

## **PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO**

# **ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ELETRIFICAÇÃO DESCENTRALIZADOS**

**Pedro Henrique Milhomem Coutinho**

**Brasília, 17 de dezembro de 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

## PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

# ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ELETRIFICAÇÃO DESCENTRALIZADOS

**Pedro Henrique Milhomem Coutinho**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista

### **Banca Examinadora**

Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo, Dr. UnB/  
Departamento de Engenharia Elétrica (Orientador)

---

Prof. Anésio de Leles, Dr. UnB/ Departamento de  
Engenharia Mecânica

---

Prof. Rafael Amaral Shayani, Msc. Faculdade Latino  
Americana

---

### **Dedicatória**

*Dedico esse trabalho aos meus pais, que são minha fonte de inspiração e minha razão para lutar sempre com alegria. Dedico também às pessoas que conquistei durante o curso, sem as quais essa conquista não seria possível.*

*Pedro Henrique Milhomem Coutinho*

## **Agradecimentos**

*Agradeço a Deus, por estar me dando condições de me superar sempre.*

*Agradeço aos Professores Ivan Camargo de Toledo e Rafael Shayani, que não só me indicaram o caminho, mas me apoiaram durante todo o trabalho.*

*Agradeço aos funcionários da UnB, em especial aos funcionários do SG11, que estavam sempre dispostos a ajudar e que também são responsáveis pela superação desse desafio.*

*Agradeço a meus pais, pelo amor e carinho que sentem por mim e que são a razão e o propósito da minha luta.*

*Agradeço aos meus irmãos, primos, em especial à Natália e Camila, amigos e a Sara, que me apoiaram sempre e proporcionaram momentos que não vou esquecer.*

*Pedro Henrique Milhomem Coutinho*

# RESUMO

O Setor Elétrico Brasileiro vive um momento ambíguo. Por um lado observam-se esforços para a universalização do atendimento de energia elétrica e por outro nos deparamos com os riscos de desabastecimento e com as dificuldades encontradas na expansão da geração e na diversificação da matriz energética do país.

A eletrificação descentralizada mostra-se como uma solução para ambos os problemas. No Brasil, mais de 10 milhões de pessoas na zona rural vivem à margem do desenvolvimento proporcionado pelo acesso à energia. Os limites da expansão da rede elétrica já começam a aparecer, principalmente pelas características territoriais e demográficas do meio rural. A eletrificação rural descentralizada apresenta alternativas que possibilitam encarar o desafio do desenvolvimento, com vantagens nos aspectos da tecnologia, ecologia, economia e bem-estar-social.

Tendo em vista o contexto do setor elétrico brasileiro e os desafios do atendimento de cargas isoladas, o presente estudo tem como objetivo geral o levantamento das possibilidades de geração para o atendimento de sistemas isolados, analisando principalmente os aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais de algumas alternativas. Como objetivo específico, é abordada a geração de energia através da turbina hidrocínética, utilizando como referencial os projetos desenvolvidos pelo Laboratório de Energia e Ambiente, resultado de uma década de pesquisa do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília - UnB.

A turbina hidrocínética é uma alternativa para comunidades isoladas situadas a margem de rios, possibilitando o suprimento de necessidades elétricas básicas. O projeto desenvolvido por pesquisadores da Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, por exemplo, poderá fornecer até 3 kW de potência. Nesse contexto, o presente estudo apresenta uma análise mais detalhada dos tipos de geração e o comportamento elétrico das cargas em diferentes situações. A parte prática procurou simular basicamente duas situações: a geração de energia através da turbina hidrocínética com arranjo que utiliza inversores, com possibilidade de atendimento por diferentes formas de onda (senoidal, quadrada modificada e quadrada), e um esquema que apresenta variação da frequência, simulando a situação existente em sistemas de geração que não possuem esse tipo de regulação.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Estrutura do Trabalho	2
<b>Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica - Tipos de Geração de Energia para comunidades Isoladas</b>	3
2.1 Energia Solar	3
2.1.1 Definições	3
2.1.2 Energia Solar em Sistemas Isolados	6
2.1.3 Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais	7
2.2 Energia Eólica	11
2.2.1 Definições	11
2.2.2 Energia Eólica em Sistemas Isolados	14
2.2.3 Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais	15
2.3 Biomassa	19
2.3.1 Definições	19
2.3.2 Biomassa em Sistemas Isolados	22
2.3.3 Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais	23
2.4 Energia Hidrelétrica	26
2.4.1 Definições	26
2.4.2 Energia Hidráulica em Sistemas Isolados	28
2.4.3 Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais – Turbina Hidrocinética	29
<b>Capítulo 3 – Opções para Conversão da energia mecânica em elétrica</b>	34
3.1 Alternativas	34
3.1.1 Gerador CC com Inversor e utilização de Cargas AC	35
3.1.2 Gerador CC e utilização de Cargas CC	39
3.1.3 Gerador Assíncrono	40
3.1.4 Gerador com Ímã Permanente	41
3.1.5 Gerador de Relutância Variável	42
3.2 Materiais e Métodos	43
3.2.1 Materiais: Laboratórios de Qualidade de Energia e Fontes Alternativas de Energia da UnB	43
3.2.2 Métodos	49
<b>Capítulo 4 – Resultados Experimentais e Discussão</b>	51
4.1 Simulação do Arranjo Gerador CC com Inversor e utilização de Cargas AC	51
4.2 Simulação do Arranjo Gerador Assíncrono – Efeitos da Variação da Frequência nas Cargas	61
<b>Capítulo 5 – Conclusão</b>	68
<b>Referências Bibliográficas</b>	71

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de um sistema fotovoltaico residencial. ....	6
Figura 2.2 - Ilustração de um sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica. ....	8
Figura 2.3 - Esquema dos tipos padrão de sistemas fotovoltaicos com cargas alimentadas por inversor e diretamente da bateria. ....	9
Figura 2.4 - Mapa de Ventos do Brasil ao longo do ano e legenda. ....	13
Figura 2.5 - Diagrama de blocos do sistema híbrido fotovoltaico – eólico – diesel da comunidade de Tamaruteua. ....	16
Figura 2.6 - Fotos do Sistema Eólico implantado em Marapanim – PA. ....	17
Figura 2.7 - Evolução do consumo de biomassa no Brasil. ....	20
Figura 2.8 - Composição setorial do consumo final energético de biomassa. ....	20
Figura 2.9 - Produção de Energia Primária no Brasil em 2006. ....	21
Figura 2.10 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa. ...	23
Figura 2.11 - Fogão Gera Luz. ....	24
Figura 2.12 - Gaseificador desenvolvido pela UnB, que transforma resíduos vegetais em energia elétrica, será utilizado em comunidade na Bahia pelo programa Luz para Todos do Ministério de Minas e Energia ( <i>foto: Cláudio Reis/UnB Agência</i> ). ....	25
Figura 2.13 - Fontes de Geração de Energia Elétrica no Brasil, 21/11/2007. ....	27
Figura 2.14 - Turbina Hidrocinética desenvolvida pelo LEA-UnB, Geração 1: Instalação Julho 1995 em Correntina-Bahia (1,5 kW). ....	30
Figura 2.15 - Turbina Hidrocinética desenvolvida pelo LEA-UnB, Geração 2: Instalação Agosto-Outubro de 2006 em Maracá - Amapá (2 kW). ....	31
Figura 2.16 - Modelo para cálculo de Potência. ....	32
Figura 3.1 - Arranjo de Geração de Energia utilizando Turbina Hidrocinética com Gerador Corrente Contínua, Controlador de Carga, Banco de Baterias e Inversor. ....	35
Figura 3.2 - Exemplo Forma de Onda de Circuito Aberto de Inversor de Onda Senoidal e Espectro de Amplitude e de Fase da Tensão. ....	36
Figura 3.3 - Exemplo Forma de Onda de Circuito Aberto de Inversor de Onda Quadrada Modificada e Espectro de Amplitude e de Fase da Tensão. ....	37
Figura 3.4 - Exemplo Forma de Onda de Circuito Aberto de Inversor de Onda Quadrada e Espectro de Amplitude e de Fase da Tensão. ....	38
Figura 3.5 - Arranjo de Geração de Energia utilizando Turbina Hidrocinética com Gerador CC, Controlador de Carga, Banco de Baterias e Cargas CC. ....	40
Figura 3.6 - Vista em corte da MRV de configuração 6/4 (numero de pólos do estator e do rotor, respectivamente) ....	42
Figura 3.7 - Fonte 5001 iX – California Instruments. ....	43
Figura 3.8 - Tela Principal do Programa de Controle da Fonte 5001 iX – Califórnia Instruments. ....	44
Figura 3.9 - Função Arbitrary Waveform - CIGUI32. ....	45
Figura 3.10 - Função Measurements - CIGUI32. ....	46
Figura 3.11 - Função Display Waveform - CIGUI32. ....	46
Figura 3.12 - Aquisição da temperatura do motor monofásico utilizando o multímetro Minipa ET 2800. ....	47
Figura 3.13 - Laboratório de Qualidade de Energia: Cargas, Fonte e Aparelhos de Medição. ....	48
Figura 3.14 - Detalhe das Cargas utilizadas nos ensaios, multímetro e tacômetro. ....	48
Figura 3.15 - Esquema de ligação das cargas individualmente. ....	49

Figura 3.16 – Esquema de ligação das cargas em conjunto. ....	50
Figura 4.1 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms- Lâmpadas Fluorescentes. ....	53
Figura 4.2 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms– Conjunto Lâmpadas Fluorescentes. ....	53
Figura 4.3 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada 110V rms– Conjunto Lâmpadas Fluorescentes. ....	53
Figura 4.4 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms– Motor Monofásico. ....	55
Figura 4.5 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms– Motor Monofásico. ....	56
Figura 4.6 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada 110V rms– Motor Monofásico. ....	56
Figura 4.7 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms – Monitor. ....	58
Figura 4.8 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms– Monitor. ....	58
Figura 4.9 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada 110V rms – Monitor. ....	58
Figura 4.10 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms – Carga 1 + Carga 2 + Carga 3. ....	60
Figura 4.11 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms – Carga 1 + Carga 2 + Carga 3. ....	60
Figura 4.12 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms – Carga 1 + Carga 2 + Carga 3. ....	60
Figura 4.13 - Comportamento da Corrente no Conjunto Lâmpadas Fluorescentes em diferentes frequências. ....	62
Figura 4.14 - Gráfico Frequência vs Potência (Calculada) .....	62
Figura 4.15 - Gráfico Corrente Rms vs Frequência e Corrente Máxima vs Frequência. ....	64
Figura 4.16 - Gráfico Potência vs Frequência e Rotação vs Frequência .....	64
Figura 4.17 - Gráfico Corrente RMS vs Frequência e Corrente Máx. vs Frequência .....	66
Figura 4.18 - Gráfico Potência (Calculada) vs Frequência .....	66
Figura 4.19 - Gráfico Corrente RMS vs Frequência e Corrente Máx. vs Frequência .....	67
Figura 4.20 - Gráfico Potência (Calculada) vs Frequência .....	67



# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Eficiência de Conversão e Custo de Células Solares .....	10
Tabela 2.2 - Projetos fotovoltaicos coordenados pelo Prodeem/MME* .....	10
Tabela 2.3 - Sistema de geração de energia.....	17
Tabela 2.4 - Sistemas simulados pelo programa HOMER© (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables). ....	18
Tabela 2.5 Empreendimentos de Geração de Energia em Operação.....	26
Tabela 2.6 - Matriz Energética Brasileira. Empreendimentos em Operação. ....	27
Tabela 2.7 - Cálculo do custo da energia gerada pela turbina hidrocínética instalada em Maracá – AP em 2006. ....	33
Tabela 3.1 – Pesquisa de preços de inversores de onda senoidal, marca Xantrex. ....	37
Tabela 3.2 - Pesquisa de preços de inversores de onda senoidal, marca Xantrex. ....	37
Tabela 3.3 – Pesquisa de preços de inversores de onda quadrada modificada, marca Xantrex. ....	38
Tabela 3.4 – Pesquisa de preços de baterias. ....	39
Tabela 4.1 - Comparação dos valores medidos e dos dados nominais do conjunto de Lâmpadas Fluorescentes.....	51
Tabela 4.2 - Parâmetros elétricos para o conjunto de lâmpadas fluorescentes em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada). ....	52
Tabela 4.3 Comparação dos valores medidos e dos dados nominais do motor monofásico, alimentação de 110V rms. ....	54
Tabela 4.4 - Parâmetros elétricos para o motor monofásico em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada). ....	54
Tabela 4.5 - Comparação dos valores medidos e dos dados nominais do monitor. ....	56
Tabela 4.6 - Parâmetros elétricos para o monitor em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada).....	57
Tabela 4.7 - Parâmetros elétricos para carga 1 + carga 2 + carga 3, em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada). ....	59
Tabela 4.8 - Comportamento do conjunto de lâmpadas fluorescentes circulares (22W+32W) com tensão senoidal em diferentes frequências.....	61
Tabela 4.9 - Comportamento do motor monofásico 75W com tensão senoidal em diferentes frequências.....	63
Tabela 4.10 - Medidas das características elétricas do monitor para diferentes frequências. ..	65
Tabela 4.11 - Medidas das características elétricas das cargas em conjunto para diferentes frequências.....	67

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas da Energia Elétrica
CERPCH	Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.
EOL	Central Geradora Eolielétrica
ENE	Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília
FINATEC	Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos
FUNTAC	Fundação de Tecnologia do Acre
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
LEA	Laboratório de Energia e Ambiente
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
SEDSPLAN-AC	Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável – Acre
SOL	Central Geradora Solar Fotovoltaica
TCU	Tribunal de Contas da União
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UnB	Universidade de Brasília
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear
WANEB	Wind Atlas for the Northeast of Brazil
$\rho$	densidade da água em $\text{kg/m}^3$

A	área das pás
Isc	Corrente de Curto Circuito
kb	eficiência
Pm	Potência Máxima
V <sub>0</sub>	velocidade da água em metros/segundo
Voc	Tensão de Circuito Aberto



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 ASPECTOS GERAIS

Energia e desenvolvimento são conceitos intimamente ligados. Na maioria dos países, nos quais o consumo de energia comercial per capita está abaixo de uma tonelada equivalente de petróleo (TEP) por ano, as taxas de analfabetismo, mortalidade infantil e fertilidade total são altas, enquanto a expectativa de vida é baixa (GOLDEMBERG, 1998). Apesar disso, segundo o Secretário-Geral da ONU, Ban Ki-moon, “cerca de 1,6 bilhão de pessoas continuam sem acesso à eletricidade, em todo o mundo”. A universalização do atendimento de energia elétrica deve ser, portanto, um objetivo da nossa sociedade. Avanços nesse sentido podem ser observados, no âmbito do governo federal, com a implantação de programas como o Programa para o Desenvolvimento da Energia nos Estados e Municípios - PRODEEM, em 1994, e posteriormente com o programa Luz no Campo. Em 2003 este foi substituído pelo programa Luz para Todos, que pretende universalizar o acesso à energia elétrica.

A expansão do atendimento apresenta problemas principalmente no fornecimento de energia às comunidades isoladas. Atualmente os programas de universalização se limitam principalmente a atender comunidades que podem ser interligadas aos sistemas de distribuição. Mas a realidade do nosso país nos apresenta diversas comunidades que não podem ser atendidas dessa forma, como as que vivem em ilhas ou em locais de difícil acesso. Não existem sequer dados confiáveis sobre essas comunidades. A dificuldade de acesso pode inviabilizar a manutenção dos equipamentos de geração de energia nos sistemas isolados, além de encarecer o transporte de combustíveis para comunidades que utilizam o diesel como fonte principal de energia, etc.

O sistema elétrico nacional também conta com os chamados Sistemas Isolados, distribuídos em áreas da região Norte e pelos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pernambuco, Bahia e Maranhão. São predominantemente térmicos e majoritariamente localizados e dispersos na Região Norte, atendem a uma área de 45% do território e a cerca de



3% da população nacional, ou seja, aproximadamente 1,2 milhão de consumidores (ELETROBRÁS, 2007).

Dessa maneira, faz-se necessário o estudo de opções de geração de energia que atendam comunidades isoladas que levem em conta os aspectos econômico, social e ambiental, promovendo junto com a universalização do acesso e uso da energia elétrica, desenvolvimento social e econômico, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar (MME, 2007).

Este trabalho tem como objetivo apresentar um panorama dos tipos de geração para comunidades isoladas, utilizando como exemplo principal as experiências do Laboratório de Energia e Ambiente – LEA – da Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília no projeto de Modernização de Turbinas Hidráulicas, desenvolvido em conjunto com a Eletronorte e que atualmente está na 3ª versão. O trabalho pretende analisar as opções existentes, visando solucionar problemas, analisar experimentalmente algumas soluções e propor novas alternativas.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta-se convencionalmente desenvolvido, seguindo a estrutura:

- **Capítulo 2:** Revisão Bibliográfica, apresentando um resumo dos tipos de geração de energia alternativa que podem ser aplicadas ao atendimento de comunidades isoladas, abordando seus princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens, custos etc. Nesse capítulo é também apresentada uma visão das características ideais para um aproveitamento hidrocínético, no caso específico do projeto desenvolvido pelo LEA.
- **Capítulo 3:** Apresenta opções existentes para o processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica, para a geração de energia com a turbina hidrocínética, além de uma abordagem sobre os materiais e métodos utilizados para os ensaios experimentais.
- **Capítulo 4:** Voltado à exposição dos resultados experimentais e discussão dos dados apresentados. A partir dos dados obtidos, pode-se comparar o comportamento das cargas para diferentes formas de onda e em diferentes frequências de operação.
- **Capítulo 5:** Apresenta as conclusões e propostas a partir dos resultados obtidos.



# **CAPÍTULO 2**

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **TIPOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA COMUNIDADES ISOLADAS.**

#### **2.1 ENERGIA SOLAR**

##### **2.1.1 DEFINIÇÕES**

O Sol é a origem da maioria das fontes de energia renováveis que existem. Podemos usar a energia do Sol de diversas maneiras, desde formas simples como secar produtos, aquecer água, uso este conhecido como energia solar térmica, até a conversão direta da energia solar em energia elétrica, mais conhecida como energia solar fotovoltaica. Nesse último, pode-se considerar o grande potencial desse tipo de energia como alternativa de geração de energia no meio rural, principalmente na eletrificação de escolas, postos de saúde, comunidades e abastecimento de água.

As vantagens que a energia fotovoltaica apresenta são principalmente a possibilidade de geração de forma distribuída, não necessitando de investimentos em linhas de transmissão; a produção de forma simples, silenciosa e estática, necessidade de baixa manutenção, curtos prazos de instalação e alta confiabilidade. Além disso, o Brasil possui a segunda maior insolação do mundo e possui 90% das reservas de silício economicamente aproveitáveis no mundo, que é o material predominantemente utilizado em sistemas fotovoltaicos no mundo e no país (JANUZZI, 2003). As desvantagens são os altos valores de investimento, baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos e o caráter intermitente desse tipo de energia.

Atualmente, a energia solar é mais difundida no uso para aquecimento de água, substituindo chuveiros elétricos em residências, e caldeiras em diversas situações. Estima-se que a instalação de um sistema solar para aquecimento de água em uma residência que atenda 4 pessoas fique em torno de R\$ 2,5 mil a R\$ 3,5 mil (BALDINI, 2007).



