES.....</b>	<b>44</b>
<b>5 CONCLUSES E PERSPECTIVAS.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A vida no nosso planeta está diretamente relacionada com a energia, pois, em qualquer atividade da natureza ela está presente, com ou sem a intervenção do ser humano. Pode-se encontrá-la nos ventos, nas chuvas, nos terremotos, entre outras.

A energia é indispensável à sobrevivência da espécie humana, nas suas diversas formas. O homem sempre buscando formas de evolução, acabou descobrindo formas alternativas de se adaptar ao meio ambiente em que vive. Então, para suprir o seu consumo energético veio à eletricidade, que se tornou uma das formas mais variáveis e úteis. Logo, passando a ser um recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões.

A produção de energia elétrica teve e tem valor importante no mundo moderno, tanto para o progresso quanto para o desenvolvimento. Com a descoberta da energia elétrica foi possível melhorias na saúde, abastecimento de água e fornecimento de alimentos, qualidade de vida e condições sanitárias, também teve contribuição para estabelecer o sistema capitalista e a sociedade de consumo (GUENA, 2010).

Energia pode ser conceituada ou caracterizada, a partir de suas fontes geradoras, como renovável ou não renovável. Entre as renováveis está a geração de energia a partir das usinas hidrelétricas.

Atualmente a grande parte da energia elétrica que chega às residências é gerada através de uma fonte hidráulica, que é a fonte mais utilizada no Brasil para geração de energia elétrica, gerada devido a uma grande quantidade de rios existentes em nosso país. O Brasil possui um rico potencial hidráulico estimado em mais de  $150 \times 10^6$  kW (CREDER, 2002).

A água possui um potencial energético muito grande e é na usina hidrelétrica que esse potencial é utilizado para gerar energia elétrica. É na queda d'água, que as turbinas movimentam um gerador elétrico, que produz energia elétrica, conforme a ilustração da figura 01.

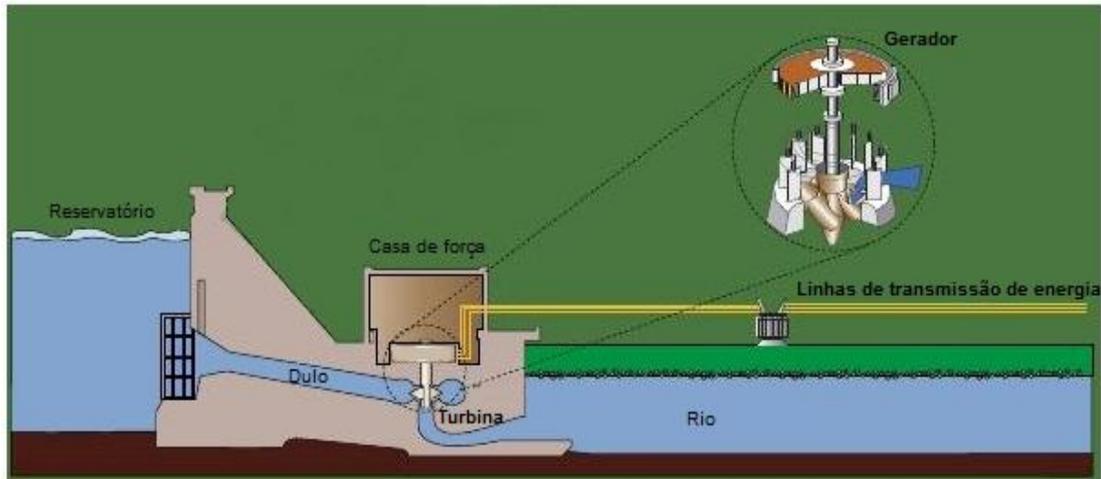


Figura 01: Esquema de uma usina hidrelétrica. Fonte: Adaptado de Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2011).

Embora, a implantação de uma usina, provoque impactos ambientais na fase de construção da represa, esta é uma fonte de energia considerada limpa. Mas não se pode esquecer, os efeitos ambientais negativos causados por grandes projetos hidrelétricos executados, sem os devidos cuidados sócio-econômicos e ambientais.

A construção e implantação de grandes hidrelétricas podem gerar, além de energia elétrica, sérias conseqüências e impactos ambientais capazes de afetar a biodiversidade local e global, a exemplo da emissão de gases de efeito estufa, de provocar impactos sócio-econômicos e afetar a agricultura e a pecuária, dentre outros.

Sendo assim, as usinas hidrelétricas não podem ser consideradas plenamente limpas, pois, cada represa construída, causa o surgimento de grande lagos, que inundam grandes áreas passíveis de urbanização e/ou cultivo, contribuindo para a destruição da biodiversidade, na medida em que restringe a

fauna e a flora originais, cuja decomposição favorecerá produção de gases de efeito estufa GEE (IDER, 2011).

Existem, além das hidrelétricas, várias outras alternativas de geração de energia elétrica, as quais podem ser consideradas não renováveis, geralmente oriundas de combustíveis fósseis, tais como: o carvão (mineral), o gás natural, o petróleo e seus derivados. O processo de formação de tais fontes energéticas pode demandar até milhões de anos (ANEEL, 2008).

O petróleo, como fonte geradora de energia elétrica, contribuiu para o desenvolvimento e o progresso da revolução industrial e de máquinas. Porém, favoreceu o surgimento de alguns fenômenos como: efeito estufa, buraco na camada de ozônio e as chuvas ácidas, causados através da emissão de gases poluentes (CO<sub>2</sub>, CO, SOX e NOX) e outras substâncias (GUENA, 2010).

Portanto, são as energias renováveis que podem, em plena era de decadência do petróleo, possibilitar produzir energia elétrica de forma limpa e sustentável, utilizando-a para ligar um simples aparelho doméstico ou até mesmo, fazer com que carros se movimentem, sem precisar do petróleo como fonte principal de combustível.

Evitando, com isso, causar qualquer tipo de agressão ao meio ambiente, mostrando que uma nova era da história humana, está prestes a acontecer, na qual as fontes de energias renováveis – a exemplo da energia solar – podem se tornar a principal fonte de fornecimento de energia elétrica da Terra. Energia esta, fornecida de forma limpa, vindo a transformar e construir um futuro diferente para o nosso planeta.

A energia solar é a fonte de energia mais abundante na Terra. Se for possível somar todas as outras fontes de energia existentes, ela seria cinco mil vezes superior. Estima-se que a energia solar que atinge a Terra durante apenas 40 minutos, é equivalente para suprir o consumo de energia do mundo todo, em um

ano. Neste sentido, o Brasil dispõe de vários recursos naturais, com ênfase à radiação solar (CASTRO, 2008).

A energia solar tem se destacado, dentre as mais significativas fontes de energia, pelo fato de ser uma fonte de energia praticamente inesgotável, que pode ser usada para a produção de eletricidade, através de painéis solares. E também, pela quantidade abundante de radiação solar, durante quase todo ano, o que estimula o uso deste recurso.

O Brasil é privilegiado em termos de radiação solar, pois dispõe de um grande potencial, capaz de ser aproveitado de forma energética. Estima-se que o potencial de radiação solar no Brasil varia de 1420 a 2230 kWh/m<sup>2</sup>/ano (ROCHA, 2010; ANEEL, 2008).

O Ceará apresenta um dos melhores índices de radiação solar do Brasil, tendo seu potencial estimado em 1825 a 2230 kWh/m<sup>2</sup>/ano, como pode ser visto na figura 02.

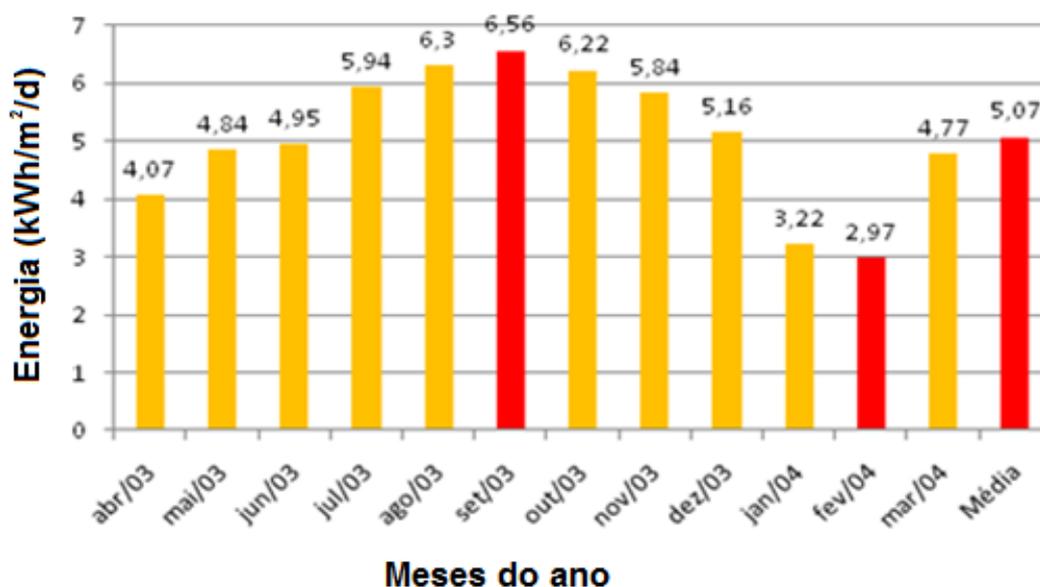


Figura 02 - Potencial da radiação solar no Ceará. Fonte: Adaptado de Rocha (2010).

