

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**UMA NOVA PERSPECTIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL EM  
CORRENTE CONTÍNUA: UMA EXPERIÊNCIA NO ESTADO DO  
PIAUI**

**EMANOEL AUGUSTO PAULO SOARES**

**Fortaleza**  
**Outubro de 2011**

**EMANOEL AUGUSTO PAULO SOARES**

**UMA NOVA PERSPECTIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL EM  
CORRENTE CONTÍNUA: UMA EXPERIÊNCIA NO ESTADO DO  
PIAUÍ**

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Informática do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. PhD Fernando Luiz Marcelo Antunes –  
Orientador

Fortaleza  
Outubro de 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- S653n Soares, Emanuel Augusto Paulo.  
Uma Nova perspectiva de eletrificação rural em corrente contínua: uma experiência no Estado do Piauí / Emanuel Augusto Paulo Soares. – 2011.  
81 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2011.  
Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.  
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.
1. Engenharia elétrica. 2. Conversores. 3. Carregador de baterias. 4. Cerrados – Brasil. I.  
Título.

**Emanoel Augusto Paulo Soares**

**Uma Nova Perspectiva de Eletrificação Rural em Corrente Contínua – Uma  
Experiência no Piauí**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamentos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.



Emanoel Augusto Paulo Soares

**Orientador:**



Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.

**Banca Examinadora:**



Prof. Edilson Mineiro Sá Júnior, Dr.



Prof.ª Ruth Pastôra Saraiva Leão, PhD..



Prof. Sergio Daher, Dr.-Ing

**Fortaleza, 21 de novembro de 2011**

Esta dissertação é dedicada às pessoas mais importantes em minha vida: meus pais, João Alberto Soares e Teresinha de Jesus Paulo Soares, aos quais devo minha formação cristã, de caráter e disciplina ao trabalho, e à minha querida esposa Cynthia Holanda de Araújo Soares, meu pilar de amor, paciência e generosidade nos momentos difíceis e de falta de estímulo.

Esta dedicatória se estende também a meus queridos filhos Karinn de Araujo Soares, Emanuella de Araujo Soares e João Alberto Soares Neto, que sempre trouxeram alegrias a meu coração.

Agradeço inicialmente ao IFPI, na pessoa do Magnífico Reitor Prof. Francisco das Chagas Santana e do Diretor Geral Prof. Paulo de Tarso Vilarinho Castelo Branco, que se empenharam em proporcionar este curso aos professores da instituição.

Agradeço ainda à Eletrobrás Distribuição Piauí, em especial ao Eng. Gregório Adilson da Paz e Eng. Luiz Carlos, que souberam avaliar a importância deste curso à companhia.

Rendo especiais agradecimentos ao orientador deste trabalho Prof. Dr. Fernando Antunes e ainda ao Prof. Dr. Sérgio Daher, pelos ricos ensinamentos e estímulo no desenvolvimento desta dissertação, contribuições estas, decisivas ao longo de seu desenvolvimento.

Resumo da dissertação apresentada à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

## **UMA NOVA PERSPECTIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL EM CORRENTE CONTÍNUA: UMA EXPERIÊNCIA NO ESTADO DO PIAUÍ**

EMANOEL AUGUSTO PAULO SOARES

**Orientador:** Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos isolados, eletrificação rural, carregador de baterias, baterias, conversor elevador.

**Número de páginas:** 81 Páginas.

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta os estudos, especificações, instalação e operação de um sistema fotovoltaico com a finalidade de fornecer energia elétrica a uma escola pública, localizada em uma área isolada do sul do Estado do Piauí. O sistema foi proposto e seu protótipo constituído por painel fotovoltaico, banco de baterias, carregador do banco de bateria e conversor CC/CC elevador, que alimenta as cargas em corrente contínua, projetado para uma autonomia de três dias, mesmo em condições mínimas de radiação solar. A energia solar capturada pelo painel solar é armazenada em um banco de baterias estacionárias do tipo chumbo-ácido. O carregador de baterias trabalhando no ponto de máxima potência (MPP) do painel é responsável pelo carregamento deste banco. A carga é suprida pelo conversor CC/CC elevador de alto ganho (24 Vdc para 311 Vdc). O projeto completo do sistema é apresentado ao longo deste trabalho, bem como são apresentados os principais resultados experimentais do protótipo mostrado e instalado em campo.

Abstract of dissertation presented at University Federal of Ceará as partial of fulfillment of the requirements for the Master degree of in Electrical Engineering.

## **A NEW PERSPECTIVE IN RURAL ELECTRIFICATION IN DC VOLTAGE: AN EXPERIENCE IN THE STATE OF PIAUÍ**

EMANOEL AUGUSTO PAULO SOARES

**Advisor:** Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.

**Keywords:** Isolated PV system, rural electrification, battery charger, battery, High boost converter.

**Number of pages:** 81 Pages.

**ABSTRACT:** This work presents the studies, specifications, installation and operation of a photovoltaic system in order to provide electricity to a public school located in an isolated area of the southern state of Piauí. The system was proposed and its prototype constituted by photovoltaic panel, battery bank, charger from the battery bank and converter DC / DC elevator, that feed the chargers in direct current designed for a range of three days, even in minimum solar radiation. The solar energy captured by solar panel is stored in a stationary batteries, lead acid type. The battery charger working at maximum power point (MPP) of the panel is responsible for load bank. The load is supplied by the DC / DC converter lift high gain (24 Vdc to 311 Vdc). The complete design system and its control are presented throughout this work, as well as presented the main results of the experimental prototype shown and installed in the field.



## Sumário

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Considerações sobre a carga.....</i>	3
<b>2 Comunidades isoladas no cerrado piauiense.....</b>	<b>8</b>
2.1 <i>Comunidade isolada.....</i>	8
2.2 <i>Escolas em comunidades isoladas do Piauí.....</i>	9
2.3 <i>Políticas públicas para a eletrificação rural .....</i>	13
2.4 <i>Considerações sobre o sistema elétrico do Piauí.....</i>	17
2.5 <i>Sistema elétrico do sul do Piauí.....</i>	19
2.6 <i>Eletrificação rural no Piauí .....</i>	20
2.7 <i>Comunidades isoladas no sul do Piauí .....</i>	22
2.8 <i>Considerações finais.....</i>	23
<b>3 Tecnologias de sistemas fotovoltaicos .....</b>	<b>24</b>
3.1 <i>Aspectos energéticos.....</i>	24
3.2 <i>Fundamentação teórica .....</i>	27
3.3 <i>Utilização da Energia Solar .....</i>	31
3.3.1 <i>Processo Termodinâmico .....</i>	31
3.3.2 <i>Processo Fotovoltaico .....</i>	32
3.4 <i>A Célula Solar Fotovoltaica.....</i>	36
3.5 <i>O Painel ou Módulo Solar Fotovoltaico.....</i>	40
3.6 <i>Acumuladores .....</i>	42
3.6.1 <i>Conceitos básicos sobre as baterias .....</i>	42

3.6.2	Principais parâmetros das baterias .....	43
3.6.3	Principais tipos de baterias quanto à utilização .....	44
3.7	<i>Considerações finais</i> .....	48
<b>4</b>	<b>Área de interesse para implantação do protótipo .....</b>	<b>49</b>
4.1	<i>Descrição da área de interesse</i> .....	49
4.2	<i>Acesso por terra</i> .....	50
4.3	<i>Características observadas no local</i> .....	54
4.4	<i>Sistemas de abastecimento d'água local</i> .....	55
4.5	<i>Substituição de combustíveis fósseis por energia limpa</i> .....	56
4.6	<i>Considerações finais</i> .....	57
<b>5</b>	<b>Sistema PV instalado na Comunidade Malícia .....</b>	<b>58</b>
5.1	<i>Configurações de Sistemas PV</i> .....	58
5.2	<i>Sistema CC</i> .....	58
5.3	<i>Sistema CA</i> .....	59
5.4	<i>Sistema PV na comunidade</i> .....	60
5.5	<i>O conversor fotovoltaico</i> .....	63
5.6	<i>O carregador de baterias</i> .....	65
5.7	<i>O conversor cc/cc de alto ganho</i> .....	65
5.8	<i>Elemento armazenador</i> .....	66
5.9	<i>O sistema proposto</i> .....	67
5.10	<i>Resultados Experimentais</i> .....	70
5.11	<i>Considerações finais</i> .....	76
<b>6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos SIGFI's .....	3
Tabela 2 - Estimativa de Consumo de Alguns Equipamentos Eletromecânicos .....	14
Tabela 3 - Domicílios particulares permanentes, com e sem energia elétrica, .....	17
Tabela 4 - Oferta Interna de Energia .....	26
Tabela 5 - Parâmetros importantes das baterias .....	43
Tabela 6 - Comparativo entre as baterias mais utilizadas.....	46
Tabela 7- Quadro de cargas .....	61
Tabela 8 - Características elétricas do painel .....	65
Tabela 9 - Especificações do conversor elevador .....	66
Tabela 10 - Componentes ativos do projeto .....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Lâmpada Compacta 11W, 220V, Philips.....	4
Figura 2 - Reator eletrônico - vista do circuito eletrônico.....	5
Figura 3 - Circuito eletrônico - lâmpada compacta 11W, 220Vca.....	5
Figura 4 - Diagrama de bloco do conjunto reator eletrônico e lâmpada.....	6
Figura 5 - (A) Forma de onda de entrada do reator, (B) Tensão retificada de entrada no oscilador.....	7
Figura 6 - SIN - Sistema Interligado Nacional.....	8
Figura 7 – Exemplo de escolas implantadas na Zona Rural do Estado do Piauí.....	10
Figura 8 - Distribuição dos domicílios rurais não atendidos, por região.....	16
Figura 9 - Sistema Elétrico da ED Piauí,.....	18
Figura 10 - Regional Boa Esperança - Sistema Elétrico.....	19
Figura 11 - Número de domicílios rurais sem acesso, por Estado, na Federação.....	21
Figura 12 - Oferta Interna de Energia.....	24
Figura 13 - Investimento anual na capacidade de novas energias renováveis 1995-2007.....	25
Figura 14 - Estrutura da Oferta Interna de Energia - OIE.....	26
Figura 15 - Balanço da radiação solar na Terra.....	29
Figura 16 - Mapa da irradiação solar direta, média anual no território brasileira, período de 1995 a 2000. ....	30
Figura 17 - Centrais Termosolares - Esquema.....	32
Figura 18 - Geração Fotovoltaica - Esquema.....	33
Figura 19 – Cenário da capacidade global acumulativa PV.....	35
<b>Figura 20</b> - Arranjo das tecnologias de células instaladas anualmente.....	35
Figura 21 - Junção N-P em equilíbrio.....	37
Figura 22 - Circuito de teste e gráfico corrente-tensão típicos de uma célula solar.....	38
Figura 23 - Gráficos corrente - tensão função da irradiação solar e temperatura da célula.....	39
Figura 24 - Placa ou Módulo Fotovoltaico.....	40
<i>Figura 25 – Curva I-V em várias temperaturas de Célula.....</i>	41
Figura 26 - Elementos de uma célula recarregável.....	42
Figura 27 - Área de interesse, Município de Uruçuí – PI.....	50
Figura 28 - Acesso à Área de interesse, Município de Uruçuí – PI.....	51
Figura 29 - Acesso à Área de interesse, Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI.....	52
Figura 30 - Estrada de acesso à Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI.....	53
Figura 31 - Estrada de acesso à Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI.....	53
Figura 32 - Grupo-gerador a diesel para bomba submersa da escola na Comunidade Malícia, Uruçuí – PI.....	54
Figura 33 - Grupo-gerador a diesel em residência na Comunidade Malícia, Uruçuí – PI.....	54
Figura 34 - Sistema de captação d'água, Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI.....	56
Figura 35 - Diagrama de blocos PV para cargas CC.....	58
Figura 36 - Diagrama de blocos PV para cargas CA.....	59
Figura 37 - Escola na comunidade Malícia – Uruçuí-PI.....	60
Figura 38 - Projeto de Montagem do Sistema na comunidade Malícia – Uruçuí-PI.....	62

Figura 39 - Projeto Executivo da Cerca do Sistema na comunidade Malícia – Uruçuí-PI.....	63
Figura 40 - Banco de Baterias do Sistema na comunidade Malícia – Uruçuí-PI.....	67
Figura 41 - Diagrama de blocos do sistema proposto.....	68
Figura 42 - Fotografia do Carregador de Baterias (direita) e Conversor Elevador (esquerda).....	69
Figura 43 - Conversor Elevador CC/CC (esquerda) e Carregador de Baterias (direita), em detalhes.....	69
Figura 44 - Tensão no painel solar.....	70
Figura 45 - Tensão na bateria – carregador.....	71
Figura 46 - Tensão de saída (elevador).....	71
Figura 47 - Potência fornecida pelas baterias – Corrente X Tensão (Elevador).....	72
Figura 48 - Corrente na Bateria – Carregador.....	72
Figura 49 - Potência fornecida pelo sistema às cargas.....	73
Figura 50 - Comparativo prático.....	73
Figura 51 - Estrutura com painéis montados – Localidade Malícia.....	74
Figura 52 - Cubículo com baterias, carregador de baterias e conversor elevador – Localidade Malícia.....	74
Figura 53 - Estrutura com painéis montados – Universidade Federal do Ceará.....	75

## SIMBOLOGIA

<b>SÍMBOLO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>	<b>UNIDADE</b>
$V(t)$	Tensão em função do tempo	V
$V_{\text{máx}}$	Tensão máxima ou de pico	V
$\omega.t$	Frequência angular	rad/s
$\varphi$	Ângulo de fase inicial	rad ou graus
$V_{\text{ef}}$	Tensão eficaz ou rms	V
$V_p$	Tensão máxima ou de pico	V
$P_{\text{Bat}}$	Potência diária corrigida da bateria	W
$\eta_{\text{bat}}$	Eficiência da bateria	-
$\eta_{\text{conv}}$	Eficiência do conversor	%
$P_{OT(wp)}$	Potência de pico, produção máxima de potência de um painel em condições ambientais ótimas, com sol a pique e sem excessiva temperatura.	W
$C_{\text{Bat}}$	Capacidade total das baterias	Wh
$d$	Dias de autonomia	-
$D_C$	Máxima profundidade de descarga	%
$C_{B(Ah)}$	Capacidade do sistema PV	Ah

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CA	– Corrente Alternada
CC	– Corrente Contínua
ED PiauÍ	– Eletrobrás Distribuição PiauÍ
EMATER	– Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do PiauÍ
IDH	– Índice de Desenvolvimento Humano
LDR	– Linha de Distribuição Rural
MPP	– Ponto de Máxima Potência
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
ONS	– Operador Nacional do Sistema
PLC	– Programa Luz no Campo
PLPT	– Programa Luz para Todos
PNUD	– Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PV	– Fotovoltaico
SIGFI	– Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
SIN	– Sistema Interligado Nacional
CAA	– Cabo de Alumínio com Alma de Aço
Eletronorte	– Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A

## CAPÍTULO 1

### 1 Introdução

Nos últimos anos, tem-se verificado grande ênfase nos meios de comunicação, quer seja pela mídia escrita, falada ou televisiva, o registro em escala global dos efeitos devastadores em razão das mudanças climáticas advindas do aumento dos níveis de gases de efeito estufa, com impactos na biodiversidade e no meio ambiente. O aumento das temperaturas médias e da cota das marés, chuvas e inundações em demasia, alastramento de doenças infecciosas são alguns exemplos destes tipos de registros.

A humanidade em contrapartida pode combater os efeitos deste fenômeno com o investimento no potencial de inovação em novas tecnologias de baixas emissões de carbono. O desenvolvimento de novas fontes de energia renovável de baixas emissões de carbono pode reduzir nossa dependência nos combustíveis fósseis em longo prazo.

O incentivo ao emprego de diversas tecnologias na produção de energias limpas e renováveis tem-se mostrado como um rumo a ser perseguido, envolvendo ações de diversos níveis de governo, e, ainda, de setores da sociedade organizada. O crescimento no número de instalações, aliado em alguns casos à aplicação de incentivos, tem proporcionado a redução dos custos de instalação e produção desta modalidade de energia elétrica.

O processo fotovoltaico (PV), que consiste em "produzir eletricidade diretamente da luz solar", tem-se mostrado como uma das opções tecnológicas viáveis quando se fala em produção de energia de forma limpa e confiável. Para suprir pequenas ou razoáveis quantidades de energia, os sistemas fotovoltaicos se apresentam, em geral, como opção justificável. Nas aplicações onde as unidades consumidoras estão localizadas distantes das linhas ou redes elétricas convencionais existentes, os sistemas fotovoltaicos autônomos têm se mostrado como opção mais viável, visto que, aos olhos das empresas concessionárias de



energia, o atendimento a essas comunidades tem se mostrado oneroso e inviável quanto ao retorno do investimento.

O atendimento com eletrificação às comunidades rurais é caracterizado pela grande dispersão geográfica da população, baixo consumo, alto investimento por consumidor, elevado custo operacional, resultando num baixo retorno ou até mesmo em prejuízo financeiro para a concessionária [8].

De encontro à justificativa das concessionárias de energia elétrica, de que os custos envolvidos para atendimento a comunidades isoladas não gerariam retorno econômico-financeira, o Governo Federal Brasileiro instituiu em 2003 o programa Luz Para Todos [21], que estabelece a possibilidade de as empresas suprirem as comunidades isoladas de energia elétrica, através de um sistema convencional de redes de distribuição ou através de sistemas com fontes primárias intermitentes.

Para tanto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece ainda que esses sistemas estejam aptos a fornecer energia para domicílios (um ponto de luz por cômodo até o limite de três pontos de luz e duas tomadas) e estabelecimentos coletivos (atendimento a escolas e postos de saúde devem ser completos).

Os procedimentos e condições de utilização desses tipos de sistemas são determinados pela Agência ANEEL, em sua Resolução Normativa nº 83 [1]. O atendimento a comunidades isoladas através de sistemas PV enquadram-se na denominação de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI).

Nas condições gerais da resolução mencionada, são colocadas como características obrigatórias aos SIGFI's o fornecimento da energia elétrica em corrente alternada senoidal, com o mesmo padrão de tensão e frequência predominantes nos municípios onde for instalado

o sistema, tendo sua denominação conforme a característica de consumo de energia da carga, devendo estar enquadrado em uma das classes de atendimento explicitadas na Tabela 1.

*Tabela 1 - Classificação dos SIGFI's*

<b>Classes de Atendimento</b>	<b>Consumo Diário de Referência (Wh/dia)</b>	<b>Autonomia (dias)</b>	<b>Potência Mínima (disponibilizada) (W)</b>	<b>Disponibilidade Mensal Garantida (kWh)</b>
<b>SIGFI13</b>	435	2	250	13
<b>SIGFI30</b>	1000	2	500	30
<b>SIGFI45</b>	1500	2	700	45
<b>SIGFI60</b>	2000	2	1000	60
<b>SIGFI80</b>	2700	2	1250	80

Fonte: Resolução Normativa ANEEL n° 83 [1]

Pode-se considerar inicialmente que unidades consumidoras isoladas do sistema de distribuição elétrica convencional têm à sua disposição, em sua grande maioria, radiação solar garantida ao longo do ano. A produção de energia elétrica a partir de uma matriz energética limpa, segura e de qualidade, como a solar, é capaz de atender suas necessidades e em concordância com as exigências do MME - Ministério de Minas e Energia.

Levando-se em consideração as resoluções normativas e autorizativas da ANEEL, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento e acompanhamento do projeto capaz de alimentar residências ou pequenas escolas implantadas em áreas rurais distantes da rede elétrica convencional, com potência instalada de até 30KW.

### **1.1 Considerações sobre a carga**

Os equipamentos a serem alimentados pelo sistema PV abordados neste trabalho são manufaturados para funcionarem em tensão alternada e encontrados no comércio da região.

Uma característica comum a esses equipamentos é o fato de possuírem uma retificação e filtro na entrada da alimentação.

Valendo-se dessa característica comum da carga e para entender melhor seu funcionamento, analisaremos uma lâmpada fluorescente compacta de marca Philips, 11W, 220V, idêntica a que foi instalada na comunidade Malícia, mostrada na Figura 1.



*Figura 1- Lâmpada Compacta 11W, 220V, Philips*

As lâmpadas fluorescentes compactas utilizadas no presente projeto, conhecidas também por lâmpadas econômicas, consistem basicamente em um reator eletrônico que alimenta uma lâmpada fluorescente, de espessura muito fina, que é dobrada várias vezes, de forma a se tornar o mais compacta possível.

Na Figura 2, tem-se a lâmpada desmontada, com seus dispositivos à mostra, onde se pode visualizar em destaque o circuito retificador da tensão de entrada, possibilitando assim o acesso a seu circuito eletrônico.

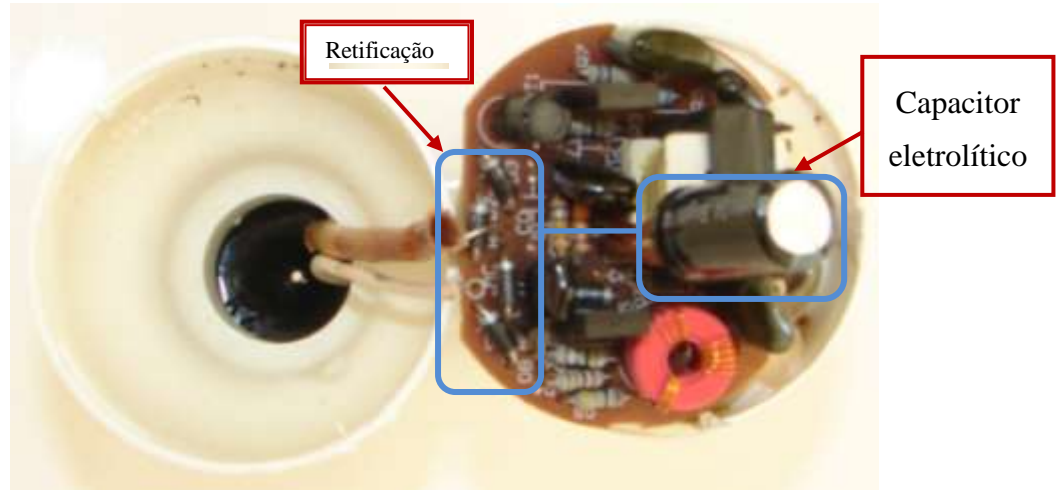


Figura 2 - Reator eletrônico - vista do circuito eletrônico

Na Figura 3, tem-se o circuito do reator eletrônico da lâmpada, com o circuito retificador e o oscilador em destaque.