Energia Solar Fotovoltaica é a energia solar gerada por células fotoelétricas, capazes de transformar a luz em um potencial elétrico sem sofrer um efeito térmico (aproveita-se entre 9% e 14%, em média, da energia do Sol). Um dos fatores que tornava proibitivo o uso da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. Por exemplo, o custo da produção das primeiras células era de US\$600/W, utilizadas para fins espaciais. Os preços se tornaram competitivos com a ampliação dos mercados e com a concorrência de várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas. Podem-se encontrar, hoje, placas fotovoltaicas ao custo médio de US\$ 8,00/W para grandes escalas. O preço tem reduzido ao longo dos anos (CRESESB, 2007).

Os sistemas fotovoltaicos encontram utilização principalmente em instalações remotas, possibilitando vários projetos de cunho social, agropastoris, como eletrificação de cercas, de irrigação, através de bombeamento de água e comunicações. As facilidades de um sistema fotovoltaico tais como modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica (CRESESB, 2007).

O maioria das células fotovoltaicas fabricadas utiliza o silício (Si) como componente principal, e podem ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. Destas, a célula de silício monocristalino é a tecnologia comercial mais empregada. Apresenta as vantagens de possuir um processo de fabricação básico e bem constituído (CRESESB, 2007).

A eficiência das células fotovoltaicas está relacionada com o processo de fabricação. As células monocristalinas apresentam grau de pureza próximo de 100% no processo de fabricação. Estas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências, girando em torno de 15%, podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios. As células de silício policristalino são fabricadas por um processo menos rigoroso, e por isso são mais baratas que as de silício monocristalino. No entanto, a eficiência cai um pouco em comparação com as monocristalinas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 14 % em escalas industriais (CRESESB, 2007).

A célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por suas características de estrutura do átomo, que apresenta alto grau de desordem. As vantagens da utilização de silício amorfo se apresentam tanto nas propriedades elétricas quanto no processo



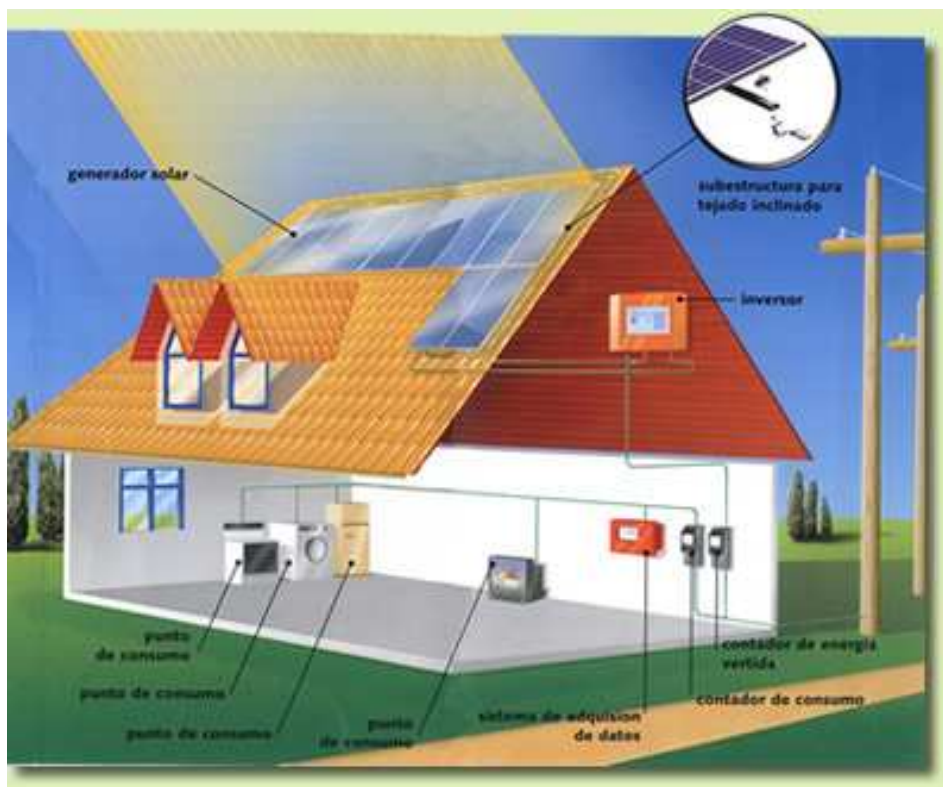
de fabricação. Mostra-se como uma tecnologia promissora, principalmente onde o custo é um fator importante para a viabilidade do projeto, podendo ser fabricado por um processo simples, mediante deposição de diversos tipos de substratos, além de possibilitar a fabricação de células com grandes áreas. Apesar do baixo custo de produção, as desvantagens que o uso de silício amorfo apresenta são: a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício, e o processo de degradação pelo qual as células passam logo no início da operação, reduzindo assim a eficiência ainda mais ao longo da vida útil (CRESESB, 2007).

Uma das principais características dos módulos fotovoltaicos é a potência, ou potência de pico. Porém, outros parâmetros também são importantes para caracterizar a funcionabilidade do módulo. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes (CRESESB, 2007):

- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )
- Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ )
- Potência Máxima ( $P_m$ )

É necessário também analisar os fatores que influenciam as características elétricas de um painel. Os principais são a intensidade luminosa e a temperatura das células. A influência da intensidade luminosa no funcionamento dos módulos diz respeito à corrente gerada, que aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. Já o aumento da temperatura das células faz com que a eficiência do módulo caia, reduzindo assim a potência máxima gerada (CRESESB, 2007). Um exemplo da utilização dos painéis fotovoltaicos interligado à rede em sistema residencial é apresentado na figura 2.1.





**Figura 2.1 - Exemplo de um sistema fotovoltaico residencial.**

(Fonte: [www.solanerosolarenergy.es/fotovoltaiica.htm](http://www.solanerosolarenergy.es/fotovoltaiica.htm))

### 2.1.2 ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS ISOLADOS

A utilização da energia solar em sistemas isolados se justifica, no caso do nosso país, principalmente pela dimensão continental e pelos baixos valores de demanda energética apresentados nos locais isolados. Devido aos preços relativamente elevados por kW instalado ou por kWh gerado através de Sistemas de Energia Solar, geralmente os projetos são previstos para o suprimento de demandas muito pequenas. Apesar disso, a instalação de sistemas fotovoltaicos não apresentam maiores dificuldades, se adequando bem para sistemas isolados. Ao mesmo tempo, o uso em residências ou em forma de mini-redes se mostra atrativo tanto do ponto de vista econômico quanto tecnológico quando comparado a outras alternativas (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

Diversas iniciativas visando o atendimento de comunidades isoladas têm sido implementadas. Pode-se citar a implementação do PRODEEM, Programa para o Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios, que teve início em 1995, objetivando promover a eletrificação rural através de sistemas fotovoltaicos. O programa envolveu



universidades, centros de pesquisa e secretarias estaduais de energia. Por meio deste programa, entre 1995 e 2002, foram instalados 6 MWp em pequenos sistemas fotovoltaicos, metade do total da capacidade instalada no Brasil (estimada em 12 MWp) (GALDINO, LIMA, 2002).

Em 2002, o Tribunal de Contas da União (TCU), através de Auditoria de Natureza Operacional, recomendou uma reestruturação completa do programa que, acatada pelo MME, visa à integração do PRODEEM ao Programa Nacional de Universalização – Luz para Todos.

### **2.1.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS.**

Um dos principais exemplos de utilização da tecnologia de sistemas fotovoltaicos para eletrificação rural foi o programa denominado PRODEEM. Patrocinado pelo governo para eletrificação fora de rede, foi criado por um decreto presidencial em dezembro de 1994. O PRODEEM caracteriza-se por ser um programa nacional descentralizado que usa uma estrutura hierárquica verticalizada a fim de identificar locais e instalar equipamentos. Com o objetivo de eletrificar escolas, centros de saúde e outras instalações comunitárias, ao invés de eletrificar domicílios individualmente, o programa beneficiou cerca de 708 mil habitantes do ano de implantação até o ano 2000 (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

Por ser o primeiro grande programa implementado no Brasil visando à eletrificação rural a partir de fontes alternativas de energia, principalmente energia fotovoltaica, a execução do projeto atravessou diversas adversidades, como a dificuldade de identificação das localidades adequadas para receber os benefícios, instalações muitas vezes colocadas em comunidades não preparadas e desorganizadas, falta de esquemas para recuperação de custos, com a conseqüente perda de fundos para manutenção e para serviços ocasionais, falta de responsabilização das comunidades locais e dos estados sobre os equipamentos, perda ocasional da coordenação com os programas de expansão de rede (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

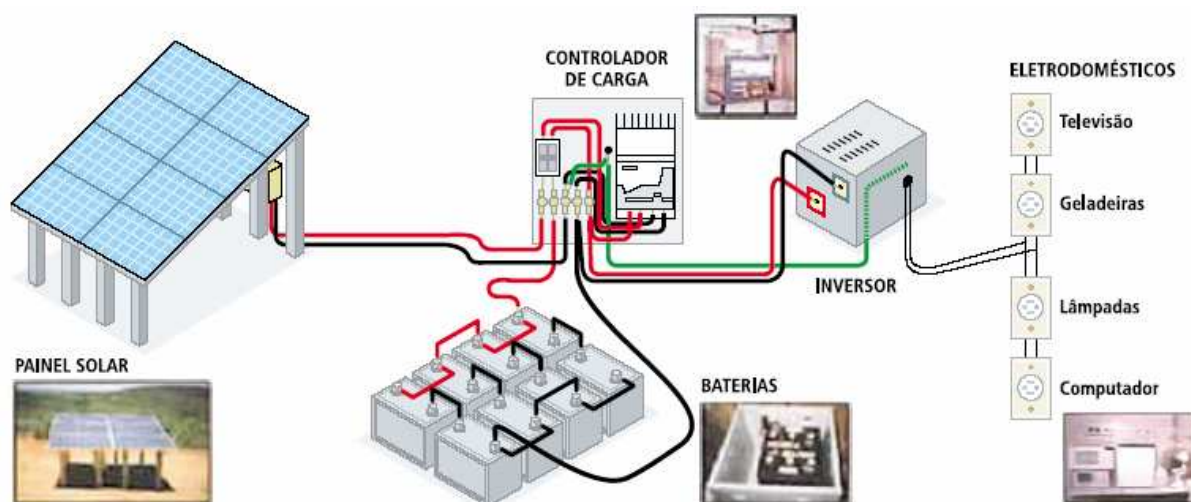
Tais dificuldades causaram o fracasso, em alguns casos, do objetivo de levar energia a comunidades isoladas. Avaliações da primeira fase em 79 sistemas investigados em 2000 apontaram que apenas 56% destes estavam efetivamente operando. Disparidades nos estados também foram apontadas: nos sistemas de Minas e São Paulo analisados, 100% estavam operando, já em Alagoas e Ceará nenhum operava (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).



Embora os aspectos técnicos sejam considerados vitais para o sucesso de projetos de eletrificação descentralizados, talvez os itens mais importantes no planejamento e execução do projeto são a manutenção e a sustentabilidade. Apesar da evolução do PRODEEM nesse sentido, que incorporou à responsabilidade dos agentes regionais os cuidados com a manutenção dos sistemas fotovoltaicos, a limitação desse tipo de atendimento é grande, principalmente considerando o crescimento do já relativamente grande número de sistemas (GALDINO, LIMA, 2002).

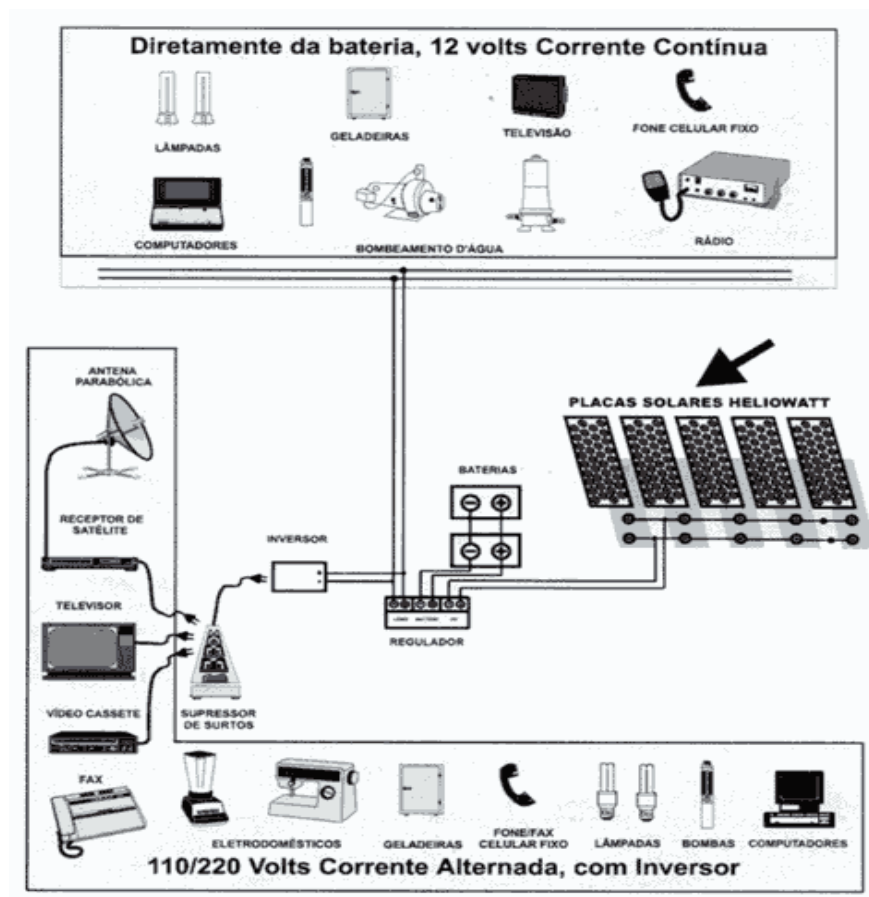
Além do PRODEEM, existem muitos pequenos projetos nacionais de geração fotovoltaica de energia elétrica, principalmente no Norte e Nordeste do Brasil. A aplicação desses projetos consiste principalmente no bombeamento de água, para abastecimento doméstico, irrigação e piscicultura; na iluminação pública; atendimento domiciliar; além de sistemas de uso coletivo. Entre outros, estão as estações de telefonia e monitoramento remoto, a eletrificação de cercas, a produção de gelo e a dessalinização de água (BRASIL, 2005).

Os sistemas de geração de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas geralmente apresentam a configuração ilustrada nas figuras 2.2 e 2.3.



**Figura 2.2 - Ilustração de um sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica.**

Fonte: (ANEEL, 2005).



**Figura 2.3 - Esquema dos tipos padrão de sistemas fotovoltaicos com cargas alimentadas por inversor e diretamente da bateria.**

Fonte: [www.ipemabrasil.org.br](http://www.ipemabrasil.org.br)

Os sistemas fotovoltaicos são constituídos por um ou mais módulos fotovoltaicos, de capacidade variando entre 20 a 100 watts, regulador de carga e descarga da bateria controlando a tensão do banco de baterias ou nível da carga; baterias do tipo chumbo-ácido, geralmente abertas, operando com baixa profundidade de descarga; cabos e acessórios de montagem, cujos projetos levem em conta problemas oriundos do clima e limitação de perdas; inversor CC/CA, para o caso de uso de equipamentos de corrente alternada; aplicações, fontes de luz e tomadas para rádio e TV, de baixo consumo, recomendando-se o uso de lâmpadas fluorescentes e conseqüentemente proibindo-se o uso de lâmpadas incandescentes (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

A operação e utilização dos sistemas fotovoltaicos é simples, embora necessitem de entendimento do usuário, principalmente quanto às suas limitações. Apresenta baixo custo de manutenção, que deve ser realizada periodicamente de acordo com as orientações do produto. A utilização das baterias também deve seguir os mesmos paradigmas da utilização dos



sistemas fotovoltaicos, principalmente para o controle no nível eletrolítico e da tensão das conexões aos terminais (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

Embora sejam caros, a aquisição e a manutenção de um sistema de iluminação representam um investimento de US\$ 10 a 25 por Wp. Para um sistema de 50Wp, isso significa de 500 a mais de 1000 dólares (DE GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

A tabela 2.1 resume as características dos tipos de células solares, apresentando as eficiências teóricas, laboratoriais e comerciais, além do custo estimado para aquisição das células.

**Tabela 2.1 - Eficiência de Conversão e Custo de Células Solares**

Tipo de Célula	Eficiência (%)			Custo (US\$/Wp)
	Teórica	Laboratório	Comercial	
Silício de cristal simples	30,0	24,7	12 a 14	4 a 7
Silício concentrado	27,0	28,2	13 a 15	5 a 8
Silício policristalino	25,0	19,8	11 a 13	4 a 7
Silício amorfo 17,0	13,0	4 a 7	3 a 5	-

Fonte: GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables: version 16. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384, 2000.

Uma estimativa de custo também pode ser obtida a partir dos dados da implementação dos projetos coordenados pelo PRODEEM. De acordo com a tabela 2.2, observa-se que o total de sistemas instalados é de 8.956, totalizando uma potência de 5.115 kWp, ao custo total de 37.250.000 US\$. Em média, para um sistema de 50Wp, um custo de instalação foi de aproximadamente 364 US\$, ou 7,28 US\$/Wp instalado.

**Tabela 2.2 - Projetos fotovoltaicos coordenados pelo Prodeem/MME\***

Energéticos				Iluminação Pública			Bombeamento			Totalização		
Fases	Qtd. (A)	Potência kWp (B)	Total US\$1mil (C)	Qtd. (D)	Potência kWp (E)	Total US\$1mil (F)	Qtd. (G)	Potência kWp (H)	Total US\$1mil (I)	Qtd. (J)=A+D+G	Potência kWp (L)=B+E+H	Total US\$1mil (M)=C+F+I
Fase I	190	87	526	137	7	76	54	78	480	381	172	1.082
Fase II	387	195	1.621	242	17	197	179	213	1.635	808	425	3.453
Fase III	843	526	3.495	0	0	0	224	165	1.173	1.067	691	4.668
Emerg.	0	0	0	0	0	0	800	235	2.221	800	235	2.221
Fase IV	1.660	972	5.456	0	0	0	1.240	457	4.569	2.900	1.429	10.025
Fase V	3.000	2.160	15.801	0	0	0	0	0	0	3.000	2.160	15.801
<b>Total</b>	<b>6.080</b>	<b>3.940</b>	<b>26.899</b>	<b>379</b>	<b>24</b>	<b>273</b>	<b>2.497</b>	<b>1.148</b>	<b>10.078</b>	<b>8.956</b>	<b>5.112</b>	<b>37.250</b>

Fonte: BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM. 2003. (\*) Observações: a. Os sistemas energéticos incluem módulos, baterias, controladores, inversores CC/CA e estrutura de fixação dos módulos. b. Os sistemas de bombeamento incluem módulos, inversores/controladores, bombas d'água e estrutura de fixação dos módulos. c. Dados das Fases I e II fornecidos pelo CEPEL.



Em relação aos aspectos ambientais, as vantagens dos sistemas fotovoltaicos são claramente a produção a partir de uma fonte renovável e limpa e cujo funcionamento não produz nenhum efeito estufa.