O Brasil tendo ótimos índices de radiação solar e a crescente preocupação com a disponibilidade de fontes de energia, a energia solar poderá se tornar uma grande possibilidade e importante fonte alternativa de energia elétrica para as residências (urbanas e rurais, locais e/ou remotas da rede de distribuição).

Através da instalação de painéis solares fotovoltaicos, seja sobre seus respectivos telhados, sejam a elas adjacentes, com a tecnologia atual, ou ainda, em breve, com o desenvolvimento e consolidação tecnológica, a partir de filmes finos de células solares adicionados às pinturas de revestimentos das paredes e telhados das respectivas residências.

Então, este trabalho trás uma pesquisa de campo realizada para identificar, caracterizar, especificar e analisar a possível viabilidade financeira de se instalar um sistema fotovoltaico para suprir a demanda energética de uma residência localizada em zona urbana.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico tem como foco a energia solar, mais especificamente, a tecnologia de sistema fotovoltaica para geração de energia elétrica no contexto do suprimento residencial, priorizando autonomia, segurança e qualidade nesta aplicação. Serão considerados, basicamente, os aspectos da demanda energética, funcionais e técnico-financeiros, inerente da tecnologia de painéis fotovoltaicos de silício policristalinos, assim como, uma análise comparativa e perspectivas tecnológicas, filmes finos de telurêto de Cádmo (CdTe), ainda em desenvolvimento.

## 2.1 Energia solar

A Energia solar é proveniente da radiação do Sol e pode ser captada por painéis solares fotovoltaicos, compostos de associação de células fotovoltaicas, e/ou painéis solar-térmicos utilizados para várias aplicações. Como a utilização da energia solar, principalmente, em residências, para o aquecimento da água. Ela é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, pois não polui o meio ambiente e é ilimitada (ANEEL, 2008).

É a energia produzida através de reações nucleares e que se propaga através do espaço interplanetário que incide na superfície da Terra. O total dessa energia em 1 ano é superior a 10.000 vezes o consumo anual de energia bruta da humanidade (CRESEB, 2005).

A vida na Terra depende da energia que vem Sol. Todos os outros recursos energéticos, disponíveis na Terra, são derivados da energia solar, como exemplo pode citar a energia armazenada pelas plantas por meio da fotossíntese. Até as modernas hidrelétricas, cujas represas são abastecidas, graças ao ciclo das águas; os geradores eólicos, alimentados pelos ventos, que são produzidos pelas diferenças de temperatura do ar da atmosfera; os combustíveis fósseis, gerados a partir de resíduos orgânicos de tempos primitivos são alguns exemplos (GTES, 2008).

No Brasil, a produção de energia elétrica, através da energia solar é ainda, considerada pequena, mas vêm demonstrado grandes avanços na geração desse tipo de energia, visto que, somos um dos mais ricos no mundo em incidência de raios solares (ALVARENGA, 2001).

O Brasil é particularmente privilegiado, por ter uma insolação média superior à das nações industrializadas, dada a sua localização geográfica. Para o Brasil não ficar em desvantagem é preciso criar programas que promovam a criação da indústria de energia solar no país. A Agência Nacional de Energia Elétrica, a

Agência Nacional do Petróleo e as empresas que operam no setor elétrico e de combustíveis têm papel preponderante neste processo.

Inúmeras são as vantagens da energia solar: é limpa, pois, seu funcionamento não emite poluente; é portátil, além de ter vida útil longa e a sua manutenção quase não exista. Mas o custo para implantar um sistema desses, de forma a obter energia elétrica, através da energia solar, é a maior desvantagem (GAMBOA, 2001).

Dentre as características deste tipo de energia, podemos citar outras vantagens, tais como:

- Difusa;
- É periódica;
- É silencioso;
- Não consome combustível;
- Tem uma vida útil superior a 20 anos;
- Não produz poluição nem contaminação ambiental;
- Permite aumentar a potência instalada por meio da incorporação de módulos adicionais;
- É resistente as condições climáticas extremas (granizo, vento, temperatura e humidade);
- Eternamente renovável à escala humana, estando disponível em quantidades muito elevadas;

## **2.2 Semicondutores**

Determinado materiais podem ser classificados como condutores ou isolantes, depende da intensidade com que os átomos seguram seus elétrons. O cobre é um bom condutor, enquanto a madeira é um bom isolante. Mas certos materiais, como o Germânio e o Silício, não é nem bom condutor e nem bom isolante. Porém, esses materiais se comportam algumas vezes como isolantes e

algumas vezes como condutores, por essa razão são chamados de semicondutores (HEWITT, 2002).

Situação intermediária entre condutores e isolantes. Uma das propriedades dos semicondutores é a facilidade de se alterar a quantidade de elétrons através de pequenas mudanças nas condições do material; por exemplo, a introdução de pequenas quantidades de impurezas ou variando a voltagem, a temperatura ou a intensidade de luz incidente sobre o material (RESNICK; HALIDAY; KRANE, 1996).

Materiais classificados como semicondutores são encontrados na natureza e se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia. Esses materiais são sólidos, capazes de mudar sua condição de isolante para condutor, com grande facilidade (GTES, 2008).

### **2.3 Célula fotovoltaica**

É o elemento transformador que converte energia solar em energia elétrica, produzida através da utilização de semicondutores, sendo o Silício o mais utilizado (GTES, 2008).

O Silício é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta, mais de 25 % da crosta terrestre é silício e ele é 100 vezes menos tóxico que outros elementos (RÜTHER, 1999).

Para fabricação destas células se remove as impurezas do Silício aquecendo a temperaturas altas e adicionando materiais, com a finalidade de fornecer ao Silício, a capacidade de converter luz em energia elétrica. Após sua finalização, as células são fixadas em uma espécie de caixa, chamada de módulo fotovoltaico (VÉRAS, 2004).

O Silício obtido em forma pura não possui elétrons livres e por isso é um mau condutor elétrico. Para alterar isto é acrescentado pequenas porcentagens de outro elemento, denominado de dopagem. Dessa dopagem do Silício com outro elemento, no caso o Fósforo, obtém-se um material com elétrons livres ou materiais portadores de carga negativa (NASCIMENTO, 2004).

Atarvés da dopagem do Silício com o Fósforo apresentam elétrons livres ou material denominado de Silício tipo *N*. Já, realizando o mesmo processo, mas acrescentando Boro ao invés de Fósforo, é obtido um material com características inversas, ou seja, um material com deficite de elétrons ou material com cargas positivas, denominados de Silício tipo *P*. Cada célula é composta de uma camada fina de material de Silicio tipo *N* e outra com maior espessura de material de Silicio tipo *P*, como pode ser observado na figura 03 (GTES, 2008).

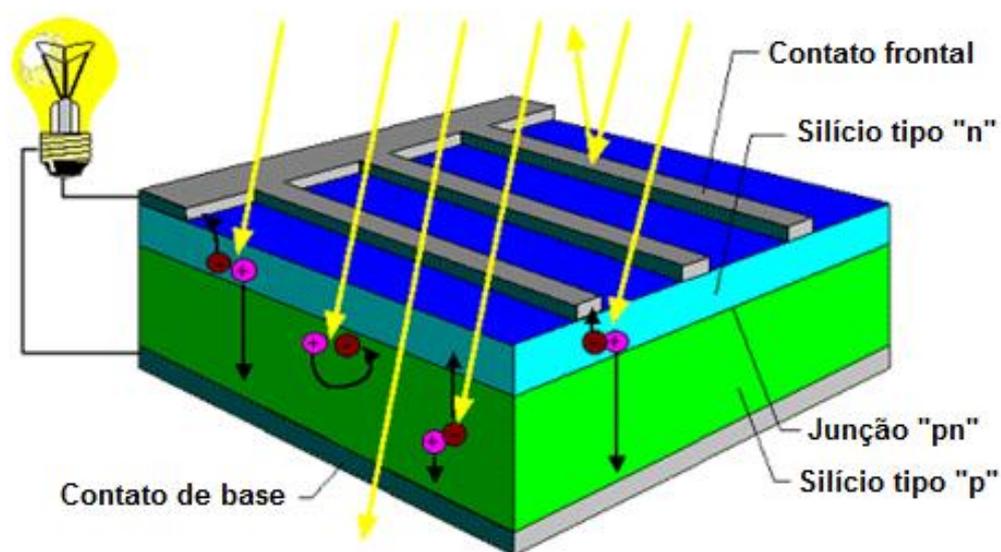


Figura 03 – Exemplo de uma célula fotovoltaica. Fonte: Adaptado de CRESESB (2011).

Tanto a camada fina como a camada que tem a espessura maior, separadamente, elas são eletricamente neutras. Ao se juntarem, exatamente na união *P* e *N*, é gerado um campo elétrico, onde os elétrons do Silício tipo *N*, ocupam os vazios da estrutura do Silício tipo *P* (CRESESB, 2011).