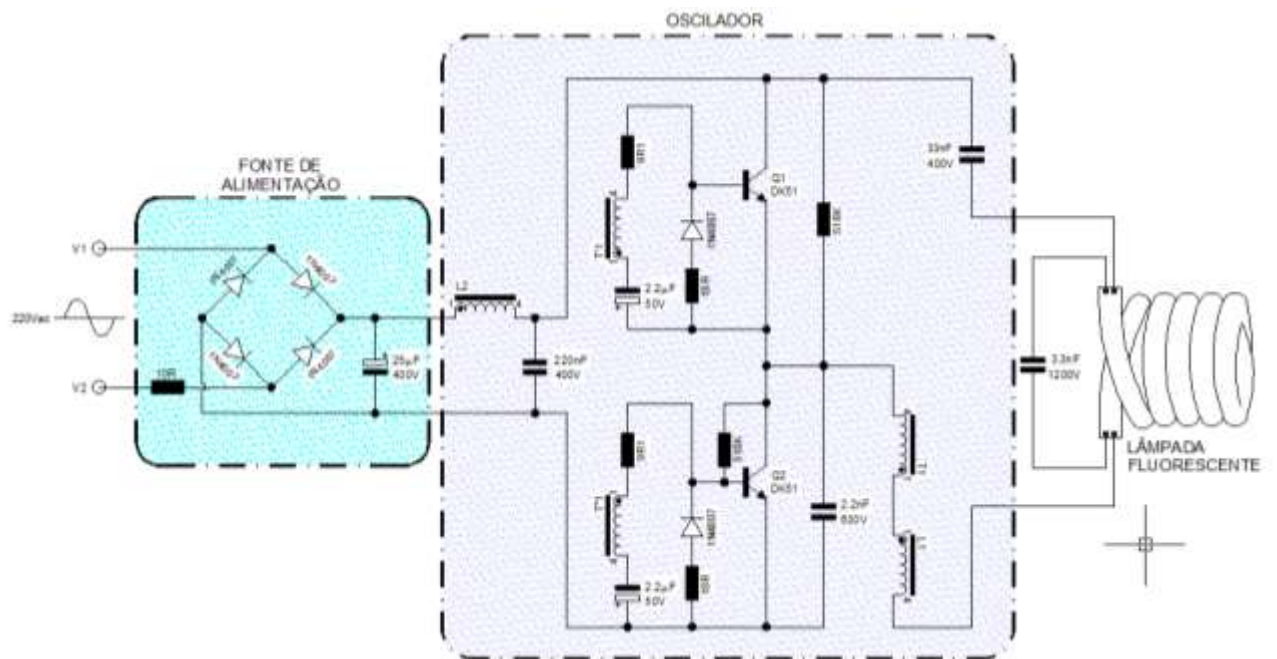


Figura 3 - Circuito eletrônico - lâmpada compacta 11W, 220Vca

O diagrama de bloco do conjunto reator eletrônico e lâmpada, elaborado com base no circuito da Figura 3, composto por três fases de transformação de energia, é mostrado na Figura 4.

O primeiro estágio é composto por uma ponte retificadora formada pelo conjunto de 4 diodos 1N4007, e a filtragem da tensão de entrada é feita por um capacitor eletrolítico de  $25\mu\text{F}-400\text{V}$ . O segundo estágio é formado pelo circuito de alta frequência e o inversor CC/CA, o terceiro estágio, por sua vez, é composto pelo circuito tanque ressonante, cuja frequência de ressonância depende dos valores dos capacitores e é utilizado para pré-aquecer os filamentos da lâmpada, manter a temperatura do filamento, gerar uma tensão suficientemente elevada para acender a lâmpada, facilitar a comutação suave do inversor e fornecer à lâmpada uma corrente próxima da senoidal.

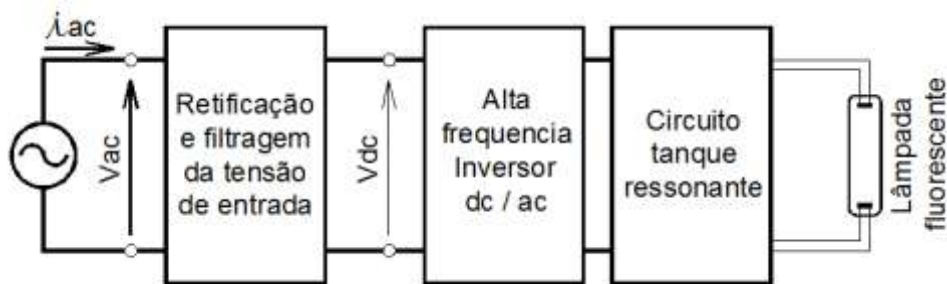


Figura 4 - Diagrama de bloco do conjunto reator eletrônico e lâmpada

A tensão senoidal de entrada tem seu valor definido pela expressão matemática dada pela função:

$$V(t) = V_{\text{máx}} \times \text{sen}(\omega.t + \varphi) \quad (1)$$

Onde:

$V(t)$  – Tensão em função do tempo.

$V_{\text{máx}}$  – Tensão máxima ou de pico (V).

$\omega.t$  – Frequência angular em ( rad/s )

$\varphi$  – Ângulo de fase inicial em ( rad ou graus )

Por definição, o valor eficaz ou rms (do inglês *root mean square*) de uma onda senoidal corresponde à mesma quantidade de tensão ou corrente contínua, capaz de produzir a

mesma potência dissipada. O valor eficaz de uma tensão senoidal corresponde a 0,707 vezes o valor máximo.

Como o valor eficaz da tensão monofásica é 220Vac, tem-se a tensão retificada de entrada do oscilador, correspondente nominalmente à tensão de pico, ou seja:

$$V_{ef} = 0,707 \times V_p \quad (2)$$

$$V_p = 311,17\text{Volt} \quad (3)$$

A Figura 5 mostra as formas de ondas de entrada do reator eletrônico da lâmpada e de entrada no oscilador, após o sinal passar pela ponte retificadora, cujo circuito já foi mostrado na Figura 3.

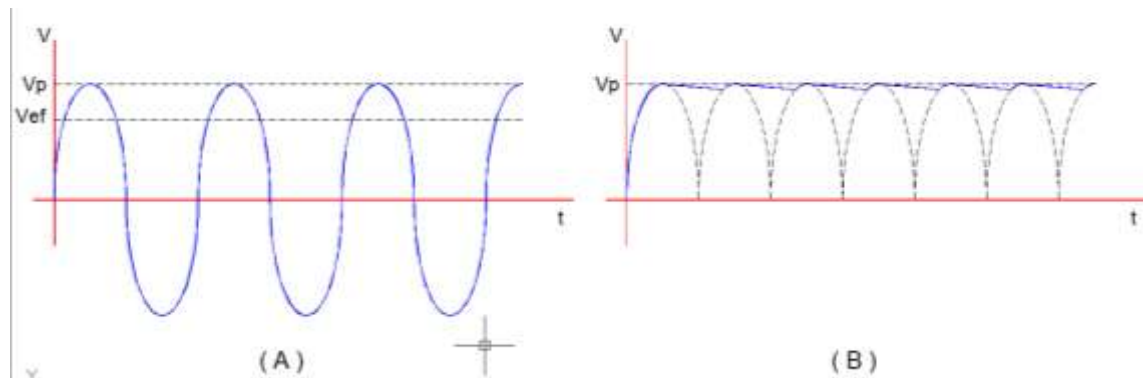


Figura 5 - (A) Forma de onda de entrada do reator, (B) Tensão retificada de entrada no oscilador

O sistema proposto neste trabalho faz a opção de alimentar em corrente contínua, na tensão de 311Vdc, cargas de iluminação e de outros equipamentos, a partir da produção de energia elétrica pelo processo fotovoltaico e seu armazenamento em um banco de baterias [6].

## CAPÍTULO 2

### 2 Comunidades isoladas no cerrado piauiense

#### 2.1 Comunidade isolada

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por ser de dimensão continental. Como se pode ver na figura abaixo, o SIN (Sistema Interligado Nacional) interliga as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, ficando fora desse sistema, apenas alguns subsistemas isolados na região amazônica.

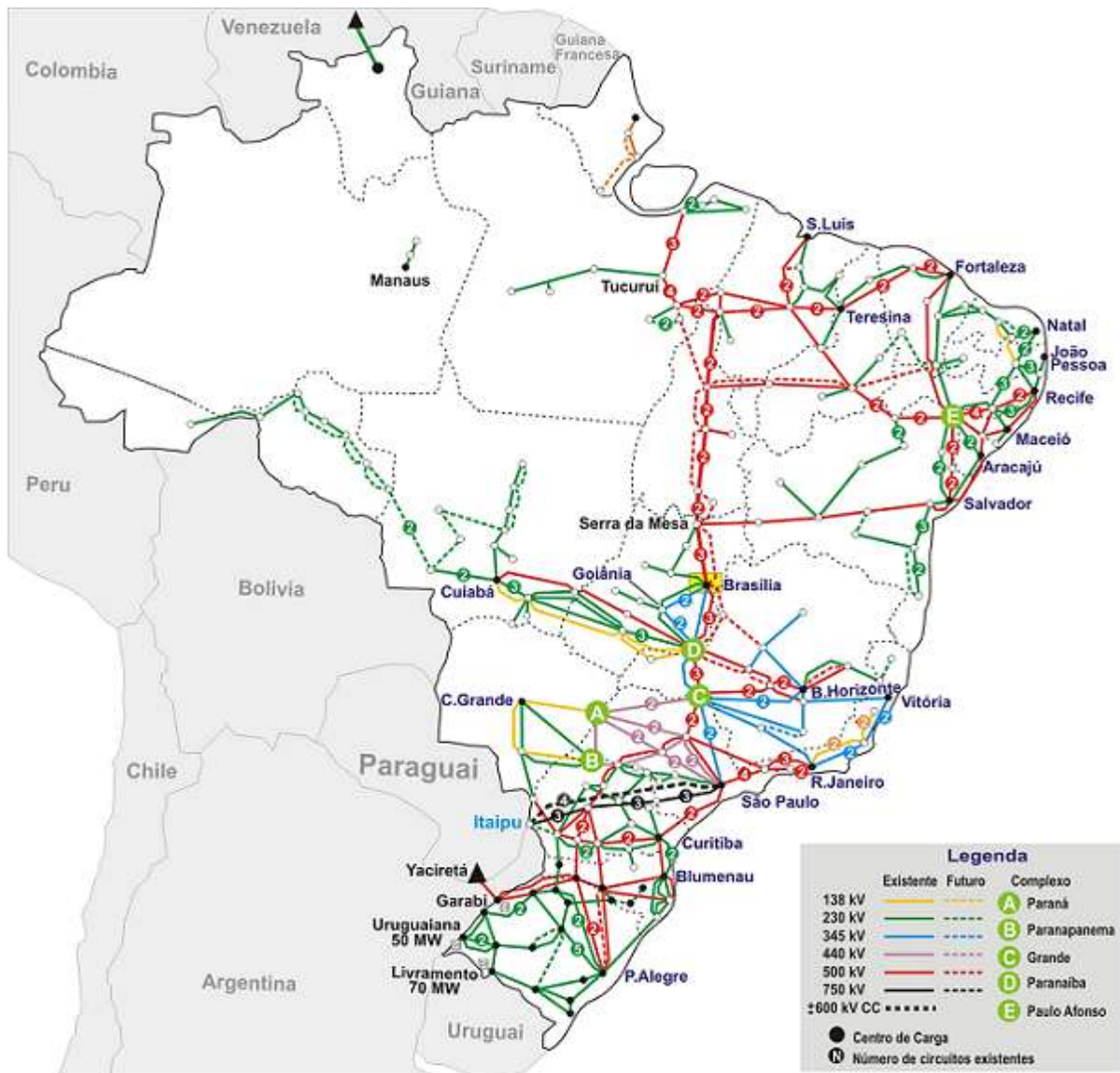


Figura 6 - SIN - Sistema Interligado Nacional  
Fonte: ONS – Operador Nacional do Sistema

Traçando-se um paralelo entre a área do território nacional atendido pelo SIN e a área de concessão de uma distribuidora de energia e seu sistema elétrico, pode-se caracterizar uma comunidade isolada como sendo aquela distante de centros urbanos, com pouca ou nenhuma disponibilidade de infraestrutura e de serviços públicos básicos, dentre esses, o fornecimento de energia elétrica. Além dessas características, são inerentes a essas comunidades baixos indicadores sociais como qualidade de vida e de desenvolvimento econômico, em especial o nível de renda, e, ainda, baixo grau de escolaridade e de expectativa de vida da população.

Comunidades isoladas pertencentes a uma área de concessão de uma empresa distribuidora de energia, ainda não atendidas pelo sistema elétrico desta, são definidas no setor elétrico como comunidades isoladas não atendidas. No caso desta comunidade ser atendida através de um sistema elétrico isolado, ou seja, sistema de energia elétrica com geração e consumo dentro da própria comunidade, não conectada ao sistema elétrico da concessionária e por consequência ao SIN, é definido como comunidade isolada atendida.

## **2.2 Escolas em comunidades isoladas do Piauí**

Pode-se observar na maioria das comunidades isoladas do Estado do Piauí, a existência de escolas, ou pelo menos suas edificações que, ao longo do tempo, passam por inúmeras dificuldades. Salta aos olhos as maiores dificuldades por que passam as escolas localizadas na área rural do Estado, a difícil comunicação dessas unidades de ensino com outras comunidades ou com o resto do país, a falta de infraestrutura e até de pessoal necessários ao seu bom funcionamento.

Apesar de praticamente não participarem das decisões de planejamento e orçamentação para a pasta da educação, quer seja no âmbito estadual ou municipal, as escolas exercem um papel importante para comunidades a elas ligadas e, em muitos casos, executam atividades comunitárias que vão além do processo de ensino propriamente dito, tornando-se, muitas vezes, comparativamente, mais representativas que escolas localizadas em áreas urbanas.





*Figura 7 – Exemplo de escolas implantadas na Zona Rural do Estado do Piauí*

O acesso à energia elétrica possibilita ao corpo docente das escolas localizadas em áreas isoladas, uma melhor apresentação de suas aulas, diversificação de temas, e ainda, com acesso a equipamentos simples como computadores e data show, apresentar textos e imagens que facilitam em muito o processo de aprendizagem. O simples fato de ter luz elétrica faz com que a escola reforce sua referência na comunidade e possibilita a utilização da edificação em outras atividades, em especial, no período noturno, tais como a contribuição na formação e capacitação do próprio corpo docente, e, ainda, formação e capacitação de adultos, eventos culturais, reuniões da comunidade, etc.

Além das aplicações com a produção de energia para iluminação, as comunidades isoladas localizadas no Sul do Piauí carecem primordialmente do bombeamento de água, da refrigeração e conservação de alimentos, do acesso a informações através da televisão e comunicação via rádio ou telefone.

A preservação dos alimentos bem como o correto acondicionamento de medicamentos, em especial quando das campanhas de vacinação, mostram a necessidade de um sistema de refrigeração que atenda a comunidade. Duas classes de unidades de refrigeração são encontradas. A do tipo a compressão que oferece comodidade em sua operação e bom controle de temperatura, aliada a um baixo consumo de energia. No entanto, os custos de implantação envolvidos nestes tipos de equipamentos ainda estão muito altos, sem contar que estes crescem diretamente com o aumento da capacidade e volume refrigerado.

Os sistemas de refrigeração do tipo absorção utilizam propano ou querosene como fonte de energia para manter um volume refrigerado. A grande dificuldade reside em se conseguir temperaturas estáveis, em especial nos modelos que utilizam o querosene, o que inviabiliza sua utilização para o armazenamento de vacinas.

A utilização da energia solar fotovoltaica tem apresentado um aumento significativo em função da crescente demanda de energia e também pela busca de fontes não poluentes e renováveis. Características como a modularidade na produção de energia solar fotovoltaica permitem a expansão da geração de forma simples, a facilidade de instalação e operação, tem favorecido a sua utilização em locais com carências no fornecimento de energia ou em aplicações móveis.

A melhoria da qualidade de vida com o acesso a serviços básicos, incluindo aí a água potável, banheiros, iluminação, e, em alguns casos, o próprio material escolar, primordial ao processo de aprendizagem, com conseqüente aumento da produtividade das propriedades rurais, estão intimamente ligadas ao grau cultural das populações nelas instaladas. Por esse motivo, é crescente a necessidade na melhoria do processo educacional dessa população, inclusive no que diz respeito ao ensino técnico e tecnológico, capaz de proporcionar uma diminuição da lacuna socioeconômica, com foco na autossustentabilidade e na reversão da tendência migratória das populações para zonas urbanas.

Muitas escolas localizadas em áreas remotas do Estado têm acesso à energia elétrica através de grupos-geradores a base de combustíveis fósseis e, em alguns casos é feita uma pequena distribuição com edificações próximas à escola. A operação desse sistema, em geral acontece periodicamente, durante algumas horas do dia e no início da noite, ou ainda quando da necessidade de energia elétrica. Esses tipos de sistemas exigem treinamento de uso, operação e manutenção e se observa que a maioria das pessoas ligadas à educação em escolas rurais não possuem formação ou experiência para operar esses tipos de equipamentos.

Além das observações acima, visualizam-se alguns problemas relacionados com a utilização de sistemas convencionais a grupos-geradores, o fluxo do fornecimento, o custo e armazenamento do combustível, que, em sua maioria, são atividades assumidas pelas Prefeituras Municipais, a falta de planejamento na manutenção periódica, a indisponibilidade de mão-de-obra qualificada para a manutenção e reparação de defeitos e a reposição de peças desgastadas, são fontes de transtorno e até de paralisação das atividades docentes.

A utilização de recursos renováveis que possibilitem o acesso à energia proporciona ao longo do tempo inúmeros benefícios, vez que o fornecimento de energia convencional, em muitos casos, apresenta uma relação custo-benefício inviável na visão empresarial das concessionárias de energia. Além disso, a utilização de recursos renováveis leva a uma independência das comunidades isoladas na aquisição de combustíveis fósseis e dos custos de manutenção e operação de grupos geradores, amplamente difundidos entre elas. Salienta-se o fato de que os sistemas renováveis, além de apresentarem baixo custo de operação, proporcionam uma redução significativa da poluição ambiental.

A escolha por sistemas renováveis deve ser amplamente debatida com a comunidade local, além de ser avaliada por especialistas na busca da boa utilização desse tipo de sistema, pois se observa que, após a instalação de alguns sistemas, não é dada a devida atenção aos equipamentos, tornando-os obsoletos ou imprestáveis, fato motivado, muitas vezes, pela falta de disseminação na comunidade, das informações de funcionamento do equipamento.

### 2.3 Políticas públicas para a eletrificação rural

O Brasil experimentou nas últimas décadas um grande fluxo migratório, em especial das populações do Nordeste para as Regiões Sul e Sudeste, motivado pela expectativa de melhores condições de sobrevivência, empregabilidade e renda. Essa migração caracterizou-se pelo fluxo em sua maioria da população rural nordestina para áreas urbanas dos grandes centros, visto o crescimento do setor industrial e da construção civil dessas áreas.

Evidenciou-se aí a necessidade de investimentos voltados à indústria e aos grandes centros por parte dos governos, sendo que esses aconteceram em detrimento de investimentos voltados à população rural.

O fato do modelo de geração e transmissão de energia ser alicerçado em grandes usinas geradoras (principalmente hidrelétricas) e linhas de transmissão que transpõem longas distâncias para o transporte de grandes blocos de energia aos centros consumidores contribuem ainda mais para colocar à margem do processo aquelas populações que vivem em localidades dispersas e com baixo poder aquisitivo.

Acontece então uma ambiguidade quando as políticas públicas voltam seus olhos e ações para as áreas urbanas e esquece-se de fortalecer o setor rural. Com o fortalecimento desse último, a possibilidade de consumo de bens duráveis, invariavelmente fortalece o setor industrial e de serviços, além de promover a fixação do homem no campo, promove também a criação de postos de trabalho, diminuindo o inchaço dos grandes centros com consequente diminuição dos custos de implantação da infraestrutura urbana, várias vezes mais cara que na área rural.

Em entrevista publicada pelo Jornal Gazeta Mercantil, tem-se uma visão atual do Estado, manifestada pelo então ministro do Desenvolvimento Agrário, Guilherme Cassel.

Brasília, 12 de Fevereiro de 2009 - Depois de ressaltar a importância econômica da agricultura familiar para a economia dos municípios, o ministro do Desenvolvimento Agrário, Guilherme Cassel, convocou ontem todos os prefeitos de municípios de

pequeno e médio porte a se mobilizarem para ajudar a desenvolver a agricultura familiar de suas regiões.

“Durante muitas décadas fomos conduzidos a um entendimento enganoso sobre o meio rural brasileiro. Achávamos que ele era dividido entre latifúndios modernos, industrializados e lucrativos; e a pobreza rural, personificada pela agricultura familiar e pela reforma agrária, que seriam improdutivas, atrasadas e sem tecnologia. Isso não condiz com a verdade objetiva do nosso país. Atualmente, a agricultura familiar é responsável por 10% de todo o Produto Interno Bruto brasileiro”, declarou o ministro.

Segundo ele, 70% de tudo que é consumido no dia a dia do brasileiro têm origem na agricultura familiar. “Ela representa 85% de todos os estabelecimentos agrícolas do país, além de abrigar 75% da mão de obra. Falamos de um segmento econômico dinâmico”. (GAZETA MERCANTIL/CADERNO A - Pág. 11 de 12/02/2009).

Nesse contexto, a eletrificação rural, quando tratada convenientemente, com investimentos e gestão adequados, engrandece o setor agrícola e com ele toda a cadeia produtiva do país. A Tabela 2 demonstra as estimativas de consumo de alguns equipamentos eletromecânicos, com o advento do programa Luz no Campo.

*Tabela 2 - Estimativa de Consumo de Alguns Equipamentos Eletromecânicos*

<b>Tipos de Equipamentos</b>	<b>Quantidades</b>
Motores elétricos	500.000
Refrigeradores	850.000
Televisores	800.000
Lâmpadas	5.000.000
Chuveiros Elétricos	600.000
Equipamentos de irrigação/bombeamento	400.000
Picadeiras/desintegradores	550.000

Fonte: Programa Luz no Campo: 1999-2003

Por outro lado, não se pode esquecer que, até a década de 90, a política de eletrificação rural era regulada pelo Decreto 41.019 - 26/02/1957, onde o antigo DNAEE determinava os encargos das concessionárias e do consumidor para novas ligações ou aumento de cargas, dependentes ou não de obras no sistema elétrico das concessionárias, forçando assim, às concessionárias, o investimento apenas nas áreas onde houvesse retorno econômico ou a eletrificação de propriedades cujos proprietários pudessem arcar com parte do capital envolvido na execução das obras, afora as obras feitas por meros interesses políticos.

Em dezembro de 1999, foi lançado o Programa Luz no Campo (PLC), de responsabilidade da Eletrobrás, tendo as concessionárias de energia como agentes executores e recursos advindos da RGR – Reserva Global de Reversão (contribuição compulsória incluída nas contas de energia, regulamentado pelo Decreto Presidencial 4.336/2002), cuja meta estabelecida era a ligação de um milhão de domicílios rurais em um prazo de três anos.

A limitação dos custos de implantação do PLC, a utilização de soluções convencionais de engenharia tais como a instalação de Linhas de Distribuição Rural (LDR) e a escolha das comunidades com menor custo de implantação de rede elétrica convencional, sem considerar qualquer outro tipo de solução energética que propiciasse menor custo de atendimento às comunidades limitaram a abrangência desse programa.

A falta de investimentos e implementação de medidas eficientes, tanto por parte do Governo Federal como dos Governos Estaduais, para a ampliação dos sistemas elétricos e atendimento às comunidades isoladas, o advento das privatizações das empresas concessionárias de energia (Distribuidoras), cujo controle acionário pertencia às duas esferas governamentais, e ainda o racionamento de energia acontecido entre os anos de 2001 e 2002, contribuíram enormemente para postergar o atendimento a essas comunidades.

O censo 2000 do IBGE constatou que 2.165.058 domicílios na área rural do país encontravam-se sem acesso à energia elétrica, e que da população envolvida, aproximadamente dez milhões de pessoas, cerca de 90%, possuíam renda inferior a três salários mínimos vigentes à época.

No mesmo censo, foi revelado que os Estados do Norte e Nordeste do Brasil são responsáveis por 81% dos domicílios rurais não atendidos pelos serviços de energia elétrica. A Figura 8 mostra os índices percentuais de domicílios rurais não atendidos pelos serviços de energia elétrica, por região.



*Figura 8 - Distribuição dos domicílios rurais não atendidos, por região*  
 Fonte: Manual de Operacionalização do Programa Luz Para Todos  
 - Eletrobrás, Revisão nº 5, 2007

A promulgação da Lei nº 10.438/02, que trata da universalização no atendimento de energia elétrica e do Decreto nº 4.873/03, que criou o Programa Luz para Todos (PLPT), estabeleceram as ações de política pública no intuito de disponibilizar os serviços de energia elétrica às comunidades não atendidas, minimizando assim a lacuna existente e observada pelos indicadores sociais.