A desvantagem, principalmente para os arranjos utilizados em sistemas isolados, consiste no impacto ambiental representado pela utilização das baterias, geralmente do tipo chumbo-ácido. Nessa configuração, a bateria deve ser trocada, em média, a cada 2-6 anos, dependendo do modelo. Além disso, o descarte indevido dessas baterias em comunidades remotas pode gerar sérios impactos ambientais, já que possuem metais pesados em sua composição (SHAYANE, 2006).

## **2.2 ENERGIA EÓLICA**

### **2.2.1 DEFINIÇÕES**

O combustível utilizado por sistemas de energia eólica é o vento, que é definido como o movimento do ar na atmosfera terrestre. Os deslocamentos de massa de ar se dão principalmente pelo aquecimento da superfície da Terra nas regiões próximas ao Equador e pelo resfriamento nas regiões próximas aos pólos. Além disso, o vento é influenciado pelo movimento da Terra e pela topografia do local (ALDABÓ, 2002).

Conhecer a intensidade dos ventos e sua direção é fundamental para a determinação do potencial de geração de energia elétrica através da energia eólica. A eficiência do aproveitamento da energia disponível nos ventos é baixa, com rendimento global de um sistema eólico estando em aproximadamente 20%. Além disso, a produção de energia depende diretamente do comportamento dos ventos (CRESESB, 2007).

A tecnologia utilizada em sistemas de energia eólica apresenta-se totalmente desenvolvida e testada, constituindo uma fonte de energia barata e cuja rentabilidade possibilita a competição com outras fontes energéticas tradicionais como as centrais térmicas de carvão, e as centrais nucleares, principalmente quando se levam em conta os custos de reparar os danos ambientais. A energia eólica gera energia elétrica sem qualquer processo de combustão ou etapa de transformação térmica. Além dessas vantagens, o Brasil possui um bom potencial de utilização da energia eólica (ALDABÓ, 2002).

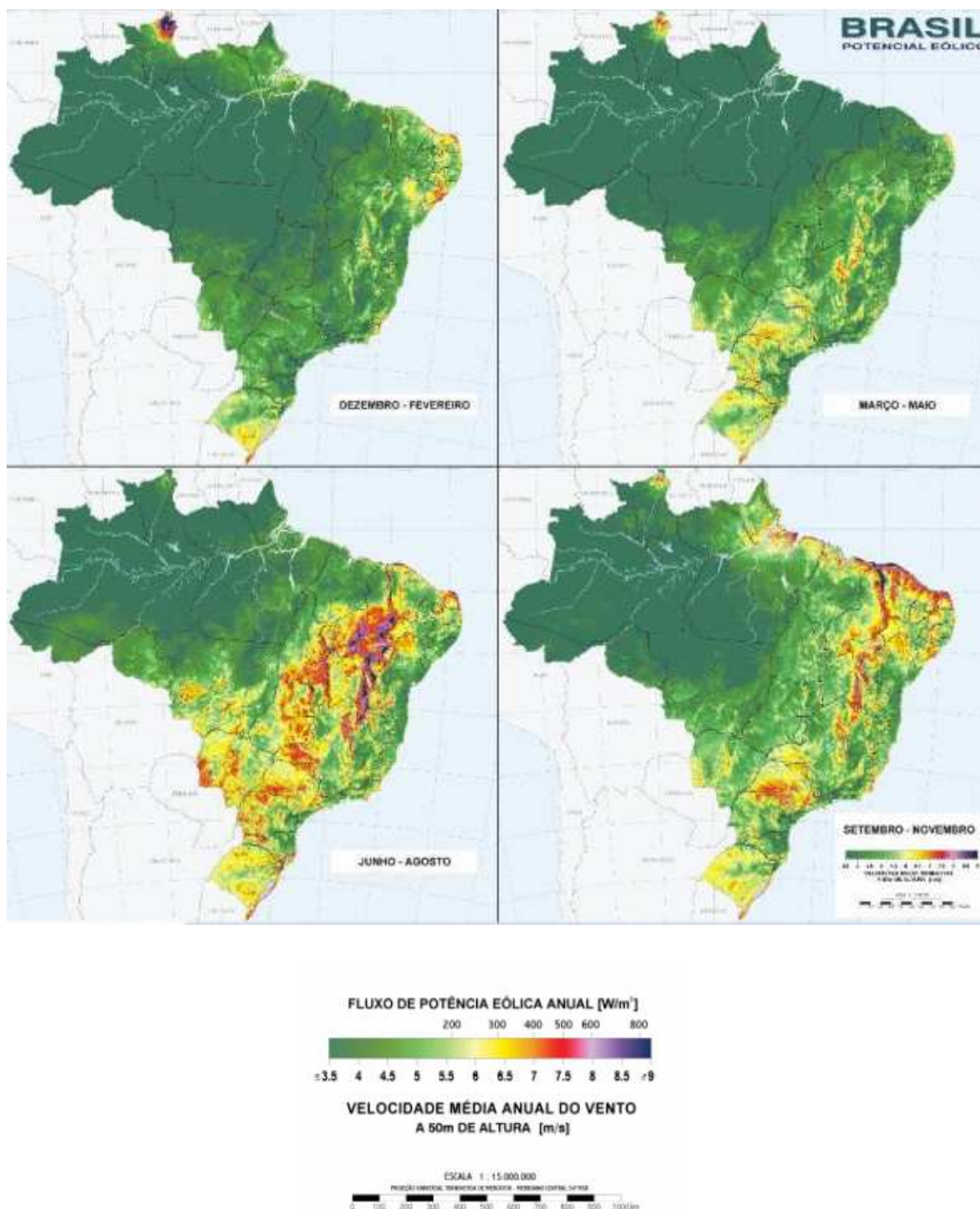




Estudos do Centro de Pesquisas da Energia Elétrica da Eletrobrás – CEPEL estimam em 143,5 GW o potencial de energia que pode ser gerada pelos ventos no território brasileiro, principalmente no litoral das regiões Sul e Nordeste e em alguns pontos do Centro-Oeste (CEPEL, 2007). Para efeito de comparação, o potencial teórico de geração de energia a partir de PCH's no país é de 15,5 GW (CERPCH, 2007).

O potencial eólico brasileiro é reconhecido como um dos maiores do mundo. Apesar disso, a produção de energia elétrica através da energia eólica representa apenas 0,24 % na matriz energética nacional (ANEEL, 2007). No Sul do Brasil, existem as localidades de Palmas (PR), Laguna (SC), Água Doce (SC), Bom Jardim da Serra (SC) e Osório (RS), com bons ventos para geração eólica. Entende-se por ventos bons aqueles que atingem pelo menos uma média anual de seis metros por segundo. Os ventos do litoral do Nordeste do Brasil, principalmente no Ceará e no Rio Grande no Norte apresentam excelentes oportunidades de aproveitamento da energia eólica, com ventos que chegam a alcançar uma média anual de oito metros por segundo (PASSOS, 2007). A remuneração do MWh (megawatt-hora) de energia eólica, para o parque Eólico de Osório, no leilão ocorrido em 2007, está fixada em R\$ 231,00, constituindo a energia mais cara do país, enquanto o MWh de fonte hídrica (PCH's) ficou entre R\$ 110,00 e R\$ 114,00.

Para implementação eficiente de um aproveitamento eólico e assegurar a energia gerada é fundamental que se tenha uma boa base do regime dos ventos no local, e isso ainda é um grande desafio, já que o Brasil carece de dados confiáveis nesse sentido. O Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT lançou, em 1998, a primeira versão do Atlas Eólico do Nordeste do Brasil (WANEB - Wind Atlas for the Northeast of Brazil) com o objetivo principal de desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos confiáveis para a região. O mapa de ventos em quatro épocas do ano é mostrado na figura 2.3.



**Figura 2.4 - Mapa de Ventos do Brasil ao longo do ano e legenda.**

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro –CEPEL.

No Brasil, apesar de ainda apresentar um estágio inicial da exploração da geração de energia elétrica a partir da energia dos ventos, já foi dado o primeiro passo com a aprovação de projetos pelo Proinfa - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, que exige o índice de nacionalização mínimo de 60% e que prevê completar a instalação de





1420 MW de potência gerados por empreendimentos eólicos. Atualmente, estima-se que a capacidade instalada, no Brasil, situa-se em torno de 236 MW. O Brasil já fabrica pás para grandes aerogeradores, há bastante tempo, em Sorocaba-SP, onde há duas fábricas de pás. Além disso, existem duas fábricas de máquinas que fabricam modernos e grandes aerogeradores no Brasil, a Wobben Windpower, da subsidiária alemã Enercon (maior fabricante alemão), com uma fábrica no Ceará e outra em Sorocaba (PASSOS, 2007).

### **2.2.2 ENERGIA EÓLICA EM SISTEMAS ISOLADOS**

A utilização de aproveitamentos eólicos no meio rural acontece tradicionalmente para o bombeamento d'água, através da utilização de cataventos multipás. Ultimamente, pode-se observar a utilização do potencial eólico na geração de energia elétrica principalmente nos sistemas híbridos, que combinam fontes de energia renovável e geradores convencionais. Geralmente estes sistemas de pequeno e médio porte utilizam sistemas eólicos e fotovoltaicos, complementando o uso dos tradicionais geradores a diesel.

A geração de energia através do vento é feita por um aerogerador, geralmente de três pás. Esse tipo de aparelho tem um movimento rotatório mais rápido. O vento, ao passar pelo rotor, aciona a turbina, que está acoplada a um gerador elétrico, que é responsável por transformar a energia cinética do vento em energia elétrica.

A geração da energia depende principalmente da quantidade de vento que passa pelo aerogerador. A energia produzida pode ser usada para:

- irrigação e eletrificação rural;
- iluminação pública;
- carregamento de baterias e telecomunicações.

Já foi demonstrado que sistemas híbridos de energia podem representar uma solução mais econômica para muitas aplicações e também proporcionar uma fonte mais segura de eletricidade devido à combinação de diversas fontes de energia. Existem ainda vantagens ambientais, já que o uso de energia renovável reduz a poluição causada pela queima de óleo diesel, transporte e armazenamento (CBEE, 2007).



### 2.2.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS.

Existem aerogeradores projetados para atender pequenas demandas, desenvolvidos para fornecer eletricidade em nível individual em áreas com elevado potencial eólico, desde algumas centenas de kW até aproximadamente 1kW. O sistema eólico é constituído basicamente de (GOUVELLO, MAIGNE, 2003):

- Aerogerador, com pás, alternador e retificador;
- uma série de baterias para compensar a ausência de vento;
- um regulador para controlar cargas e descargas da bateria;
- receptores para baixo consumo;
- um inversor para aplicações em corrente alternada.

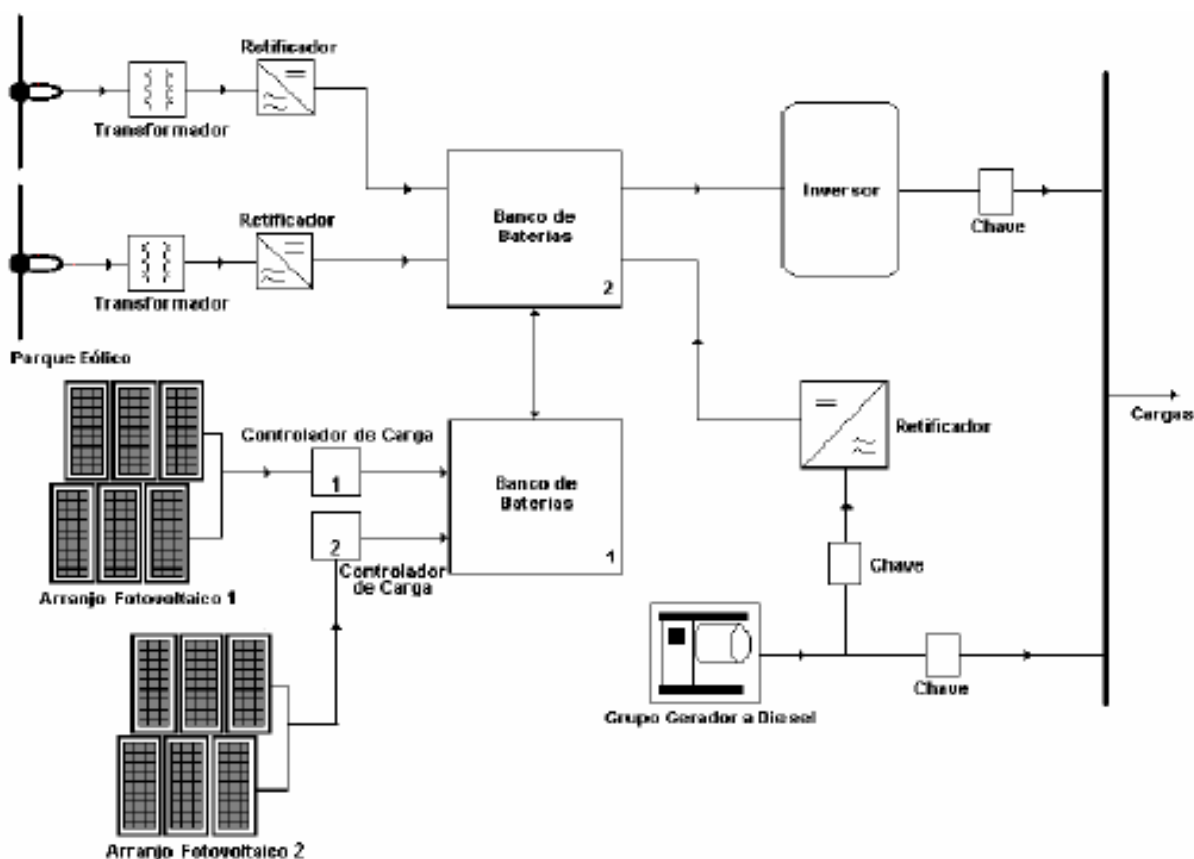
Os produtos relacionados aos sistemas eólicos têm a vantagem de serem padronizados, porém a rede de distribuição ainda está em fase inicial. A instalação não apresenta maiores dificuldades. Os geradores são adaptados às velocidades dos ventos no local de funcionamento. Para uma velocidade do vento de 5 m/s os geradores mais adequados são os multipás. Os sistemas de duas ou três pás necessitam de uma velocidade de vento por volta de 10 m/s. Por esse motivo é importante que se conheça bem o comportamento dos ventos no local da instalação dos sistemas eólicos ao longo do tempo. A incerteza agregada ao funcionamento dos geradores eólicos devido à natureza do recurso é uma das mais importantes limitações desse tipo de aproveitamento (GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

Distribuído de modo mais confiável do que os sistemas de energia solar, um gerador eólico individual tem um custo de investimento muito variável em função de cada situação. Na Europa um gerador custa, em média, de US\$ 500 a 1.100, sem os acumuladores. O preço de um gerador de 100W fabricado e distribuído na China não excede a US\$ 150 (GOUVELLO, MAIGNE, 2003).

A manutenção desses sistemas é necessária principalmente no que diz respeito às peças móveis, que devem ser lubrificadas. Cuidados com o banco de baterias devem ser tomadas, de acordo com as orientações do fabricante. Os custos de operação e manutenção dos sistemas eólicos são consideravelmente baixos (GOUVELLO, MAIGNE, 2003).



Um exemplo de sistema eólico é o implementado no Sistema híbrido de Tamaruteua, no município de Marapanim – Pará. Esse sistema foi inicialmente implantado em 1999 e estava em fase final de revitalização no início de 2007. Atualmente, o projeto é composto de 2 aerogeradores de 7,5 kW cada, 32 módulos fotovoltaicos de 120 Wp (3,84kW), 1 grupo gerador diesel de 40 kVA, 64 baterias estacionárias de 12V/185Ah, 1 inversor/retificador de 23 kVA, 2 controladores de carga de 48V/40A, 1 estação meteorológica (2 sensores de velocidade, 1 sensor de direção do vento, 1 sensor de temperatura e 1 sensor de radiação solar), sistema de telemetria (medição dos parâmetros elétricos: V, A, P), mini-rede de distribuição de energia (aproximadamente 1.600 m). O sistema atende aproximadamente 40 residências, consumo de 81 kWh/dia com pico de demanda de 7 kW. O esquema de ligação do sistema híbrido é apresentado na figura 2.4 (PEREIRA et al., 2007).



**Figura 2.5 - Diagrama de blocos do sistema híbrido fotovoltaico – eólico – diesel da comunidade de Tamaruteua.**

Fonte: (PEREIRA et al., 2007).



**Figura 2.6 - Fotos do Sistema Eólico implantado em Marapanim – PA.**

Fonte: (PEREIRA et al., 2007).

As características dos sistemas híbridos de geração de energia, instalado em 1999 e revitalizado em 2006, são apresentados na tabela 2.3. Em ambos os sistemas, 1999 e 2006, o custo de aquisição dos equipamentos foi considerado o mesmo. A taxa cambial aplicada foi de US\$ 1,00 = R\$ 2,50.

**Tabela 2.3 - Sistema de geração de energia.**

	SISTEMA 1999	CUSTO 1999	SISTEMA 2006	CUSTO 2006
Sistemas Fotovoltáicos (FV)	16 módulos AstroPower de 120 Wp	US\$ 6,00 / Wp	16 módulos AstroPower de 120 Wp + 16 módulos Kyocera de 120 Wp	US\$ 6,00 / Wp
Sistema Eólico	2 aerogeradores de 7,5 kW - BWC Excel - R	US\$ 4,00 / W	2 aerogeradores de 7,5 kW - BWC Excel - R	US\$ 4,00 / W
Inversor Retificador	3 inversores TRACE de 5 kW	US\$ 4.000,00 / unidade	1 inversor Equisul de 18 kW / retificador de 4 kW	US\$ 24.800,00
Baterias	64 baterias de 350 Ah / 6V	US\$ 184,00 / unidade	64 baterias estacionárias de 185 Ah / 12 V	US\$ 150,00 / unidade
Gerador a diesel	30 kVA (24 kW)	US\$ 350,00 / kW	40 kVA (32 kW)	US\$ 350,00 / kW

Fonte: (PEREIRA et al., 2007).

Uma simulação computacional das características do sistema de geração de energia no sistema híbrido de Tamaruteua é apresentado na tabela 2.4, cujos resultados possibilitam uma melhor escolha dos componentes do sistema.



**Tabela 2.4 - Sistemas simulados pelo programa HOMER© (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables).**

FV (kWp)	XLR	Gen (kW)	Bat	Inv Ret (kW)	CapInic (US\$x1,00)	Total NPC (US\$x1,00)	COE (US\$/kWh)	Ren	Diesel (L/ano)	Ger (h)	ProdEn (kWh/ano)	ExcEn (kWh/ano)	CO <sub>2</sub> (kg/ano)
1.92	2	24	64	15	88.870	222.647	0,830	0,50	7.081	977	41.814	3.846 (9%)	18.646
7.68	2	32	64	18	130.340	246.384	0,918	0,68	5.305	627	45.426	7.451 (16%)	13.971
7.68	2	32	128	18	139.940	250.669	0,934	0,69	4.902	579	44.311	6.213 (14%)	12.908
3.84	2	32	128	18	116.900	243.688	0,908	0,58	6.292	734	41.817	3.599 (9%)	16.568
3.84	2	32	64	18	107.300	241.684	0,901	0,56	6.791	804	43.079	4.854 (11%)	17.882
-	-	24	-	-	8.400	487.050	1,815	-	33.208	8.760	63.082	33.522 (53%)	87.449
-	-	24	64	18	42.600	276.595	1,031	-	13.723	1.771	41.251	122 (0,3%)	36.137
-	-	24	128	18	52.260	290.503	1,083	-	13.937	1.816	41.751	126 (0,3%)	36.701

Fonte: (PEREIRA et al., 2007).