Quando a luz incide sobre a célula, os fótons que a integram, se chocam com os elétrons da estrutura do Silício, gerando energia e os transformando em condutores. É devido ao campo elétrico gerado na união *P* e *N*, que os elétrons fluem da camada *P* para a camada *N* (GTES, 2008).

Através de um condutor externo é gerado um fluxo de elétrons, que por definição, chama-se de corrente elétrica. Este processo continuará ocorrendo, enquanto a luz incidir na célula. Já a intensidade da corrente gerada variará, proporcionalmente, conforme a intensidade da luz incidente, ou seja, quanto mais luz incidir na célula, maior será a corrente gerada (GTES, 2008).

O módulo fotovoltaico contém várias células conectadas em série ou em paralelo, que ao se unir a camada negativa de uma célula, com a positiva da seguinte, farão seus elétrons fluírem de uma célula para outra, através dos condutores. Este fluxo irá se repetir até chegar à última célula do módulo, do qual, será consumida ou acumulada em baterias (CRESESB, 2011).

Cada elétron que abandona o módulo fotovoltaico será substituído por outro, que regressa do acumulador ou da bateria. O cabo da interconexão entre o painel e bateria, conduz o fluxo de elétrons, de modo que, quando um elétron abandona a última célula do módulo e encaminha-se para a bateria, outro elétron entra na primeira célula (CRESESB, 2011).

É por isso que um dispositivo fotovoltaico é considerado inesgotável, pois ele é capaz de produzir energia elétrica em resposta à energia luminosa, absorvida por ele.

A energia elétrica, gerada por uma célula, é considerada pouca, mas, quando se liga, várias células à produção de energia elétrica se torna maior, podendo ser armazenada em baterias e depois utilizada conforme a necessidade (GTES, 2008).

Através do armazenamento em baterias se possibilita o fornecimento de energia elétrica, mesmo em períodos com pouca radiação solar.

## 2.4 Tipos de células fotovoltaicas

Entre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, pode-se destacar, a utilização do Silício cristalino c-Si, do Silício policristalino, do Silício amorfo a-Si, telureto de cádmio CdTe e disseleneto de cobre e índio CIS.

### 2.4.1 Silício Cristalino (c-Si)

O c-Si (figura 04) é uma das tecnologias fotovoltaicas mais tradicionais, que apresenta uma grande produção a nível comercial, se consolidando no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema confiabilidade. No entanto, o custo de produção destes painéis solares é bastante elevado e as possibilidades de reduzi-los, praticamente, estão esgotadas, pois, sua eficiência é em torno de 25% (RÜTHER, 1999).



Figura 04 - Exemplo de módulo solar de c-Si. Fonte: Rütther (1999)

#### 2.4.2 Silício Policristalino (poli-Si)

Os poli-SI (figura 05) são produzidos a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais.

São mais baratas que as de c-SI por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. Porém, sua eficiência é menor em comparação as células de c-SI, ou seja, sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor.

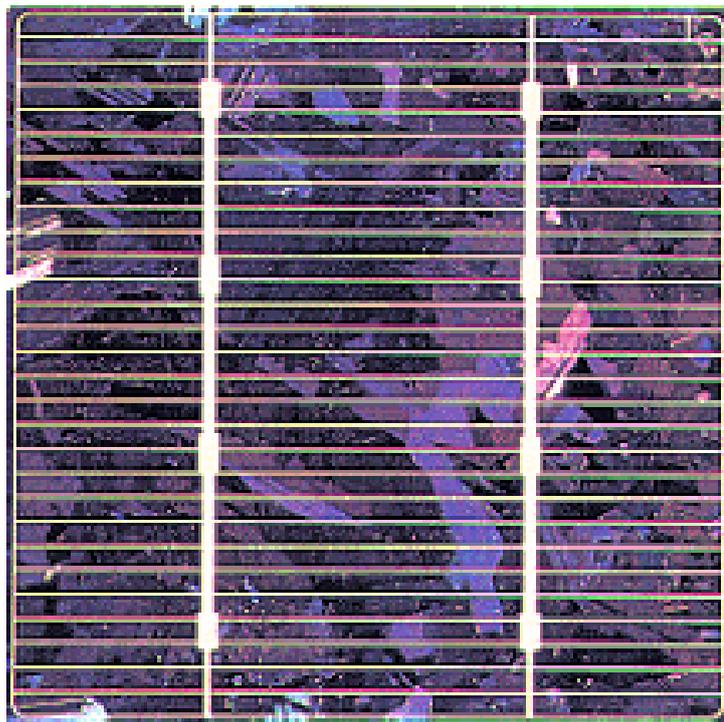


Figura 05 - Exemplo de uma célula fotovoltaica de c-Poli. Fonte: CRESESB (2011).

### 2.4.3 Silício Amorfo (a-Si)

O Silício Amorfo (a-Si), no início dos anos 80, era visto como a grande e única tecnologia fotovoltaica em filmes finos, que eram comercialmente viáveis. Uma tecnologia ideal para aplicação em produtos, onde o consumo elétrico é baixo, por exemplo, relógios, calculadoras entre outros (RÜTHER, 1999).

O a-Si possibilita, na fase de sua fabricação, que seja depositados substratos de baixo custo, como vidro (figuras 06 e 07), aço inox (figura 08) e alguns plásticos. O resultado disso são painéis solares flexíveis (figura 08), inquebráveis, mais leves, semitransparentes (figura 06), com superfícies curvas (figura 07), possibilitando um mercado fotovoltaico variado. O a-Si é esteticamente mais atraente, logo é encontrado em aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil (RÜTHER, 1999).



Figura 06 - Exemplo de painel solar de a-Si. Fonte: Adaptado de Rütther (1999).

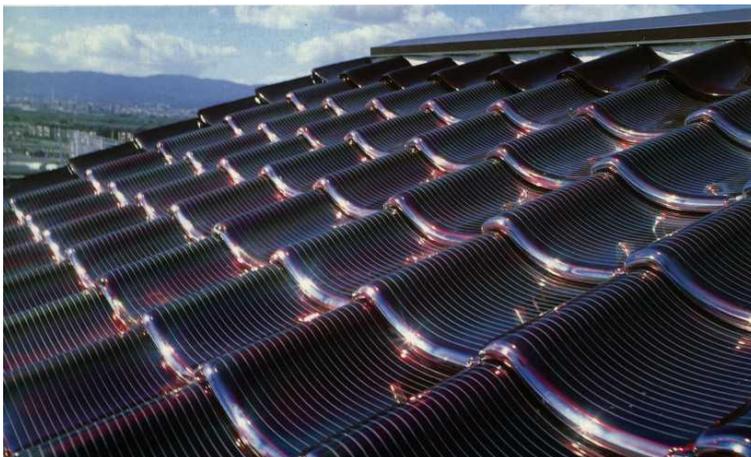


Figura 07 - Painel solar fabricado diretamente nas telhas de vidro. Fonte: Rütther (1999)



Figura 08 – Exemplo de painel solar flexíveis. Fonte: Rütther (1999).

#### 2.4.4 Telureto de Cadmio (CdTe)

O CdTe é um material semicondutor que permite, através da técnica de eletrodeposição, ser depositado em substrato metálico que é um método relativamente simples e barato (LIMA, 2010).

Na forma de filmes finos, é um dos primeiros competidores do c-Si e do a-Si, no mercado fotovoltaico. Os painéis são, normalmente, sob a forma de placas de vidro, em um tom marrom/azul escuro. Ele é esteticamente atrativo, comparado ao c-Si. CdTe com relação a-Si tem custos atrativamente mais baixos, quando produzidos

em grandes escalas e tem grandes chances de competitividade no mercado fotovoltaico, para a geração de potência elétrica (RÜTHER, 1999).

#### 2.4.5 Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

São os compostos baseados no disseleneto de cobre e índio ( $\text{CuInSe}_2$ , ou simplesmente CIS) e disseleneto de cobre, gálio e índio ( $\text{CuInGaSe}_2$ , ou CIGS) (RÜTHER, 1999).

Pelo seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas e custos de produção relativamente mais baixos, pode ser uma tecnologia com competitividade promissora no mercado fotovoltaico. Assim como o a-Si e o CdTe, o CIS é esteticamente interessante, aplicado a projetos arquitetônicos diversos (RÜTHER, 1999).

## 2.5 Efeito fotovoltaico

Em 1839, Edmond Becquerel, verificou a conversão de energia solar, em energia elétrica. Ele observou que a estrutura de um material semiconductor, quando exposto a luz, apresentava uma diferença de potencial nos extremos. E em 1876, foi montado um aparato fotovoltaico, resultado de estudos das estruturas no estado sólido (CRESESB, 2010).

Processo tecnológico que se dá, a partir do uso de módulos solares, que tem na sua composição, células solares, também chamadas, de células fotovoltaicas. Elas criam uma diferença de potencial elétrico, causada pela ação da luz, provinda de uma fonte luminosa, podendo ser solar ou não.

## 2.6 Estado da arte e perspectivas para energia solar

Apesar de o Brasil possuir matriz energética, basicamente, oriunda de hidrelétricas, ele já é o décimo país melhor colocado no ranking mundial de energia solar, atrás apenas de China, Israel, Áustria, Índia, Turquia, Alemanha, Japão, Estados Unidos e Austrália (ABRAVA, 2010).