Ficou a cargo da ANEEL o estabelecimento das metas de universalização a serem cumpridas por cada concessionária dentro de sua área de concessão, iniciando pelas áreas próximas das redes de distribuição existentes, possibilitando assim uma minimização nos custos de implantação e ligação de novas unidades consumidoras, visto que todo o investimento deverá ser feito sem qualquer ônus ao solicitante. Posteriormente ao atendimento a essas comunidades, restam aquelas comunidades cuja eletrificação através de soluções não convencionais tornam-se viáveis.

O cenário apresentado pelo IBGE, no último censo, retrata o avanço das obras de eletrificação rural, alcançado pelo PLPT em todas as regiões do Brasil, no entanto as regiões Norte e Nordeste continuam apresentando números relevantes de domicílios sem acesso a qualquer forma de energia elétrica. Para o Nordeste, dos 14.922.901 domicílios visitados

pelas equipes do IBGE, 339.087 domicílios não dispõem de energia elétrica, o que corresponde a 2,27% do total de domicílios nordestinos, conforme se observa na Tabela 3.

*Tabela 3 - Domicílios particulares permanentes, com e sem energia elétrica, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação*

Regiões Brasileiras	Domicílios particulares permanentes	Domicílios com energia elétrica da concessionária ou outra forma		Domicílios sem energia elétrica	
		Unidades	%	Unidades	%
Norte	3.975.533	3.724.295	93,68%	251.207	6,32%
Nordeste	14.922.901	14.583.662	97,73%	339.087	2,27%
Sudeste	25.199.799	25.133.234	99,74%	66.211	0,26%
Sul	8.891.279	8.859.224	99,64%	31.979	0,36%
Centro-Oeste	4.334.673	4.294.592	99,08%	40.028	0,92%
Brasil	57.324.185	56.595.007	98,73%	728.512	1,27%

Fonte: Sinopse do Censo Demográfico do IBGE - 2010.

## 2.4 Considerações sobre o sistema elétrico do Piauí

O Piauí é atendido pelo SIN através de linhas de 500kV que chegam ao Estado transportando energia elétrica oriunda das usinas hidrelétricas de Sobradinho na Bahia, Tucuruí no Pará e de Boa Esperança, localizada no rio Parnaíba, entre Piauí e Maranhão.

A rede básica do Estado tem como pontos de suprimento de energia elétrica através do Sistema Interligado Norte/Nordeste, as subestações de 500/230 kV de Boa Esperança, São João do Piauí e Teresina II. O Parque Eólico da Pedra do Sal no município de Parnaíba é interligado ao SIN pela subestação Parnaíba, com capacidade de 18MW. O potencial eólico no litoral piauiense é considerado de qualidade para a produção de energia elétrica [27], no entanto faz-se necessário um fortalecimento do sistema elétrico dessa região para que as empresas tenham um maior atrativo de investimento nesse tipo de geração[26].

Encontram-se conectadas também ao SIN quatro usinas termoelétricas a óleo pelas subestações de Nazária, Altos, Campo Maior e Marambaia, com capacidade de 13,1MVA



cada, concebidas durante o período do racionamento de energia, encontram-se aptas somente para operarem em situações de contingência.

A partir da subestação de Boa Esperança, por meio de duas linhas de transmissão em 230 kV, o sistema é interligado à subestação Teresina I e daí, duas linhas em 230 kV interligam a subestação Teresina II para atender a grande Teresina e, partindo desta uma linha em 230 kV interliga a subestação Piripiri na região Norte do Estado, que se interliga com a Subestação Sobral, no Estado do Ceará.

A subestação Picos, que é interligada à subestação Tauá e a subestação Elizeu Martins, são interligadas com a subestação de São João do Piauí através de duas linhas em 230 kV. Novo ponto de suprimento de propriedade do grupo Eletrobrás (Eletronorte) está previsto para entrar em operação até dezembro de 2011, em Ribeiro Gonçalves.

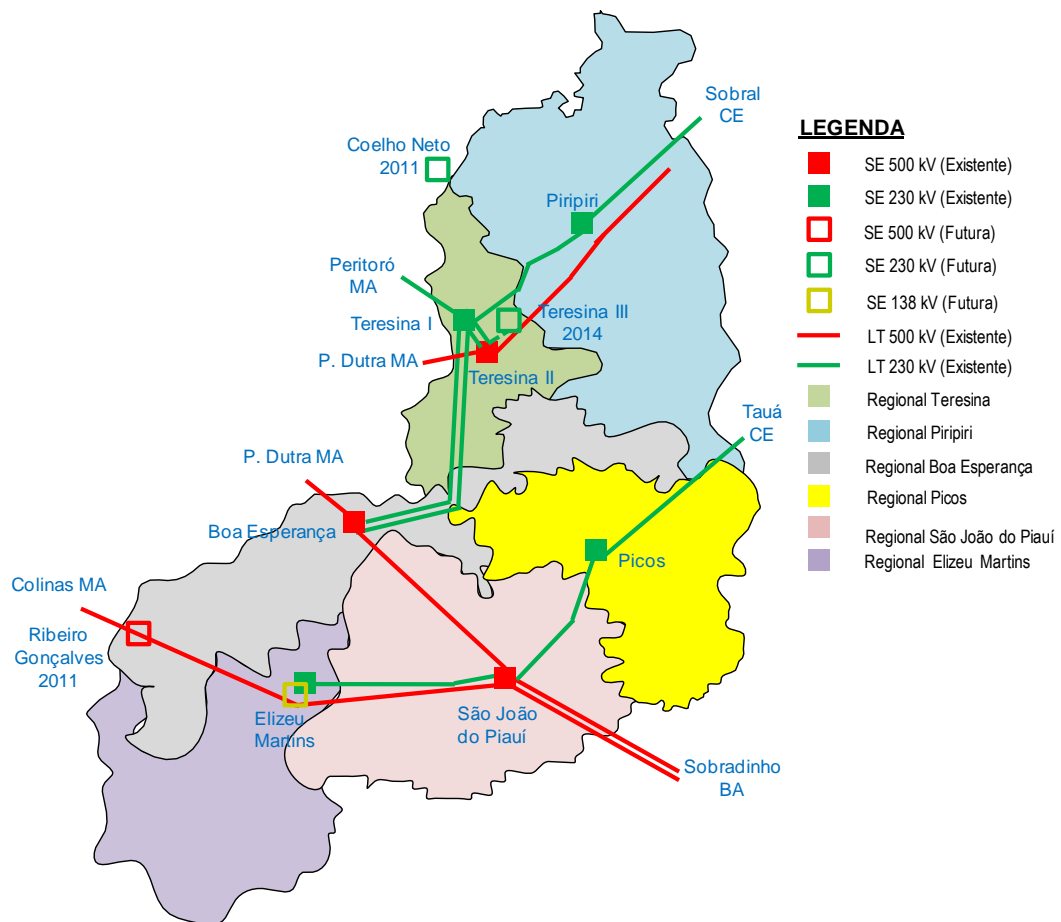


Figura 9 - Sistema Elétrico da ED Piauí,  
Fonte: ED Piauí

## 2.5 Sistema elétrico do sul do Piauí

O sistema de transmissão da ED Piauí tem sua malha composta basicamente por sistemas radiais, envolvendo grandes distâncias, constituindo-se de 4.897 km de linha que operam nas tensões de 138 kV, 69 kV e 34,5 kV, totalizando 71 subestações com carga instalada de 988 MVA.

A Regional Boa Esperança, que supre as cargas das microrregiões de Bertolândia e Floriano, é também responsável pela alimentação de energia elétrica da área de interesse, ou seja, o município de Uruçuí, que no momento, encontra-se alimentado pela regional Elizeu Martins, interligando 8 subestações nas tensões de 69 kV e 34,5 kV, com demanda na ordem de 30 MW.

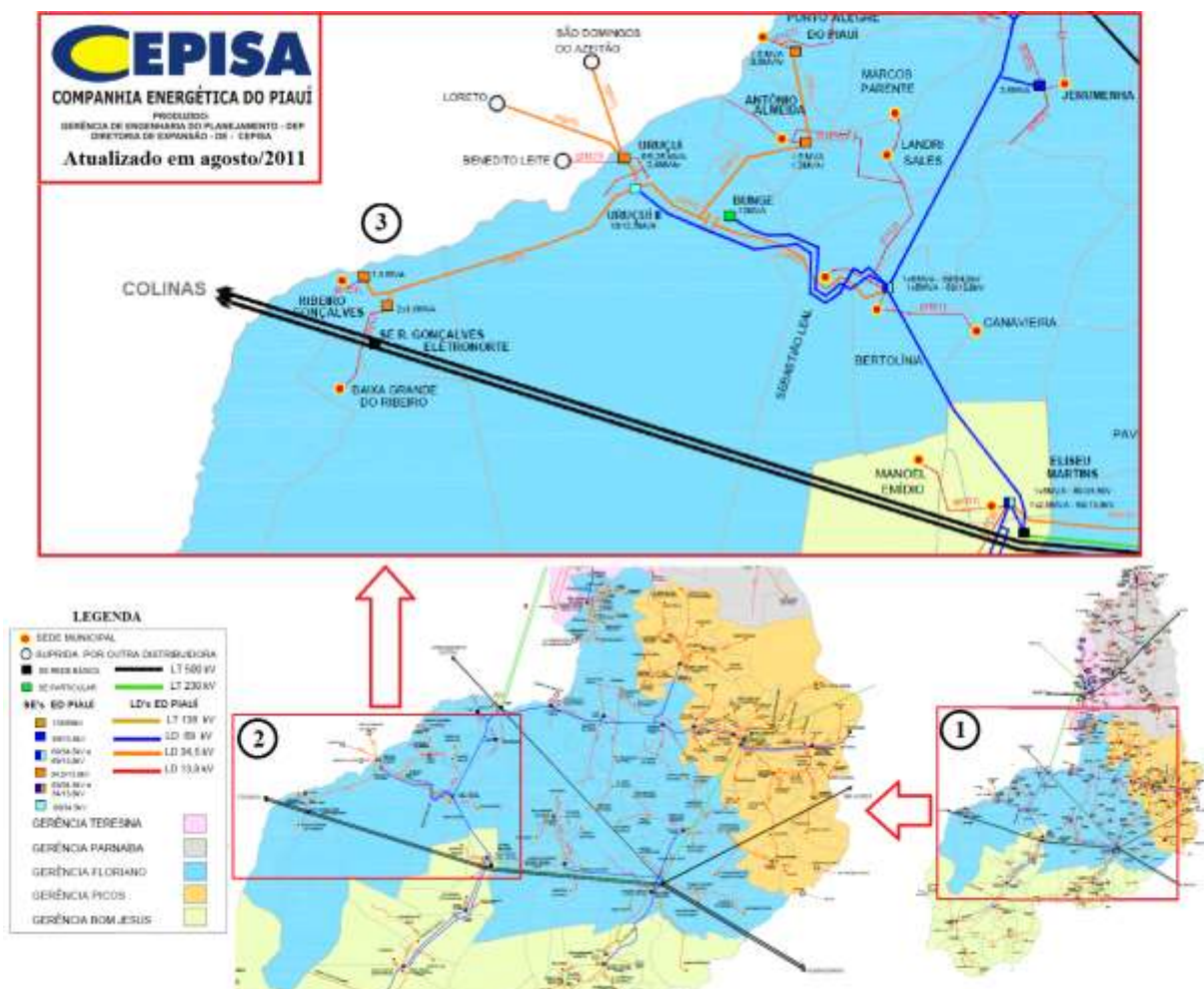


Figura 10 - Regional Boa Esperança - Sistema Elétrico

Fonte: Planejamento de Curto Prazo da ED Piauí 2009-2013 - Sumário Executivo (2011)

Limitações técnicas impõem condições não satisfatórias de funcionamento, tanto na Alta Tensão quanto na Média Tensão, tendo como críticas as áreas atendidas a partir das subestações de Novo Oriente e Uruçuí, com a linha Boa Esperança - Bertolândia, na tensão de 69 kV, com 112 km em cabo 4/0 CAA, a linha Oeiras - Novo Oriente, na tensão 69 kV com 66 km em cabo 1/0 CAA e a linha Uruçuí - Ribeiro Gonçalves, na tensão 34,5 kV, com 106 km em cabo 1/0 CAA, apresentam os piores desempenhos [7].

Observa-se na Figura 10, a gritante falta de infraestrutura de redes de distribuição na área de interesse deste projeto, fato esse observado em qualquer nível de tensão, caracterizando um vazio a ser explorado pela concessionária local. Em consequência desses fatos, a região apresenta um dos maiores níveis de demanda reprimida de energia, com núcleos de fazendas e agroindústrias, munidas de unidades de grupos geradores, utilizando combustíveis fósseis para produzirem a energia necessária a seus funcionamentos.

## **2.6 Eletrificação rural no Piauí**

As políticas públicas e práticas convencionais de engenharia aplicadas pela ED PIAUÍ na eletrificação rural não foram diferentes das demais empresas de distribuição de energia no território nacional, resultando em cerca de 150.000 domicílios rurais excluídos do atendimento elétrico, tornando-se, em consequência, uma dívida eminentemente social com essas comunidades.

A área rural do Estado do Piauí, em especial aquela denominada de Cerrado Piauiense, é caracterizada pela baixa densidade demográfica aliada ao baixo consumo de energia, o que requer alto investimento por consumidor e custos de operação e manutenção também muito altos. Essas características inviabilizam qualquer retorno financeiro de médio e longo prazo à concessionária de energia elétrica.

A falta do vetor de desenvolvimento em que se constitui a energia elétrica no atendimento às necessidades básicas e melhoria da qualidade de vida das populações que vivem no meio rural, quer sejam aquelas básicas, como abastecimento d'água, acesso à saúde, iluminação, lazer, educação e comunicação ou ainda aquelas ligadas à produção, como irrigação ou processamento de produtos agrícolas, constitui-se o principal motivo do subdesenvolvimento e da não sustentabilidade dessas regiões.

A Figura 11 mostra, em números absolutos, os domicílios sem acesso à eletrificação rural nos Estados da Federação, referente ao ano de 2007.

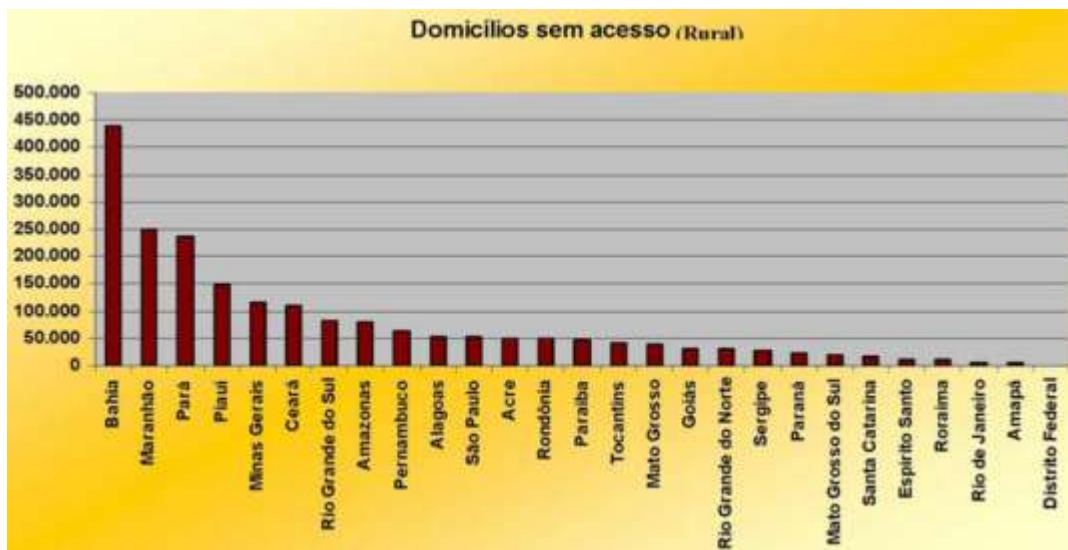


Figura 11 - Número de domicílios rurais sem acesso, por Estado, na Federação

Fonte: (Programa Luz para Todos - Manual de Operacionalização  
- Eletrobrás, Revisão nº 5, 2007)

Este levantamento, estabelecido pelo IBGE e publicado pelo Manual de Operacionalização do Programa Luz para Todos, serve para observar que a situação do Estado do Piauí, no tocante a fornecimento de energia elétrica aos domicílios localizados na área rural, apresenta-se como uma das piores em comparação com as demais regiões do Brasil, encontrando-se situações piores, nos estados da Bahia, Maranhão e Pará, estados estes que possuem área geográfica de dimensões continentais, maiores que muitos países do continente europeu.

## 2.7 Comunidades isoladas no sul do Piauí

Estão incluídos no bioma Cerrado na região Sul do Estado do Piauí os municípios de Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena, Uruçuí, Antônio Almeida, Bertolândia, Eliseu Martins, Manoel Emídio, Landri Sales, Marcos Parente, Floriano, Guadalupe, Itaueira, Jerumenha, Barreira do Piauí, Bom Jesus, Gilbués, Monte Alegre do Piauí, Palmeiras do Piauí, Corrente, Cristalândia do Piauí, Ribeiro Gonçalves e Uruçuí.

A região é considerada como uma das últimas fronteiras agrícolas do Brasil, caracterizada pela produção de grãos, em especial a soja e algodão, com características de mecanização intensiva e, por consequência, muito pouca utilização de mão-de-obra, e ainda a utilização de insumos químicos.

A implantação de grandes projetos agropecuários entre as décadas de 70 e 80, destacando-se o reflorestamento com a cultura do caju, impôs à região uma ocupação acelerada, intensificada enormemente a partir da década de 90, com a implantação dos projetos de produção de grãos, destinados à exportação, em especial, à produção intensiva da soja.

Destaca-se, como objeto do presente estudo, o município de Uruçuí, em especial a localidade denominada Malícia, que, por encontrar-se a 120 km distantes da sede municipal, e ainda a aproximadamente 40 km distante da rede elétrica mais próxima, enquadra-se dentro daquela possibilidade de atendimento com solução de engenharia não convencional, mencionada anteriormente.

O objetivo deste estudo é verificar a possibilidade de atendimento através de um sistema fotovoltaico à unidade escolar da localidade, possibilitando o desenvolvimento do ponto de vista cultural da comunidade e seus impactos econômicos e sociais.

A pesquisa fundamentou-se em levantamento da documentação bibliográfica e estatística realizado em instituições vinculadas, direta ou indiretamente, às questões

energéticas existentes no país e no mundo e, em especial, no Estado do Piauí e no município de Uruçuí.

## **2.8 Considerações finais**

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral quanto à utilização de sistemas PV em escolas de comunidades isoladas e ainda uma breve análise da situação atual e das opções energéticas utilizadas por essas comunidades, especialmente na região do Cerrado Piauiense envolvendo ainda as políticas públicas para a eletrificação rural.

Foi apresentada também uma análise e definição de sistemas isolados, comparando o SIN com uma visão geral do sistema elétrico no Estado do Piauí.

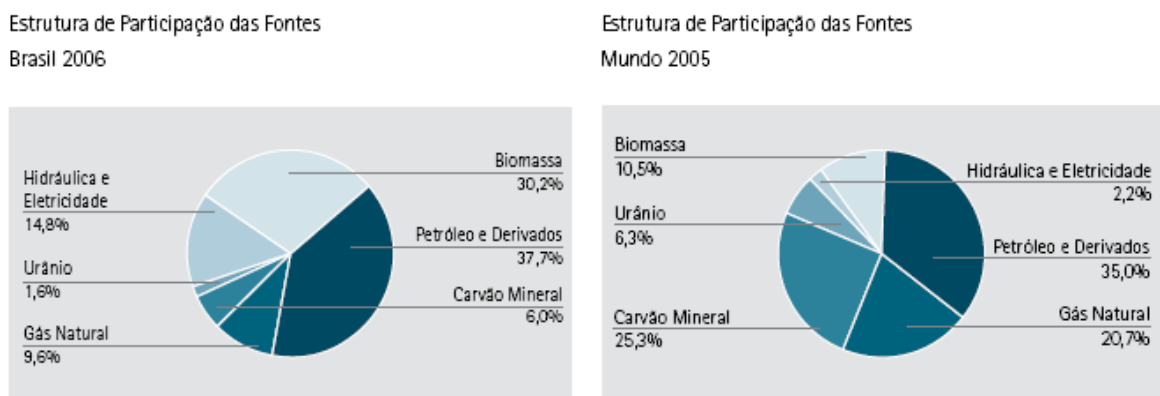
## CAPÍTULO 3

### 3 Tecnologias de sistemas fotovoltaicos

Do ponto de vista da fonte, a energia é em geral agrupada em dois grandes blocos: aquela cuja fonte é classificada como renovável e aquela classificada como não-renovável. Inclui-se na classe de energia não-renovável aquela dita de estocagem, produzida a partir de hidrocarbonetos, carvão mineral, nuclear. A classe de energia renovável, dita como energia de fluxo, é produzida a partir do sol, dos ventos, hidráulica, biomassa, geotérmica, das marés e das ondas.

#### 3.1 Aspectos energéticos

A partir do Balanço Energético Nacional - 2007, publicado pelo MME - Ministério de Minas e Energia, é feito um paralelo da oferta de energia entre o Brasil e o Mundo, em termos percentuais.



*Figura 12 – Oferta Interna de Energia*

Fonte: MME - Balanço Energético Nacional ano 2007, pg. 22

A partir desse paralelo, pode-se observar que a produção e consumo de energia, tanto para o Brasil quanto para o Mundo, baseia-se especialmente em combustíveis fósseis, fato que

compromete em longo prazo a matriz energética mundial, pois, apesar dos esforços em aumentar os estoques deste tipo de combustível com novas prospecções e cada vez mais profundas (camada pré-sal), este recurso é esgotável.

Não obstante as características já mencionadas desse tipo de energia, esta é responsável pela emissão em larga escala de poluentes na atmosfera, tendo como consequência, acentuação do fenômeno denominado efeito estufa. Essa característica enseja imediata mudança nos hábitos de consumo energético das populações, a migração para outras formas de energias e investimentos em estudos e desenvolvimento de energias renováveis.

Conforme demonstra a Figura 13, retirada da publicação “ Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21”, observa-se ao longo dos anos um aumento sensível do investimento em energias renováveis, tendo como vetor tanto as políticas públicas como iniciativas privadas.

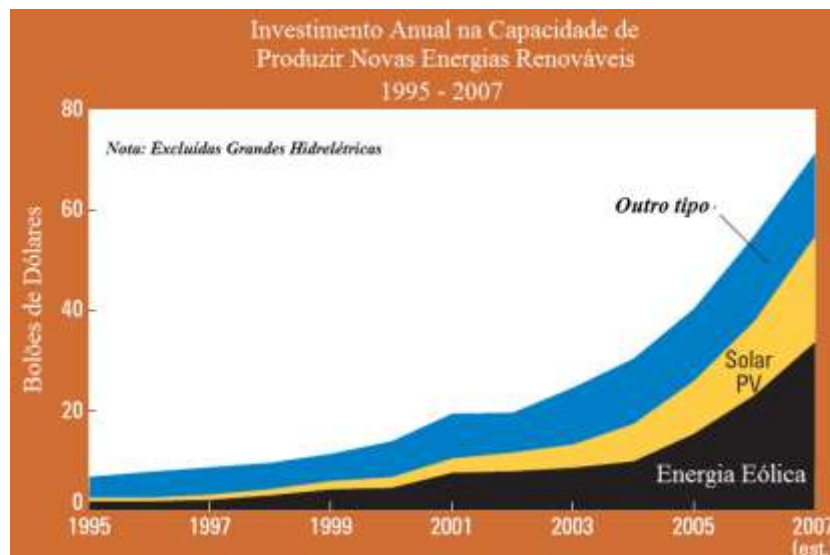


Figura 13 - Investimento anual na capacidade de novas energias renováveis 1995-2007  
Fonte: REN21-Renewables 2007-Global Status Report

Comparado ao resto do mundo, o documento do MME - Balanço Energético Nacional ano 2007 mostra que o Brasil aparece em condições notadamente favoráveis, com



45% da oferta de energia dentro da classe de energias renováveis. A Tabela 4 compara a oferta interna de energia a partir de seu tipo, com base nos gráficos apresentados na Figura 14.