Onde, FV – capacidade do sistema fotovoltaico; XLR – total de aerogeradores de 7,5 kW; Gen – capacidade do grupo gerador a diesel; Bat – total de baterias de 185 Ah/12V; Inv/Ret – capacidade do inversor/retificador; CapInic – capital inicial para implementação do sistema; Total NPC – total gasto ao longo da vida útil do sistema; COE – custo da energia gerada; Ren – participação da geração renovável na produção total de energia; Diesel – total de óleo diesel consumido; Ger – horas/ano de operação do grupo gerador a diesel; ProdEn – produção total de energia / ano; ExcEn – energia não aproveitada / ano; CO<sub>2</sub> – emissão de CO<sub>2</sub> / ano.

Pode-se observar, que para o sistema revitalizado, o capital inicial necessário para implementação do projeto foi de 107.300 US\$, para um total de 50,84 kW instalado, resultando em um custo de instalação de aproximadamente 2110 US\$/kW.

As características ambientais dos sistemas eólicos e fotovoltaicos são muito parecidas. O arranjo da geração de energia é praticamente o mesmo, com utilização do banco de baterias e inversores. Aqui também se observa o impacto ambiental negativo da utilização de baterias,



principalmente no contexto das comunidades isoladas. Como já comentado, podem existir dificuldades na troca e descarte dessas baterias.

## **2.3 BIOMASSA**

### **2.3.1 DEFINIÇÕES**

No setor elétrico, define-se biomassa como qualquer recurso renovável oriundo de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para produzir energia. A biomassa é tradicionalmente utilizada para produzir energia, principalmente para fins térmicos, mas apresentando também novas formas de conversão de energia para produção de energia elétrica, como combustíveis líquidos, gaseificação entre outros (ANEEL, 2005).

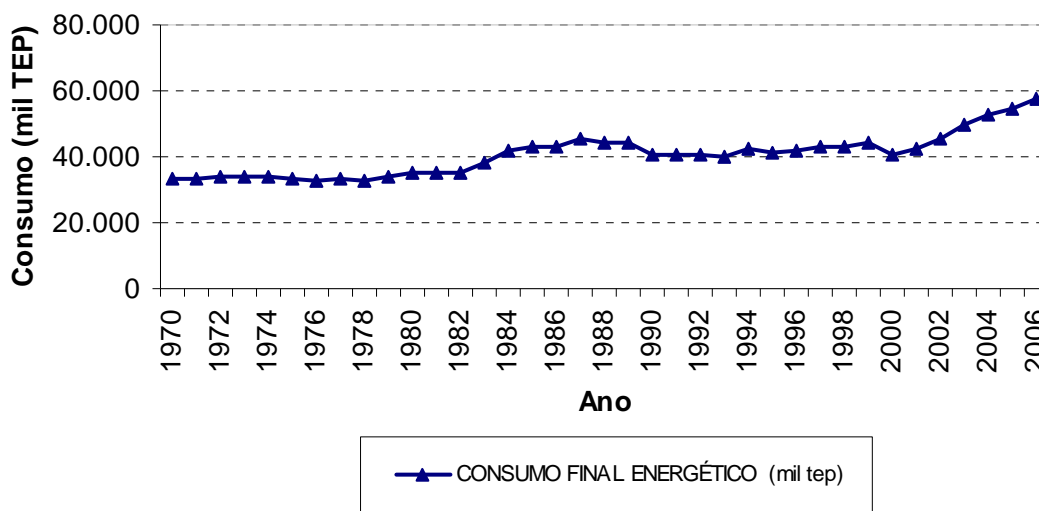
As vantagens da utilização da biomassa são diversificadas, principalmente pela variedade de insumos que existem. Podemos citar o grande aproveitamento de resíduos para geração de energia, como o bagaço da cana, palha de arroz entre outros, pode produzir energia de forma descentralizada; a disponibilidade de biomassa em locais com demanda reprimida de energia elétrica; a produção de energia próxima dos consumidores, reduzindo gastos com transmissão e distribuição (COELHO, 2001). A produção de energia através da biomassa pode se adequar às potencialidades regionais, podendo, por exemplo, gerar energia através da casca de castanha de caju, no Ceará e Piauí, a partir do óleo de palma (dendê) e côco-da-baía no Pará e Bahia (ANEEL, 2005). Além disso, a produção de combustíveis a partir de matéria orgânica, como o etanol e o biodiesel, diversifica a matriz energética brasileira já que se mostra uma alternativa de energia renovável para o uso de combustíveis fósseis.

O esgotamento de fontes não-renováveis favorecerá um maior aproveitamento energético da biomassa, principalmente por pressões ambientalistas. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, essa tecnologia é mais utilizada em sistemas de co-geração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica (CERPCH, 2007).

Segundo dados do Ministério das Minas e Energia, o consumo total de Biomassa no Brasil no ano de 2006 foi de 57.409 mil TEP. Em 1970 o consumo era de 33.324 mil TEP. O gráfico da evolução do consumo de Biomassa é apresentado na figura 2.6:



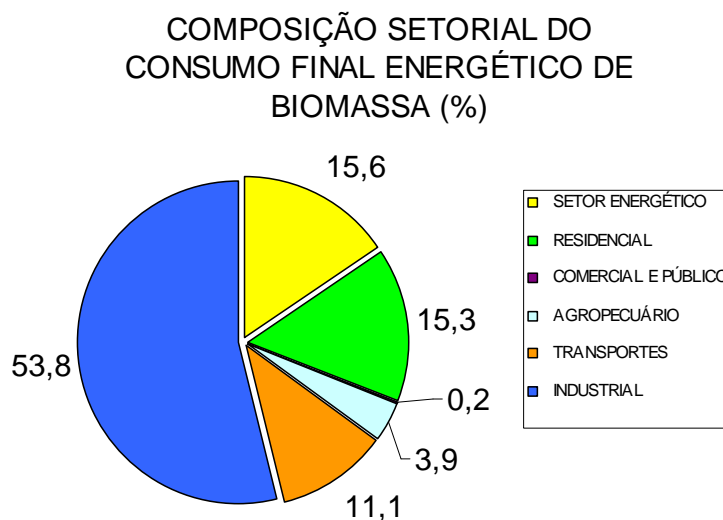
### Evolução do Consumo de Biomassa no Brasil



**Figura 2.7 - Evolução do consumo de biomassa no Brasil**

Fonte: Balanço Energético Nacional – MME.

Existem diversos tipos de biomassa, podemos destacar algumas de maior importância como a lenha, carvão vegetal, óleos vegetais, cana-de-açúcar, álcool, resíduos rurais, resíduos urbanos e resíduos industriais. O consumo de 57.409 mil TEP de Biomassa, que inclui bagaço de cana, lenha, outras fontes primárias renováveis, carvão vegetal e álcool, é dividido em diversos setores:

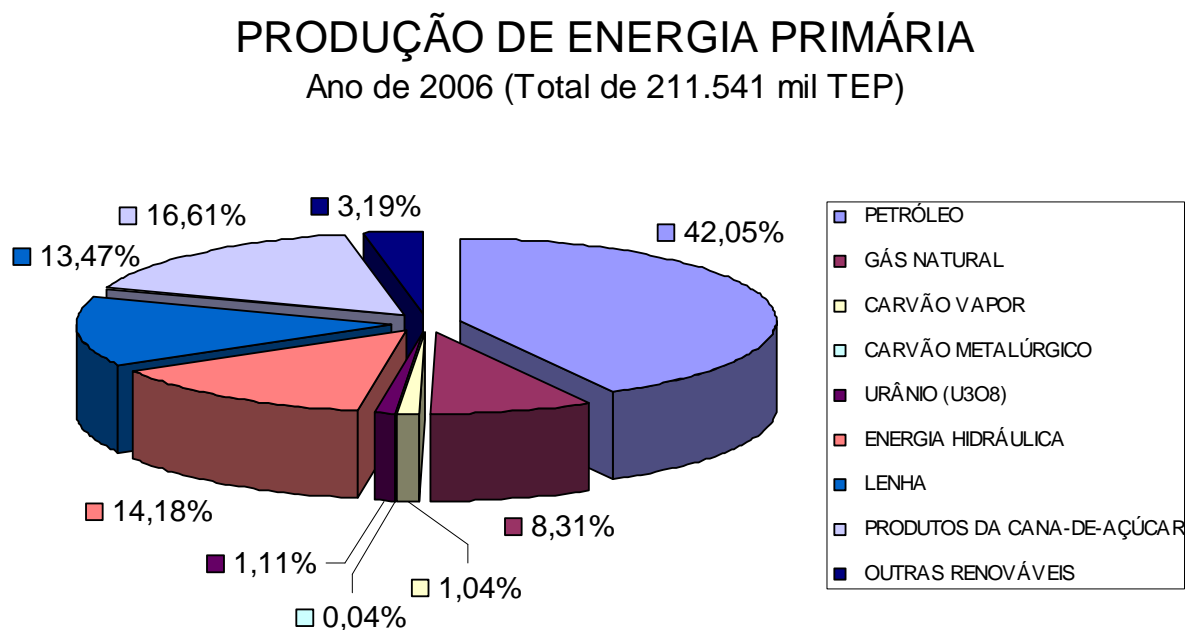


**Figura 2.8 - Composição setorial do consumo final energético de biomassa.**

Fonte: Balanço Energético Nacional 2007 - MME



A lenha ainda representa 13,47% da produção de energia primária no Brasil, segundo dados do Ministério das Minas e Energia apresentados no gráfico 2.9.



**Figura 2.9 - Produção de Energia Primária no Brasil em 2006**

Fonte: (BRASIL, 2007)

A cana de açúcar é, historicamente, um dos principais produtos agrícolas do Brasil, cujo cultivo foi iniciado ainda na época da colonização. Em 1975, a cultura de cana-de-açúcar teve novo incentivo com a implantação do Pro Álcool, criado pelo governo federal a fim de produzir um combustível alternativo, em consequência da Crise do Petróleo ocorrida em 1973. Desde 1978, o álcool vem sendo utilizado como combustível para motores. (CERPCH, 2007)

No Brasil há 308 usinas de açúcar e álcool, com um processamento médio de 1 milhão de toneladas de cana por usina por ano. Só no Estado de São Paulo, são 130 usinas, que processam 1.5 milhões de toneladas por ano, em média. Cada tonelada de cana produz 140 kg de bagaço, das quais 90% são usados para produzir energia (térmica e elétrica) na usina; além do bagaço, a tonelada de cana produz 150 kg de açúcar (usado para açúcar, etanol e agora plásticos); e 140 kg de palha, que hoje é perdida nas queimadas no campo. O bagaço é





equivalente a 11.0 milhões t. óleo combustível; 25% da palha, se recolhidos, seriam equivalentes a 3.2 milhões t. óleo (MACEDO, 2001).

A co-geração de energia a bagaço produz praticamente toda a energia térmica, e cerca de 95% da elétrica, demandada pelas usinas de açúcar e álcool. Além disso, outra vantagem ambiental diz respeito ao próprio etanol produzido, cuja energia renovável corresponde a cerca de nove vezes o insumo fóssil utilizado em sua produção. Isso torna o processo atraente, sobretudo do ponto de vista da sustentabilidade, entre os usos comerciais de energia alternativa no mundo, proporcionando a redução de emissões de gases de efeito estufa em milhões de t. de Carbono (equivalente) (MACEDO, 2001).

### **2.3.2 BIOMASSA EM SISTEMAS ISOLADOS**

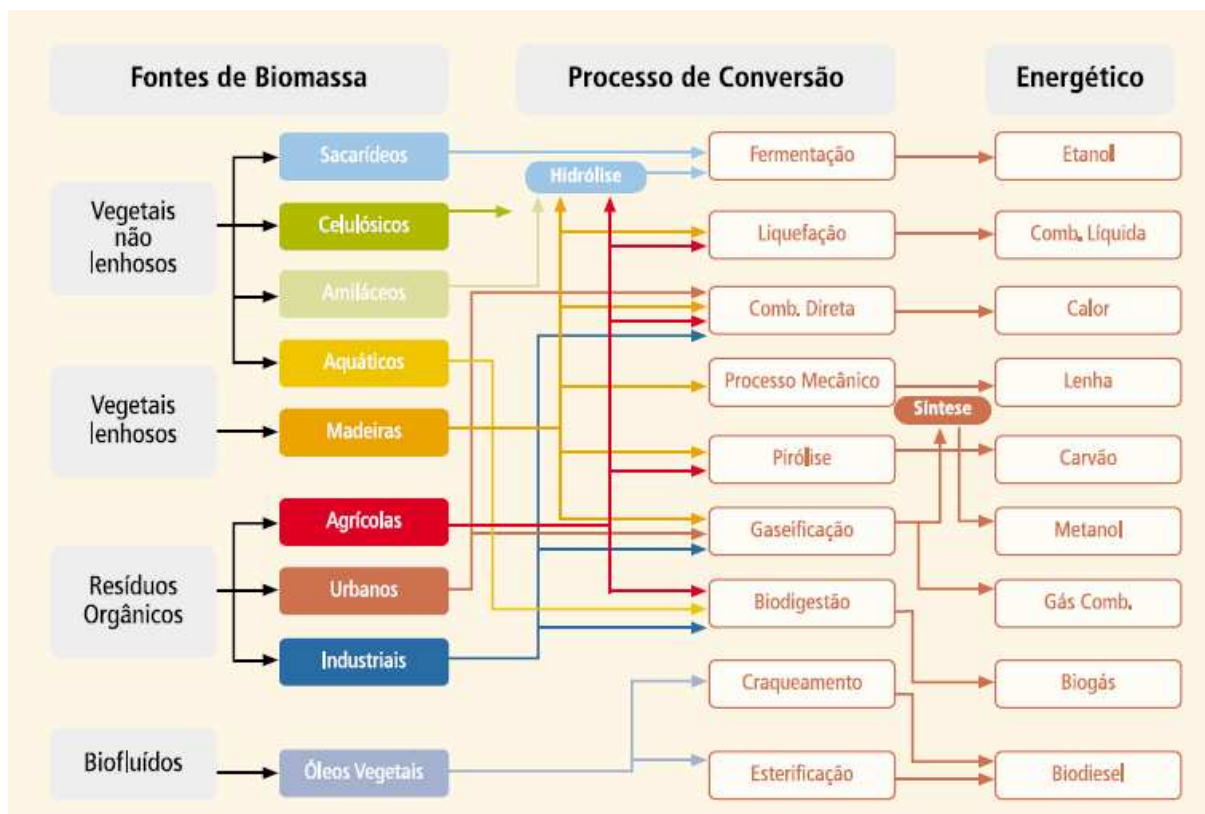
A geração de energia através da biomassa apresenta diversas vantagens, principalmente no contexto da eletrificação em sistemas descentralizados. O Brasil possui grande quantidade de biomassa disponível, principalmente de origem agro extrativista. Nas regiões isoladas localizadas ao Norte do Brasil existe grande potencial de utilização dos resíduos derivados do extrativismo ou da agricultura de subsistência para a produção de energia, sobretudo porque essas atividades se apresentam como principal atividade econômica das comunidades nessas regiões. Já existem projetos nos Estados do Pará (Município de Moju) e Amazonas (Reserva Extrativista do Médio Juruá, Comunidade do Roque) empregando óleo de palma para esta finalidade (COELHO et al., 2001).

Existem pesquisas para geração de pequeno porte (aproximadamente 20 kW) pelo processo de gaseificação de biomassa, usando resíduos localmente disponíveis de pequeno porte, que utilize a tecnologia nacional. Essa opção tecnológica já é utilizada em outros países, como a Índia e a China. O Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) e do Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS) da UnB, por exemplo, desenvolveram um gaseificador que pode utilizar cascas de árvores, caroços de açaí e lascas de madeira de cedro, e produz energia elétrica. O equipamento foi apresentado em junho de 2007 a representantes do Departamento de Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (MME) e será usado no programa Luz para Todos (ROMERO, 2007).



### 2.3.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS.

As diversas fontes de Biomassa e os processos de conversão de energia são resumidos na figura 2.10.



**Figura 2.10 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.**

Fonte: (ANEEL, 2005)

Na realidade das comunidades isoladas, a lenha é amplamente utilizada para cozimento de alimentos, mas também pode ser utilizada como uma alternativa de geração de energia elétrica para atender aos domicílios isolados sem acesso a rede elétrica convencional. Ganhador do Premio Finep da Região Norte na Categoria Inovação Social, o Fogão Gera Luz apresentado na figura 2.11, concebido pelo Sr. Ronaldo Muneo Sato que desenvolveu uma tecnologia genuinamente nacional com capacidade de gerar energia elétrica com o aproveitamento de calor de um fogão doméstico. Participaram do projeto o Governo do Estado através da Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável-SEPLANDS, Fundação de Tecnologia do Acre-FUNTAC em parcerias com as Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A – ELETRONORTE, ELETROACRE e UFAC (FUNTAC, 2007).



A nova tecnologia explora o calor produzido e desperdiçado em um fogão. Nele se incorporou um eficiente sistema para transformar a água em vapor, que passa por um motor acoplado a um gerador, concebido especialmente para este fim. O fogão produz energia para ligar cinco lâmpadas e uma TV ou rádio, evitando assim a falta de informação e o maior isolamento da população, e ainda apresenta as vantagens de não haver contato com a fuligem ocasionada pela queima da lenha, que é a oitava causa de morte no Brasil. Há total aproveitamento do calor, o que não ocorre nos fogões à lenha tradicionais, além de não produzir fumaça (FUNTAC, 2007).



**Figura 2.11 - Fogão Gera Luz**

Fonte: (FUNTAC, 2007)

A gaseificação da biomassa apresenta vantagens na geração de energia em sistemas isolados, principalmente porque utiliza resíduos, agrega valor às atividades extrativistas, e pode se adaptar a diferentes realidades regionais. A nacionalização dessa tecnologia é importante, e a Universidade de Brasília já apresenta avanços nesse sentido. Em junho de 2007, como já mencionado, apresentou o projeto chamado de gaseificador *downdraft* estratificado (ROMERO, 2007).



**Figura 2.12 - Gaseificador desenvolvido pela UnB, que transforma resíduos vegetais em energia elétrica, será utilizado em comunidade na Bahia pelo programa Luz para Todos do Ministério de Minas e Energia (foto: Cláudio Reis/UnB Agência)**

Fonte: (ROMERO, 2007)

A biomassa é inserida por uma abertura superior de um cilindro de cimento refratário de 1 metro de altura. O processo de geração do gás acontece pela queima desses resíduos, e passa por um processo de pós-tratamento para a separação de material particulado. Após essa etapa o gás pode alimentar um pequeno motor, que aciona e mantém em operação um gerador de energia elétrica. A economia na utilização do combustível fóssil é grande, já que o gás substitui a maior parte do insumo utilizado pelo motor, que é regulado para utilizar apenas 15% do óleo diesel original (ROMERO, 2007).

A primeira unidade do equipamento tinha previsão de instalação para o fim de julho de 2007, no município de Correntina, interior da Bahia, com capacidade de 5 kW. Hoje, essa comunidade tem cerca de dez famílias e vive com apenas 1 kW. Demandas maiores podem ser atendidas no futuro, já que a tecnologia desenvolvida para o gaseificador permite gerar até 30 kW, o suficiente para abastecer cerca de cem famílias com cinco pessoas cada (ROMERO, 2007).