Mas a tecnologia está a passos lentos no Brasil, embora, o nosso país tenha excelentes condições que nos coloquem em vantagem com relação a outros países. Já na Europa, há o incentivo da utilização dessa fonte alternativa de energia, há séculos, através de políticas públicas (ABRAVA, 2010).

A produção e instalação de sistemas de energia solar já criaram cerca de 770.000 empregos no mundo. Tanto a instalação de aquecedores como a instalação de painéis fotovoltaicos em telhados é considerado um trabalho relativamente bem remunerado em outros países. Nos Estados Unidos, por exemplo, um técnico que instala sistema de energia solar chega a ganhar de 15 a 35 dólares por hora (DIDONÊ, 2009).

O Brasil, que tem um enorme potencial solar, pode encontrar na energia solar, uma grande oportunidade de geração de empregos. Só pra se ter idéia, no território americano é mais de 3.400 empresas no setor de energia solar, empregando cerca de 35.000 funcionários. A Associação das Indústrias de Energia Solar dos EUA prevê um aumento para mais de 110.000 empregos até 2016 (DIDONÊ, 2009).

Mas de acordo com a empresa Solar Brasileira, a energia solar fotovoltaica tem um custo bastante alto e por isso não substitui a geração de energia elétrica convencional. Ela pode ser uma alternativa viável para comunidades que não tem acesso a energia elétrica, gerada de forma convencional, demandas de baixo consumo, assim como, pequenos projetos (SOLAR BRASIL, 2010).

Outras tecnologias podem vir ser grandes oportunidades para, gradualmente, serem introduzidas no mercado de sistemas derivados da energia solar, com custos mais baixos, mesmo que estas tecnologias correspondam a uma pequena fração do mercado global fotovoltaico (BRITO, 2009).

Trabalhos de pesquisa estão sendo realizadas, com intuito de se buscar novas alternativas, na fabricação de células fotovoltaicas, principalmente, para reduzir seus custos. Estes trabalhos de pesquisas estão direcionados a células fotovoltaicas de filmes finos. Atualmente, há três tipos de módulos fotovoltaicos de filmes finos disponíveis no mercado e que são fabricados a partir de silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe) (JANNUZZI; VARELLA; GOMES, 2009).

Existe um grande numero de pesquisas em células fotovoltaicas de CdTe em vários países, o objetivo principal é reduzir os custos de produção das células fotovoltaicas. A tecnologia de filmes fino é a segunda geração das células fotovoltaicas e já estão disponíveis no mercado. A grande vantagem dos filmes finos é por serem produzidas através de técnicas simples que se utiliza de camadas semicondutoras até cem vezes menos espessas que as de silício policristalino, como conseqüência disto, os dispositivos de filmes finos apresentam um menor custo (LIMA, 2010).

A energia solar pode vir a ser uma alternativa viável para suprir as necessidades energéticas presentes e futuras da sociedade local e global. Porém, são necessários, investimentos tecnológicos, financeiros, coerência e ética entre as pesquisas acadêmicas e as políticas públicas.

Como exemplo, a instalação da primeira usina solar do Brasil, construída no estado no Ceará no município de Tauá, a 350 quilômetros de Fortaleza. Um investimento de R\$ 10 milhões de reais. A usina tem uma capacidade inicial de 1MW, que é o suficiente para abastecer 1500 residências cearenses (figura 09). Porém, a empresa já possui autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL) e da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMACE) para a ampliação da capacidade da planta para 5 MW.



Figura 09: Primeira usina solar do Brasil em Tauá-ce. Fonte: Diário do Nordeste (2011).

## 2.7 Classificação do sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico é classificado de acordo com sua configuração de instalação, que pode ser dividida em três categorias: sistemas isolados, híbridos e conectados a rede (CRESESB, 2011).

### 2.7.1 Sistemas Isolados

São sistemas que armazenam a energia elétrica que foi gerada, normalmente, é armazenado em baterias. Este tipo de sistema é mostrado pelo esquema da figura 10.

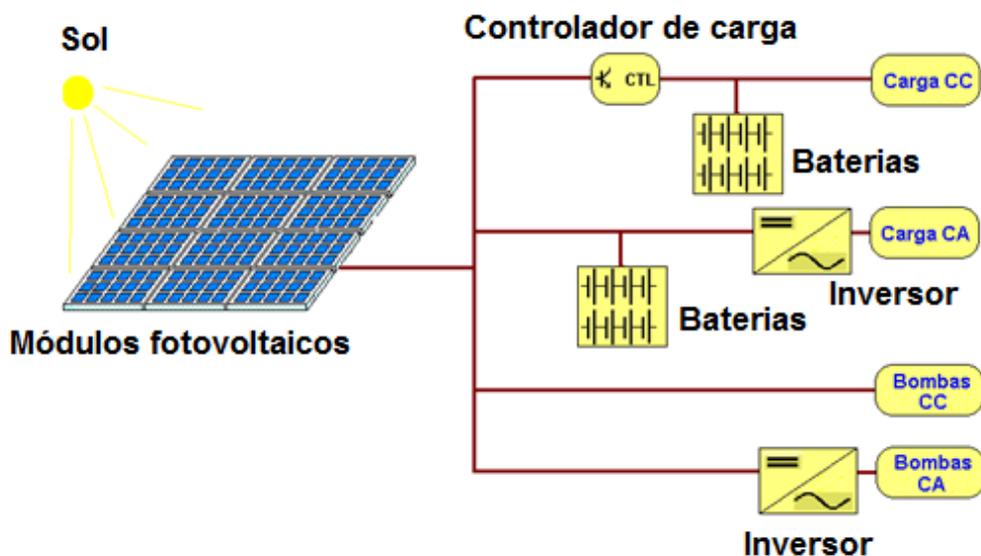


Figura 10: Sistema fotovoltaico isolado. Fonte: Adaptado de CRESESB (2011)

Mas nem todos os sistemas isolados necessitam armazenar essa energia como, por exemplo, na irrigação, onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocada em reservatórios (figura 11). (CRESESB, 2011).



Figura 11 - Bóia flutuante em Valente-BA. Fonte: CRESESB (2011).

Para esses tipos de sistemas, alguns equipamentos são de fundamental importância como:

- Controlador de Carga que tem por função controlar a carga e descarga da energia que vai ser armazenada na bateria e também de controlar a carga que é usada em sistemas pequenos, onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).
- Inversor, que é utilizado para alimentar os equipamentos de corrente alternada (CA).

### 2.7.2 Sistemas Híbridos

Esses sistemas são desconectados da rede convencional e apresentam várias fontes de geração de energia, através de vários sistemas diferentes, que buscam o fornecimento de energia, pelo aproveitamento racional e buscando a melhor situação para cada sistema, são eles: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras formas de geração, como mostrado na figura 12 (CRESESB, 2011).

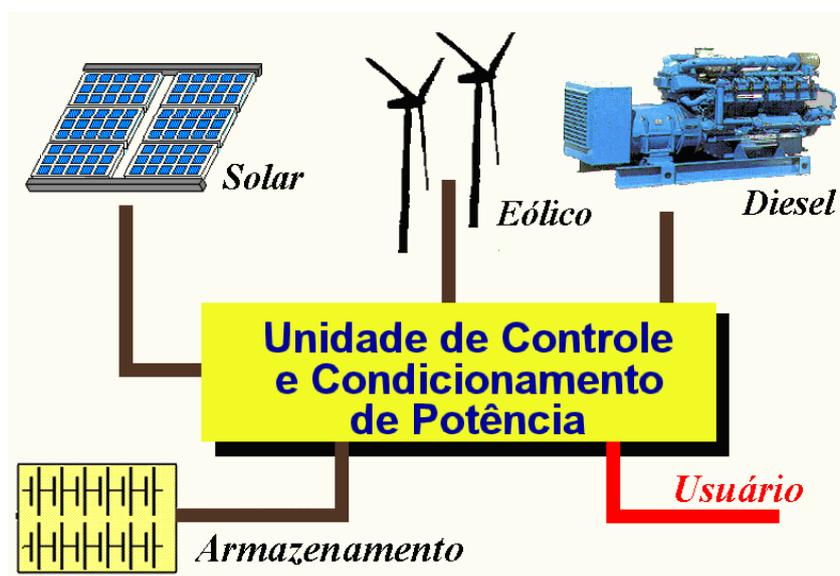


Figura 12 - Exemplo de sistema híbrido. Fonte: CRESESB (2011).

São bastantes empregados para instalações de médio a grande porte, visando atender um número maior de usuários, onde a quantidade de energia, que irá ser gerada é muito grande. Nesse tipo de sistema, se trabalha com cargas de corrente contínua, o que vê a necessidade de um inversor (CRESESB, 2011).

### 2.7.3 Sistemas Conectado à Rede

Nestes sistemas é utilizado um grande número de painéis fotovoltaicos e não há necessidade de armazenar energia, porque toda a energia que é gerada vai direto para rede. É um sistema que representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte, ao qual esta ligada.

O sistema fotovoltaico é ligado a inversores, que é ligado diretamente na rede, como é mostrado no esquema da figura 13. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança da concessionária do serviço, para que a rede não seja afetada (CRESESB, 2011).