Tabela 4 - Oferta Interna de Energia

Tipos de Energias		Brasil (%)	Mundo (%)
Energia Renovável (de fluxo)	Hidráulica	14,8	2,2
	Biomassa	30,2	10,5
<b>Totais de Energia Renovável</b>		<b>45,0</b>	<b>12,7</b>
Energia Não-Renovável (de estocagem)	Petróleo e Derivados	37,7	35,0
	Carvão Mineral	6,0	25,3
	Nuclear	1,6	6,3
	Gás Natural	9,6	20,7
<b>Totais de Energia Não-Renovável</b>		<b>55,0</b>	<b>87,3</b>

Fonte: Produção própria baseado no Balanço Energético Nacional ano 2007, pg. 22

Neste mesmo documento, destaca-se análise feita comparando o Brasil e o Mundo acerca da utilização de fontes renováveis de energia.

O Brasil manteve as vantagens comparativas com o resto do mundo em termos de utilização de fontes renováveis de energia. No país, em 2006, 45,1% da OIE foi de energia renovável, enquanto que, em 2005, a média mundial foi de 12,7% e nos países da OECD<sup>(1)</sup> foi de apenas 6,2%. (PRODUÇÃO PRÓPRIA BASEADO NO BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2007, p. 22)

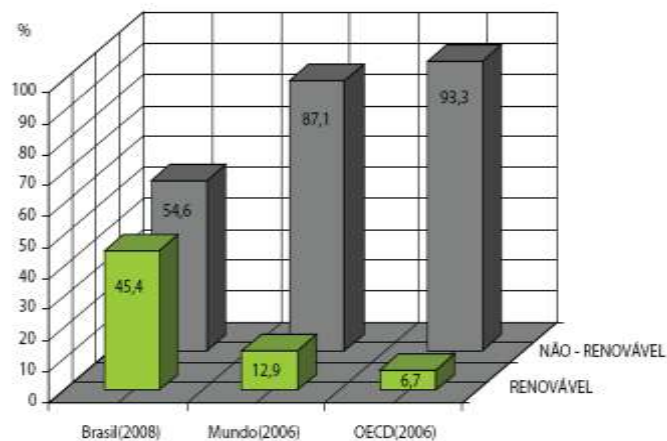


Figura 14 - Estrutura da Oferta Interna de Energia - OIE

Fonte: MME - Resenha Energética Brasileira Exercício 2008, pg. 8

<sup>(1)</sup>Países membros da Organisation de Coopération et de Développement Économiques: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Coreia do Sul, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Eslovaca, República Tcheca, Suíça, Suécia e Turquia.

No período em análise, observa-se um aumento na demanda total por energia. Em 2007, o Brasil apresentou uma Oferta Interna de Energia total de 238,76 milhões de tep<sup>(2)</sup>; já em 2008, esse número passa a 251,52 milhões de tep, correspondendo a um aumento percentual de 5,3%.

No entanto, no mesmo documento, observa-se que apesar do aumento da demanda, o que significa crescimento econômico, houve uma redução do uso de fontes renováveis de energia em detrimento do uso de energias de fontes não-renováveis. Em 2008, a energia renovável passou a representar 45,4% da Matriz Energética Brasileira, enquanto que em 2007 a participação era de 45,9%.

Não obstante o crescimento da OIE de fontes não-renováveis, o Brasil ainda apresenta uma das mais altas proporções na oferta de energia de fontes renováveis, em comparação com a média mundial e também com os países que compõem a Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômicos – OECD.

### 3.2 Fundamentação teórica

O sol é uma fonte inesgotável de energia e, a partir da incidência de sua radiação na terra, tem se tornado ao longo do tempo, uma fonte firme de produção de energia elétrica renovável, com impacto mínimo ao meio ambiente.

Ao longo do ano, devido ao movimento elíptico da Terra em torno do Sol, a distância entre esses dois astros pode variar entre  $1,47 \times 10^8$  km e  $1,52 \times 10^8$  km e, devido a esse fato, a intensidade da radiação solar incidente na atmosfera varia cerca de 6,9%, entre  $1.321 \text{ W/m}^2$  (no início de julho) e  $1.412 \text{ W/m}^2$  (no início de janeiro). Sobre esse assunto, no site da

---

<sup>(2)</sup>Tonelada Equivalente de Petróleo (tep) é a unidade comum na qual se convertem as unidades de medida das diferentes formas de energia utilizadas no BEN. Os fatores de conversão são calculados com base no poder calorífico superior de cada energético em relação ao do petróleo, de 10800 kcal/kg.

NASA ([http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/05feb\\_sdo/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/05feb_sdo/)), têm-se retratado os esforços de estudos na quantificação da radiação solar incidente.

Na atualidade, utilizando-se de satélites, ficou possível precisar a radiação solar incidente que atinge a atmosfera terrestre em um plano perpendicular aos raios. Seu valor médio é de  $1.366 \text{ W/m}^2$  (constante solar) e, para sua determinação, considera-se todo o espectro eletromagnético, tanto o visível como o não visível a olho nu. Sua disponibilidade em todo o globo terrestre proporciona a produção de energia mesmo nos locais mais longínquos e isolados do globo, evitando nos casos mais utilizados, custos com a eventual construção de linhas e redes de distribuição para atender essas áreas.

Algumas interações acontecem até a radiação solar atingir a crosta terrestre, dentre elas, a absorção de parte da radiação pela atmosfera, uma outra parte é refletida ao espaço e outra difundida. Conseqüentemente, pode-se afirmar que a radiação solar direta, ou seja, aquela que atinge diretamente a crosta terrestre é sempre menor que o valor da constante solar.

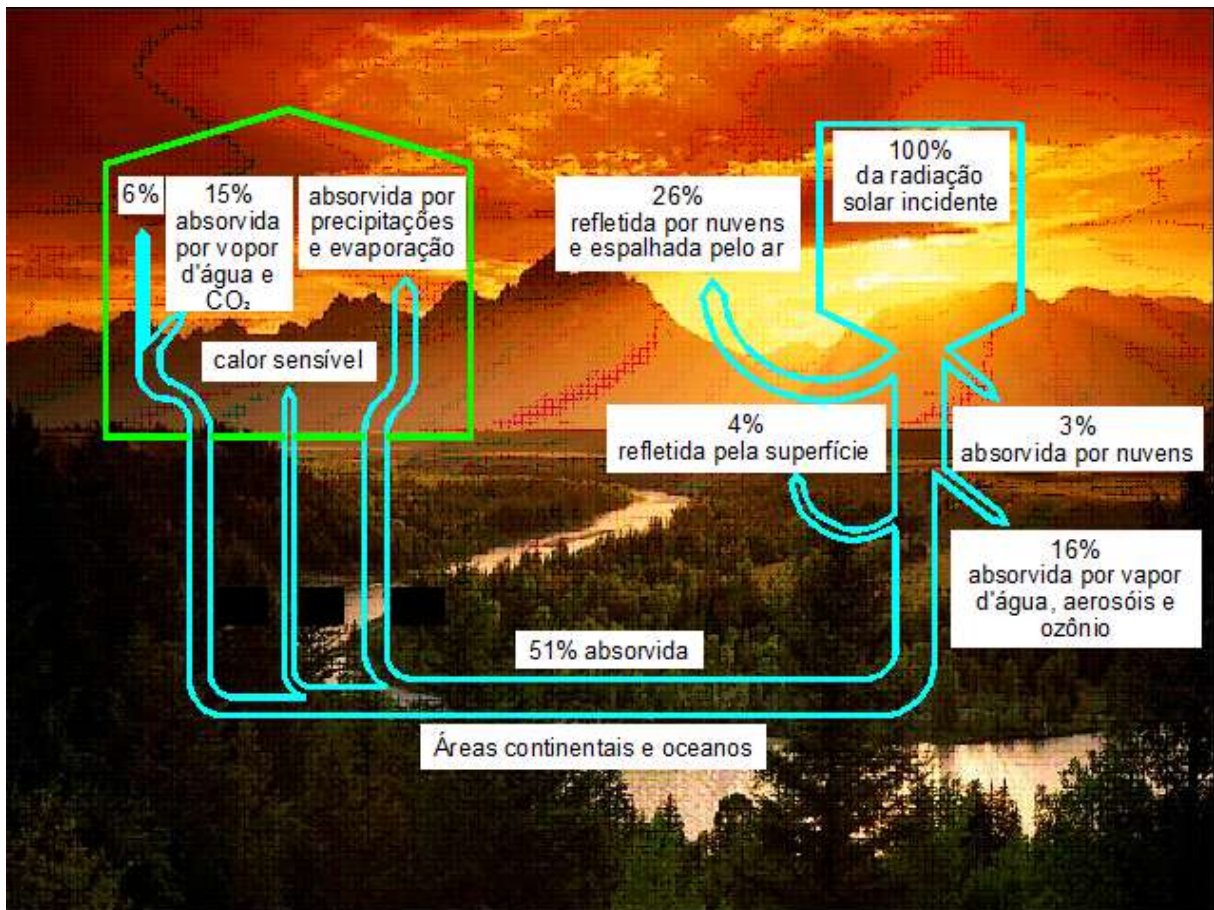
Fatores como a composição do ar e seu deslocamento, as precipitações meteorológicas e mudanças climáticas e ainda a latitude influenciam fortemente nos valores da radiação solar incidente, forçando assim que se lance mão de dados históricos, de informações a partir de imagem de satélites e de modelos estatísticos na determinação com certa precisão, dos valores observados em uma determinada localidade.

A citação transcrita abaixo, apresentada pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar – Projeto Swera, nos dá uma visão mais detalhada sobre a coleta de dados para a determinação das potências de radiação solar.

Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas entre medidas de radiação incidente na superfície e condições atmosféricas locais e, geralmente, apresentam validade restrita à região estudada. Já os modelos físicos são válidos para qualquer região uma vez que solucionam a equação de transferência radiativa que descreve matematicamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera. A principal dificuldade da aplicação de modelos físicos reside na obtenção dos dados necessários para a parametrização das interações entre a radiação solar e os constituintes

atmosféricos. Entre esses dados pode-se citar a cobertura de nuvens e o perfil dos constituintes atmosféricos como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases atmosféricos.

A Figura 15 demonstra os valores do balanço da radiação solar na terra [14]. A parametrização dos modelos utilizados para se estimar o fluxo de radiação solar na superfície da terra tem como base os dados coletados por estações climatológicas ou solarimétricas na superfície terrestre ou em imagens de satélites que permitam a obtenção das propriedades óticas da atmosfera.



*Figura 15 - Balanço da radiação solar na Terra*

Fonte: modificada Atlas of Satellite Observations Related to Global Change, (1995, pg. 20)

Essas informações são apresentadas geralmente em gráficos ou mapas, e dispõem os valores da radiação solar na superfície horizontal, cuja unidade é o “ kWh / m<sup>2</sup> / unidade de

tempo” ou o “  $\text{kJh} / \text{m}^2 / \text{unidade de tempo}$ ”, onde para unidade de tempo, costumeiramente, adota-se o dia, o mês ou o ano.

Observa-se na Figura 16 abaixo que a disponibilidade da radiação solar direta medida e registrada pelo Projeto Swera, com envolvimento de inúmeros órgãos governamentais e científicos internacionais, varia em sua média anual, de 3,5 a 6,5  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$  ao longo de todo o território nacional.

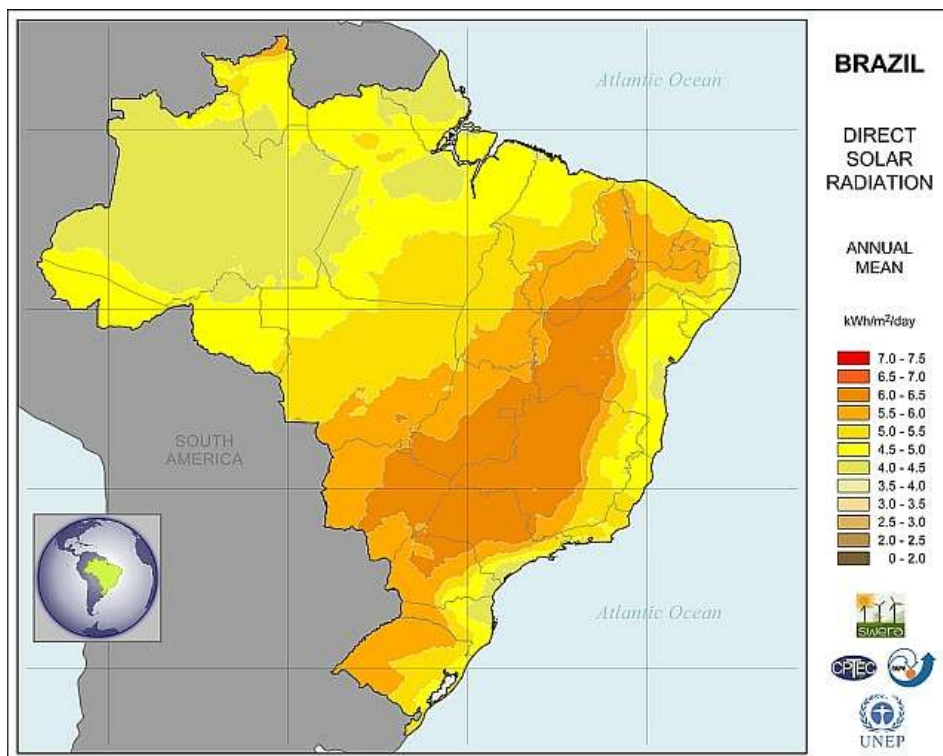


Figura 16 - Mapa da irradiação solar direta, média anual no território brasileira, período de 1995 a 2000.

Fonte: Annual and seasonal average direct normal (DNI) GIS data (contours) for Brazil from INPE and LABSOLAR. Disponível em <http://swera.unep.net/index.php?id=metainfo&rowid=163&metaid=280>  
Acesso em: 16/03/2009

Esses valores registrados pelo Projeto Swera foram obtidos com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 e revela condição favorável em todo o território nacional na produção de energia elétrica a partir do aproveitamento fotovoltaico. Em comparação com outros países que investem e se encontram mais evoluídos nessa tecnologia, e em condições menos favoráveis de incidência solar em média diária anual, fica demonstrado que existe uma grande margem para investimento dessa tecnologia pelo Brasil.



### **3.3 Utilização da Energia Solar**

Basicamente dois processos são utilizados atualmente na produção de eletricidade a partir do aproveitamento da radiação solar incidente, o processo termodinâmico, que transforma a radiação solar em calor, utilizando-se de concentradores de raios solares, e posteriormente, através de conjuntos turbo-geradores, transformando essa energia em energia elétrica, e o processo fotovoltaico, que consiste da conversão direta da luz solar em eletricidade, através do denominado efeito fotovoltaico.

#### **3.3.1 Processo Termodinâmico**

Com a finalidade de atingir metas na redução de emissões de gases que agravam o efeito estufa, as nações têm combinado programas de incentivo e novos normativos com políticas agressivas na busca de minimizar os custos e eficientizar novas fontes de energia, projetando para a próxima década crescimento elevado para o setor de energia solar.

Esse tipo de geração apresenta perspectivas de custos competitivos em relação aos combustíveis fósseis, tendo em vista a escalada dos preços do petróleo, gás e seus derivados, além de trazer inúmeros benefícios, como a inversão da produção de gás carbono à atmosfera. Ainda existem inúmeros desafios técnicos, financeiros e regulamentares, que limitam o crescimento e disseminação desse tipo de aproveitamento a ser alcançados, dentre os quais se pode citar a escolha do local, que deverá apresentar topografia de fácil nivelamento, proximidade de sistemas elétricos convencionais existentes, e ainda políticas de garantia do financiamento aos investimentos, dentre outros.

O CSP (Concentrating solar power ) utiliza-se de um campo de espelhos, chamados de concentradores solares, com a função de captar a energia solar incidente na área do campo, concentrando-a e encaminhando-a a uma área bem menor (foco), com a finalidade de aquecer

um fluido. Esse fluido aquecido é transportado a um turbo-gerador, que produzirá energia elétrica assim como em usinas termelétricas convencionais.

Centrais de torre, de disco parabólico ou com concentradores cilíndricos, são exemplos das tecnologias utilizadas na atualidade com eficiência que varia de 14% a 22% de aproveitamento da energia solar incidente.

Em algumas montagens atuais, têm-se utilizado filme plástico aluminizado em lugar de espelhos de vidro, com a finalidade de reduzir custos e aumentar a eficiência de conversão. A Figura 17 mostra um esquema simplificado com os três modelos de centrais termosolares.

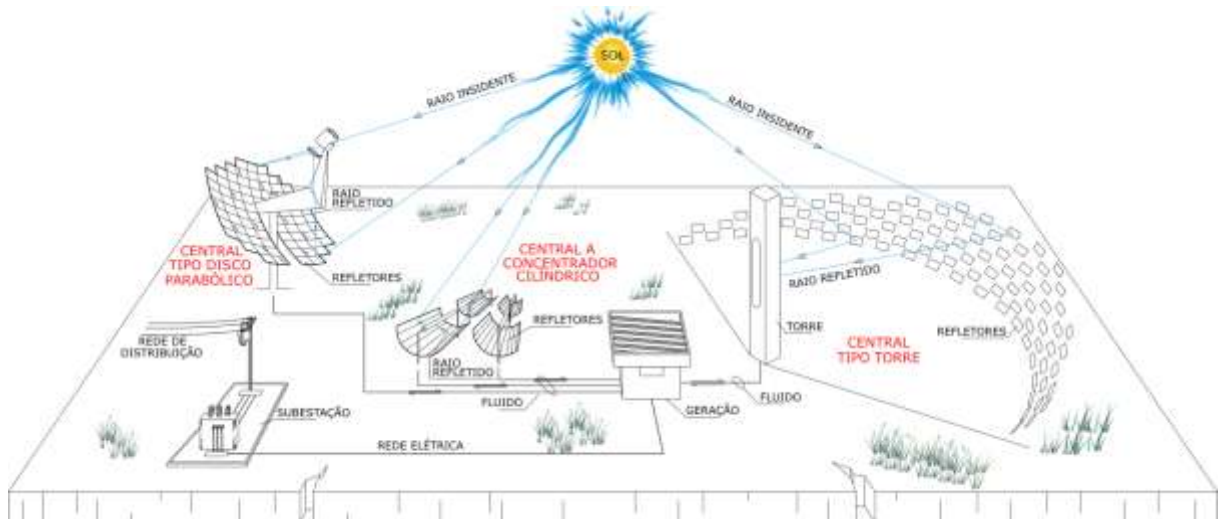


Figura 17 - Centrais Termosolares - Esquema

### 3.3.2 Processo Fotovoltaico

Este processo acontece pela transformação direta da luz em energia elétrica conseguida através de células solares, produzidas de materiais semicondutores tais como o silício, o arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre e índio.

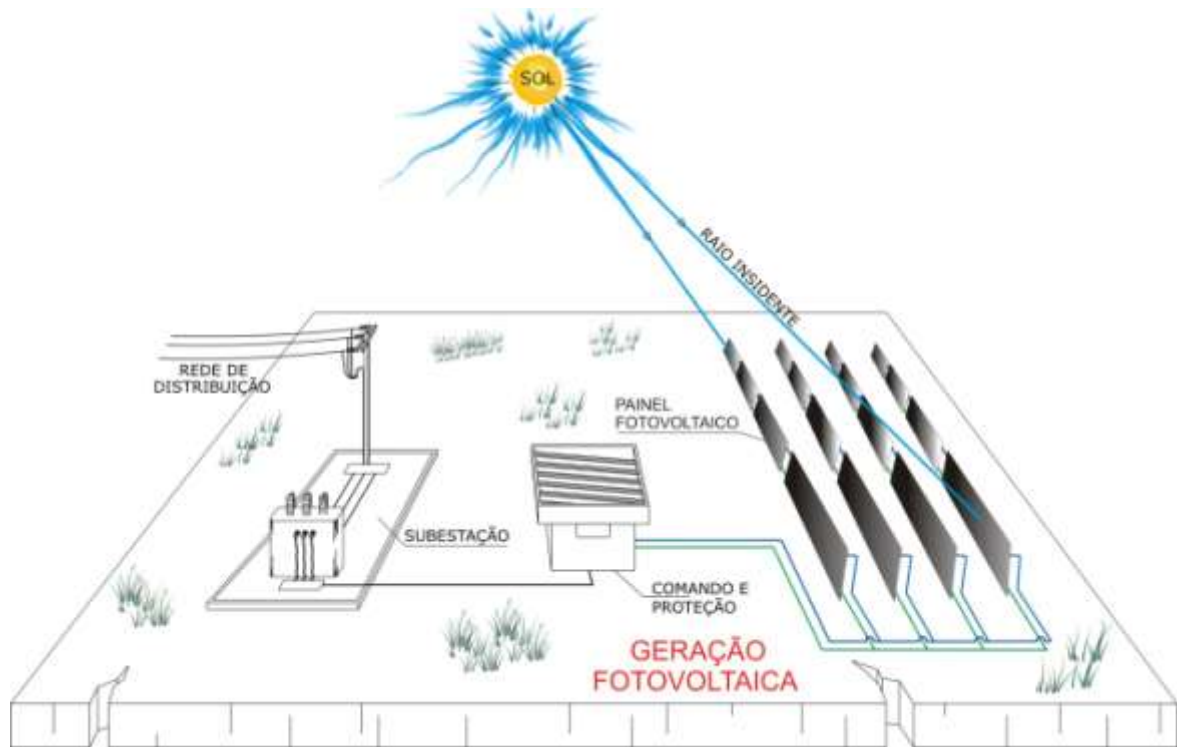


Figura 18 - Geração Fotovoltaica - Esquema

A luz solar se apresenta como onda eletromagnética e transporta energia na forma de fluxo de fótons. Quando incidente em determinados materiais, sob condições específicas, são capazes de liberar elétrons que, devidamente capturados, promovem o surgimento de uma corrente elétrica. Este processo é conhecido como efeito fotovoltaico.

Aproveitando-se dessa característica, um conjunto de células fotoelétricas são dispostas em painéis e arranjadas de forma a serem submetidas à radiação solar o maior espaço de tempo possível durante o período do dia, transformando a energia solar em energia elétrica sem que para tanto sejam necessárias peças girantes ou outros equipamentos para produzir ciclos termodinâmicos.

As primeiras células fotovoltaicas utilizaram o selênio como matéria-prima, com eficiências de conversão da luz solar em eletricidade, variando em torno de 0,5%. Em 1954 foi implementada a primeira célula solar a base de silício que, em poucos anos, chegou a uma eficiência de 6%. Com a evolução tecnológica e melhoramentos implementados desde aquela época, consegue-se produzir células solares na atualidade com eficiência superior a 20%.



Na atualidade, as células fotovoltaicas são produzidas pela composição de duas lâminas bastante delgadas e sobrepostas de material semicondutor: a primeira lâmina é um cristal de silício dopado (com impurezas) com fósforo e a segunda é composta por cristal de silício dopado com boro.

Ao ser submetida à incidência dos raios solares, a energia proveniente da radiação luminosa faz surgir uma corrente elétrica em seu interior, gerando uma força eletromotriz entre as capas e capturada a partir de eletrodos convenientemente conectados em cada uma das capas.

Obtém-se uma tensão em torno dos 0,58 V nos bornes da célula, quando esta é submetida a uma radiação solar com densidade de potência de  $1.000 \text{ W/m}^2$ . O artifício de se conectar uma determinada quantidade de células em série é utilizado para se obter uma tensão maior nos bornes de conexão dessas células.