Além disso, o sistema de gaseificação apresenta as vantagens de ser extremamente simples e não ter nenhum componente tecnológico que não possa ser fabricado no Brasil. O impacto ambiental produzido pela queima da biomassa é compensado na produção da biomassa, que sequestra carbono do meio ambiente. A produção de biomassa promove ainda a inclusão social, já que mantém as pessoas trabalhando na agricultura familiar.



## 2.4 ENERGIA HIDRELÉTRICA

### 2.4.1 DEFINIÇÕES

Podemos definir energia hidrelétrica como o aproveitamento da energia hídrica dos cursos de água para a produção de energia elétrica. Os primeiros usos da força das águas para aproveitamentos mecânicos foram o bombeamento de água e a moagem de grãos. Esses aproveitamentos se deram devido a grande disponibilidade dos recursos, facilidade de aproveitamento e principalmente pelo caráter renovável da fonte (CERPCH, 2007).

Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. É a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países e responde por cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo. No Brasil, a importância da energia hidrelétrica na matriz energética é maior ainda. Segundo dados do Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica, existem atualmente 659 empreendimentos hidrelétricos em funcionamento (CGHs, PCHs e UHEs), produzindo um total de 76.777.150 kW, o que corresponde a 77% da produção de energia elétrica total do país (ANEEL, 2007).

**Tabela 2.5 Empreendimentos de Geração de Energia em Operação.**

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	214	112.637	112.190	0,11
EOL	15	239.250	236.850	0,24
PCH	290	1.800.280	1.770.049	1,77
SOL	1	20	20	0
UHE	158	74.442.295	74.935.994	74,78
UTE	992	23.760.043	21.150.675	21,11
UTN	2	2.007.000	2.007.000	2
<b>Total</b>	<b>1.672</b>	<b>102.361.525</b>	<b>100.212.778</b>	<b>100</b>

Fonte: Banco de Informações de Geração - ANEEL. Os valores de porcentagem são referentes à Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é igual à considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.



### Empreendimentos de Geração de Energia em Operação.

(em %, total de 100.212.778 kW)

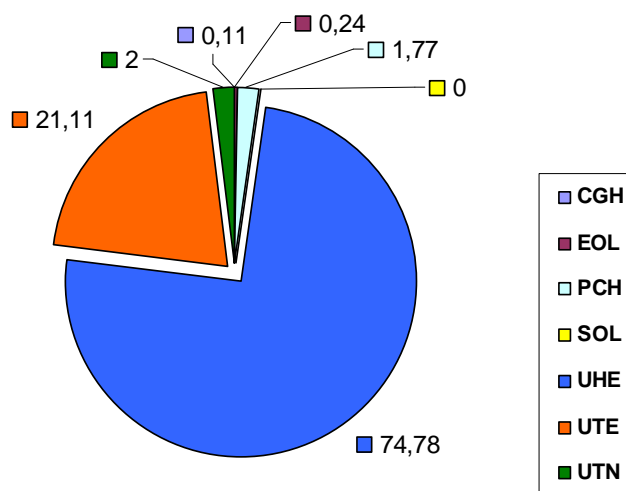


Figura 2.13 - Fontes de Geração de Energia Elétrica no Brasil, 21/11/2007.

Fonte: ANEEL

Tabela 2.6 - Matriz Energética Brasileira. Empreendimentos em Operação.

Empreendimentos em Operação							
Tipo		Capacidade Instalada		%	Total		%
		N.º de Usinas	(kW)		N.º de Usinas	(kW)	
Hidro	CGH	214	112.190	0,11	659	76.792.733	70,90
	PCH	287	1.744.549	1,74			
	UHE	158	74.935.994	74,83			
Gás	Natural	78	10.162.302	9,38	108	11.313.280	10,45
	Processo	30	1.150.978	1,06			
Petróleo	Óleo Diesel	574	2.916.286	2,69	596	4.386.180	4,05
	Óleo Residual	22	1.469.894	1,36			
Biomassa	Bagaço de Cana	235	2.926.441	2,70	279	3.984.415	3,68
	Licor Negro	13	794.817	0,73			
	Madeira	26	224.207	0,21			
	Biogás	2	20.030	0,02			
	Casca de Arroz	3	18.920	0,02			
Eólica		15	236.850	0,22	15	236.850	0,22
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	7,54
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total		1.666	108.305.458	100	1.666	108.305.458	100

Fonte: Banco de Informações de Geração da ANEEL – outubro/2007.



Onde: CGH Central Geradora Hidrelétrica; EOL - Central Geradora Eolielétrica; PCH - Pequena Central Hidrelétrica; SOL - Central Geradora Solar Fotovoltaica; UHE - Usina Hidrelétrica de Energia; UTE - Usina Termelétrica de Energia; UTN - Usina Termonuclear.

Outra característica importante do aproveitamento da energia hidráulica para geração de energia elétrica, e que a diferencia da maioria das fontes de energia renovável, é sua alta eficiência. A conversão se dá por meio do uso de turbinas hidráulicas, que através de um acoplamento mecânico aciona o rotor do gerador elétrico que transforma a energia mecânica em energia elétrica. A eficiência desse processo pode chegar a 90%. Atualmente, caracteriza-se como o processo de conversão de energia primária em energia secundária mais eficiente (ANEEL, 2005).

Os aproveitamentos hidrelétricos podem ser classificados de acordo com a capacidade ou potência instalada, além de outras variáveis como altura efetiva da queda d'água, localização, tipo de turbina, tamanho do reservatório etc. De forma geral, pode-se classificar os empreendimentos hidrelétricos em UHE (Usina Hidrelétrica), PCH (Pequena Central Hidrelétrica) e CGH (Central Geradora Hidrelétrica).

#### **2.4.2 ENERGIA HIDRÁULICA EM SISTEMAS ISOLADOS**

Pode-se observar um crescente estímulo à geração descentralizada de energia elétrica e, nesse contexto, é necessário destacar o importante papel de fontes alternativas de energia, principalmente dos pequenos empreendimentos hidráulicos. Estes tipos de geração de energia possuem as vantagens de apresentarem impactos ambientais reduzidos, que atualmente se apresentam como os principais entraves da expansão da geração de energia elétrica. Além disso, podem ser implementados próximos ao consumidor, tanto em grandes centros de carga como em áreas distantes do Sistema Interligado Nacional, atendendo a comunidades até então desprovidas de suprimento de energia elétrica, contribuindo assim com o objetivo de universalização do acesso, proporcionando desenvolvimento econômico dessas regiões e redução da pobreza dessas comunidades.

As Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH's, de forma geral, possuem potências entre 1 e 30 MW, e lago limitado a uma área máxima de 3 km<sup>2</sup> para a cheia centenária. A implantação desse tipo de empreendimento recebe diversos tipos de incentivos do governo





federal, como redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição, isenção do pagamento da compensação financeira pelo uso dos recursos hídricos. Com potências menores que as PCH's, as CGH's (até 1 MW) não precisam de autorização da ANEEL para ser instaladas.

A utilização da geração descentralizada com base em PCH's e CGH's têm mostrado grande potencial na eletrificação rural, devido aos baixos custos se comparados com a extensão de uma rede ou utilização de um sistema de geração diesel. A geração elétrica a partir deste tipo de tecnologia permite suprir pequenos grupos populacionais isolados e cria as condições para o desenvolvimento de micro redes e das condições básicas para formação de uma infra-estrutura local. As CGH's são projetos com pequeno prazo de maturação, o que possibilita uma melhor distribuição no tempo dos investimentos e sua rápida absorção (VIANNA, VIEIRA, NASCIMENTO, 2000). Todas essas vantagens também existem para os projetos que utilizam as turbinas hidrocinéticas, cujos detalhes são apresentados no item 2.4.3, a partir de dados do projeto desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

#### **2.4.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS – TURBINA HIDROGINÉTICA.**

O funcionamento da turbina hidrocinética é baseado no uso da força das correntezas para gerar energia elétrica, ou seja, utiliza a energia cinética presente nos cursos d'água ou marés, sem a necessidade de intervenção estrutural no meio ambiente, já que essa tecnologia não utiliza a energia potencial como a maioria dos empreendimentos hidroenergéticos, que necessitam da construção de barragens, formação de lagos, que afetam a fauna e flora. Existem turbinas que utilizam esse princípio de diversas formas, como as que funcionam submersas, ancoradas no fundo do rio ou colocadas em balsas etc. (CERPCH, 2007).

Pesquisas na Universidade de Brasília – UnB, para o projeto da turbina hidrocinética tiveram início em 1986. Estudos para a implementação da primeira turbina iniciaram em 1994, procurando atender o desejo do médico Dr. Edgard Van Den Beuch, que buscava uma alternativa de suprimento de energia elétrica para um posto médico localizado na comunidade de Arrojelândia, município de Correntina na Bahia. O funcionamento da turbina possibilitou geração e fornecimento contínuo de 0,8 kW de energia elétrica com 220V para o posto

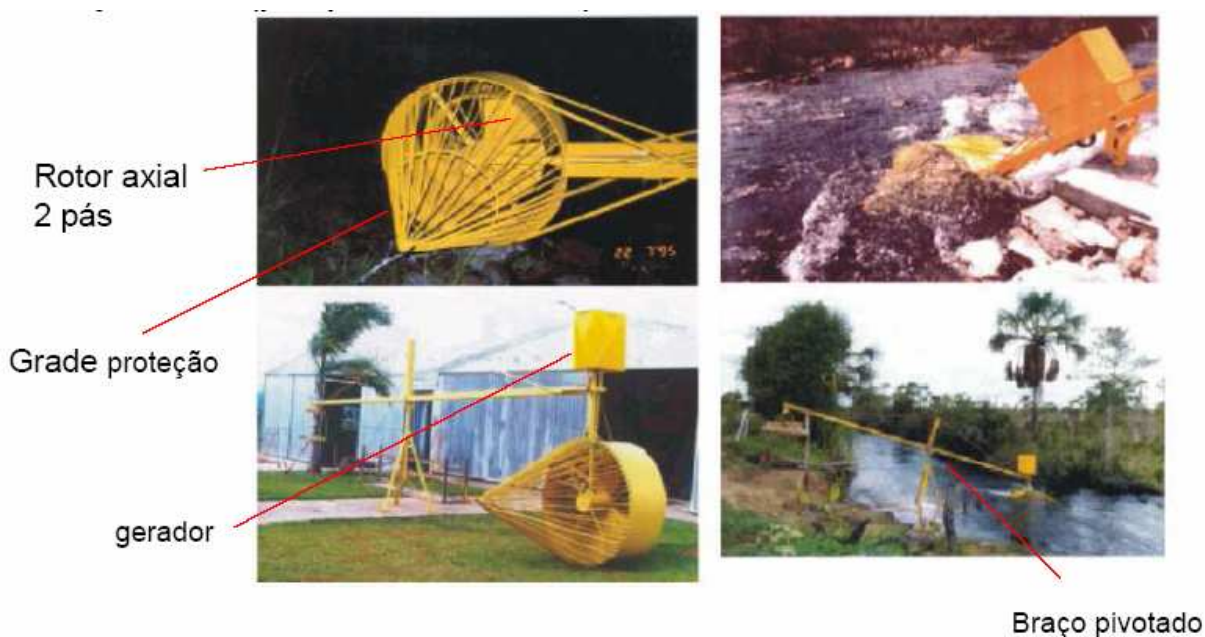




médico, beneficiando, aproximadamente, 8.000 pessoas (FELIZOLA, MAROCCOLO, FONSECA, 2007).

Participaram inicialmente do projeto, os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília - UnB, Lucio Renó Salomon, Aldo João de Sousa e Antonio Manoel Dias Henriques. Mais tarde se incorporaram ao projeto o Engenheiro Clovis de Oliveira Campos, Engenheiro Luiz Fernando Balduino e Engenheiro Rudi Henri Van Els (FINATEC, 2007).

O objetivo principal do desenvolvimento da tecnologia é fornecer energia elétrica para pequenas comunidades ribeirinhas ou localidades onde seria inviável a construção de barragens, que consiga vencer principalmente os desafios de sustentabilidade e baixa manutenção, além de custos de investimento (FINATEC, 2007).



**Figura 2.14 - Turbina Hidrocinética desenvolvida pelo LEA-UnB, Geração 1: Instalação Julho 1995 em Correntina-Bahia (1,5 kW).**

Fonte: (BRASIL-JUNIOR, 2007)

A primeira unidade da turbina entrou em operação em julho de 1995, atendendo a um posto médico e a uma residência, com todos os equipamentos e eletrodomésticos usuais. Além das vantagens ambientais apresentadas, já que não precisa de obras de engenharia para



instalação, não afeta a fauna e flora local, as turbinas apresentam alta durabilidade, em média 30 anos, com produção ininterrupta de energia. A primeira turbina, chamada de Geração 1, com capacidade de gerar até 1.2 kW, encontra-se em funcionamento até hoje e não ocorreu queima de nenhum eletrodoméstico, o que caracteriza alta confiabilidade desse modelo (ELS et al., 2006).

A turbina hidrocínética requer uma velocidade acima de 1,5 m/s (5,4 km/h) e uma profundidade mínima de 1m. Nessas condições, é possível obter 400 kWh por mês. Em melhores condições, pode-se atingir uma produção de energia da ordem de 3000 kWh por mês, equivalente ao consumo médio de 4 apartamentos de 3 quartos, em um bairro de classe média (FINATEC, 2007).

No Brasil, a experiência de maior sucesso na geração de energia elétrica usando a tecnologia da turbina hidrocínética é associada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília – UnB. As pesquisas já renderam o desenvolvimento de três gerações de turbinas hidrocínéticas. A segunda geração foi instalada também em Correntina – BA (em 2005 com potência de 2 kW) e Maracá – AP (em 2006 com potência de 2 kW). A terceira geração, ainda em estudo, apresenta inovações como a presença de um difusor otimizado, integração do gerador ao núcleo, entre outros.



**Figura 2.15 - Turbina Hidrocínética desenvolvida pelo LEA-UnB, Geração 2: Instalação Agosto-Outubro de 2006 em Maracá - Amapá (2 kW).**

Fonte: (BRASIL-JUNIOR, 2007)

São estudados diversos arranjos elétricos para a geração de energia a partir do acoplamento entre turbina hidrocínética e gerador elétrico. Geralmente o fornecimento de eletricidade é realizado em 110 ou 220 volts, em corrente alternada, podendo alimentar diretamente eletrodomésticos comuns sem o uso de equipamentos especiais, mas existem pesquisas com arranjos que utilizam geração em corrente contínua, motivado principalmente



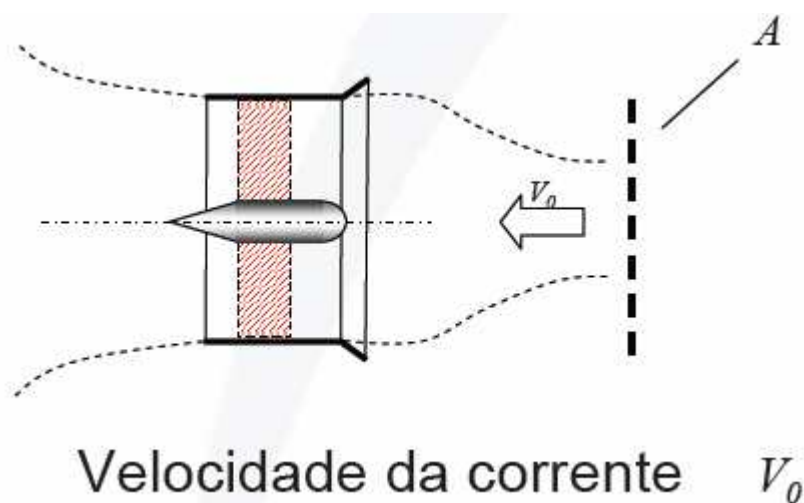
por características dos geradores, como tamanho e disponibilidade no mercado. (FINATEC, 2007)

A geração de energia com a turbina hidrocinética obedece a seguinte fórmula:

$$\text{Potência teórica máxima} - P_e = k_b \cdot A \cdot \rho \cdot V_0^3 / 2$$

Onde:

- $A$  = área das pás
- $\rho$  = densidade da água em  $\text{kg/m}^3$
- $V_0$  = velocidade da água em metros/segundo
- $k_b$  = eficiência



**Figura 2.16 - Modelo para cálculo de Potência.**

Fonte: (BRASIL-JUNIOR, 2007)

Existem limitações, principalmente com relação ao peso das turbinas, o que dificulta a instalação em locais de difícil acesso, e alto custo de investimento e instalação. Otimizações ocorreram nos últimos projetos procurando aumentar o aproveitamento da energia hidráulica disponível, que permitiram uma construção bastante robusta. A máquina desenvolvida pelo LEA se diferencia dos projetos apresentados na literatura, principalmente por apresentar um



estator na entrada da hélice que direciona o fluxo da água que entra na turbina para melhorar o ângulo de ataque na hélice. Dessa forma, melhora a transformação da energia hidráulica em mecânica, além de uso de tubo de sucção e de cones de entrada e de saída que minimizam a turbulência gerada na saída da turbina (FINATEC, 2007).

Por exemplo, uma turbina com geração nominal de 1kW, pode fornecer um consumo de 720 kW/hora por mês. Essa energia é mais do que suficiente para garantir um consumo padrão de uma residência, nos níveis de conforto de uma casa popular nos centros urbanos. Com isso é possível acionar eletrodomésticos convencionais, como geladeira, *freezer*, bomba de água, televisão e iluminação (FINATEC, 2007).

Podem-se exemplificar os custos dessa tecnologia analisando os dados para o cálculo da energia gerada no projeto instalado em Maracá – AP no segundo semestre de 2006, apresentados na tabela 2.7.

**Tabela 2.7 - Cálculo do custo da energia gerada pela turbina hidrocínética instalada em Maracá – AP em 2006.**

Custo do equipamento	CE	15.000,00	Reais
Custo de Instalação	CI	32.500,00	R\$
Transporte		6.500,00	R\$
Obras civis de instalação base		13.500,00	R\$
Serviços de apoio montagem em campo		6.500,00	R\$
Montagem do secador de frutos		6.000,00	R\$
Custo de Manutenção e operação /ano	CM	5.600,00	R\$ /ano
Salário mínimo de um operador por ano (350*13)		4.550,00	R\$ /ano
Custo de peças reposição e lubrificante		1.050,00	R\$ /ano
Investimento inicial	I	47.500,00	R\$
Custo de insumo energético CC	CC	0	
Valor do subproduto	VS	0	
Valor residual	R	0	
Vida útil	v	10	anos
Potência instalada	PI	1	KW
Fator de capacidade (21 horas por dia funcionando)	FC	0,8750	
Energia gerado durante o ano	Em	7665	kWh
Taxa de juros (12% ano)	tx (i)	0,12	%
Custo distribuído total por ano		14.006,75	R\$
Custo da energia kWh em reais		1,71	R\$/kWh

Fonte: (BRASIL-JUNIOR, 2007)



# **CAPÍTULO 3**

## **OPÇÕES PARA CONVERSÃO DA ENERGIA MECÂNICA EM ELÉTRICA**

### **3.1 ALTERNATIVAS - INTRODUÇÃO**

Existem diversas alternativas de geração de energia para o atendimento de regiões isoladas. As características geralmente encontradas nessas regiões são a baixa densidade demográfica e de renda, infra-estrutura precária, elevada distância dos grandes centros, locais remotos e situados muitas vezes em emaranhados de rios, etc. Soma-se a isso o fator econômico e a eletrificação rural por extensão da rede elétrica se mostra inviável na maioria dos casos das comunidades isoladas.