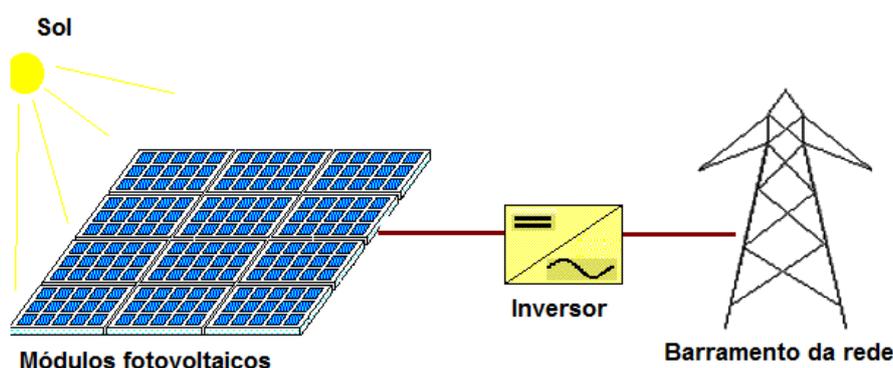


Figura 13 - Sistema conectado à rede. Fonte: CRESESB (2011).

Sistemas fotovoltaicos conectados a rede convencional é uma forma muito atraente para quem pretende rentabilizar um telhado ou um terreno, próximo de habitações.

Os sistemas fotovoltaicos, conectados à rede, foram responsáveis por 94% do total instalado em 2007 (Figura 14), ou seja, os outros 6% restantes correspondem a sistemas não conectados à rede. Relatos de países que investem em energia solar informam que ao longo do tempo, a forte tendência do mercado está voltada para os sistemas fotovoltaicos, conectados à rede elétrica. Os avanços da indústria fotovoltaica e seu crescimento vertiginoso, a partir da década de 90, devem-se a políticas públicas implementadas por vários países (JANNUZZI; VARELLA; GOMES, 2009).



Figura 14: Instalação de sistemas fotovoltaicos. Fonte: Adaptado de Jannuzzi, Varella e Gomes (2009)

## 2.8 Introdução ao software de simulação HOMER

É um software de modelagem disponibilizado gratuitamente na versão 2.68 e acessível no endereço [www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com). Uma ferramenta com a função de projetar e analisar sistemas híbridos e assim auxiliar os usuários nas configurações, simulações, avaliações e direcionando o melhor sistema para eletrificação de unidades de consumo (ROCHA, 2010).

O HOMER faz varias simulações comparando os resultados e obtendo uma estimativa do capital e das despesas operacionais. Determina a viabilidade econômica de um sistema híbrido de energia e apresenta a alternativa financeira mais vantajosa dentre as várias fontes de energia renováveis em relação à rede elétrica de distribuição, aqui representada pela concessionária Companhia Energética do Ceará (COELCE).

Possibilitando ainda atentar para os impactos ambientais mediante a estimativa de emissões de gases de efeito estufa relacionados a cada processo produtivo de eletricidade (ROCHA, 2010; HOMER, 2011).

Tem por objetivo principal a identificação do sistema de menor custo e melhor viabilidade financeira e que seja capaz de suprir a demanda de eletricidade de uma determinada unidade consumidora, seja ela uma residência urbana, rural, uma comunidade, uma empresa ou uma indústria (ROCHA, 2010).

## **2.9 Breve estudo de viabilidade financeira de sistemas fotovoltaicos**

A análise da viabilidade financeira pode ser feita de forma simplificada a partir da estimativa do tempo de retorno simples do capital investido no projeto de um sistema fotovoltaico para suprimento energético, objeto desta monografia. Será aqui considerado com resultado satisfatório um tempo de retorno simples inferior ao tempo de vida útil do sistema fotovoltaico simulado nesta monografia.

Tempo de retorno simples ( $r$ ) do capital investido, representado na equação 1, permite analisar a viabilidade econômica do investimento, sem considerar a taxa de juros. Através de uma divisão do custo da implantação do empreendimento pelo benefício auferido, o resultado desta divisão, mostra o tempo necessário, para que os benefícios se igualem ao que foi investido (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2006).

A viabilidade financeira do sistema fotovoltaico pode ser obtida através da razão entre o total investido (custo de aquisição, reposição, operação e manutenção) do sistema fotovoltaico na unidade de consumo, neste caso residencial, e valor do custo mensal da energia elétrica produzida pelo sistema, conseqüentemente consumida pelo usuário deste sistema, estimado através da equação 1.

$$r = \frac{vi}{vp} \quad (1)$$

Em que,  $r$  corresponde ao tempo do retorno simples do investimento,  $vi$  corresponde ao valor do capital investido, e  $vp$  corresponde ao custo total da energia elétrica, produzida, melhor detalha pela equação 2.

$$vp = ep \times ecm \quad (2)$$

Em que,  $ecm$  representa a energia consumida mensalmente na residência e  $ep$  representa o valor da tarifa da energia produzida pelo sistema, especificado na equação 3.

Basicamente, a produção de eletricidade, como todo processo produtivo, demanda custos relativos a aquisição e reposição de equipamentos, custos de operação e manutenção. Sendo assim, o custo da energia elétrica produzida pode ser estimado, com a ajuda do software HOMER, em função da razão do custo total anualizado do sistema de produção de eletricidade e energia elétrica consumida no período de um ano, cuja unidade é o kWh/ano, conforme equação 2 (ROCHA, 2010; HOMER, 2011).

$$ep = \frac{ca}{eCA + eCC + cr} \quad (3)$$

O HOMER auxilia no cálculo do custo da energia produzida  $ep$  através da equação 3, na qual  $ca$  representa o custo total anualizado do sistema [R\$/ ano],  $eCA$

representa a energia elétrica consumida por um período de tempo de um ano pelo somatório de cargas primárias em corrente alternada CA [kWh/ano],  $e_{CC}$  representa a energia elétrica consumida por um período de tempo de um ano pelo somatório de cargas primárias em corrente contínua CC [kWh/ano], e  $cr$  representa a energia elétrica total consumida da rede [kWh/ano] (HOMER, 2011).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da análise da viabilidade de um sistema solar fotovoltaico, referente à eletrificação residencial, é necessário o conhecimento da quantidade de eletricidade residencial demandada e a análise comparativa entre as opções de suprimento energético, seja através da concessionária local, seja através de alternativas, a partir de fontes renováveis de energias e a seleção da melhor opção de suprimento energético.

A seleção da melhor opção de sistema de pleno e satisfatório atendimento, evidentemente, precisa focar, além dos aspectos técnicos de qualidade, segurança e eficiência, aquele que, geralmente, apresenta-se como fator decisivo no mercado de energia, o aspecto financeiro, que define o preço do sistema de suprimento elétrico, o custo da energia gerada e tempo de retorno deste investimento. Assim, foi escolhida uma residência tipo comum, de um aluno do curso de Física da Universidade Estadual do Ceará (UECE), residente no município cearense de Fortaleza, mais especificamente, onde reside o autor desta monografia.

Os dados técnicos de painéis fotovoltaicos e inversores foram buscados no mercado nacional, através de busca na internet, com foco na melhor qualidade técnica e menor custo. As alternativas encontradas foram submetidas a uma análise comparativa, e posteriormente, selecionada àquela, de melhor atendimento à demanda técnica, com menor custo.

O dimensionamento e especificação do sistema fotovoltaico para geração alternativa de eletricidade foi elaborado para que este atenda e satisfaça plenamente, com qualidade, continuidade e segurança, a demanda elétrica da amostra. Assim sendo, faz-se necessário a caracterização desta demanda, a fim de que, se possa dimensionar o sistema fotovoltaico, para suprimento alternativo de eletricidade da amostra em estudo, em função, da estimativa de potencial de radiação solar da região geográfica, na qual, a amostra se localiza.

O potencial de radiação solar foi estimado a partir de Rocha (2010) e com o auxílio computacional do software HOMER. A partir do auxílio computacional do software HOMER 2.68, foram estimados os dados de radiação solar, através da especificação das coordenadas geográficas da região da residência, definida pelas latitudes inicial e final e longitudes inicial e final, que abrange a região de Fortaleza, capital do Estado do Ceará.

O método aplicado para eletrificação alternativa de uma residência urbana, através de um sistema fotovoltaico, consiste, basicamente, nas seguintes etapas:

1) Conhecer e estimar a demanda de energia elétrica: Pesquisa de campo para identificação, caracterização, especificação e análise da demanda energética de uma amostra de residência fortalezense; Identificação e especificação técnica de todos os equipamentos elétricos disponíveis utilizados na residência em estudo, devidamente relacionados aos respectivos dados técnicos e períodos de utilização diária e mensal;

2) Conhecer e estimar, com auxílio computacional do HOMER ver. 2.68, o potencial de radiação solar da região, na qual, localiza-se a residência considerada, para simulação de aplicação do sistema fotovoltaico desta monografia;

3) A partir das etapas anteriores (1 e 2), analisar os dados obtidos, dimensionar e projetar, através de pesquisa de mercado dos equipamentos necessários e auxílio do software HOMER 2.68, um sistema fotovoltaico capaz de suprir de eletricidade, a unidade de consumo residencial a ser especificada nesta monografia;

4) A partir da etapa anterior (3), como auxílio computacional do software HOMER 2.68, especificar os custos de aquisição, operação e manutenção dos equipamentos que comporão o sistema fotovoltaico projetado; proceder simulações e análises comparativas, dentre as várias possíveis configurações do sistema fotovoltaico projetado, para suprimento de eletricidade a unidade de consumo residencial a ser especificada nesta monografia; suprimento de eletrificação, capaz de atender, plena e adequadamente, à demanda da respectiva residência; análise da viabilidade financeira, com o auxílio do software HOMER, do sistema fotovoltaico dimensionado e projetado, para em seguida, selecionar a melhor opção financeira,

para o suprimento de energia elétrica alternativa, da unidade de consumo residência fortalezense, a ser caracterizada como amostra, neste estudo de caso;

5) Seleção, através de análise comparativa de custos de suprimento de eletricidade convencional e alternativo, da melhor opção de configuração e operação do sistema fotovoltaico, capaz de suprir de eletricidade, com qualidade e menor custo possível, à demanda de eletricidade da residência urbana fortalezense deste estudo de caso.