Então, para a mesma radiação solar mencionada anteriormente, conectando-se 36 células em série, obtém-se uma tensão máxima da ordem de 18 V em seus conectores. Essa configuração é denominada de “módulo ou painel fotovoltaico”. A conexão de vários painéis fotovoltaicos, devidamente distribuídos conforme mostrado no esquema da Figura 18 é denominado de Central Fotovoltaica.

Em termos de potência instalada, o cenário evolutivo para o mundo é retratado na publicação feita pela European Photovoltaic Industry Association - Global Market Outlook for Photovoltaics until 2012 [23], página 4, cujo gráfico transcrevemos na Figura 19.

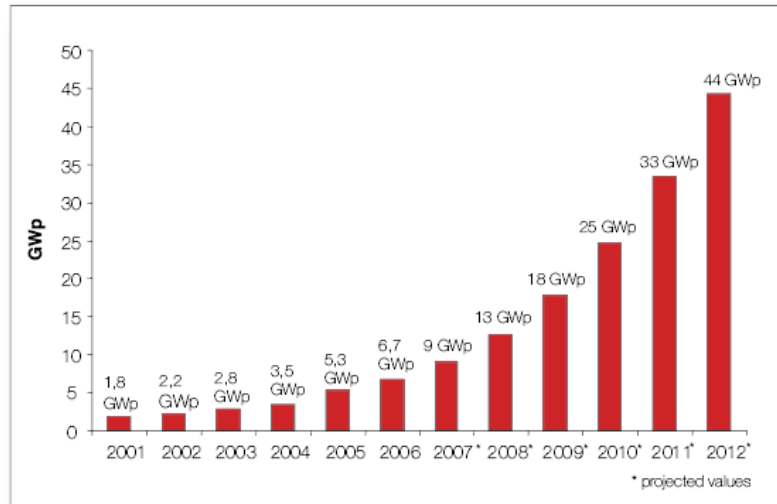


Figura 19 – Cenário da capacidade global acumulativa PV

Fonte: Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica - Perspectivas do Mercado Global para a energia fotovoltaica até 2012, pg. 4

As células mais utilizadas são as confeccionadas a partir de silício cristalino e, tendo em vista a disponibilidade quase ilimitada do silício, representam algo em torno de 90 a 95% de todas as células solares produzidas.

A Figura 20 ilustra a produção de células de silício cristalino nos últimos anos, quer seja na forma monocristalina, multicristalina ou em lâminas [24].

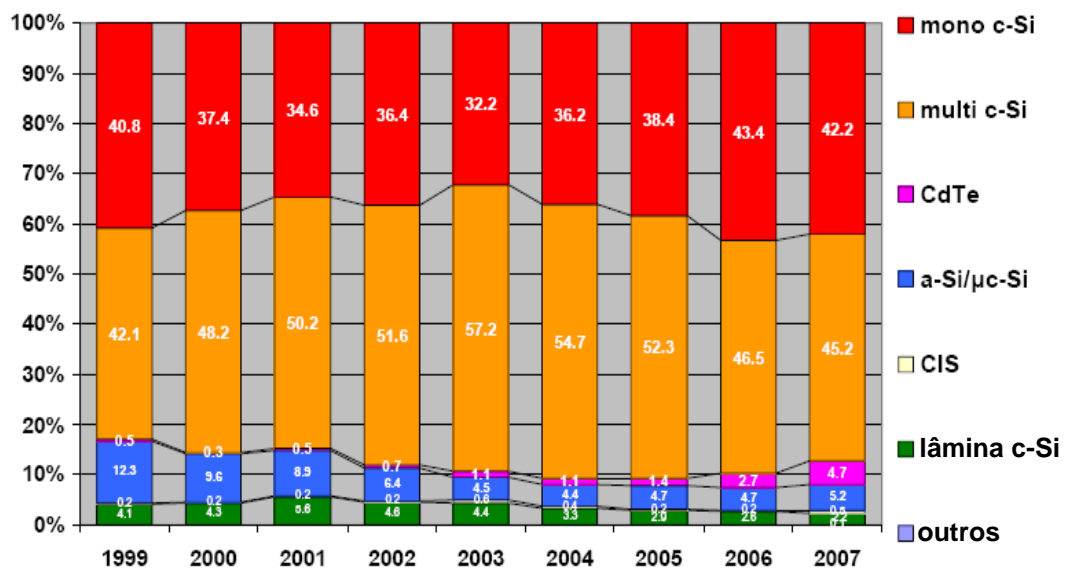


Figura 20 - Arranjo das tecnologias de células instaladas anualmente

Fonte: PHOTON International – Edição Março 2008, pg 140

Como o silício não se apresenta na natureza na forma de elemento químico puro e sim uma ligação química em forma de dióxido de silício, para sua obtenção, retira-se o oxigênio não desejado do dióxido de silício através do aquecimento da areia de sílica juntamente com pó de carvão, conseguindo-se nesse processo a produção de silício metalúrgico, com uma pureza de 98%. Também é comum aos fabricantes valerem-se de processos químicos de purificação a fim de utilizar os descartes das indústrias de semicondutores.

### **3.4 A Célula Solar Fotovoltaica**

Os dispositivos fotovoltaicos (PV) são geralmente classificados em três classes principais; considera-se a primeira geração como sendo aquela baseada em tecnologia de silício (mono e poli) cristalino, com a maior participação de mercado.

A segunda geração é baseada em tecnologias de filmes finos (thin-film): telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS e CIGS), silício amorfo e tandem (camadas amorfas somadas a camadas cristalinas) e filmes finos policristalinos. Devido à sua maleabilidade, essa tecnologia, já bastante difundida, é vetor para outras aplicações, como módulos flexíveis, integração com a arquitetura de edificações, dentre outras.

A terceira geração é caracterizada por tecnologias que reúnem células orgânicas, híbridas e células solares de corante (DSC - Dye Solar Cells), que se encontram mais próximas da produção em escala industrial que as células orgânicas e híbridas, cujos estudos e produção de protótipos permanecem em nível laboratorial avançado. Outras publicações ainda mencionam uma quarta geração de dispositivos PV ainda em fase de desenvolvimento, baseados em técnicas como a fotossíntese.

Em todo o mundo, uma grande variedade de novos materiais está sendo testada em laboratórios e institutos de pesquisas, a fim de se obterem compostos com maior rendimento e mais acessíveis na produção fotovoltaica. Estima-se que, entre 2015 e 2020, emergirão novas

tecnologias com a capacidade de dar ascendência à indústria da energia solar ou abrirá as portas de uma série de novas aplicações para essa tecnologia.

Na produção industrial das células fotovoltaicas a silício, é utilizado o processo denominado de difusão para a injeção de pequena quantidade de outros elementos químicos ao silício na forma cristalina (material dopante), uma vez que, nesta forma, este é um semicondutor com poucas cargas livres, portanto com resistividade muito elevada. O processo é executado de modo a proporcionar ao mesmo tempo uma diminuição do valor inicial da resistividade e a criação de zonas de diferentes tipos de cargas.

A criação de uma zona no semicondutor com excesso de cargas negativas (elétrons) define o semicondutor do tipo N (Negativo). Por outro lado, a criação no semicondutor de uma zona onde predominam as cargas positivas, que atraem elétrons livres, define o semicondutor do tipo P (Positivo). O processo de difusão permite a criação de duas zonas semicondutoras adjacentes no mesmo material, sendo uma do tipo “N” e outra do tipo “P”. O espaço que separa essas zonas é denominado de zona de transição ou simplesmente junção.

Procurando o equilíbrio, cargas livres se deslocam da zona de alta densidade até a zona oposta, deixando a zona de junção totalmente livre de cargas. Nesse ponto, as zonas adjacentes têm concentrações de cargas minoritárias, ou seja, cargas negativas do lado “P” e cargas positivas do lado “N”. O acúmulo dessas cargas em ambos os lados da junção faz surgir uma diferença de potencial, que se opõe à continuação do movimento inicial das cargas. Quando alcançado o fim do movimento de cargas, diz-se que a junção N-P alcançou seu ponto de equilíbrio, ilustrada na Figura 21.

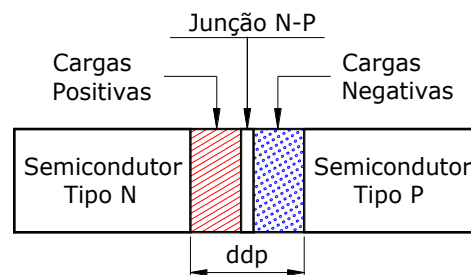


Figura 21 - Junção N-P em equilíbrio  
Fonte: Criação própria

O fenômeno fotovoltaico acontece quando a célula fotovoltaica é submetida à radiação solar e os fótons liberam elétrons dos átomos de silício criando então duas áreas de cargas livres: uma positiva e outra negativa. Essas novas cargas alteram o equilíbrio alcançado na junção N-P. Conectando-se um condutor em cada uma das zonas, e estas a uma carga, verifica-se a circulação de uma corrente elétrica. A potência elétrica pode ser determinada pelo produto da tensão instantânea de saída pela corrente instantânea.

Pode-se então comparar a célula fotovoltaica a um diodo de grande superfície, que submetido à radiação solar é capaz de gerar energia elétrica. O seu funcionamento está relacionado aos níveis da radiação solar, à temperatura e à área da superfície incidente, cujas características são mostradas através de gráficos que relacionam a corrente com a tensão, como o da Figura 22.

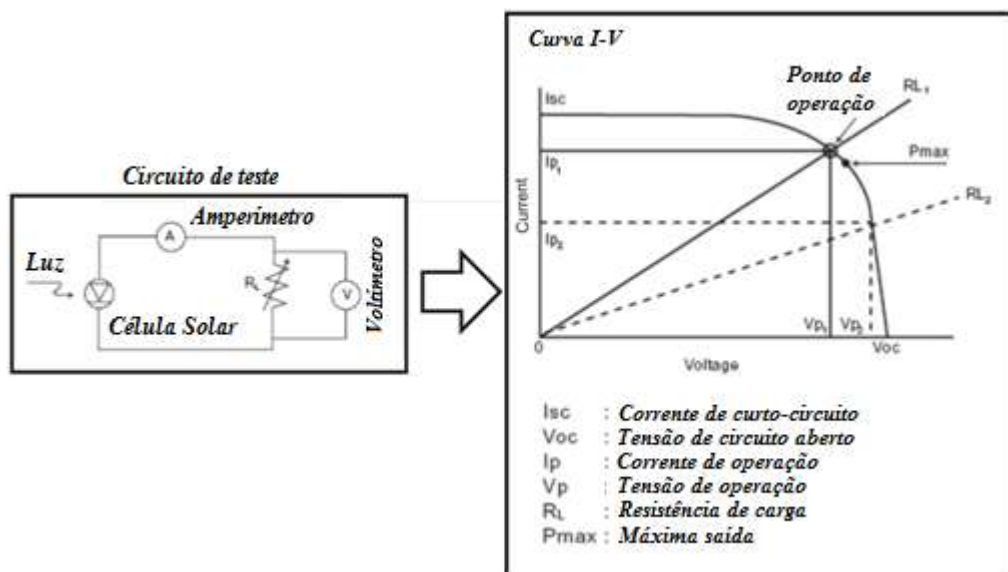


Figura 22 - Circuito de teste e gráfico corrente-tensão típicos de uma célula solar  
Fonte: Panasonic Solar Cells Technical Handbook '98/99, pagina 4 modificado

A curva I-V é produzida a partir do circuito de teste, variando-se a resistência de carga  $R_L$  de zero a infinito, enquanto se registram as medições da corrente e tensão. O ponto no qual a curva I-V e resistência  $R_L$  se interceptam é o ponto de funcionamento da célula solar. A corrente e a tensão neste ponto são respectivamente  $I_p$  e  $V_p$  e se localizam no ponto de máximo rendimento da célula solar.

De uma forma geral, as características das células fotovoltaicas são apresentadas através de curvas I-V, como as mostradas na Figura 23, função da intensidade da radiação solar e temperatura da célula.

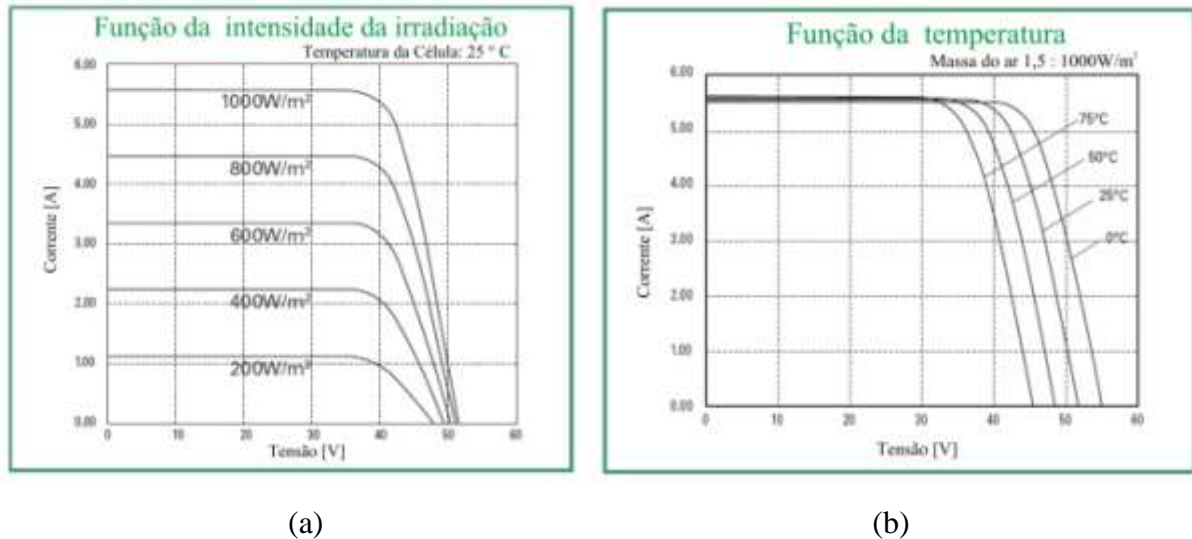


Figura 23 - Gráficos corrente - tensão função da irradiação solar e temperatura da célula  
Fonte: Sanyo – Datasheet Hit Photovoltaisches Modul Hip-215NHE5, modificado

Como efeito à mudança na intensidade de radiação solar, analisando-se a Figura 23 (a), observa-se claramente uma variação acentuada na corrente de saída, possibilitando-se afirmar que a corrente varia diretamente com a radiação, enquanto que a tensão, apesar de sua tendência de queda, permanece praticamente constante.

Outra característica mostrada Figura 23(b) acontece devido ao aumento da temperatura, que provoca uma redução diretamente proporcional da tensão. Por esse motivo, para locais com elevadas temperaturas ambientes, utilizam-se módulos que possuam maior quantidade de células em série, com a finalidade de se alcançar tensão de saída suficiente para carregar baterias.

### 3.5 O Painel ou Módulo Solar Fotovoltaico

A junção ou conexão em série de um número determinado de células fotovoltaicas, mais frequentemente de células de silício cristalino, dá origem ao painel ou módulo solar fotovoltaico. A fim de dotar o painel solar de rigidez mecânica, dispõem-se as células de forma que estas são suportadas por um encapsulamento laminado em perfil de alumínio provido de guarnições capazes de garantir também proteção contra a umidade e ajudando na dissipação de calor, garantindo vida útil superior a 30 anos ao dispositivo.

Os painéis solares fotovoltaicos são fabricados normalmente com vidro temperado e antirreflexivo em sua parte frontal; em seguida, tem-se uma camada de acetato de vinil etileno cobrindo as próprias células e seus contatos. O acetato tem como função primordial a proteção dos dispositivos contra os raios ultravioletas. Na parte posterior é colocada uma camada de vidro ou plástico Tedlar e porque neste lado estão os pontos de interconexão elétrica. O conjunto é então envolto em uma moldura de alumínio, com a finalidade de dar mais rigidez mecânica ao conjunto e facilitar a fixação dos módulos nas estruturas de suporte.

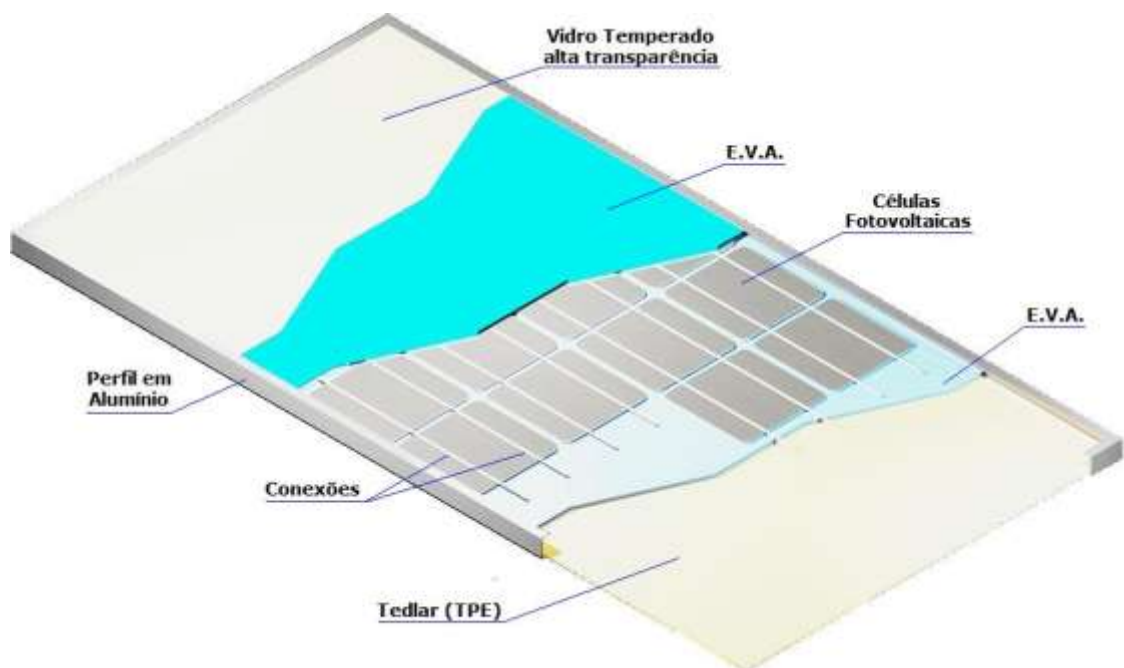
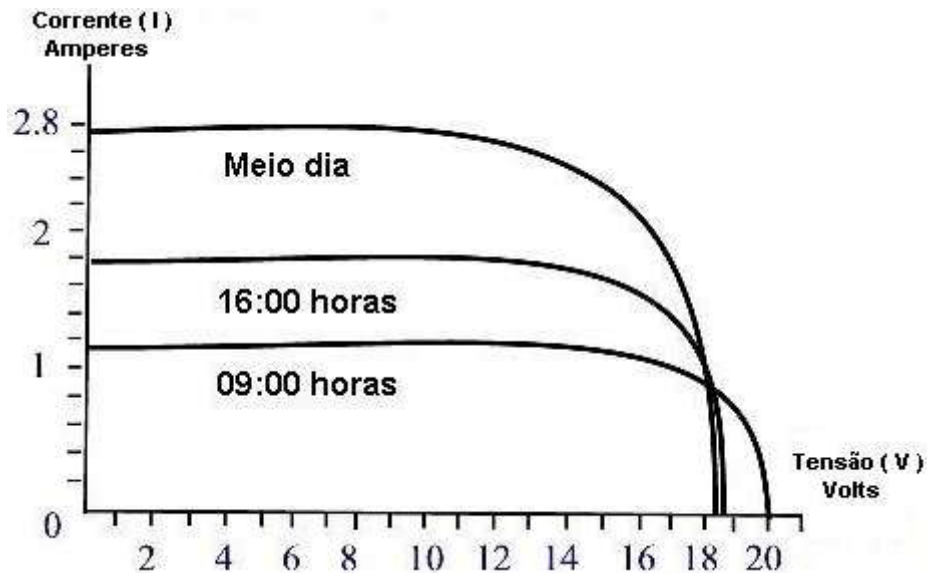


Figura 24 - Placa ou Módulo Fotovoltaico  
Fonte: Sanyo – Criação própria

Da mesma forma que para a célula, são gerados os gráficos com as curvas I-V para os módulos PV. Sua utilização deve levar em consideração que a carga determina o ponto de funcionamento na curva I-V, portanto a característica operativa da carga a conectar é uma informação preciosa e imprescindível na especificação do módulo PV.

As condições ambientais de radiação e temperatura ambiente ditam o comportamento característico do módulo. A curva I-V destes é formada por uma família de curvas onde são expressas as características de saída durante o dia, em uma determinada época do ano, como mostrado na Figura 25 abaixo.



*Figura 25 – Curva I-V em várias temperaturas de Célula*

Fonte: Disponível em <http://www.solarterra.com.br/pdf/curso-energia-solar-fotovoltaica.pdf>  
Acesso em: 16/05/2010

Pode-se, portanto, a partir da área compreendida sob cada curva mostrada na Figura 25, determinar a quantidade de energia que o módulo é capaz de gerar durante o dia, cuja unidade mais usual é o W.h / dia.



### 3.6 Acumuladores

A capacidade e as características eletroquímicas dos vários tipos de baterias existentes no mercado mostram que, para um projeto desta magnitude, o conhecimento desses dispositivos é fundamental para uma boa escolha, pois em qualquer sistema fotovoltaico com acumuladores, a escolha do tipo de bateria empregada ditará o sucesso ou fracasso do projeto.

Serão apresentadas as diferentes tecnologias disponíveis e mais utilizadas no mercado nacional de baterias, comparando vantagens e possíveis aplicações de cada, a fim de escolher o modelo mais eficiente e com melhor relação custo-benefício para o presente projeto.

#### 3.6.1 Conceitos básicos sobre as baterias

Procurou-se estabelecer uma compreensão mais completa dos processos químicos responsáveis pelo comportamento elétrico e dinâmico observados durante a operação de carga e descarga. A funcionalidade básica de uma bateria pode ser descrita pelas reações que ocorrem dentro de suas células. O arranjo dos componentes de uma célula pode ser visto na Figura 26.

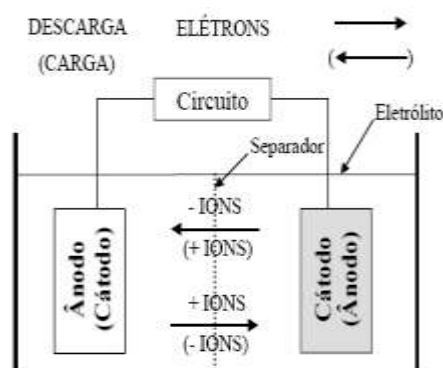


Figura 26 - Elementos de uma célula recarregável

Fonte: [23]

Uma bateria armazena energia na forma eletroquímica nos materiais ativos ligados a suas grades de eletrodos metálicos positivos e negativos. Quando um circuito condutor externo estiver conectado a seus eletrodos, os elétrons são transferidos de um material ativo para o outro em função da reação eletroquímica estabelecida.

O eletrólito também participa na reação com a troca de íons entre materiais ativos. Essas reações eletroquímicas possibilitam à bateria fornecer energia elétrica para uma carga conectada (processo de descarga), ou aceitar a energia elétrica a partir de uma fonte a ela conectada (processo de carregamento).