Atualmente, o fornecimento de energia em locais isolados se dá de forma descentralizada, utilizando principalmente a Geração Diesel-Elétrica. Essa forma de produção de energia se caracteriza principalmente pelo elevado custo operacional (compra, transporte e distribuição do óleo diesel), baixa qualidade da energia produzida, além de impacto ambiental pela queima de combustível fóssil com produção de gases que aumentam o efeito estufa.

A geração de energia através de fontes renováveis (solar, eólica, biomassa e hidráulica) apresenta diversas vantagens, principalmente para a geração descentralizada no atendimento de sistemas isolados de pequeno e médio porte, como os já apresentados na revisão bibliográfica. Apesar disso, a utilização dessas formas de energia ainda está em segundo plano. (BARBOSA et al., 2004)

Para uma mesma fonte, existem diversos arranjos e tecnologias para a obtenção de energia. No âmbito da geração em sistemas descentralizados, um dos maiores desafios para a

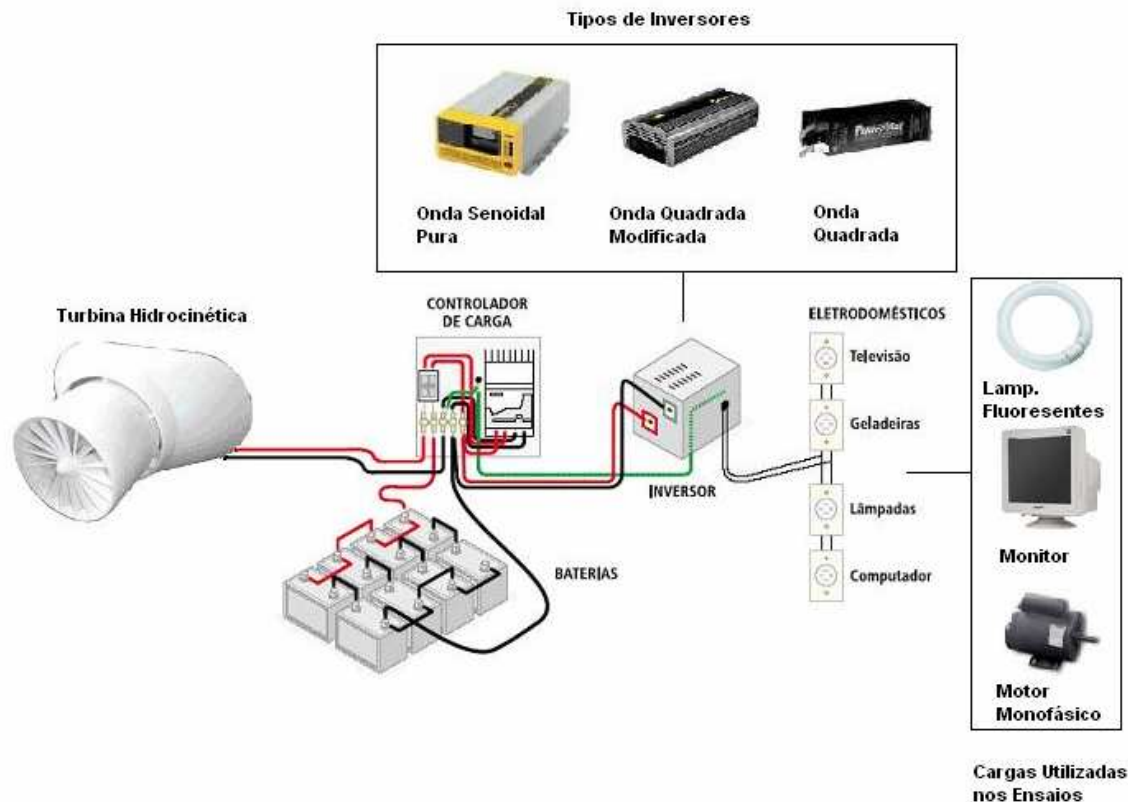


implementação eficaz de uma tecnologia consiste na geração de energia com uma menor complexidade de manutenção.

O presente capítulo aborda as características tecnológicas, de investimento, operação e manutenção, de alguns dos tipos de arranjo utilizados para geração de energia utilizando uma turbina hidrocínética, a fim de que se possam comparar vantagens e desvantagens, de acordo com as especificidades de aplicações, isolamento das comunidades, disponibilidade de manutenção, etc. No final do capítulo é apresentada a metodologia para a simulação de algumas das alternativas aqui destacadas.

### 3.1.1 GERADOR CORRENTE CONTÍNUA COM INVERSOR E UTILIZAÇÃO DE CARGAS CA.

A geração de energia utilizando um arranjo com controlador de carga, banco de baterias e inversor é bastante comum, sendo encontrada em sistemas que utilizam a energia solar, eólica e na turbina hidrocínética. Um exemplo desse arranjo é mostrado na figura 3.1:



**Figura 3.1 - Arranjo de Geração de Energia utilizando Turbina Hidrocínética com Gerador Corrente Contínua, Controlador de Carga, Banco de Baterias e Inversor.**

Fonte: Atlas Aneel Modificado.

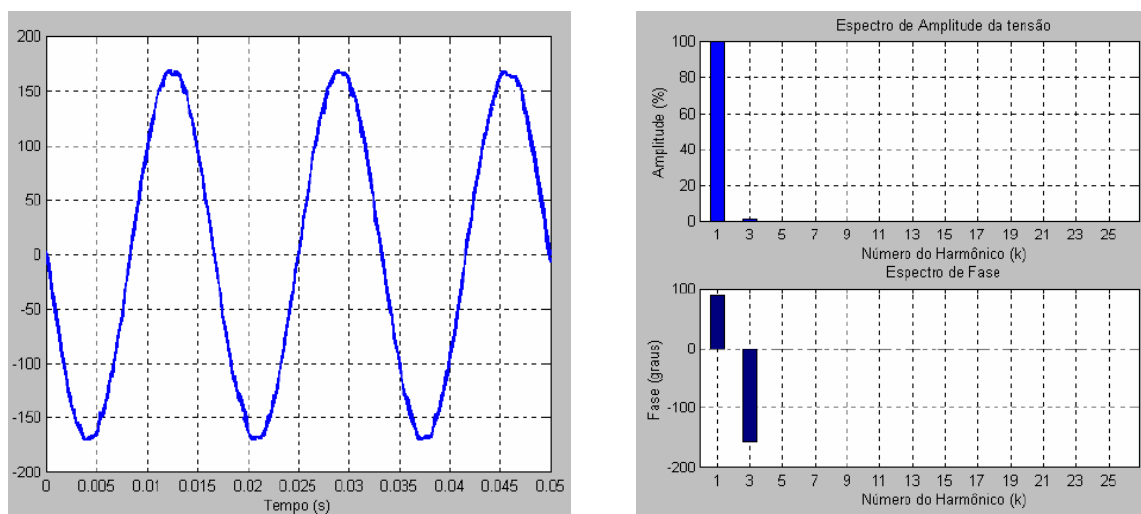




As vantagens apresentadas nesse tipo de arranjo são principalmente o controle elétrico da qualidade da energia gerada, proporcionado pela utilização das baterias. Dessa forma, a energia utilizada pelas cargas não é influenciada por alterações no funcionamento da turbina, já que utilizam a energia disponível nas baterias, que são carregadas pelo gerador elétrico acoplado à turbina hidrocínética.

Os inversores comercialmente disponíveis possuem forma de onda senoidal, quadrada modificada ou quadrada.

Os inversores de onda senoidal possuem baixa taxa de distorção harmônica de tensão (DHTv) de 1 a 5% e alta eficiência (de 85 a 95%). A qualidade da tensão gerada nesses inversores muitas vezes se mostra melhor que a disponibilizada pela rede. Apresentam funcionamento simples e dispositivo de desligamento automático para sobretensão e sub-tensão. Um exemplo de forma de onda e espectro de amplitude e fase da tensão para a saída de um inversor de onda senoidal pura é mostrado na figura 3.2:



**Figura3.2 - Exemplo Forma de Onda de Circuito Aberto de Inversor de Onda Senoidal e Espectro de Amplitude e de Fase da Tensão.**

Fonte: (GALHARDO, PINHO, 2004).

O custo dos inversores de onda senoidal pura é o mais alto entre os inversores, principalmente por apresentar um desempenho melhor. Os preços de alguns inversores são apresentados na tabela 3.1 e 3.2.

**Tabela 3.1 – Pesquisa de preços de inversores de onda senoidal, marca Xantrex.**

Modelo	Preço
Inversor ProSine 1000 GFCI (12/120 senóide pura)	R\$ 4.990,00
Inversor ProSine 1000 GFCI (24/120 senóide pura)	R\$ 3.990,00
Inversor ProSine 1000i (24/230 senóide pura)	R\$ 4.990,00
Inversor ProSine 1800i (24/230 senóide pura)	R\$ 5.890,00

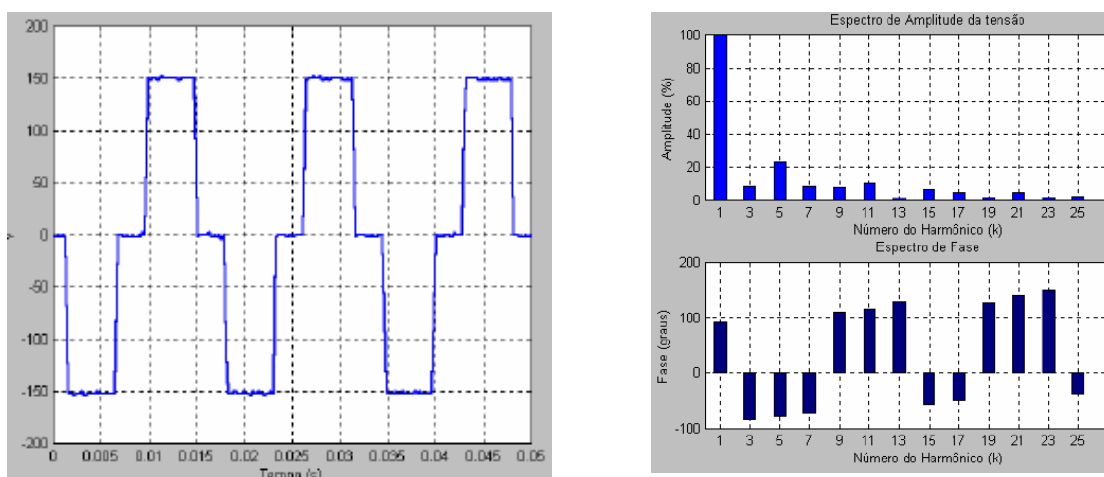
Fonte: <http://www.brasilhobby.com.br/listagem.asp?NSubCat=318>. Acesso em 26/11/2007.

**Tabela 3.2 - Pesquisa de preços de inversores de onda senoidal, marca Xantrex.**

Modelo	Preços		
	Altapower.com	Amazon.com	Xantrex.com
PROsine 1000 12V HW/XFR	\$799.95	\$756.76	-
Inversor ProSine 1000 GFCI (12/120 senóide pura)	\$749.95	\$959.43	US\$890.00
Prosine 1800	\$1,149.99	\$1,059.89	US\$1,300.00
Xantrex PROsine 1800/24V HW/TR	\$1,299.99	\$1,480.94	-
Xantrex PROsine 1800/12V HW/TR	\$1,149.99	\$1,300.00	-

Fonte: <http://www.xantrex.com/web/id/10/p/1/pt/7/product.asp>. Acesso em 26/11/2007.

Os inversores com onda do tipo quadrada modificada, ou senoidal modificada, são os mais comuns comercialmente. Caracterizam-se por apresentarem um Taxa Harmônica de Tensão (THDv) de 15 a 35% menores que os de onda quadrada, eficiência (de 80 a 95%) um pouco menor que os de onda senoidal pura, além de preços mais acessíveis. Um exemplo da forma de onda de um inversor de onda quadrada modificada é apresentado na figura 3.3.

**Figura 3.3 - Exemplo Forma de Onda de Circuito Aberto de Inversor de Onda Quadrada Modificada e Espectro de Amplitude e de Fase da Tensão.**

Fonte: (GALHARDO, PINHO, 2004).





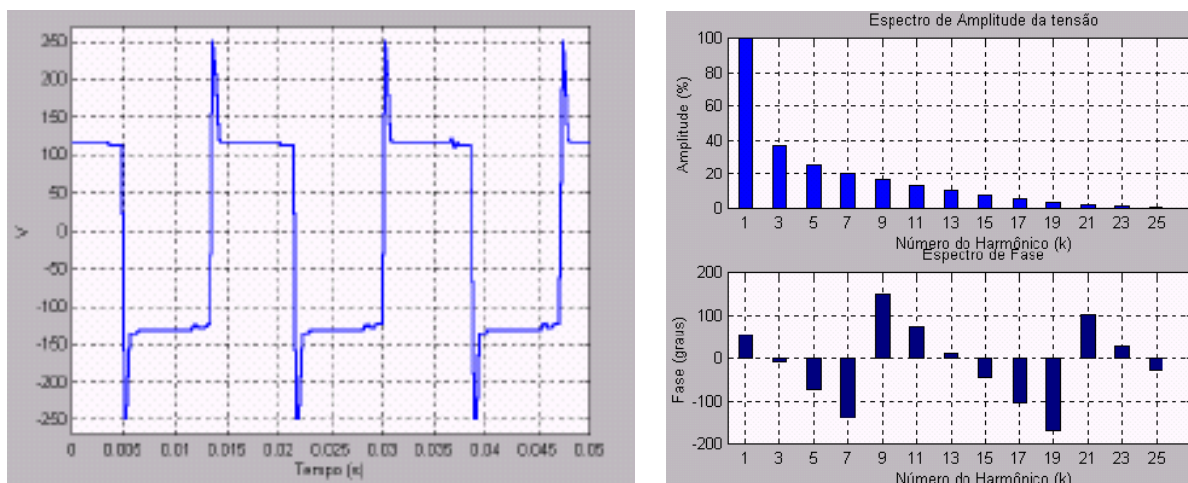
Uma estimativa de preços é apresentada na tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Pesquisa de preços de inversores de onda quadrada modificada, marca Xantrex.**

Modelo XPower Plus (Xantrex)	Preços	
	Comércio Local	Amazon.com
700W	R\$ 720,00	\$83.69
600W	R\$ 550,00	-
400W	R\$ 380,00	\$37.49
175W	R\$ 250,00	\$35.89
150W	R\$ 200,00	-

Fonte: <http://www.xantrex.com/web/id/1/type.asp>. Acesso em 26/11/2007.

Os inversores de onda quadrada apresentam alta taxa de Distorção Harmônica Total de Tensão (THDv) superior a 40%, baixa eficiência (de 60 a 80%). Alguns fabricantes indicam limitações de uso, como por exemplo de refrigeradores, mas em alguns casos, podem apresentar resultados melhores que os inversores de onda quadrada modificada. Quase não são mais encontrados no mercado. Um exemplo de onda do inversor de onda quadrada é apresentado a seguir:



**Figura 3.4 - Exemplo Forma de Onda de Circuito Aberto de Inversor de Onda Quadrada e Espectro de Amplitude e de Fase da Tensão.**

Fonte: (GALHARDO, PINHO, 2004).

As baterias, para o caso da turbina hidrocínética, tem uma finalidade diferente das fontes alternativas intermitentes, como solar e eólica. Para fontes intermitentes, geralmente as



baterias são carregadas quando existe disponibilidade da fonte de energia e fornecem energia quando esta não pode suprir a necessidade das cargas. Para a turbina hidrocínética, a geração de energia acontece 24 horas e varia de acordo com o cubo da velocidade da água. O gerador CC fornece energia de acordo com a vazão disponível, que movimenta a turbina. Nesse caso, a bateria funciona como um regulador de tensão, fornecendo a tensão necessária para o inversor, cujo funcionamento não permite grandes variações na tensão de entrada.

A utilização de baterias, como já mencionado, caracteriza um impacto ambiental negativo, já que necessitam de um descarte especial e isso se mostra difícil, principalmente em comunidades isoladas. Além disso, é necessária a manutenção das baterias, que devem ser substituídas após alguns anos de uso. O preço das baterias constitui uma parcela significativa do investimento do arranjo, variando com o tipo e capacidade (Ah) desejada, de acordo com o projeto. Uma pesquisa de preços é mostrada na tabela 3.4:

**Tabela 3.4 – Pesquisa de preços de baterias.**

Modelos	Capacidade Ah (Tensão Nominal 12 Vcc)	Preços (R\$)
12MC36 – Moura	36	190,00
12MC45 – Moura	45	238,00
12MC63 – Moura	63	346,00
12MC105 – Moura	105	568,00
12MC150 – Moura	150	740,00
12MC175 – Moura	175	845,00
12MC220 – Moura	220	1.157,00
DF 2000 - DELPHI	115	415,00
DF 3000 - DELPHI	185	840,00

Fonte: [www.energia-alternativa.com.br](http://www.energia-alternativa.com.br). Referência: 22/08/2007. Acesso em 08/12/2007.

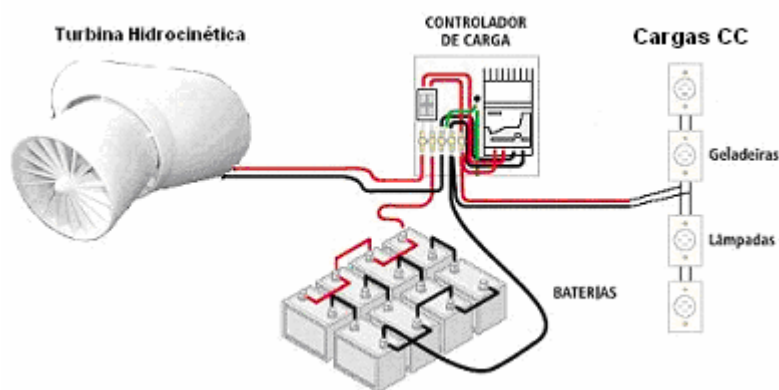
O arranjo descrito apresenta desvantagens principalmente em relação à manutenção. Por se constituir de diversos aparelhos e equipamentos, a probabilidade do conjunto apresentar problemas no funcionamento é maior, dificultando a acessibilidade da tecnologia, principalmente para comunidades isoladas.

### 3.1.2 GERADOR CC E UTILIZAÇÃO DE CARGAS CC

A geração em corrente contínua possibilita também a utilização de cargas especiais, que são conectadas diretamente à saída das baterias, utilizando portanto corrente contínua. Os produtos existentes são principalmente lâmpada com diodo LED para luminárias com capacidade entre 0.4 e 1.2 W (12 e 24 V), lâmpadas fluorescentes compactas com capacidade



entre 5 e 30 W (12 e 24 V); Refrigeradores e "freezers" com capacidade entre 32 e 225 litros (12 e 24 V). Muitos refrigeradores CC são construídos de forma que seu funcionamento não apresenta o pico de energia característico dessas cargas, reduzindo o consumo de energia.