6) Estimativa do Tempo de Retorno simples do investimento no projeto proposto de sistema fotovoltaico, para eletrificar uma unidade de consumo residencial do município de Fortaleza, e determinação da viabilidade do respectivo projeto.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para se estimar o consumo de energia elétrica da residência foi feito um levantamento detalhado de todos os aparelhos existentes na residência, devidamente, relacionados com suas respectivas potências. Dessa forma, foram detalhados, quais os aparelhos utilizados em cada cômodo da residência e a quantidade que continham em cada cômodo, posteriormente, sendo possível determinar a frequência de utilização desses aparelhos durante o dia e a quantidade de horas que eles eram utilizados, como pode ser visto na tabela 01.

Tabela 01: Especificação do consumo diário da residência

Cômodo	Aparelho	Quantidade	Potência (kW)	Potência Total (kW)	Horas	Consumo (kWh)
Sala	Lâmpada	2	0,03	0,06	6	0,36
	Televisor	1	0,135	0,135	14	1,89
Dormitorio I	Lâmpada	1	0,015	0,015	4	0,06
	Televisor	1	0,047	0,047	4	0,188
	Rádio	1	0,014	0,014	10	0,14
	Ventilador	1	0,085	0,085	8	0,68
Dormitorio II	Lâmpada	1	0,015	0,015	4	0,06
	Ventilador	1	0,18	0,18	6	1,08
	Computador	1	0,085	0,085	8	0,68
Dormitorio III	Lâmpada	1	0,015	0,015	4	0,06
	Televisor	1	0,13	0,13	5	0,65
	Ventilador	1	0,085	0,085	10	0,85
Dormitorio IV	Lâmpada	1	0,015	0,015	8	0,12
	Computador	1	0,18	0,18	12	2,16
	Ventilador	1	0,055	0,055	10	0,55
Cozinha	Lâmpada	1	0,015	0,015	4	0,06
	Geladeira	1	0,0228	0,0228	24	0,5472
Banheiro I e II	Lâmpada	1	0,015	0,015	2	0,03
	Lâmpada	1	0,015	0,015	2	0,03
Varanda	Lâmpada	1	0,015	0,015	4	0,06
Garagem	Lâmpada	1	0,015	0,015	4	0,06
<b>Total</b>						<b>10,3152</b>

Para especificar o perfil de demanda de energia elétrica foram pesquisados e caracterizados, os períodos de utilização de cada equipamento, ao longo do tempo, inicialmente de um dia e depois se estima a demanda mensal, conforme representados na tabela 02. Assim uma melhor caracterização da análise comparativa dos valores de consumo da residência.

Tabela 02: Consumo total diário de cada hora da residência

<b>Hora</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
0h	0,6718
1h	0,5418
2h	0,3468
3h	0,3468
4h	0,3468
5h	0,3468
6h	0,1928
7h	0,1228
8h	0,1718
9h	0,1718
10h	0,0518
11h	0,1878
12h	0,3378
13h	0,3928
14h	0,3928
15h	0,2578
16h	0,3378
17h	0,3378
18h	0,5498
19h	0,5648
20h	0,8448
21h	0,8598
22h	0,8928
23h	1,0468
<b>Total</b>	<b>10,3152</b>

A partir dos valores apresentados na tabela 02, pode-se construir um gráfico, mostrado conforme a figura 15. Onde estão as especificações do consumo de energia de forma mais objetiva. Podemos observar que, na residência, há uma variação de energia consumida no período das 24 horas do dia, com um consumo mínimo de 0,0518 kWh por hora e um pico de 1,0468 kWh por hora.

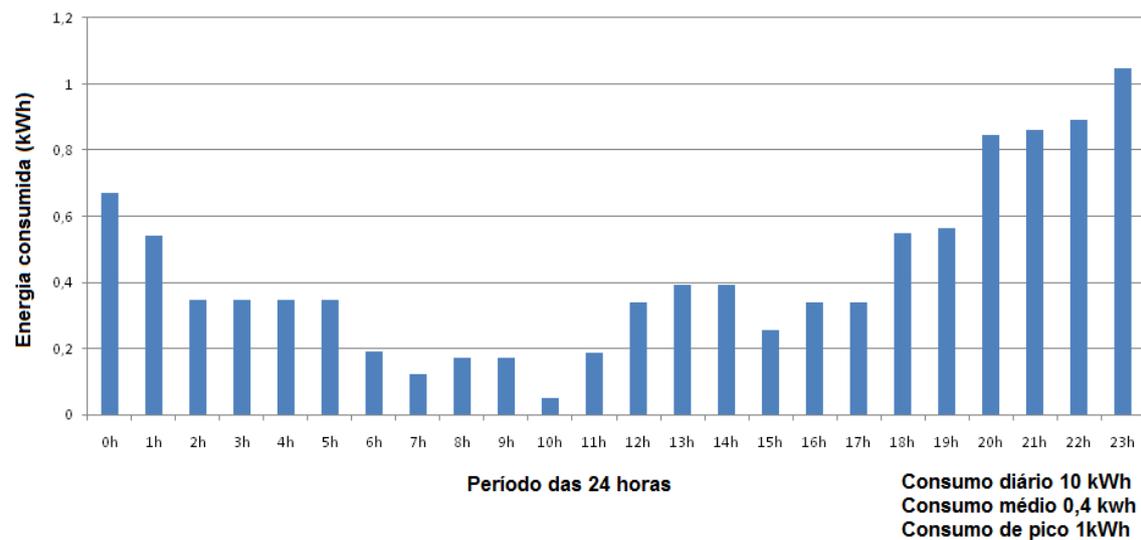


Figura 15: Especificação do consumo de cada hora do dia

Com uma operação básica, multiplica-se o resultado da somatória de todos os consumos registrados na tabela 3 e multiplica por 30 dias, obtém-se a energia consumida no mês, que é de 309,456 kWh/mês.

A estimativa do potencial solar do local da residência foi feita a partir do auxílio do software HOMER e resulta pela análise comparativa e validação, com os dados estimados por Rocha (2010).

A estimativa do potencial solar obtido por Rocha (2010) foi feita a partir de uma base de dados de radiação solar, criada através do software computacional RAMS, instalado na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e no laboratório de informática do curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceara (MACFA).

Aplicando o procedimento de modelagem numérica com o auxílio do software RAMS e de visualização dos respectivos dados através do FERRET, foi possível encontrar a estimativa de potencial de radiação solar da cidade de Fortaleza.

Os dados obtidos por Rocha (2010) tem índices de radiação solar máximo de 6,27 kWh/m<sup>2</sup>/dia, no mês de março e valor mínimo de 5,28 kWh/m<sup>2</sup>/dia, no mês de junho, e uma média anual de 5,27 kWh/m<sup>2</sup>/ano, como pode ser visto na figura 16.



Figura 16: Dados de radiação solar. Fonte: Adaptado de Rocha (2010).

Através de uma pesquisa foi verificado os dados da localização geográfica como o ponto de latitude 3°45'44.00" ao Sul e de Longitude 38°32'43.71" ao Oeste. Com esses dados o software HOMER calcula através de uma pesquisa via internet quais os índices de radiação da localização geográfica definida pelo o usuário do software.

Os dados obtidos através do software HOMER tiveram como índice de radiação solar máximo, um valor de 6,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia, no mês de setembro e um valor mínimo de 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia, no mês de Abril, tendo uma media de 5,3 kWh/m<sup>2</sup>/ano, como pode ser visto na figura 17.

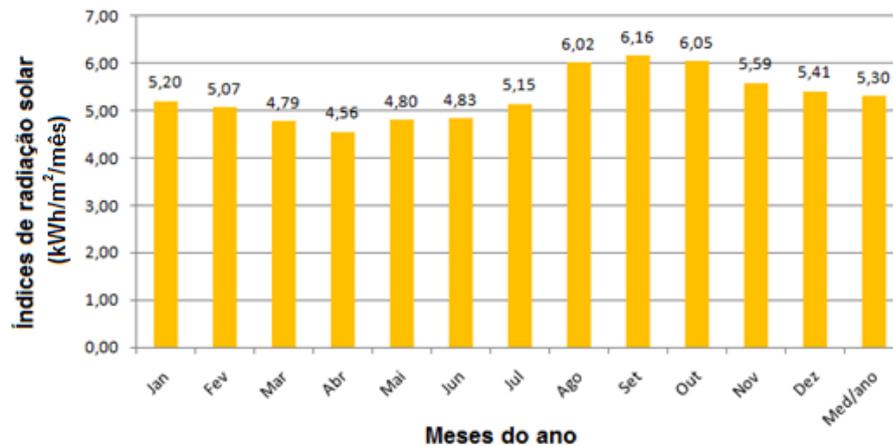


Figura 17: Dados de radiação solar. Fonte: Adaptado do software HOMER.