### 3.6.2 Principais parâmetros das baterias

Os parâmetros mais importantes das baterias são relacionados na tabela abaixo:

*Tabela 5 - Parâmetros importantes das baterias*

<b>Parâmetro</b>	<b>Definição</b>
Tensão	- Força eletromotriz ou diferença de potencial, expressa em volts (V).
Tensão de corte	- Tensão da bateria ou da célula, em que a descarga é cortada. A tensão de corte é especificada pelo fabricante e é função da taxa de descarga e da temperatura.
Material ativo	- Constituintes de uma célula que participam da reação eletroquímica de carga / descarga.
Capacidade	- Quantidade de ampere-hora (Ah) em uma bateria totalmente carregada ou a quantidade que uma bateria pode entregar sob condições específicas de descarga.
Autodescarga	- É resultante de correntes internas na bateria; estas correntes ocasionam perda de carga mesmo em uma bateria não utilizada.
Célula	- Unidade eletroquímica básica usada para armazenar energia elétrica.
Bateria	- Duas ou mais células eletricamente ligadas para formar uma única unidade. Usualmente, o termo "bateria" também ser aplicado a uma única célula.
Corrente	- Fluxo de elétrons igual a um Coulomb de carga por segundo, expresso em ampères (A).
Ciclo	- Processo de descarga e posteriormente a carga de uma bateria, de tal forma que é restaurado ao seu estado de totalmente carregada.

Vida útil	- Dada em números de ciclos, carga seguida de descarga, que uma célula recarregável pode fornecer.
Ciclo de trabalho	- Parâmetros de funcionamento de uma bateria, incluindo fatores como: custo, taxas de descarga, profundidade de descarga, duração do ciclo e período de tempo no modo de espera.
Eletrodo	- Condutor elétrico e os materiais associados ativos em que ocorre uma reação eletroquímica. Também referido como as placas positivas e negativas.
Electrólise	- Dissociação química da água em hidrogênio e gás oxigênio causada pela passagem de uma corrente elétrica.
Eletrólito	- Meio onde acontece o transporte de íons entre os eletrodos positivos e negativos de uma célula.
Diferença de potencial	- Trabalho que deve ser feito contra as forças elétricas para mover uma unidade de carga de um ponto a outro, também conhecida como força eletromotriz (fem).
Célula ou bateria primária	- Pilha ou bateria que não se destina a ser recarregada e é descartada quando esgotada sua capacidade útil.
Bateria secundária	- Uma bateria que, após descarregada, pode ser restaurada a seu estado de carga, pela passagem de uma corrente elétrica através da célula na direção oposta à de descarga. (Também chamada de armazenamento ou recarregáveis).
Separador	- Camada de material isolante eléctrico que separe fisicamente eletrodos de polaridade oposta. Os separadores devem ser permeáveis aos íons no eletrólito e também podem ter a função de armazenar ou imobilizar o eletrólito.
Sulfatação	- Formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas de uma bateria de chumbo-ácido.
Terminal	- Conexões elétricas externas de uma célula ou bateria.
Fuga térmica	- Uma condição que ocorre com o processo de carga em uma bateria que resulta na geração de calor dentro da bateria, maior do que o calor dissipado por esta, provocando um aumento descontrolado da temperatura da bateria, podendo provocar a falha na célula, encurtamento da vida útil, e/ou fusão da bateria.

### 3.6.3 Principais tipos de baterias quanto à utilização

#### 3.6.3.1 Baterias estacionárias

São fabricadas em uma grande variedade de modelos para diferentes aplicações, especialmente utilizadas nos casos onde a potência fornecida se faz necessária em situações de espera ou de emergência. Uma característica especial desse tipo de bateria é que não

devem ser totalmente descarregadas, devem permanecer em carga de flutuação contínua para que possam ser usados na demanda.

As baterias estacionárias são utilizadas em especial nos casos de alimentação de emergência, equipamentos de telecomunicações, sistemas isolados e fontes de alimentação ininterrupta.

### **3.6.3.2 Baterias automotivas**

As baterias automotivas ou SLI (do inglês *Start, Light and Ignition*) são as mais aplicadas e utilizadas no mercado de baterias e, por consequência, são produzidas em maior número do que qualquer outro tipo de bateria de armazenamento. Esse tipo de bateria é utilizado basicamente para dar partida em motores de automóveis ou outros tipos de motores de combustão interna.

Observação importante é o fato de que esse tipo de bateria não é adequado nas aplicações de descarga profunda, ao contrário, são utilizadas em aplicações que necessitam de altas correntes por um curto espaço de tempo. Normalmente a bateria automotiva recebe uma carga de flutuação enquanto o veículo estiver funcionando.

### **3.6.3.3 Baterias de tração**

Baterias de tração são usadas como principais fontes de energia de veículos ou máquinas elétricas; por esse motivo, são usadas nos casos de regimes mais severos de funcionamento, necessitando de potência, energia e longa vida cíclica, principalmente quando operam em ciclos de descarga profunda. Encontram-se no mercado as baterias de tração do tipo empastadas (com placas mais espessas) ou tubulares.

### 3.6.4 Escolha da tecnologia

No projeto, os aspectos mais importantes para escolha do tipo de bateria são:

- Baixo custo: custos altos comprometem a viabilidade do projeto;
- Vida útil: quando maior a vida útil menor os gastos com manutenção;
- Rendimento: a energia elétrica obtida por conversão fotovoltaica é uma energia de custo considerável;
- Disponibilidade: evitar importações e custos com transporte ou grandes estoques.

Na tabela abaixo foram relacionadas as características positivas e negativas que serviram de orientação à tomada de decisão quanto ao tipo de acumulador a ser utilizado no projeto.

*Tabela 6 - Comparativo entre as baterias mais utilizadas*

BATERIA	CARACTERÍSTICAS POSITIVAS	CARACTERÍSTICAS NEGATIVAS
NiCd  níquel cádmio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tecnologia já desenvolvida e madura;</li> <li>• longa vida útil;</li> <li>• alta corrente de descarga;</li> <li>• preço baixo;</li> <li>• ótima performance sob rigorosas condições de trabalho;</li> <li>• carga rápida e simples mesmo após armazenagem prolongada;</li> <li>• alto número de ciclos de carga e descarga (1000 ciclos de carga e descarga);</li> <li>• disponível em larga escala de tamanho e opções de desempenho.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• baixa densidade de energia;</li> <li>• contêm material tóxico;</li> <li>• não podem ser descartadas no meio ambiente;</li> <li>• precisam ser recicladas;</li> <li>• alta taxa de auto-descarga precisando ser carregada periodicamente quando armazenada;</li> <li>• submetida a uma descarga não completa, poderão ser formados grandes cristais nas placas das células (efeito memória)</li> </ul>

<p>NiMH</p> <p>níquel metal hidreto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alta densidade de energia (50 a 100% maior capacidade) se comparada com as baterias NiCd;</li> <li>• menor efeito memória;</li> <li>• armazenagem e transporte simples;</li> <li>• não tóxica e não causa dano ao meio ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ciclo de vida p inferior ao das baterias NiCd;</li> <li>• ciclos repetidos de carga e descarga profundas reduzem sua vida útil;</li> <li>• desempenho se deteriora após 200 a 300 ciclos;</li> <li>• corrente limitada de descarga, melhores resultados com 20 a 50 % da corrente nominal;</li> <li>• processo de carga mais complexo, geram mais calor e requerem um maior tempo de carga;</li> <li>• alta taxa de auto-descarga;</li> <li>• o desempenho se deteriora se armazenada em elevadas temperaturas, devem ser armazenadas em local fresco, a 40% do estado de carga;</li> <li>• requerem descargas completas regularmente para evitar o efeito memória;</li> <li>• são mais caras que as baterias NiCd.</li> </ul>
<p>Chumbo-Ácido</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• é a bateria mais econômica;</li> <li>• é barata e simples de se fabricar;</li> <li>• tecnologia madura, confiável e bem compreendida;</li> <li>• auto-descarga está entre as mais baixas em sistemas de baterias recarregáveis;</li> <li>• baixa exigência de manutenção;</li> <li>• sem efeito memória;</li> <li>• suporta taxas elevadas de descargas;</li> <li>• sem preenchimento de eletrólito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• o peso é um problema a ser analisado;</li> <li>• não pode ser armazenada quando descarregada;</li> <li>• baixa densidade de energia;</li> <li>• só permite um número limitado de ciclos completos de descarga;</li> <li>• o eletrólito e o conteúdo da carga podem causar danos ambientais;</li> <li>• limitações do transporte em baterias de chumbo-ácido inundado;</li> <li>• fuga térmica quando do carregamento impróprio.</li> </ul>
<p>Lítio-Íon</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alta densidade de energia;</li> <li>• peso leve;</li> <li>• rápido crescimento tecnológico;</li> <li>• Auto-descarga relativamente baixa;</li> <li>• baixa exigência de manutenção;</li> <li>• sem efeito memória;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mais caras que as outras;</li> <li>• precisam ser utilizadas dentro de padrões rígidos de segurança, requer circuito de proteção;</li> <li>• tecnologia mais recente;</li> <li>• envelhecimento mesmo se não estiver em uso;</li> <li>• moderada corrente de descarga;</li> <li>• dependendo da quantidade, está sujeito aos regulamentos do transporte;</li> <li>• caro para manufaturar;</li> <li>• tecnologia não inteiramente madura.</li> </ul>

Lítio-Íon Polímero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• versão mais barata da Lítio-Íon;</li> <li>• similar à de Lítio-Íon em termos de densidade de energia;</li> <li>• geometria muito fina;</li> <li>• permite uma embalagem simplificada, com a utilização de eletrólitos em gel;</li> <li>• mais resistente à sobrecarga;</li> <li>• menos possibilidade de vazamento de eletrólito;</li> <li>• potencial para melhorias existente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• densidade de energia mais baixa que a Lítio-Íon;</li> <li>• contagem de ciclo diminuída comparada à bateria de Lítio-Íon;</li> <li>• caro para manufaturar, O circuito de controle reduzido implica em maiores custos de fabricação.</li> </ul>
--------------------	--	--

De acordo com as principais características dessas baterias, conclui-se que a tecnologia que atende melhor aos requisitos do projeto é a de chumbo-ácido tipo estacionária, pois possui um baixo custo, uma elevada vida útil, uma tecnologia bem dominada e é de fácil obtenção, já que se dispõe de fornecedores locais, diminuindo a distância, a duração e o custo do transporte.

### 3.7 Considerações finais

Nesta seção foram abordadas as tecnologias fotovoltaicas tratando os aspectos e processos de utilização da energia solar disponíveis, uma análise sobre a célula e painéis fotovoltaicos além de uma análise sobre acumuladores, destacando seus principais tipos e parâmetros, o que substanciou a escolha dos dispositivos utilizados no sistema montado.

## CAPÍTULO 4

### 4 Área de interesse para implantação do protótipo

#### 4.1 Descrição da área de interesse

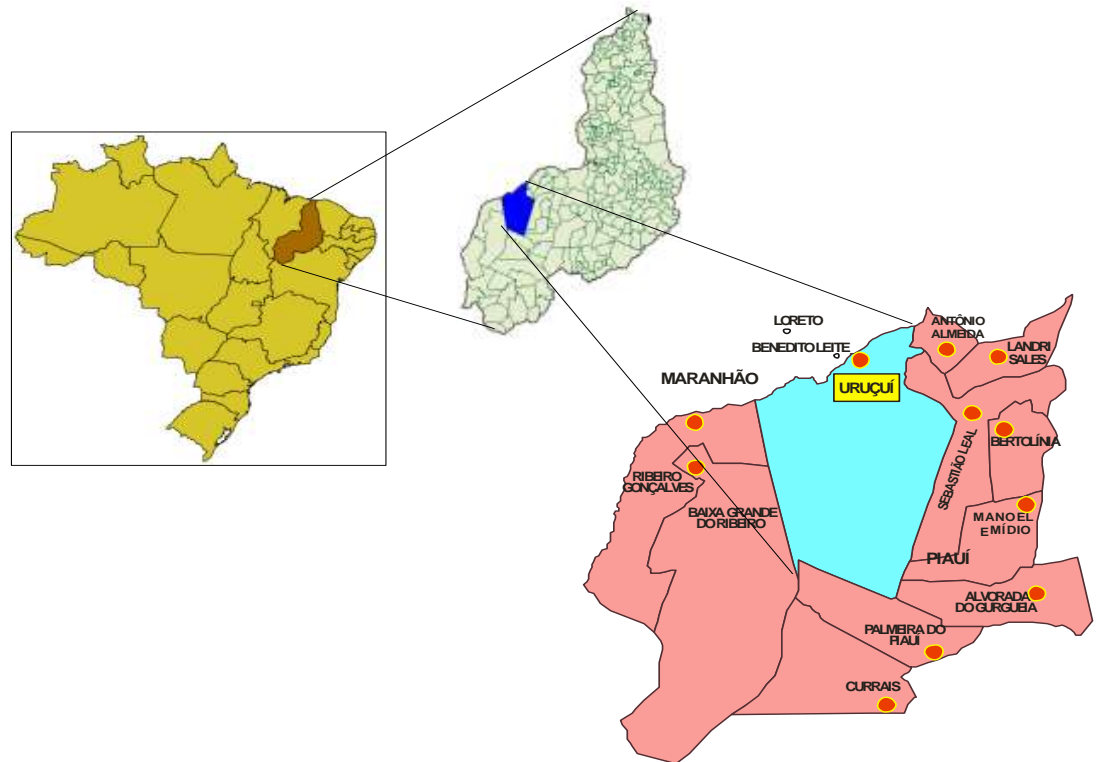
A área de interesse está localizada na região sudoeste do Estado do Piauí, pertencente à microrregião do Alto Parnaíba, correspondente ao município de Uruçuí. O município teve crescimento de 20,50% no período 1991-2000 em seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) passando de 0,517 em 1991 para 0,623 no ano de 2000. Este índice se apresenta bem abaixo quando comparado ao da capital Teresina, que é de 0,766, segundo o Atlas de Desenvolvimento Humano / PNUD-2000 [25].

Neste período, o hiato de desenvolvimento humano (a distância entre o IDH do município e o limite máximo do IDH, ou seja,  $(1 - \text{IDH})$ ) foi reduzido em 21,9%. Mantendo-se esta taxa de crescimento do IDH, o município levaria 18,1 anos para alcançar São Caetano do Sul (SP), o município com o melhor IDH do Brasil (0,919), e 9,6 anos para alcançar Teresina (PI), o município com o melhor IDH do Estado (0,766).

O município limita-se ao Norte com o Estado do Maranhão e o município de Antônio Almeida, ao Sul com os municípios de Palmeira do PI e Alvorada do Gurguéia, a Leste com os municípios de Sebastião Leal, Landri Sales e Manoel Emídio, a Oeste com os municípios de Ribeiro Gonçalves, Baixa Grande do Ribeiro e o Estado do Maranhão.

Uruçuí possui área territorial de 8.578,84 km<sup>2</sup>. Segundo o resultado oficial do Censo 2000 – IBGE a densidade demográfica do município é de 2,0 hab/km<sup>2</sup>, e foram contabilizados 17.011 habitantes. Possui clima Semiárido com temperatura média de 20°C a 31°C e vegetação predominante de Cerrado. A localização da sede municipal possui latitude de 07°13'46" sul e longitude de 44°33'22" oeste, com altitude de 167 m .





*Figura 27 - Área de interesse, Município de Uruçuí – PI  
Fonte: Criação própria*

## 4.2 Acesso por terra

Partindo-se da cidade de Teresina, o trecho em rodovia mais viável para se chegar até as comunidades visitadas deve ter como apoio a cidade de Uruçuí, vez que nas localidades não é oferecida qualquer condição de hospedagem.

Pelo mapa apresentado abaixo, pode-se verificar marcado em linha vermelha o trecho percorrido, sendo que até próximo à cidade de Jerumenha, a estrada é em pavimentação por asfalto e de boa qualidade, posteriormente, percorre-se aproximadamente 40 km em estrada carroçável também de boa qualidade para carros de médio porte.



*Figura 28 - Acesso à Área de interesse, Município de Uruçuí – PI*  
Fonte: Ministério dos Transportes – DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - 2002

No trecho compreendido entre a cidade de Uruçuí e as comunidades visitadas, têm-se aproximadamente 10 km em asfalto e 110 km em estrada carroçável de baixa qualidade, demandando tempo e obrigando um deslocamento em baixa velocidade.

A Figura 29 mostra uma visão do percurso entre a cidade de Uruçuí e a localidade Malícia.



*Figura 29 - Acesso à Área de interesse, Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI*  
Fonte: Imagem de Satélite – Google Earth

A Figura 30 e Figura 31 mostram a qualidade da estrada e dá uma idéia das dificuldades encontradas no percurso entre a cidade de Uruçuí e a localidade Malícia.





*Figura 30 - Estrada de acesso à Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI*



*Figura 31 - Estrada de acesso à Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI*

O difícil acesso e a relativa isolamento dessas comunidades, em especial no período das chuvas, tornar-se-ão fatores de dificuldades quando da necessidade de manutenção do sistema PV a ser instalado.

### 4.3 Características observadas no local

Trata-se de uma comunidade com pouca infraestrutura, distantes da rede elétrica convencional mais próxima em aproximadamente 40 km, onde se observa em algumas residências, a utilização de iluminação e outros eletrodomésticos, alimentados por grupos-geradores a diesel.



*Figura 32 - Grupo-gerador a diesel para bomba submersa da escola na Comunidade Malícia, Uruçuí – PI*



*Figura 33 - Grupo-gerador a diesel em residência na Comunidade Malícia, Uruçuí – PI*

Algumas residências possuem sistema encanado de água, alimentadas diretamente da caixa d'água suprida por sistema comunitário de bombeamento em poço profundo artesiano. O sistema é alimentado também por grupo-gerador a óleo diesel.

Observou-se que grande parte das casas da comunidade encontra-se próxima uma das outras, sendo esse fator interessante e passível de estudos mais aprofundados no caso de se desejar utilizar um sistema fotovoltaico, suprimindo uma pequena rede de distribuição.

Apesar do esforço de programas governamentais, é prática comum na região a utilização métodos agressivos à natureza na produção de alimentos, como é o caso das queimadas, em especial, nos períodos que antecedem o plantio.

Grande parte da comunidade utiliza-se do rádio como meio de informação, em sua maioria, as comunidades não fazem uso de meios de informação como a televisão, jornais ou revistas, contribuindo assim com a desinformação coletiva, em especial no tocante a programas governamentais e práticas agrícolas mais avançadas. Junte-se a esses, o fato de que aquelas comunidades não têm acesso a nenhuma assistência técnica, quer seja por meio da EMATER (Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Piauí) ou qualquer outro órgão governamental que trate desse assunto.

#### **4.4 Sistemas de abastecimento d'água local**

Observa-se que as deficiências energéticas influem diretamente na obtenção de água, visto que se relacionam com a extração e transporte da água do poço ao reservatório e daí ao ponto de utilização, que não abrange a totalidade das residências.

Apresenta-se como desvantagem o fato de que este sistema de abastecimento, além de utilizar combustíveis fósseis para a distribuição d'água, dependente muitas vezes de recursos financeiros dos moradores das localidades para aquisição de óleo diesel.



*Figura 34 - Sistema de captação d'água, Comunidade Malícia, Município de Uruçuí – PI*

Fica claro que o suprimento de água melhora enormemente as condições de higiene do próprio local de moradia, provoca redução no número de doenças associadas a seu uso, e tem como fator preponderante a diminuição da migração humana para regiões melhor assistidas, em especial, nos períodos de estiagem.

#### **4.5 Substituição de combustíveis fósseis por energia limpa**

Vislumbra-se evidente que a utilização de sistemas fotovoltaicos possa resultar na diminuição do uso de combustível fóssil, tornando-se importante contribuição com relação à preservação ambiental, indo de encontro à pressão da sociedade pela redução da queima desse tipo de combustível. Nesse contexto, a energia solar é a que apresenta os melhores atributos de uma energia limpa.

#### **4.6 Considerações finais**

A área de interesse onde foi implantado o sistema é apresentada no presente capítulo, sua descrição e localização, com a eleição e identificação da unidade escolar que recebeu o sistema, e o contexto onde se encontra inserida a comunidade Malícia.

Foram explanadas as características observadas no local, em especial no que diz respeito às condições de abastecimento d'água e à possibilidade de substituição de combustíveis fósseis por energia limpa.



## CAPÍTULO 5

### 5 Sistema PV instalado na Comunidade Malícia

#### 5.1 Configurações de Sistemas PV

Está-se tratando para a comunidade Malícia de um sistema autônomo, e este pode ser idealizado para atender tanto carga CC quanto carga CA, com ou sem armazenamento de energia. Para sistemas mais complexos, as cargas poderão ser um mix de cargas CC e CA.

#### 5.2 Sistema CC

O sistema utilizado para cargas CC sem armazenamento de energia é a mais simples das configurações, utilizado, em geral, para acionamento de cargas de pequeno porte, onde não haja necessidade de um funcionamento contínuo ou noturno. Esse tipo de configuração é bastante apropriado para utilizações onde seja possível o armazenamento de produtos processados durante o período de funcionamento, como armazenamento d'água, trituração de grãos, dentre outros. O diagrama de blocos Figura 35 possibilita uma visão mais detalhada para cargas CC.

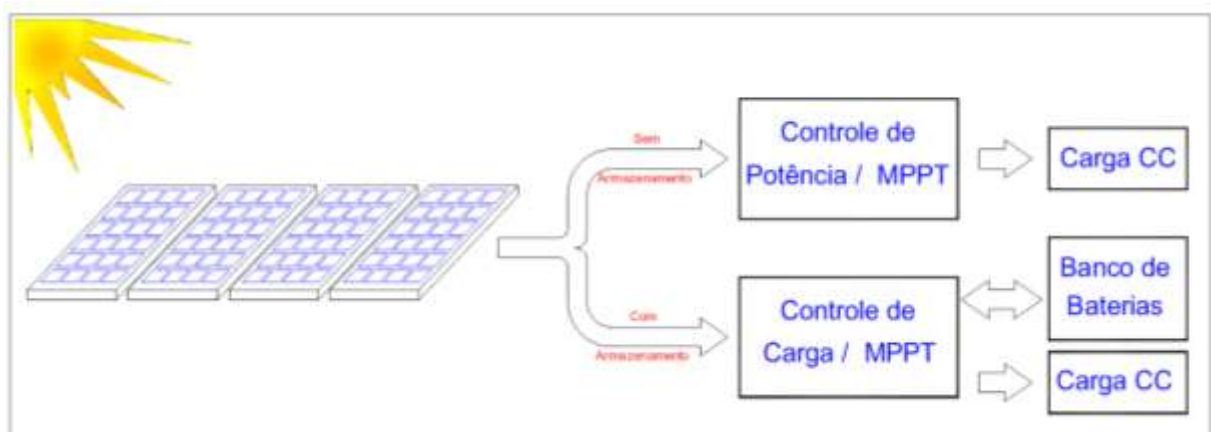


Figura 35 - Diagrama de blocos PV para cargas CC

Esta configuração depende enormemente das condições climáticas e níveis de radiação utilizáveis, o que pode comprometer sua eficiência visto que essas variáveis atuam

diretamente sobre a curva característica  $I \times V$  do sistema, deslocando constantemente o ponto de máxima potência.

Sistemas para cargas CC com armazenamento de energia são utilizados para contornar a falta de eficiência apresentada na configuração anterior, possibilitando o funcionamento do sistema no ponto de máxima potência. Essa configuração permite o fornecimento de energia às cargas, sem necessariamente a geração fotovoltaica; o excedente de energia é armazenado em baterias e pode ser utilizado a qualquer tempo para suprir, por exemplo, a iluminação, televisores, sistemas de som e de comunicação.

Nesse caso, o acumulador é crucial para o bom funcionamento do sistema e, para proteger as baterias contra sobrecargas indevidas ou descargas profundas e, procurando aumentar sua vida útil, é acoplado um controlador de carga.

### 5.3 Sistema CA

Da mesma forma que em sistemas para cargas CC sem armazenamento de energia, têm-se os sistemas CA sem armazenamento de energia, quando a carga a ser alimentada é composta por equipamentos CA, só que, nesses casos, é utilizado um inversor CC-CA entre a fonte CC (Painéis Fotovoltaicos) e a carga. Também, nesses casos, a eficiência do sistema é função das variáveis climáticas, e, ainda, do rendimento do inversor CC-CA. O diagrama de blocos da Figura 36 possibilita uma visão mais detalhada para cargas CA.