**Figura 3.5 - Arranjo de Geração de Energia utilizando Turbina Hidrocinética com Gerador CC, Controlador de Carga, Banco de Baterias e Cargas CC.**

Fonte: Atlas Aneel Modificado.

Apesar de apresentar a vantagem de não precisar de equipamentos para transformar a energia utilizada pelas cargas, com arranjo sendo utilizado principalmente em locais que necessitam atender principalmente iluminação, apresenta desvantagens como dificuldade de reposição das cargas, que não são encontradas facilmente no mercado. O sistema fica limitado à utilização de cargas CC, que não possuem grande diversidade. Além disso, são mais caras que os similares em corrente alternada. Por exemplo, uma lâmpada fluorescente compacta 12 Vcc, 30 W, custa em média US\$ 30, enquanto um freezer CC custa em média US\$ 1.000 (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2007).

### 3.1.3 GERADOR ASSÍNCRONO

As máquinas elétricas rotativas podem ser utilizadas tanto como motor quanto como gerador. O funcionamento em cada uma das possibilidades tem, porém, características intrínsecas que, dependendo da aplicação, sugerem seu uso mais frequente para um ou outro caso (CAMPOS, 2004).

As máquinas assíncronas são caracterizadas por sua robustez, construção simples (especialmente as máquinas com rotor em gaiola de esquilo), baixo custo, ampla disponibilidade e alta relação potência-peso (W/kg), são usualmente utilizadas como motores.



Sua aplicação como gerador de energia elétrica é útil principalmente quando se deseja manter frequência e tensão estabilizadas, mesmo quando existe rotação variável imposta ao eixo. Além disso, para produzirem potência ativa, consomem potência reativa indutiva. Nesse contexto, o gerador assíncrono é bastante utilizado em turbinas eólicas, cuja rotação depende da velocidade do vento (CAMPOS, 2004). A turbina hidrocínética apresenta um comportamento análogo, dependendo da variação da velocidade das correntezas, que varia ao longo das estações do ano. A utilização do gerador assíncrono também se justifica nesse caso.

A principal desvantagem dos geradores assíncronos, principalmente para geração de poucos kW, é que a disponibilidade no mercado é menor, além do tamanho das máquinas, que são produzidas nos mesmos modelos dos geradores de maior potência.

#### **3.1.4 GERADOR COM IMÃ PERMANENTE**

Os geradores com imã permanente são presentes em diversas aplicações. A utilização da tecnologia se dá principalmente por vantagens na manutenção, já que estes dispensam as escovas, as únicas partes sujeitas a atrito e conseqüente desgaste, se restringem aos rolamentos do rotor. Além disso, permitem uma produção de eletricidade livre de ruídos elétricos e da incômoda interferência nos aparelhos de televisão, causados pelas escovas dos geradores (INOVA UNICAMP, 2007).

Existe produção desses geradores nacionalmente, com tecnologia consolidada pela empresa Geradores NH de Minas Gerais. A produção começou em 1972 e já ultrapassou a marca de 13.000 unidades comercializadas, dispondo atualmente de uma linha de geradores com potência nominal variando de 300 a 10.000 watts (INOVA UNICAMP, 2007).

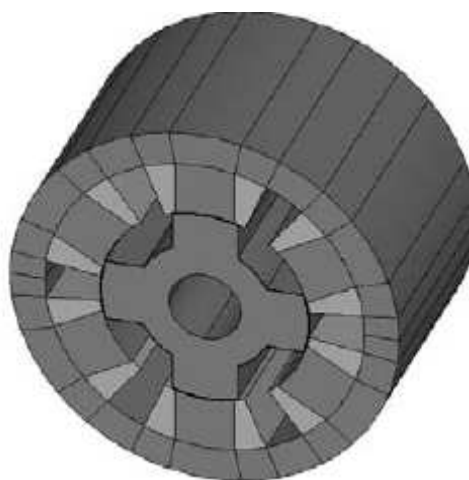
A principal desvantagem desse tipo de geração é a impossibilidade de auto-correção da variação de tensão provocada pela mudança de carga. Mas para aplicações de pequeno porte existem várias soluções para esse problema. A mais simples, e utilizada em alguns locais que utilizam os geradores NH, é a regulação manual. O controle é feito com base num simples voltímetro e a ajuda de um banco de lâmpadas incandescentes, que são mantidas acessas em um número necessário a garantir o lastro de carga, sendo ligadas ou desligadas individualmente de forma a garantir a estabilidade da tensão em 110 V. Apesar disso, a NH oferece um controlador eletrônico externo que garante um valor de tensão estabilizado, independente da carga (INOVA UNICAMP, 2007).



### 3.1.5 GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O funcionamento da máquina de relutância variável se baseia no princípio de que o rotor tende a se deslocar para uma posição onde a relutância é mínima a qual corresponde à posição onde a indutância da bobina excitada do estator é máxima (SOTELO; ROLIM; FERREIRA, 2002).

Pode-se destacar como vantagens desse tipo de máquina o oferecimento de grande robustez e custo de produção estimado reduzido. A figura 3.5 apresenta uma vista em corte de uma máquina de relutância variável, a qual apresenta em sua configuração 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor. A simetria do circuito magnético permite que o fluxo enlaçado mútuo seja praticamente nulo, mesmo para condições de saturação do motor. Desta forma a indutância própria de cada fase será responsável por todo torque que for produzido pelo motor. A indutância própria de uma fase varia linearmente com a posição angular do rotor, quando o motor opera sem saturação. Já na presença de saturação, esta relação deixa de ser linear (SOTELO; ROLIM; FERREIRA, 2002).



**Figura 3.6 - Vista em corte da MRV de configuração 6/4 (numero de pólos do estator e do rotor, respectivamente)**

Apesar das máquinas serem robustas, de eficiência energética mais elevada que as máquinas convencionais, apresentam exigências mais complexas no que diz respeito ao seu controle (SOTELO; ROLIM; FERREIRA, 2002).



O uso desse tipo de máquina encontra aplicação em armazenamento cinético de energia, com a finalidade principal de reduzir problemas de qualidade de energia em sistemas industriais.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.2.1 MATERIAIS: LABORATÓRIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA E FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA DA UNB.

O laboratório de Qualidade de Energia possui uma estrutura completa para simulação e análise de formas de onda e características de qualidade de energia. No presente trabalho, utilizou-se a fonte da California Instruments modelo 5001 série iX. O instrumento combina a flexível fonte de potência AC/DC com um analisador de potência de alto desempenho.



**Figura 3.7 - Fonte 5001 iX – California Instruments.**

A abordagem integrada da fonte evita desorganizações de cabos e instrumentos geralmente encontrados em ensaios de teste de potência. Todas as conexões são internas, praticamente eliminando a necessidade de multímetros digitais, analisadores de harmônicas, correntes etc.

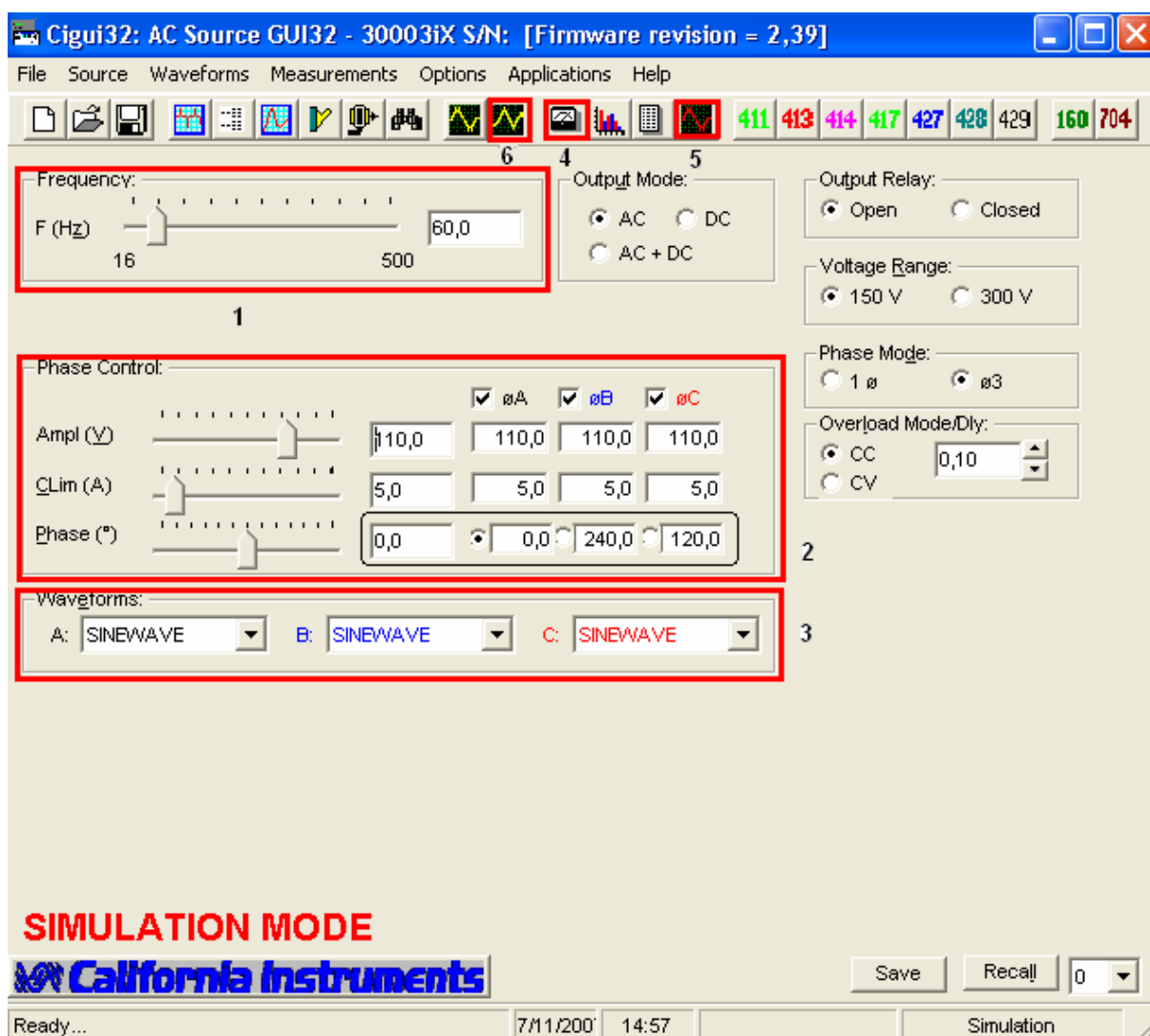
Com regulação precisa da saída que pode ser realizada a partir dos comandos disponíveis na parte frontal dos módulos da fonte e também através da conexão com computador. Com o programa CIGUI32 AC Source Control, todos os controles e medições podem ser feitos pelo computador, de forma fácil e prática. A fonte mostra-se uma excelente ferramenta em diversas áreas de aplicação para testes de potência AC e DC. Diferentes funções estão disponíveis e foram utilizadas nos ensaios realizados, como:

- Controle do regime permanente da saída;
- Criar, executar, guardar, carregar e imprimir programas transitórios;



- Gerar e salvar ondas harmônicas;
- Gerar e salvar ondas arbitrárias;
- Medidas padrão dos parâmetros elétricos;
- Download de dados de um osciloscópio de armazenamento digital;
- Captar e exibir a forma de onda de tensão e corrente;
- Medir, exibir, imprimir e registrar harmônicas de tensão e corrente.

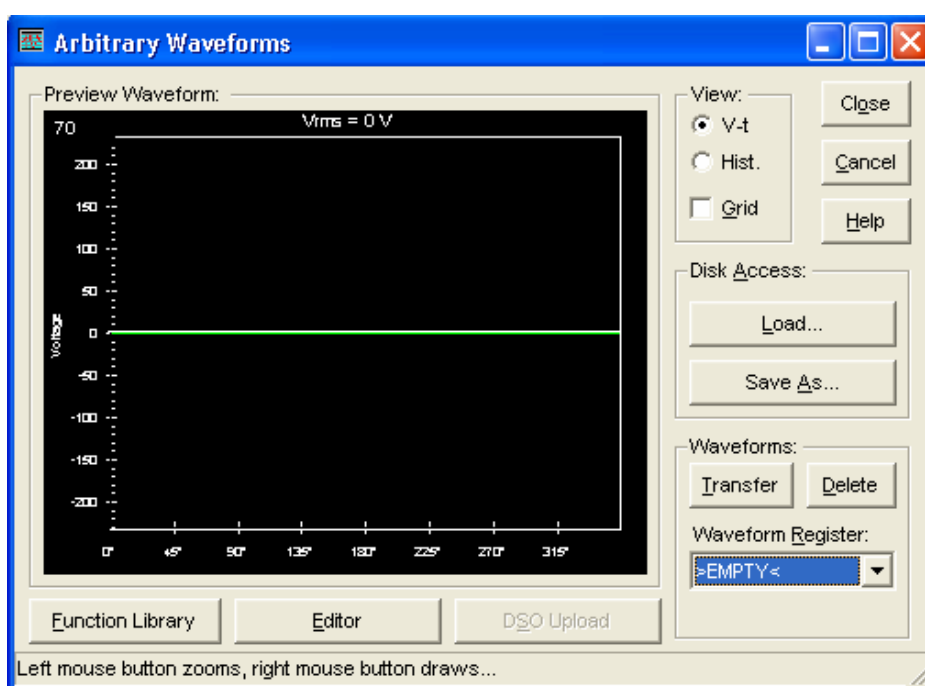
A tela principal do software CIGUI32 AC Source Control é apresentada na figura 3.6:



**Figura 3.8 - Tela Principal do Programa de Controle da Fonte 5001 iX – Califórnia Instruments.**



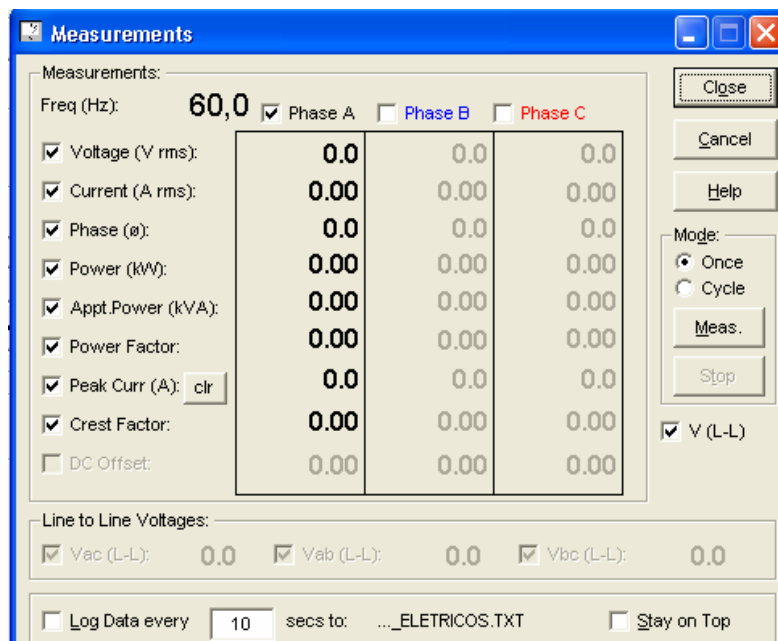
O Painel principal apresenta o Controle de Frequência (em 1, Frequency), onde se pode escolher a frequência de operação da forma de onda para uma faixa de 16 a 500 Hz. Os valores de Amplitude, Corrente Limite e Ângulo de Fase das fases A, B e C podem alterados independentemente em Phase Control (2). A forma de onda na saída da fonte pode ser escolhida em Waveforms (3). Existem formas de onda na biblioteca padrão do programa, como a SINEWAVE, SQUARE, ou pode-se optar por desenhar a forma de onda desejada, em Arbitraty Waveform (6). Essa função permite construir uma forma de onda através de uma tabela de 1024 células, ou pode-se desenhar no campo Preview Waveform com o próprio mouse.



**Figura 3.9 - Função Arbitraty Waveform - CIGUI32.**

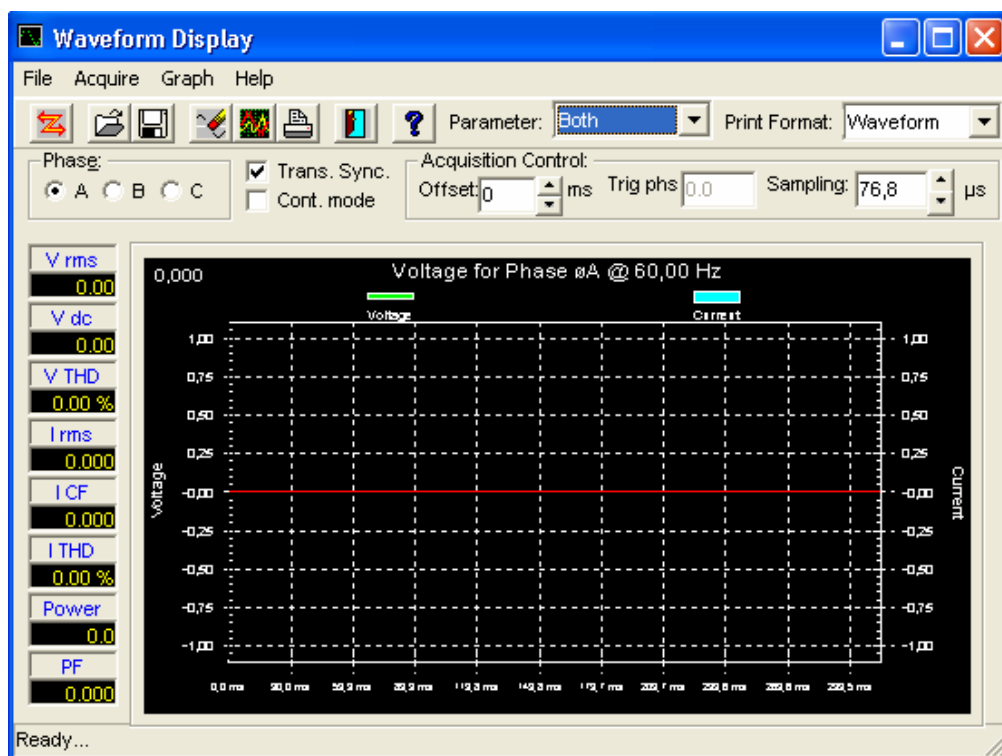
O programa apresenta ainda opções que fornecem diversos tipos de medições. Em Measurements (4), a tela fornece os valores de Tensão (V rms), Corrente (A rms), Phase, Potência (kW), Potência Aparente (kVA), Fator de Potência, Corrente Máxima do ciclo (A). Existe a opção das medições serem realizadas uma vez ou em ciclos pré-determinados. É possível escolher ainda quais fases devem ser observadas.





**Figura 3.10 - Função Measurements - CIGUI32.**

As formas de onda da tensão e corrente podem ser observadas em Waveform Display (5). Nessa tela, mostrada a seguir, pode-se escolher o parâmetro a ser observado, como tensão, corrente, ou ambos. A fase deve ser escolhida e a forma de onda é mostrada. Na barra lateral, algumas medições são mostradas, como distorção harmônica total de tensão e corrente, entre outras.