Então, a partir da comparação dos dados obtidos por Rocha (2010) e os dados obtidos através do software HOMER, tem-se valores quantitativos muito próximos.

Os dados do potencial solar são introduzidos no software HOMER, como dados de entrada para se especificar o recurso. E através das configurações necessárias são feitas simulações para possíveis configurações de sistemas, nas quais prioriza a viabilidade financeira.

Com o resultado do consumo mensal obtido, foi feita uma pesquisa no mercado nacional, onde foi obtido um orçamento de um sistema que suprisse a demanda energética da residência, que é de aproximadamente 310 kWh/mês, então, para essa demanda foi escolhido um sistema conectado à rede elétrica de distribuição.

Através da pesquisa de mercado dos equipamentos necessários foi direcionado um sistema fotovoltaico que suprisse a demanda energética da residência, parcialmente, de forma que a tarifa da energia gerada pelo sistema fosse a mais vantajosa possível. Na tabela 03 é especificado o painel fotovoltaico com o orçamento e especificações.

Tabela 03: Especificação e orçamento do painel fotovoltaico

<b>Especificação e custos de Painéis fotovoltaicos</b>	
Quantidade	1
Potência (kW)	0,13
Custo de aquisição (R\$)	1300
Custo de reposição (R\$)	1300
Custo de Operação e manutenção (R\$/ano)	26

Fonte: Adaptado de SOLAR BRASIL (2011)

Na tabela 04 é especificado o inversor ou conversor de corrente contínua para corrente alternada com o orçamento.

Tabela 04: Especificação e orçamento do inversor

<b>Especificação e custo do inversor</b>	
Quantidade	1
Potência (kW)	2,8
Custo de aquisição (R\$)	6.832
Custo de reposição (R\$)	6.832
Custo de Operação e manutenção (R\$/ano)	1.366

Fonte: Adaptado de SOLAR BRASIL (2011)

A partir das especificações e dos orçamentos vistos na tabela 03 e 04 e através da utilização do programa computacional HOMER 2.68, pode-se detalhar os custos de aquisição, operação e manutenção de forma mais específica e objetiva do sistema fotovoltaico.

De acordo com a representação da figura 18, extraída do software HOMER, pode ser visto de forma mais simplificada a composição do sistema fotovoltaico, que no caso, é um sistema conectado a rede elétrica.

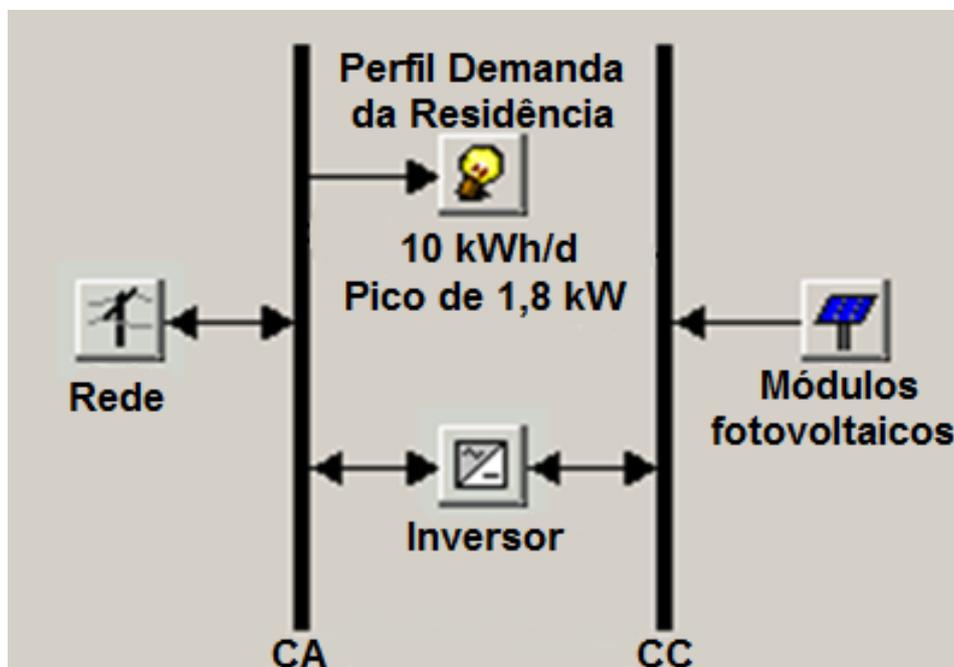


Figura 18: Representação do sistema. Fonte: Adaptado do software HOMER (2011).

Os custos do sistema, da tarifa e da manutenção do melhor sistema fotovoltaico, ou seja, o mais viável financeiramente e ecologicamente, de acordo com os resultados obtidos a partir da utilização do software HOMER, podem ser vistos na tabela 05.

Tabela 05: Sumário de custos do sistema fotovoltaico conectado à rede

<b>Sumário do Sistema de Eletrificação</b>	<b>Custos</b>
Sistema (R\$)	31.329,60
Energia gerada (R\$/kWh)	0,6576
Operação e manutenção (R\$/ano)	2.158,40

Fonte: Adaptado do programa HOMER

A partir da equação 1 e com os custos do sistema fotovoltaico, instalação, manutenção e operação e o valor do kWh da energia elétrica gerada pelo sistema é possível estimar o tempo de retorno simples, do que foi investido no projeto, observado na tabela 06.

Tabela 06: Estimativa do tempo de retorno

Custo Total do Sistema (R\$) – $vi$	31.329,60
Demanda mensal média de eletricidade (kWh/mês) – $ecm$	309,46
Custo da Energia Produzida (Tarifa R\$/kWh) – $ep$	0,66
Custo médio da energia demandada – $Eq 2$	203,50
Tempo de Retorno simples – $r$ (meses)	153,96
Tempo de Retorno – $r/12$ (anos)	12,83

O sistema fotovoltaico, nesse caso, tem um tempo de retorno de aproximadamente 13 anos, conforme estimativa mostrada na Tabela 8. Comparado a vida útil dos painéis fotovoltaicos, que é de 25 anos, o usuário teria aproximadamente 12 anos de energia gerada considerada de baixo custo, ou seja, quase gratuita. Depois dos 25 anos, os painéis ainda gerariam energia, mas com rendimento menor, porém o sistema estaria pago.

Na figura 19 são especificados, pela conta de energia da residência, os valores referentes ao consumo mensal em kWh e o valor pago pelo consumo. A partir da divisão do valor pago de R\$ 126,47 e do consumo de 282 kWh é possível encontrar o valor da tarifa da energia elétrica em R\$/kWh pago pelo usuário da residência a concessionária de energia elétrica, que fornece energia para o estado do Ceará, COELCE. O valor da tarifa encontrado em R\$/kWh (reais por quilowatt-hora) é de aproximadamente R\$ 0,45 por kWh.

Então, o valor da tarifa da energia produzida pelo sistema fotovoltaico foi de aproximadamente R\$/kWh 0,66 e o valor da tarifa da energia fornecida pela rede elétrica é de aproximadamente R\$/kWh 0,45.

INFORMAÇÕES SOBRE O FATURAMENTO DO CONSUMO							
Leit. Atual	Leit. Anterior	Const.	Consumo (kWh)	Cons. Incl.	Cons. Fat.	Tarifa (R\$/kWh)	Valor (R\$)
16358	16076	1,0	282	0,0	30	0,19894	5,96
					70	0,34108	23,87
					120	0,51157	61,38
					62	0,56842	35,26
11/04/11	12/03/11		30 DIAS		282		126,47
DESCRIÇÃO							VALOR (R\$)
VALOR CONSUMO DO MES							126,47
ICMS COMPLEMENTAR BAIXA RENDA-CONV CONFAZ 079							9,13
MULTA MORATORIA REF 01/2011							2,79
CORRECAO MONETARIA DO MES							1,43
JUROS DO MES							2,09
ILUMINACAO PUBLICA MUNICIPAL							20,53
PIS-COFINS COMPLEMENTAR-TARIFA BAIXA RENDA							1,89
VENCIMENTO					16/05/2011	TOTAL A PAGAR (R\$)	
						164,33	

Figura 19: Conta de energia elétrica da residência. Fonte: COELCE (2011).

Através do software HOMER aplicação do sistema fotovoltaico que foi configurado representar algumas vantagens sócio-econômicas e ambientais, conforme mostrado na tabela 07.

Tabela 07: Emissões de Gases de Efeito Estufa

Poluentes	Emissões do Sistema (kg/ano)	Emissões da Rede (kg/ano)
Dióxido de Carbono (CO2)	2.103	2.353
Dióxido Sulfúrico	9,12	10,2
Óxido de Nitrogênio	4,46	4,99

Fonte: Adaptado do software HOMER

## 5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Considerando que o tempo de retorno simples foi estimado em 13 anos e a vida útil média do sistema fotovoltaico é de 25 anos, conclui-se que esse sistema torna-se financeiramente viável.