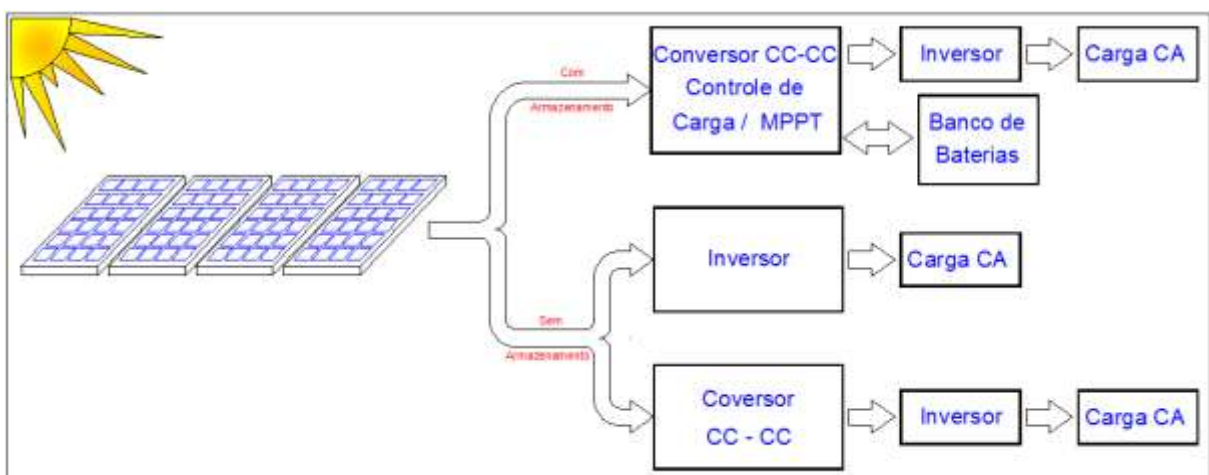


Figura 36 - Diagrama de blocos PV para cargas CA

O controle da tensão no barramento CC é conseguido com o acoplamento de um banco capacitivo e um conversor CC-CC que, funcionando através de um algoritmo que busque o ponto de máxima potência, possibilita ao máximo o aproveitamento da energia gerada pelos módulos PV.

No caso de sistemas com armazenamento de energia para cargas CA, são utilizadas baterias para o armazenamento do excedente de energia gerada, proporcionando maior liberdade no regime de utilização da carga. Essa configuração é bastante utilizada quando se deseja a utilização de eletrodomésticos convencionais.

#### **5.4 Sistema PV na comunidade**

Encontra-se na comunidade Malícia uma escola cuja edificação obedece a um determinado padrão, constando basicamente de duas salas de aulas e uma área separando-as, conforme pode ser observado na Figura 37.



*Figura 37 - Escola na comunidade Malícia – Uruçuí-PI*

Para a unidade escolar existente, foram definidos como necessidade básica os equipamentos e cargas abaixo relacionados.

*Tabela 7- Quadro de cargas*

<b>Quantidade</b>	<b>Localização</b>	<b>Descrição</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Demanda (h/dia)</b>	<b>Total (Wh/dia)</b>
04	Salas de aula	Lâmpadas PL de 23W	92	3	276
02	Corredor	Lâmpadas PL de 11W	22	3	66
04	Banheiros, depósito e cantina	Lâmpadas PL de 5W	20	3	60
01	Hall Central da Escola	Televisor	48	3	144
01		Parabólica	10	3	30
01		Rádio	10	3	60
01		DVD	20	3	60
<b>T O T A L</b>					<b>696</b>

O desenvolvimento de um sistema, nos moldes do aqui apresentado, deverá levar em consideração o atendimento à Resolução Normativa de nº. 83, de 20 de setembro de 2004 e à Resolução Autorizativa nº. 927, de 29 de maio de 2007 – ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), quanto aos critérios de autonomia no fornecimento de energia elétrica ANEEL, 2008) e ainda ter seus dispositivos (painéis solares, carregador de baterias, baterias estacionárias e conversor elevador), montados e acoplados, não se esquecendo evidentemente do suporte (pórtico e caixas), que possibilita a montagem e proteção do conjunto.

Como se pode observar na Tabela 7, o consumo diário da unidade consumidora não ultrapassa os 1000 Wh/dia, permitindo o enquadramento de seu atendimento pelo SIGFI 30 e para a instalação do sistema PV, foi elaborado o projeto executivo, cujas vistas de frente e lateral são apresentadas na Figura 38.

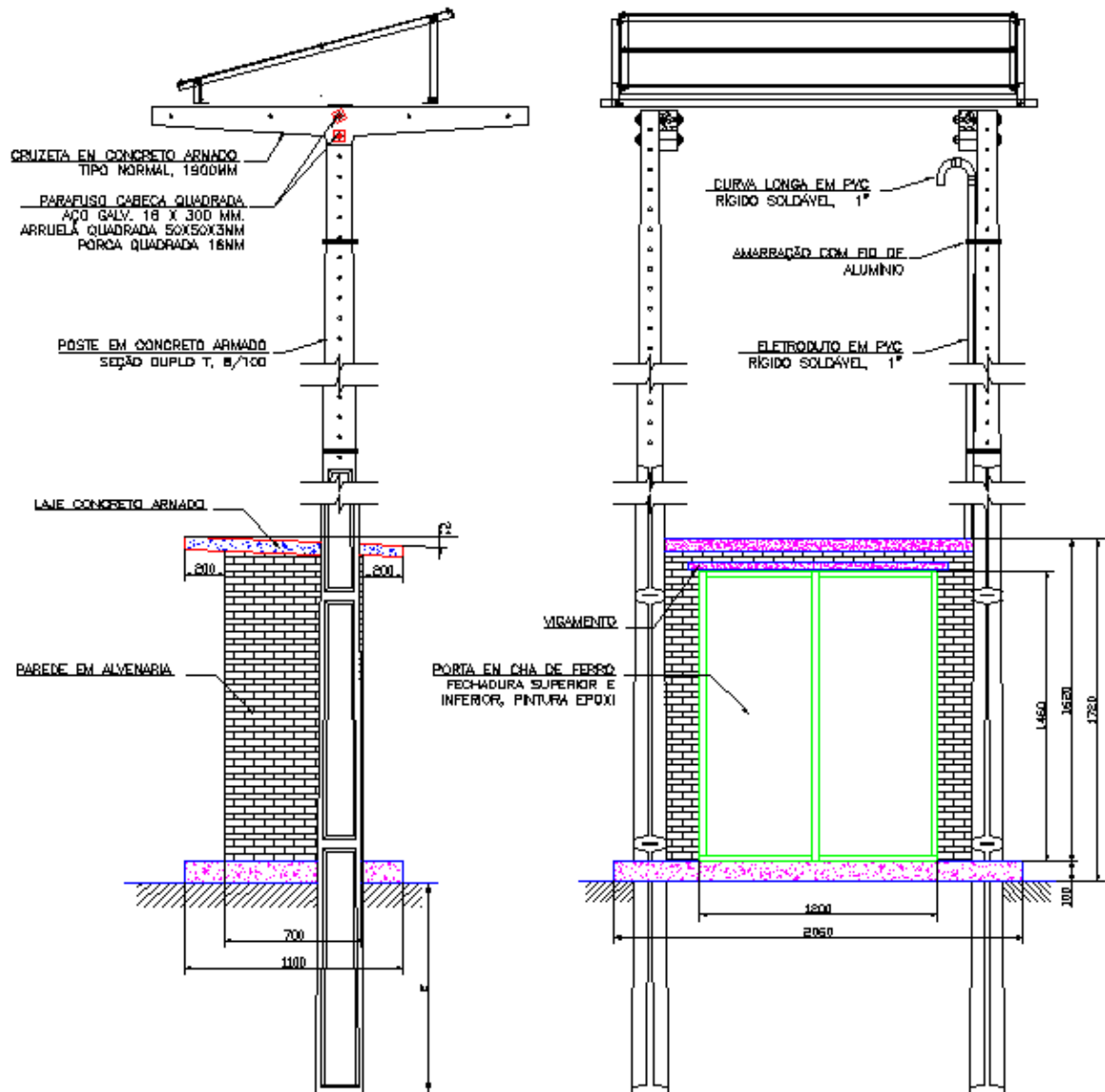


Figura 38 - Projeto de Montagem do Sistema na comunidade Malícia – Uruçuí-PI

Por motivo de segurança e no intuito de evitar a aproximação das crianças e de animais que pudessem causar algum dano aos equipamentos, foi projetada uma cerca de proteção com portão de acesso com chaves, cujas vistas são apresentadas na Figura 39.

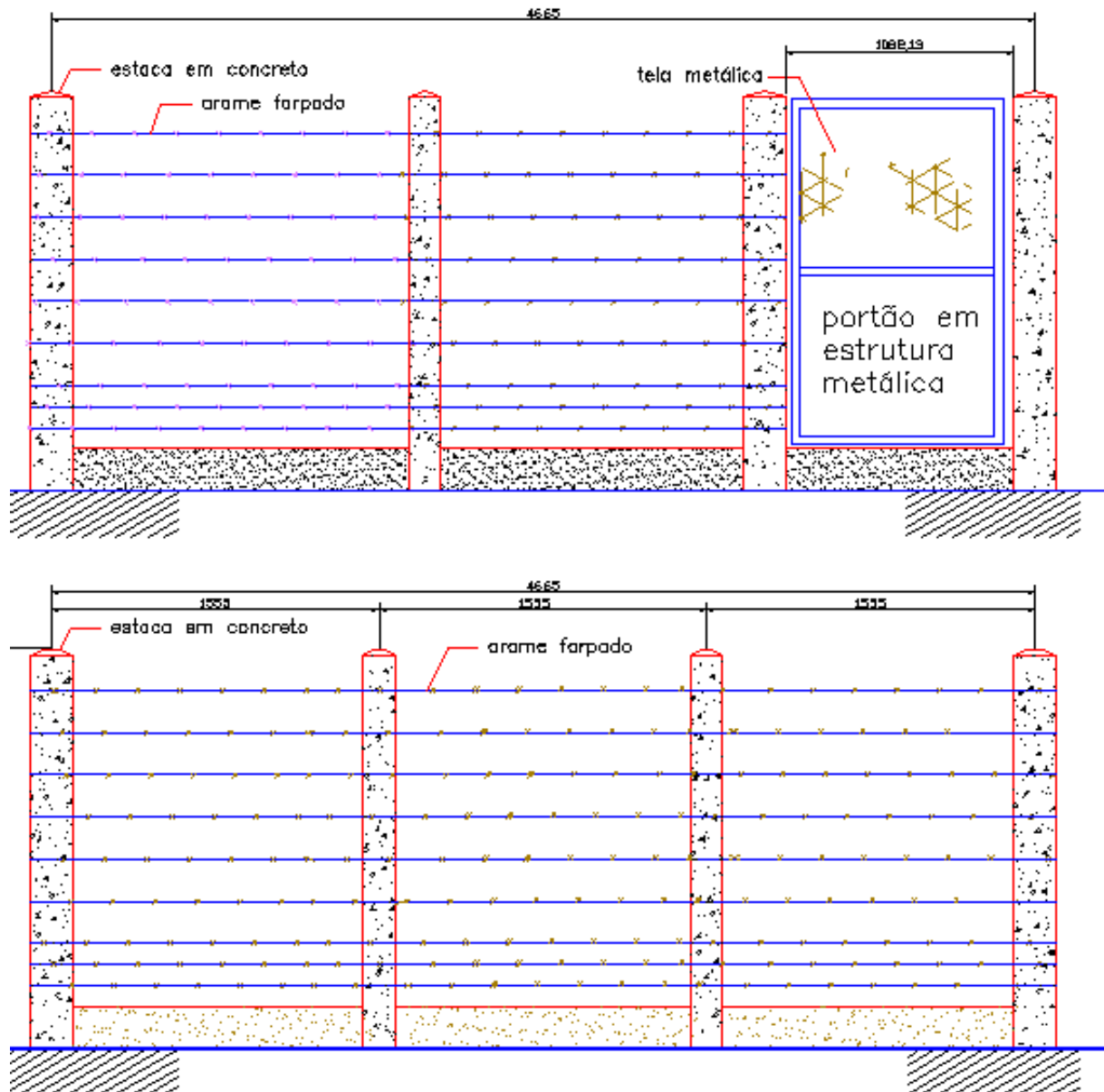


Figura 39 - Projeto Executivo da Cerca do Sistema na comunidade Malícia – Uruçuí-PI

## 5.5 O conversor fotovoltaico

Definida a potência a ser consumida pelo sistema, pode-se dar início a seu dimensionamento, definindo-se que o sistema deverá ter capacidade de 30 kWh/mês, ou seja, um consumo diário de ordem de 1000 Wh/dia.

Como a maior parte do sistema deverá operar três horas por dia, pode-se estabelecer que o consumo diário de referência do sistema para as três horas diárias é de aproximadamente 333,3 W/h.

Estabelecido o consumo diário de referência, deve-se levar em consideração a eficiência da bateria e do controlador de carga. Para o caso foi considerado  $\eta_{bat}=0,85$  para eficiência da bateria e  $\eta_{conv}=0,90$  considerando as perdas nos conversores [6].

O valor corrigido mostrado na equação (04) corresponde à energia que o sistema de acumulação deve fornecer diariamente, garantido assim os 1000 Wh/dia na saída do gerador fotovoltaico.

$$P_{Bat} = \frac{P_{out}}{\eta_{Bat} \times \eta_{conv}} \rightarrow P_{Bat} = 1307,18W \quad (4)$$

$P_{Bat}$  – Potência diária em Watt, corrigida.

$\eta_{bat}$  – Eficiência da bateria.

$\eta_{conv}$  – Eficiência do conversor

De posse do valor corrigido e sabendo-se que a quantidade de horas de sol pleno na localidade é de 4,78 h/dia, admite-se então um fator de segurança para se determinar a potência fornecida pelo sistema.

$$Pot_{(Wp)} = \frac{1,25 \times P_{Bat}}{4,78} = 341,84W \quad (5)$$

Neste caso, optou-se por utilizar painéis de 130 Wp. Concluí-se que será necessário um total de três painéis, perfazendo uma potência total de 390 Wp.

A Tabela 8 apresenta as especificações elétricas dos painéis utilizados, suas características foram coletadas no site do fabricante dos painéis solares, Kyocera [9].

Tabela 8 - Características elétricas do painel

ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS DOS PAINÉIS	
Parâmetro	Valor
Máxima Potência	130 W
Tolerância	+10% / -5%
Voltagem de Máxima Potência	17,6 V
Corrente de Máxima Potência	7,39 A
Voltagem de Circuito Aberto	21,9 V
Corrente de Curto-Circuito	8,02 A

Fonte: <http://www.kyocerasolar.com.br/site/arquivos/produtos/68.pdf>.  
Acesso em: 16/05/2010

## 5.6 O carregador de baterias

Foi utilizado o carregador de baterias cujo projeto, simulação, princípio de funcionamento, formas de onda e detalhes de comutação estão expostos por (SILVA 2010), cujas características específicas de controle digital permitem monitorar a tensão na bateria e controlar a corrente de carga, e ainda buscar o ponto de máxima potência do painel (MPP - Maximum Power Point).

Tendo em vista a topologia apresentada para esse dispositivo, tem-se uma redução da ondulação na corrente de entrada do conversor, bem como uma redução significativa na amplitude de descarga do capacitor, com conseqüente redução da ondulação da tensão de saída.

## 5.7 O conversor cc/cc de alto ganho

Também apresentado por [6], o conversor utilizado tem a função de elevar a tensão de 24 Vcc fornecida ao barramento pelo banco de baterias, para a tensão de 311 Vcc que serão conectadas à carga ligada ao sistema.



A topologia utilizada é a do conversor boost de alto ganho com indutor acoplado, e potência de 300 Wp, cujas características estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Especificações do conversor elevador

ESPECIFICAÇÕES DO CONVERSOR ELEVADOR	
Parâmetro	Valor
$V_{CEIN}$ – Tensão de entrada	24 V
$V_{CEOUT}$ – Tensão de saída	311 V
$P_{CEOUT}$ – Potência de Saída	300 W
$\eta_{CE}$ – Rendimento do conversor	95%
$I_{CEIN}$ – Corrente de entrada	13,16 A
$\Delta V_{CEOUT}$ – Ondulação de tensão no capacitor de saída	0,5% de $V_{CEOUT}$
$\Delta I_{INCE}$ – Ondulação de corrente na entrada	20% de $I_{CEIN}$
$f_{CE}$ – Frequência de comutação	30 kHz
$\Delta V_{CEIN}$ – Ondulação de tensão na entrada	0,2% de $V_{CEIN}$
$D_{CE}$ – Razão Cíclica	45%

Fonte: SILVA, F. S. F. E Sistema fotovoltaico para iluminação e Alimentação de Pequenos Equipamentos em Corrente Contínua. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFC, Fortaleza, 2010.

## 5.8 Elemento armazenador

As principais especificações necessárias ao dimensionamento das baterias são a capacidade individual de carga (em Ah), tensão nominal por elemento e a relação entre limite máximo de descarga profunda e total de ciclos para vida útil. Este último item merece destaque, pois irá afetar a quantidade de baterias no banco e também sua vida útil.

O sistema foi dimensionado para 3 dias de autonomia e uma máxima profundidade máxima de descarga de 60% de acordo com a equação (03).

$$C_{Bat} = \frac{P_{Bat} \cdot d}{D_c} \rightarrow C_{Bat} = 6535,947W \cdot h \quad (6)$$

$C_{Bat}$  – Capacidade total das baterias (Wh).

$d$  – Dias de autonomia ( 3 ).

$D_c$  – Máxima profundidade de descarga (60%).

Dado o valor da capacidade de acumulação do sistema, divide-se pela tensão do banco de baterias para se encontrar a capacidade do sistema em (Ah)

$$C_{B(Ah)} = \frac{C_{Bat}}{V_{Barra}} = 272,33Ah \quad (7)$$

$V_{Barra}$  – Tensão CC de barra do banco de baterias (V).

Conclui-se que para esse valor, será necessário usar duas baterias de 150 Ah em paralelo. Como a tensão do barramento CC foi estabelecida em 24V, precisa-se de duas baterias associadas em série de 12V em cada ramo paralelo. Portanto, ter-se-á um total de 4 (quatro) baterias de 150 Ah, conforme mostrado na Figura 40.



*Figura 40 - Banco de Baterias do Sistema na comunidade Malícia – Uruçuí-PI*

## 5.9 O sistema proposto

Pode-se então definir agora a configuração do sistema que deverá ser constituído por um gerador fotovoltaico de 390 Wp (3 painéis de 130Wp), um carregador de baterias de

390W, um conversor elevador de alto ganho de 600 W e um banco de baterias de 600Ah (4 baterias de 150Ah). O diagrama apresentado na Figura 41 proporciona uma visão da configuração do sistema.

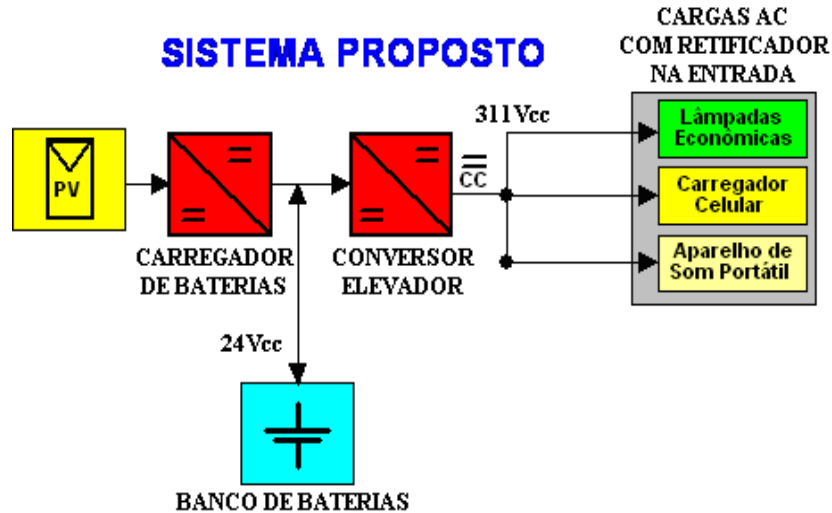


Figura 41 - Diagrama de blocos do sistema proposto  
Fonte: [6]

Na Tabela 10, encontra-se sintetizada a relação dos componentes do sistema projetado.

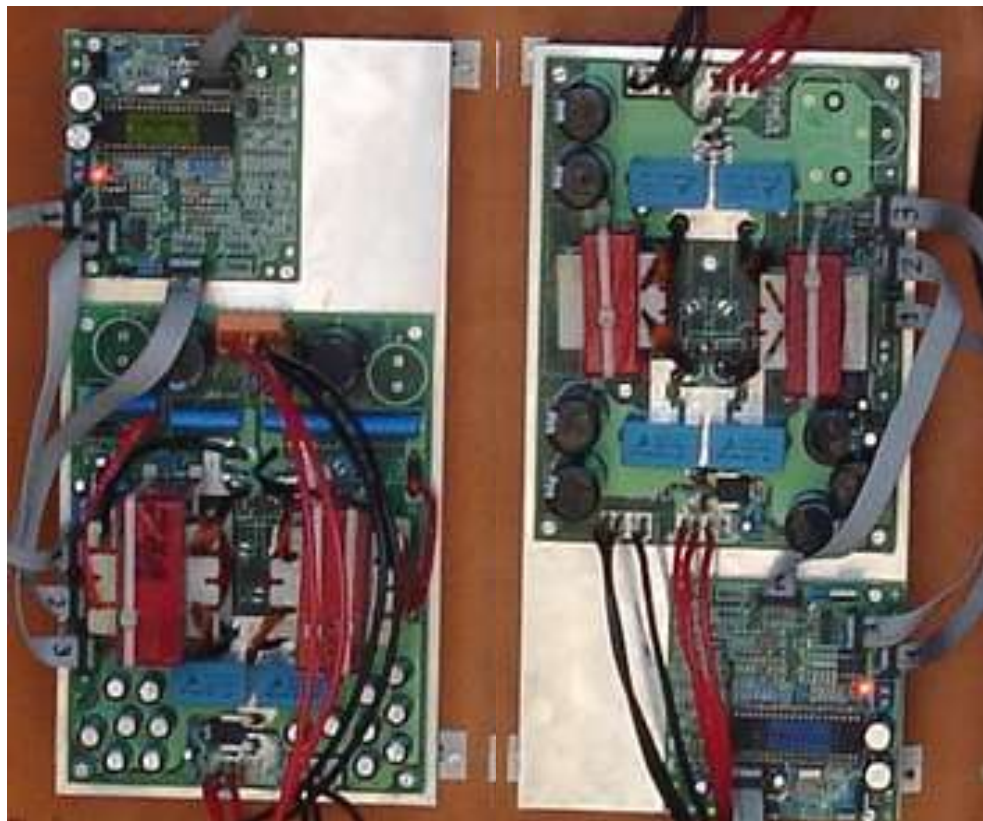
Tabela 10 - Componentes ativos do projeto

Quantidade	Componente	Descrição
03	Painel KC 130T	130 Wp
04	Bateria de chumbo ácido	12 V / 150 Ah
01	Carregador de baterias	390 W
01	Conversor elevador	600 W

Na Figura 42, é apresentada a fotografia do painel montado com o Conversor; a Figura 43 apresenta em detalhes a placa montada do Carregador de Baterias e do Conversor Elevador CC/CC.



*Figura 42 - Fotografia do Carregador de Baterias (direita) e Conversor Elevador (esquerda) montados na comunidade Malícia*



*Figura 43 - Conversor Elevador CC/CC (esquerda) e Carregador de Baterias (direita), em detalhes*

## 5.10 Resultados Experimentais

Para possibilitar a coleta e armazenamento das principais grandezas elétricas do sistema, foram instaladas memórias ao circuito do carregador de baterias e do conversor elevador, cujos resultados são apresentados a seguir. Foi coletada uma amostra das informações como representativa do todo e agrupadas de forma a permitir determinar a tensão no painel solar, tensão e corrente no carregador de baterias, tensão no conversor elevador, potência fornecida pelas baterias e potência total do sistema fornecida à carga.