A partir do desenvolvimento e dos resultados deste trabalho, pode-se concluir, que a energia elétrica gerada através da energia solar, vem sendo cada vez mais utilizada. E uma de suas grandes vantagens de utilizá-la é por ser totalmente limpa e renovável, sem depender de combustíveis fósseis, sem emitir poluentes e sua manutenção ser extremamente facilitada.

Uma das grandes desvantagens desta forma de geração de energia elétrica é o custo de aquisição dos equipamentos, que ainda tem custos bastante elevados. Nos resultados foi mostrado, que a geração de energia elétrica, a partir dos painéis fotovoltaicos, pode ser viável, mas o tempo de retorno em geral é muito longo, o que pode inviabilizar financeiramente o projeto.

Pode-se notar que os painéis fotovoltaicos, com a atual tecnologia de cristais de silício, para geração de eletricidade aplicada a residências urbanas, ainda não são financeiramente viáveis em curto prazo, porém, quando se usa um sistema conectado a rede, o tempo de retorno do investimento diminui, podendo ser viável, dependendo do projeto. Foi mostrado, que um dos motivos da possível viabilidade do sistema conectado a rede é a forma de gerar energia elétrica junto à rede convencional.

O sistema fotovoltaico conectado a rede, com a atual tecnologia de cristais de silício, para gerar eletricidade aplicada a residências urbanas, pode ser uma ótima alternativa para consumidores isolados ou localizados remotamente distantes da rede elétrica da concessionária, que no caso do Ceará é a COELCE. Há a possibilidade de aplicá-los em locais distantes, que promovam situações de

manutenção da vida, principalmente humana, e/ou promovendo o desenvolvimento de atividade laboratorial e contribuindo para o desenvolvimento sócio-econômico.

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser alavancados e viabilizados, financeiramente, com a utilização de novas tecnologias, a exemplo de filmes finos de CdTe. Trabalhos de pesquisas vêm sendo realizados em cima de filmes finos, que além de apresentar atrativo estético, seus custos de produção são baixos, quando produzidos em grande escala. Uma tecnologia com ótimas chances de despontar, tornando-se um forte competidor no mercado fotovoltaico, para a geração de energia elétrica.

Espera-se que como o desenvolvimento da tecnologia de filmes finos de CdTe dentre outros, seja possível reduzir consideravelmente os custos e melhorar o desempenho dos painéis ou módulos fotovoltaicos.

## REFERÊNCIAS

ABRAVA, Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento/Departamento Nacional de Aquecimento Solar. Disponível em: <http://www.abrava.com.br/?Canal=8&OperId=3003&Channel=Tm90JiMyMzc7Y2lhcw==>. Acesso em 17 de março de 2011.

ALVARENGA, Carlos Alberto, Energia solar, Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\\_Solar%283%29.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf). Acesso em 04 de janeiro de 2011.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>. Acesso em 04 de abril de 2011.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3 ed. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília – DF, Brasil, 2008.

ANEEL. Energia Hidráulica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, p. 2. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_par2\\_cap3.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap3.pdf). Acesso em: 10 de abril de 2011.

BRASIL, SOLAR. Tecnologia e Energia Fotovoltaica LTDA. Cartilha de energia solar, 2010. Disponível em: <http://www.solarbrasil.com.br/Cartilha%20Solar%202010.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2011.

BRITO, Miguel Centeno. Urbanismo e Construção. Energia Solar Fotovoltaica, 2009. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/urbanismo%20e%20construcao.pdf>. Acesso em 22 de fevereiro de 2011.

CASTRO, Rui M. G. Energias renováveis e produção descentralizada, 2002. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/tccivancruzicksouza.pdf>. Acesso em 10 janeiro de 2011.

Construção de usina solar em Tauá avança. Diário do Nordeste, Ceará, 01 de dezembro de 2010. Caderno Negócios. Disponível em: <http://diariodonordeste.globo.com/materia.asp?codigo=894433>

CREDER, Helio. Instalações Elétricas. Ed. JC: LCT,2002. 1p.

CRESESB, Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. Energia Solar Princípios e Aplicações, p. 6, 13, 14, 15, 5, 21, 22 e 23. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_solar.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.pdf). Acesso em 05 de março de 2011.

DIDONÊ, Débora. Empregos de futuro: as oportunidades de trabalho criadas por um mundo atento ao zelo contra o aquecimento global, 2009. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/301209/empregos-futuro-p-274.shtml>. Acesso em 27 de fevereiro de 2011.

GAMBOA, Roberto Marçal. Eletricidade solar, estado atual e perspectivas, 2001. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/roberto2001.pdf>. Acesso em 10 de fevereiro de 2011.

GTES, Grupo de Trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, p. 17, 31, 43, 26 / Rio de Janeiro, Edição Especial, PRC-PRODEEM Rio de Janeiro - Agosto – 2004.

GUENA, Ana Maria de Oliveira. Avaliação ambiental de diferentes formas de geração de energia elétrica, p. 5. Dissertação de mestrado, IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2007.

HEWITT, Paul G. Física conceitual. p. 377 /Paul G. Hewitt; tradução Trieste Freire Ricci; Maria Helena Gravina. – 9. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2002.

HOMER. *www.homerenergy.com*. Acesso em 15 de março de 2011.

IDER, Instituto de Desenvolvimento Sustentavel e Energias Renováveis, 2011. Disponível em: <http://www.ider.org.br/energias-renovaveis/energias-renovaveis>. Acesso em 15 de março de 2011.

JANNUZZI, Gilberto de Martino; VARELLA, Fabiana K. de O. M; GOMES, Rodolfo Dourado Maia; Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação, 2009. p. 16, 20, 21 e 22. Disponível em: [http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO\\_PROJETO\\_2\\_FINAL.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO_PROJETO_2_FINAL.pdf). Acesso em 11 de março de 2011.

LIMA, Francisco Anderson de Sousa. Eletrodeposição de Filmes Finos de CdTe para Aplicação em Células Solares Fotovoltaicas, p. 44 e 24. Dissertacao de mestrado, MACFA/UECE, 2010.

MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; MARTINS, André Ramon Silva. Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. Revisão de Parícia Machado Silva. 3 ed. Itajubá: FUPAI, 2006. P 207 e 208;

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. Princípio de funcionamento da célula Fotovoltaica, 2004. Disponível em: [http://www.solenerg.com.br/figuras/monografia\\_cassio.pdf](http://www.solenerg.com.br/figuras/monografia_cassio.pdf). Acesso em: 17 de março de 2011.

OLIVEIRA, Karen J; GURGEL, J. M. M; SILVA, Z. E. da; Análise do custo de instalação de sistemas fotovoltaicos isolados, 2002. Disponível em: [http://www.les.ufpb.br/portal/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_details&gid=33&Itemid=30](http://www.les.ufpb.br/portal/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=33&Itemid=30). Acesso em: 12 de fevereiro de 2011.

RESNICK, Robert; HALIDAY, David; KRANE, Kenneth S. Física 3. 4. ed. p. 3. Rio de Janeiro: Editora LCT – Livros Técnicos e Científicos, 1996.

ROCHA, José Stênio. Análise do potencial de aplicação de sistemas híbridos como alternativa para eletrificação do meio rural: estudo de caso para Pentecoste-CE, p. 59, 61, 82. Dissertação de mestrado, MACFA/UECE, 2010.

RÜTHER, Ricardo. Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e o Trabalho do Labsolar nesta Área, p. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Florianópolis-SC – 1999.

VÉRAS, Paulo Claudino. Estudo dos benefícios e proposta de um modelo de controle de um rastreador solar ativo, 2004. Disponível em: [http://www.mec.ita.br/~pcv/monografia-paulo\\_veras.pdf](http://www.mec.ita.br/~pcv/monografia-paulo_veras.pdf). Acesso em: 01 de fevereiro de 2011.

ZWEIBEL, Ken; MASON, James; Fthenakis, VASILIS. Perspectivas Para a Energia Solar. ed. Scientific American Brasil, edição 69, fevereiro de 2008.

## ANEXOS

Anexo 1: Tabela 08 – Valores de custo do sistema, operação, manutenção e a tarifa da energia gerada com sistemas fotovoltaicos contendo até a 14 painéis

Quantidade de painéis	Painéis (kW)	Conversor (kW)	Custo do Sistema (R\$)	Operação e Manutenção (R\$/ano)	Custo da Energia Gerada (R\$)
01	0,13	1	31329,60	2092,80	0,66
02	0,26	1	32024,00	2046,40	0,67
03	0,39	1	32921,60	2014,40	0,69
04	0,52	1	33960,00	1993,60	0,71
05	0,65	1	35083,20	1979,20	0,74
06	0,78	1	36273,60	1971,20	0,76
07	0,91	1	37516,80	1966,40	0,79
08	1,04	1	38801,60	1964,80	0,82
09	1,17	1	40116,80	1966,40	0,84
10	1,30	1	41456,00	1969,60	0,87
11	1,43	1	42830,40	1976,00	0,90
12	1,56	1	44246,40	1984,00	0,93
13	1,69	1	45692,80	1995,20	0,96
14	1,82	1	47164,80	2009,60	0,99

Fonte: Adaptado de HOMER (2011)