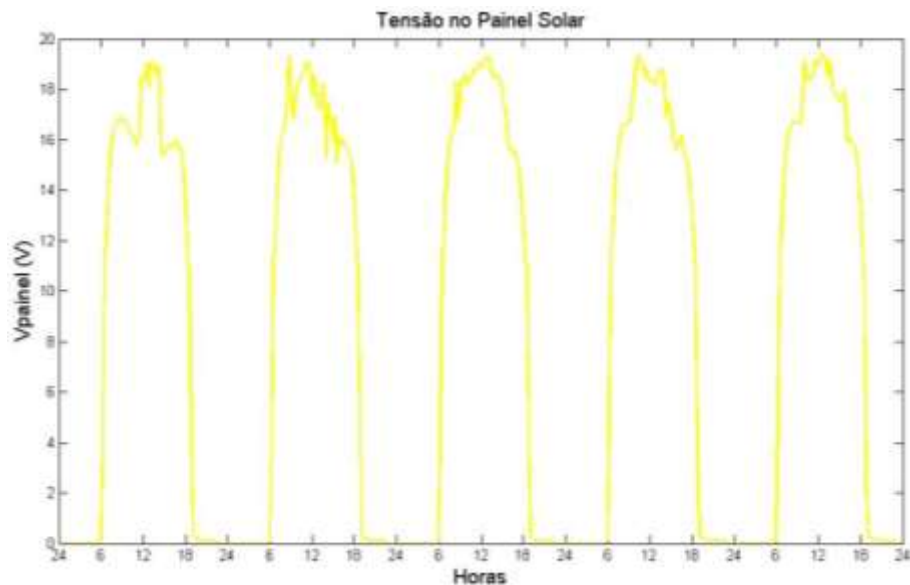


Figura 44 - Tensão no painel solar

No período de incidência solar, ou seja, das 6 às 18h, observa-se uma certa simetria no gráfico, com a tensão no painel solar variando entre 15V e 19V. Nesses intervalos, as oscilações de tensão ocorrem em função do nível de encobrimento ou não por nuvens das placas solares.

Como se pode observar, a tensão gerada pelo painel solar tem seu valor máximo aproximando-se ao valor da tensão máxima em vazio, conforme Tabela 8, caracterizando que o sistema funciona em grande parte do dia, com sua carga desligada.

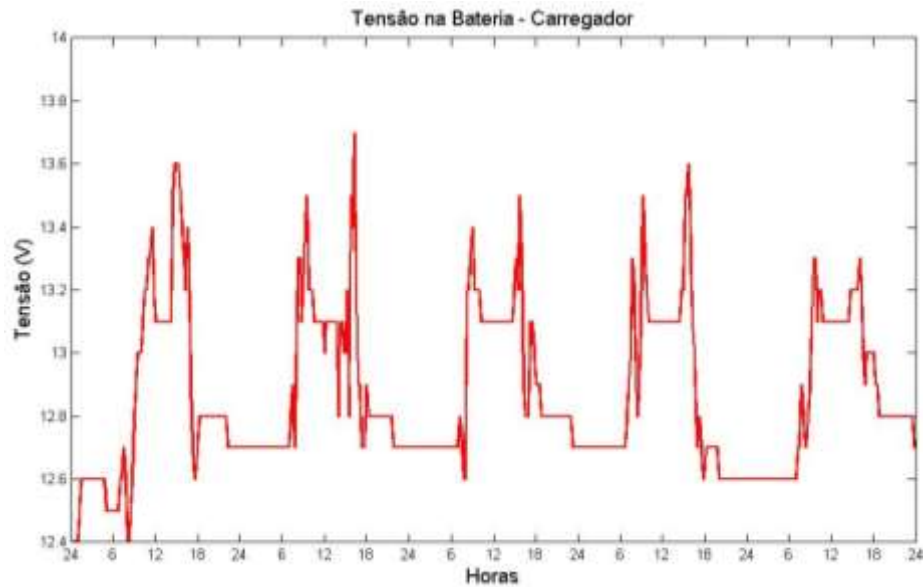


Figura 45 - Tensão na bateria – carregador

Observa-se na Figura 45 que no processo de carga das baterias durante o dia, e descarga durante a noite, o controlador de carga funcionou satisfatoriamente, protegendo o banco de baterias de descargas excessivas ou sobretensões.

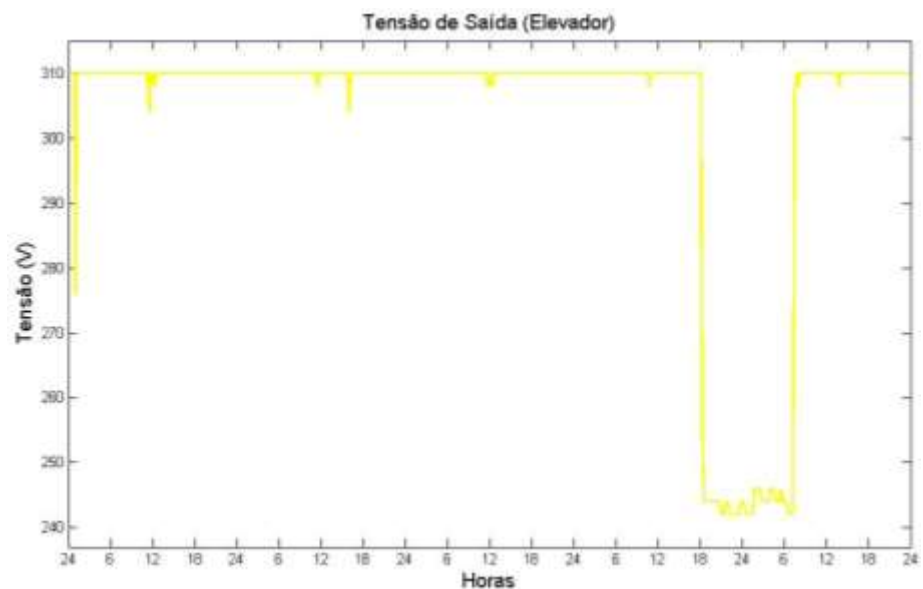


Figura 46 - Tensão de saída (elevador)

A Figura 46 apresenta a tensão de saída do conversor CC-CC elevador, com valor de 310 Vdc, confirmando o funcionamento desse dispositivo e possibilitando a conexão da carga ao sistema.



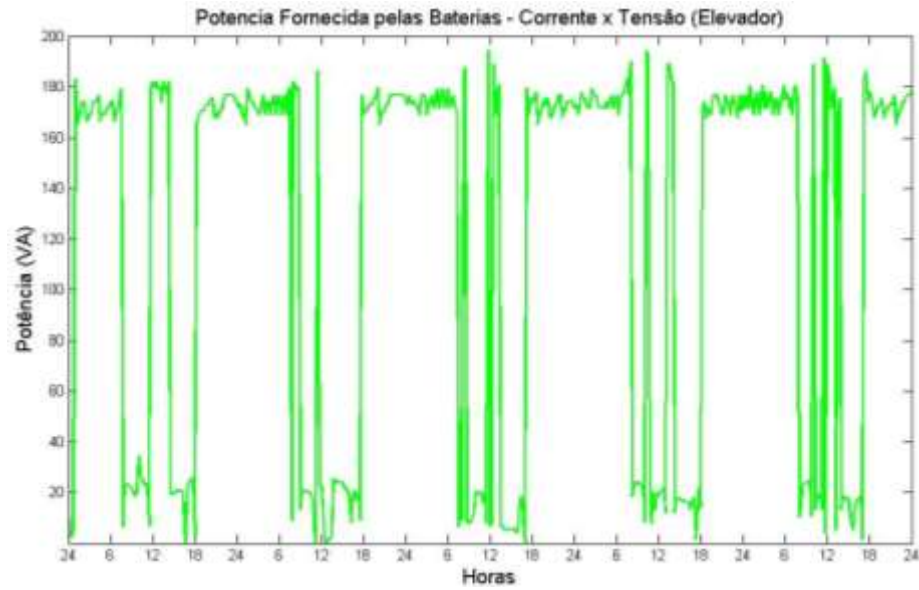


Figura 47 - Potência fornecida pelas baterias – Corrente X Tensão (Elevador)

A potência fornecida pelo sistema é função do funcionamento e do período do dia ou da noite em que a carga é ligada. Para o caso, registramos a potência de pico de 195 VA.

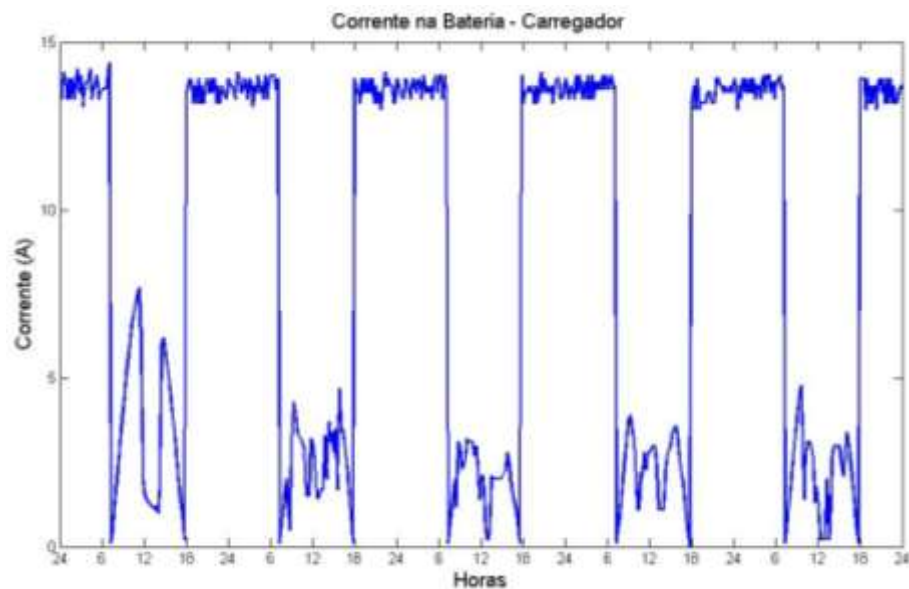


Figura 48 - Corrente na Bateria – Carregador

No patamar superior do gráfico apresentado na Figura 48, mostra-se a corrente no banco de baterias, correspondente ao período noturno e no patamar inferior, a corrente no período em que há incidência solar.

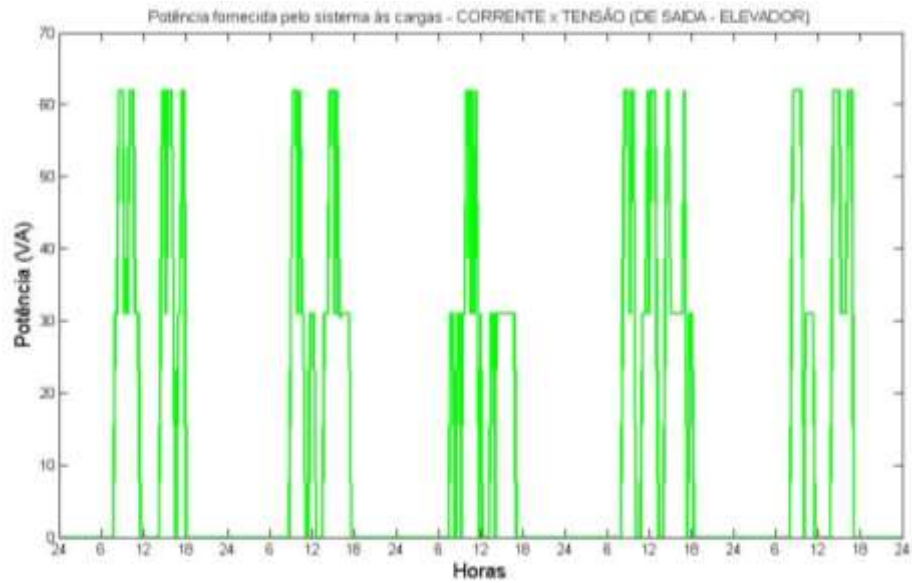


Figura 49 - Potência fornecida pelo sistema às cargas  
CORRENTE x TENSÃO DE SAÍDA

De posse dessas informações foi elaborado um gráfico comparativo envolvendo as correntes e tensões do sistema completo, referindo-se ao mesmo período de tempo.

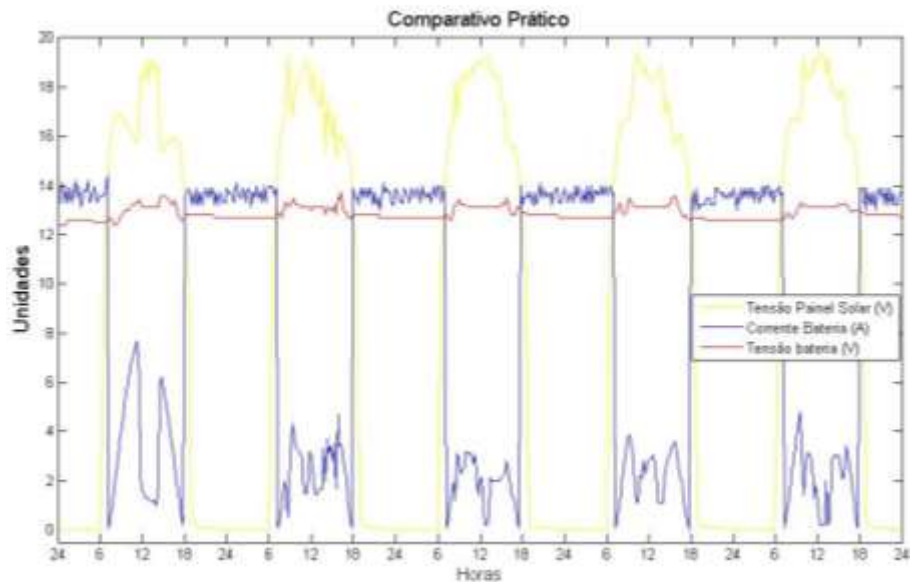


Figura 50 - Comparativo prático



O sistema montado é apresentado por fotos do local da instalação. Conforme projetado, foi construída a estrutura que recebeu a montagem do sistema, apresentada na Figura 50, na localidade Malícia – Uruaú / PI.



*Figura 51 - Estrutura com painéis montados – Localidade Malícia*



*Figura 52 - Cubículo com baterias, carregador de baterias e conversor elevador – Localidade Malícia*

A réplica do sistema instalado nas dependências da UFC é apresentada na Fig. 50, observando-se que, como o terreno escolhido não apresenta desníveis consideráveis, a estrutura foi montada com postes de concreto de 6(seis) metros, diferentemente dos de 8(oito) metros de altura utilizados na localidade Malícia.



*Figura 53 - Estrutura com painéis montados – Universidade Federal do Ceará*

### **5.11 Considerações finais**

Foram apresentadas as configurações de sistemas fotovoltaicos e uma explicação sobre os elementos conversores PV, o carregador de baterias, o conversor CC/CC de alto ganho e ainda o elemento armazenador constituído pelo banco de baterias, o que possibilitou contextualizar a configuração para a área de interesse.

## CAPÍTULO 6

### 6 Conclusão

O presente trabalho abordou a implementação de um sistema fotovoltaico para alimentação de cargas em corrente contínua, em comunidades isoladas do sistema elétrico convencional.

Foram montados dois sistemas idênticos, sendo um na localidade Malícia, no município de Uruçuí, ao sul do Estado do Piauí, e outro nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica - Campus da Universidade Federal do Ceará.

O protótipo instalado no Campus da Universidade funciona há aproximadamente dois anos, sem apresentar problemas de ordem técnica, constituindo-se em um sistema satisfatório até o presente momento. Já o protótipo instalado na localidade Malícia, apresentou problemas relacionados ao mau uso, fruto da falta de conscientização, orientação e treinamento da comunidade que utiliza o sistema, que inadvertidamente, permitiu a instalação de uma carga elevada, levando o sistema à sobrecarga, fazendo com que operasse os dispositivos de proteção.

Os equipamentos instalados atenderam plenamente as condições a que foram submetidos, quando comparados a sistemas PV em corrente alternada, o fato de não se utilizar um inversor e de se ter maior eficiência para o conversor CC-CC garantiram melhor rendimento ao sistema.

A configuração do sistema operando em corrente contínua e com conversor elevador CC-CC de alto ganho para alimentação das cargas mostrou-se como a mais adequada, não se esquecendo de se levar em consideração as necessidades do projeto e de atendimento às regulamentações da ANEEL.

Foi também apresentado um completo dimensionamento do sistema proposto, chegando-se a uma configuração ótima deste, composto por três painéis fotovoltaicos (KC130 T – 130 Wp), um carregador de baterias de 390 W, um banco de baterias composto por quatro unidades de 12 V / 150 A e um conversor elevador de 600 W.

Para a instalação do sistema em campo foi realizado um estudo da estrutura a ser utilizada. Optou-se por postes de concreto, devido à facilidade de aquisição na região, evitando-se, com isso, a utilização de pórticos de madeira. Os painéis fotovoltaicos foram montados em uma base feita em cantoneira de alumínio, colocadas no topo dos postes mencionados.

Aproveitou-se a montagem dos postes para a construção de um compartimento fechado, munido de aberturas para a ventilação, para receber e proteger os conversores e as baterias.

Os conversores foram afixados em uma única chapa metálica e guardados dentro de um armário metálico com chave. A chave foi utilizada para dar mais segurança ao sistema e ao pessoal que o utiliza.

O sistema encontra-se instalado na escola no município de Uruçuí-PI desde outubro de 2009.

Na definição do banco de baterias do tipo chumbo-ácido estacionária, levaram-se em consideração os problemas relacionados com a sulfatação, que acontece com baterias automotivas sem a agitação do eletrólito e, ainda, com a finalidade de aumentar sua vida útil, as baterias são providas de válvula com permeabilidade seletiva e ser própria para sistemas fotovoltaicos.

O dimensionamento do banco de baterias levou em consideração que o sistema PV deverá garantir um funcionamento de 3 dias de autonomia, até 3 horas por dia e uma vida útil de 5 anos, chegando-se a quatro baterias estacionárias de 150 Ah.

Foram ainda apresentadas as informações necessárias para se determinar os painéis fotovoltaicos a serem utilizados. Considerando que o painel fotovoltaico deve trabalhar no seu ponto de máxima potência, sua especificação levou em consideração a temperatura e a quantidade de radiação solar a que este está submetido, visto que essas variáveis influenciam diretamente em seu rendimento.

Identificou-se ao longo deste trabalho, a necessidade da promoção antecipada do envolvimento dos interessados na viabilização deste tipo de instalação, não se esquecendo de considerar as diferentes motivações de cada ator no processo.

A concessionária, corporações e governos locais, organizações não-governamentais, universidades, agências reguladoras, entre outros, devem ser chamados a participarem do processo, em conjunto com as comunidades isoladas, vez que a participação ativa do usuário, sua capacitação e compreensão nas práticas de manutenções da tecnologia, são primordiais à sustentabilidade dos projetos de implantação deste tipo de sistema.

Outro ponto a ser considerado é a possibilidade de se dimensionar estruturas mais leves e adaptação deste sistema na forma de módulos, facilitando assim sua aquisição por parte da concessionária, o transporte, a desmontagem e montagem em outros locais, à medida que a comunidade venha a ser alimentada pela rede elétrica convencional.

## 7 Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL. Resolução ANEEL N° 83. Diário Oficial de 24 de Setembro, 2004;
- [2] ANEEL. Resolução ANEEL N° 927. Diário Oficial de 29 de Maio, 2007;
- [3] ALENCAR, A. F.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; XIMENES, S; CRUZ, C.; JÚNIOR, E. M.; SILVA, F. S. F. Off-Grid PV System to Supply a Rural School on DC Network. 10° International Conference on Renewable Energies and Power Quality - (ICREPQ'10), Granada, Espanha, março de 2010;
- [4] BORGES, E.; KLAUS, W.; MONTEIRO, C.; SCHWAB, T. Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares – Teste em Campo de um Modelo Sustentável de Eletrificação Rural. II Congresso Brasileiro de Eficiência energética, Vitoria-ES, setembro de 2007;
- [5] SILVA, F. S. F.; ALENCAR, A. F.; SOUSA, S. K.; XIMENES, S.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; CRUZ, C.; JÚNIOR, E. M.; ENDROLATH, L.; FILHO, J. S. PV System to Supply Lighting and Small Electronic Equipments of an off-Grid Rural School. RIO 9 - World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro-RJ, março de 2009;
- [6] SILVA, F. S. F. E Sistema fotovoltaico para iluminação e Alimentação de Pequenos Equipamentos em Corrente Contínua. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFC, Fortaleza, 2010;
- [7] ED PIAUÍ - Planejamento de Curto Prazo - 2009-2013 - Sumário Executivo 2011;
- [8] FEDRIZZI, M. C – Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico, São Paulo: Escola Politécnica - USP, Dissertação de Mestrado, 1997;
- [9] Módulo Policristalino de Alta Eficiência - KD135SX-UPU. Datasheet kyocerasolar
- [10] [http://universalizacao.aneel.gov.br/uni\\_projecao\\_brasil\\_universal.asp](http://universalizacao.aneel.gov.br/uni_projecao_brasil_universal.asp);
- [11] [http://missionscience.nasa.gov/ems/01\\_intro.html](http://missionscience.nasa.gov/ems/01_intro.html)  
Uma introdução ao espectro eletromagnético, que inclui informação, abrangendo cada categoria de onda. Incluídas imagens atualizadas NASA e aplicações;

- [12] INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais); LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar - Universidade Federal de Santa Catarina) – Brasil, Solar: annual and seasonal average direct normal (DNI) GIS data (contours) for Brazil from INPE and LABSOLAR, 11 de agosto de 2005.
- [13] Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e Ricardo Ruther. – São José dos Campos : INPE, 2006;
- [14] Harrison E. F., Minnis P., Barkstrom B. R., Gibson G. G.. Radiation Budget at the Top of the Atmosphere. Atlas of Satellite Observations Related to Global Change 1995;
- [15] Brasil. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética; Balanço Energético Nacional 2007: Ano base 2006. Relatório final / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética.– Rio de Janeiro : EPE, 2007;
- [16] Brasil. Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2008 (Preliminar);
- [17] IEEE-1013: IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Photovoltaic (PV) Systems. Março, 2000;
- [18] Catálogo Técnico - Mora Clean – Famílias MF e MC. Ref.: MC012001, Moura;
- [19] E.L.P. Borges, C.M. Carvalho, M.M.A. Olivieri, “Projeto Piloto de Xapuri” Relatório Final. Eletrobrás 2008, Vol. 1, PP. 44-47;
- [20] DOU. Decreto n°. 4.873. Brasília: Diário Oficial da União de 11 de novembro de 2003;
- [21] DOU. Decreto n°. 6.442. Brasília: Diário Oficial da União de 25 de abril de 2008;
- [22] Junior E. M. S.; “Sistema Fotovoltaico para Iluminação Pública em Horário de Ponta”; Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFC, Fortaleza – Ceará, Novembro de 2004;
- [23] EPIA - European Photovoltaic Industry Association - Global Market Outlook for Photovoltaics until 2012;
- [24] PHOTON INTERNATIONAL - <http://www.photon-magazine.com/index.htm>;
- [25] Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, BRASÍLIA, 2001;
- [26] Eletrobrás Distribuição Piauí - Plano Decenal 2010 – 11.01.2011;
- [27] AMARANTE O. A. C. - Camargo Schubert Engenharia Eólica; ZACK M. B. J. - TrueWind Solutions; SÁ A. L. - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/CEPEL - ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.