**Figura 3.11- Função Display Waveform - CIGUI32.**



Medidas adicionais são necessárias para a análise do comportamento do motor utilizado no experimento. Para tanto se utilizou o multímetro Minipa ET 2800, que possui a função de medida de temperatura, que foi adquirida na carcaça do motor, de acordo com a figura 3.12. A velocidade de rotação foi adquirida utilizando o tacômetro digital Minipa MDT 2238A.



**Figura 3.12 - Aquisição da temperatura do motor monofásico utilizando o multímetro Minipa ET 2800.**

Podem-se agrupar as cargas geralmente encontradas em comunidades rurais, atendidas por sistemas isolados, em três grupos de cargas: iluminação, refrigeração e entretenimento. As cargas utilizadas nos ensaios e suas características nominais estão listadas a seguir:

Iluminação:

Carga 1: 2 lâmpadas fluorescentes circulares OSRAM (22W+32W), Reator Eletrônico – 127 V, 0.84 A, 50/60 Hz., Potência: 60W,  $FP \geq 0.50$  C.

Refrigeração:

Carga 2: Motor Monofásico SIEMENS 1BE4545-2NK, Tensão: 115 V, Potência: 75 W, 3400/2700 U/min, Frequência 50/60 Hz, C= 7.5  $\mu$ F 420 V.

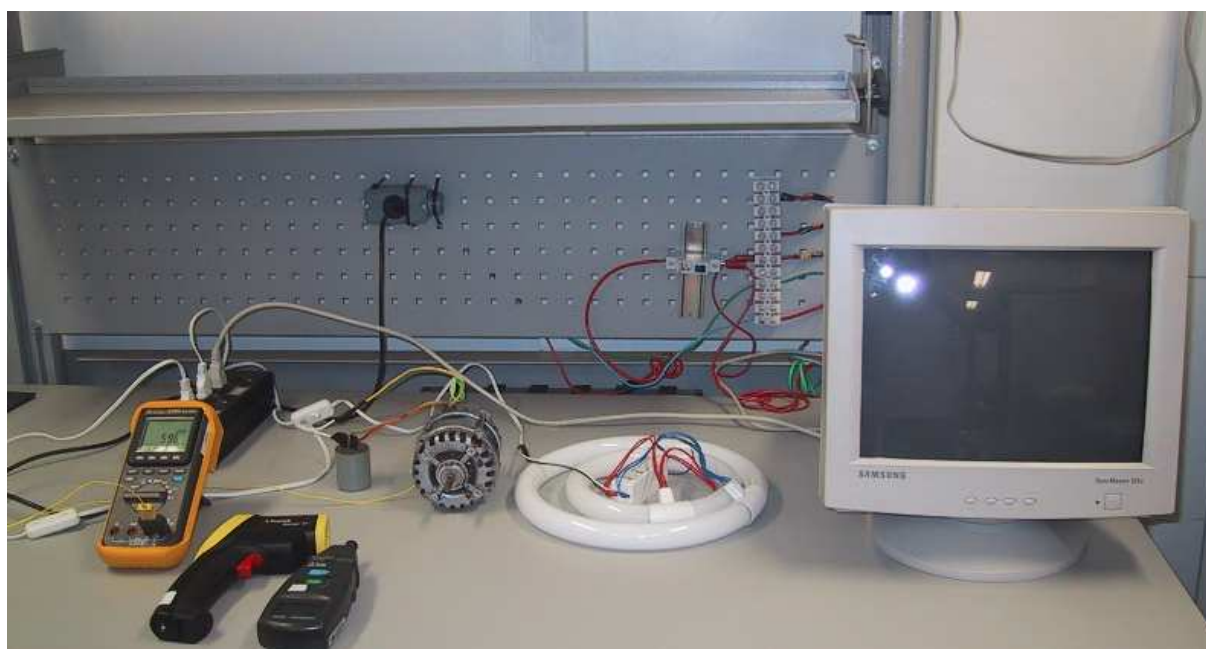
Entretenimento:



Carga 3: Monitor Samsung Mod. 551v S, Tensão 90 ~ 264 VAC rms, Frequência 60/50 Hz  $\pm$  3Hz, Corrente 1.2 A, Potência 80W (Máximo) e 70W (Nominal).



**Figura 3.13 - Laboratório de Qualidade de Energia: Cargas, Fonte e Aparelhos de Medição.**



**Figura 3.14 - Detalhe das Cargas utilizadas nos ensaios, multímetro e tacômetro.**



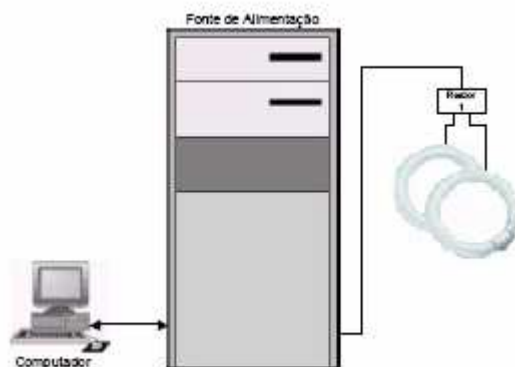
### 3.2.2 MÉTODOS

Partindo de uma proposta de trabalho que consistiu em simular os principais arranjos utilizados na geração de energia com a turbina hidrocínética a fim de analisar as influências destes no comportamento elétrico e físico das cargas geralmente utilizadas em sistemas isolados, estabeleceu-se a prática de dois ensaios. O primeiro visa uma análise do comportamento das cargas alimentadas por tensão com as formas de onda quadrada, quadrada modificada e senoidal pura, que são as formas de onda dos inversores disponíveis no mercado. O segundo visa uma análise do comportamento das cargas em diferentes frequências, simulando um cenário de geração de energia com, por exemplo, uma turbina hidrocínética acoplada a um gerador CA, em um arranjo sem regulação de frequência.

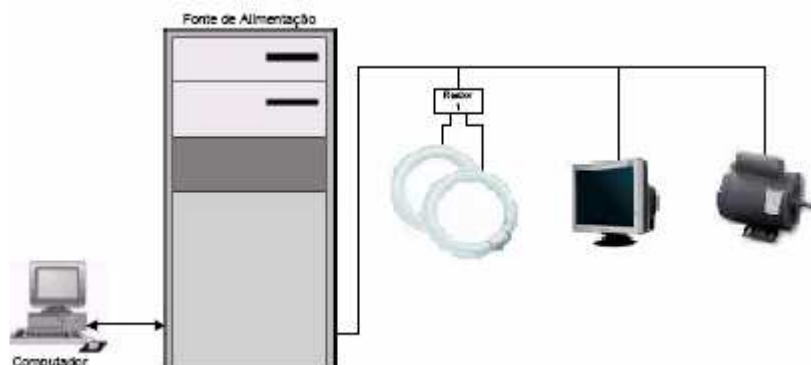
Os ensaios foram divididos em 4 partes, as cargas foram testadas isoladamente e em conjunto:

- o Aquisição com alimentação senoidal pura;
- o Aquisição com alimentação quadrada modificada;
- o Aquisição com alimentação quadrada; e
- o Alimentação com alimentação senoidal em várias frequências.

As ligações foram realizadas de acordo com os esquemas apresentados nas figuras 3.13 e 3.14:



**Figura 3.15 - Esquema de ligação das cargas individualmente.**



**Figura 3.16 – Esquema de ligação das cargas em conjunto.**

Em cada teste, observaram-se os seguintes parâmetros: Tensão (V), Corrente (A), Corrente Máxima (A), Potência (kW), Potência Aparente (kVA), Fator de Potência, Distorção Harmônica de Corrente (I THD %), além da captura das formas de onda da tensão e corrente. Para os testes com a carga 2 – Motor Monofásico, além destes observou-se também a temperatura atingida até o equilíbrio, bem como a velocidade de rotação.

Realizou-se também uma comparação com os dados nominais disponibilizados pelo fabricante com os valores medidos experimentalmente, para cada carga.



# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

### 4.1 SIMULAÇÃO DO ARRANJO GERADOR CC COM INVERSOR E UTILIZAÇÃO DE CARGAS AC.

O ensaio do Arranjo Gerador CC com Inversor utilizando Carga CA pretende simular a operação da turbina hidrocínética utilizando o arranjo mais complexo: Turbina acoplada a um gerador CC, que alimenta um banco de baterias através de um controlador de carga, e cuja transformação CC/AC é realizada por um inversor, cuja forma de onda de saída pode ser de onda senoidal, quadrada modificada e quadrada.

- Carga 1: Lâmpadas Fluorescentes

Primeiramente, adquiriram-se os parâmetros elétricos da carga para tensão nominal e comparou-se com os valores disponibilizados pelo fabricante, de acordo com a tabela 4.1:

**Tabela 4.1 - Comparação dos valores medidos e dos dados nominais do conjunto de Lâmpadas Fluorescentes.**

Grandezas	Frequência 60 Hz – 127 V rms	
	Valores Medidos	Valores Nominais
Tensão (V)	125,56	127,00
Corrente (A rms)	0,610	0,840
Potência (W)	44,423	60
Fator de Potência	0,58	≥0,50'

Pode-se observar que a corrente medida ficou bem abaixo do valor nominal (aproximadamente 27% inferior), apresentando portanto, potência inferior à nominal.



Para uma alimentação de 110 V, os parâmetros para os 3 tipos de forma de onda estão mostrados na tabela 4.2:

**Tabela 4.2 - Parâmetros elétricos para o conjunto de lâmpadas fluorescentes em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada).**

Grandezas	Frequência 60,00 (Hz) – Tensão: 110 Vrms		
	Senoidal	Quadrada Modificada	Quadrada
Tensão (V rms)	108,68	108,48	107,62
Corrente (A rms)	0,57	1,88	1,42
Corrente Máxima do Ciclo (A)	15,5	21,8	14,55
Potência Aparente (kVA)	0,062	0,204	0,153
Fator de Potência	0,58	0,21	0,21
Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)	59,05	74,19	83,75
Potência Calculada (W)	35,93	42,83	32,10

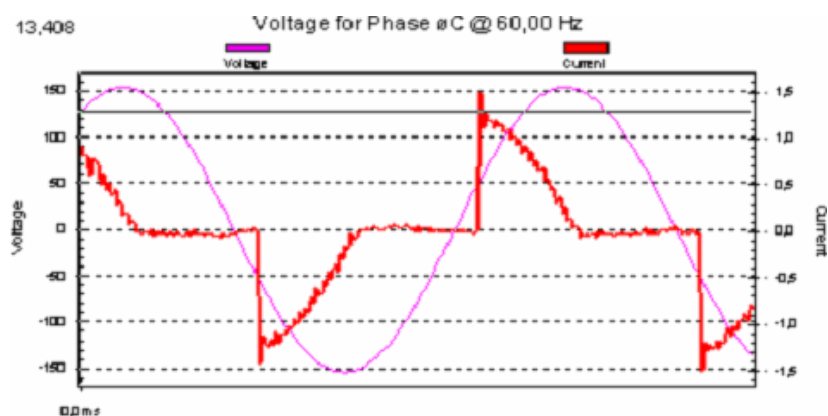
As medidas para tensão senoidal (110 V rms e frequência 60 Hz) são consideradas referências.

Da comparação dos parâmetros para os três tipos de alimentação observam-se as altas correntes RMS para alimentação quadrada modificada e quadrada apresentadas em relação à referência, com valores respectivos de 1.88 A rms (mais de 3 vezes do valor de referência) e 1.42 A rms (mais de duas vezes do valor de referência). Apesar disso, a corrente máxima do ciclo aumentou apenas para a forma de onda quadrada modificada, que atingiu 21.8 A, aproximadamente 40% maior que o valor de referência.

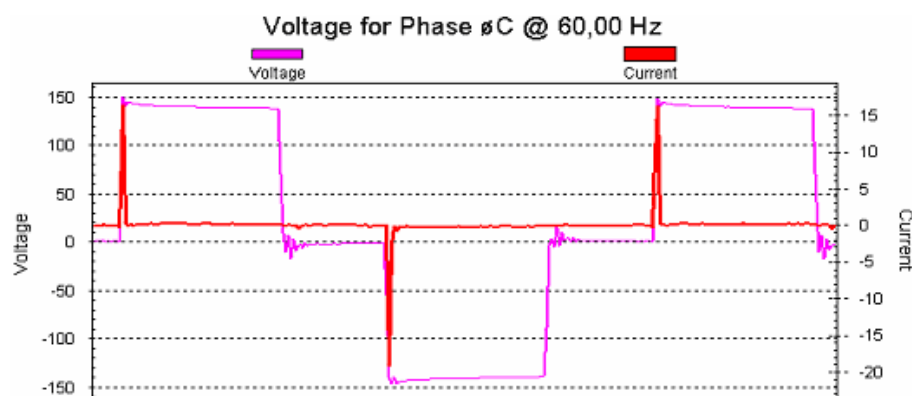
A potência se manteve abaixo da nominal para os três casos de alimentação. O reator, de baixo fator de potência, consumiu mais potência reativa para as formas diferentes da senoidal.

As formas de onda obtida para alimentação senoidal, quadrada modificada e quadrada, respectivamente, são mostradas nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3:

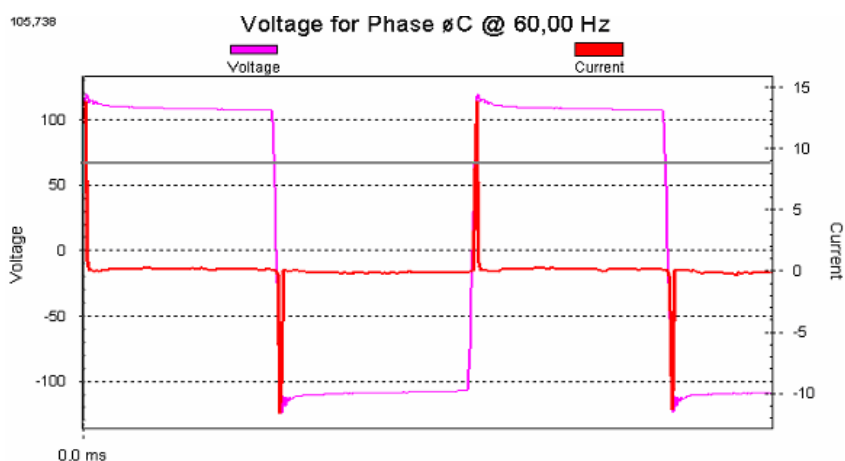




**Figura 4.1 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms- Lâmpadas Fluorescentes.**



**Figura 4.2 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms- Conjunto Lâmpadas Fluorescentes.**



**Figura 4.3 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada 110V rms- Conjunto Lâmpadas Fluorescentes.**

- Carga 2: Motor Monofásico





Para o motor, a comparação com os parâmetros nominais foi considerada para uma alimentação de 110 V, já que o valor nominal de 115 V é bem próximo deste:

**Tabela 4.3 Comparação dos valores medidos e dos dados nominais do motor monofásico, alimentação de 110V rms.**

Grandezas	Frequência 60 Hz	
	Valores Medidos	Valores Nominais
Tensão (V)	108,68	115,00
Corrente (A rms)	0,610	0,652
Potência (W)	61,279	75

Os parâmetros para os 3 tipos de forma de onda estão mostrados na tabela 4.4:

**Tabela 4.4 - Parâmetros elétricos para o motor monofásico em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada).**

Grandezas	Frequência 60,00 (Hz) – Tensão: 110 V rms		
	Senoidal	Quadrada Modificada	Quadrada
Tensão (V rms)	108,65	108,37	107,5
Corrente (A rms)	0,60	1,07	1,45
Corrente Máxima do Ciclo (A)	0,89	1,88	2,83
Potência Aparente (kVA)	0,065	0,116	0,156
Fator de Potência	0,94	0,63	0,58
Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)	5,38	83,53	92,41
Potência Calculada (W)	61,28	73,05	90,41
Temperatura de Equilíbrio (°C)	50,5	57,7	65,4
Rotação (rpm)	3540	3530	3540

As medidas para tensão senoidal (110 V rms e frequência 60 Hz) são consideradas referências.

É importante salientar que os ensaios foram realizados com motor sem carga. Dessa forma, a potência ativa medida corresponde à potência perdida no rotor e estator. O motor apresenta, portanto, baixo rendimento, já que o valor da potência sem carga se aproximou bastante do valor da potência nominal.

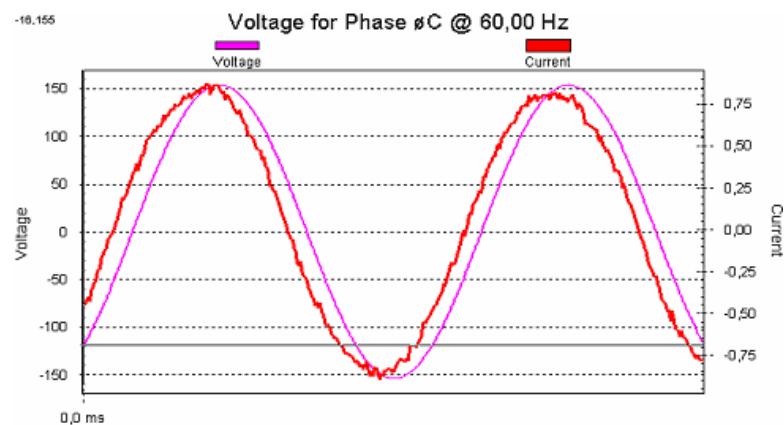


A rotação se manteve praticamente constante. A corrente é bastante influenciada pela forma de onda da tensão, fato evidenciado pelo comportamento da Distorção Harmônica Total da Corrente e confirmado na forma de onda das correntes, apresentadas nas figuras 4.5 e 4.6.

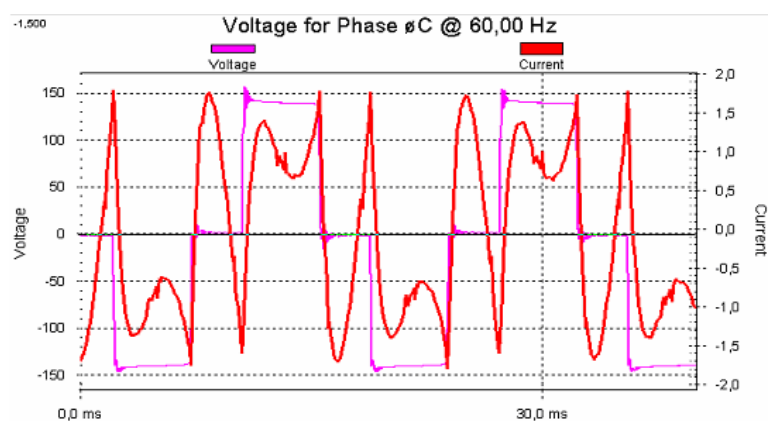
Um parâmetro importante na análise do comportamento do motor é a temperatura. A mesma foi monitorada até entrar em regime permanente. Como o motor solicitou maiores correntes para as formas de onda quadrada e quadrada modificada, um aumento da temperatura é esperado. Para a onda quadrada, que apresentou uma corrente RMS de 1.45 A (aproximadamente 2.5 vezes a corrente de referência), a temperatura do motor atingiu um valor de 65.4 °C, um aumento de 14.9 °C, aproximadamente 30%. Para a forma de onda quadrada modificada, o aumento de temperatura foi de 7.2 °C, ou aproximadamente 14%.

Outro parâmetro bastante afetado pelas formas de onda da tensão é o fator de potência, que se reduziu a 0.58 para a onda quadrada, indicando um maior consumo de potência reativa para as formas de onda não-senoidais.

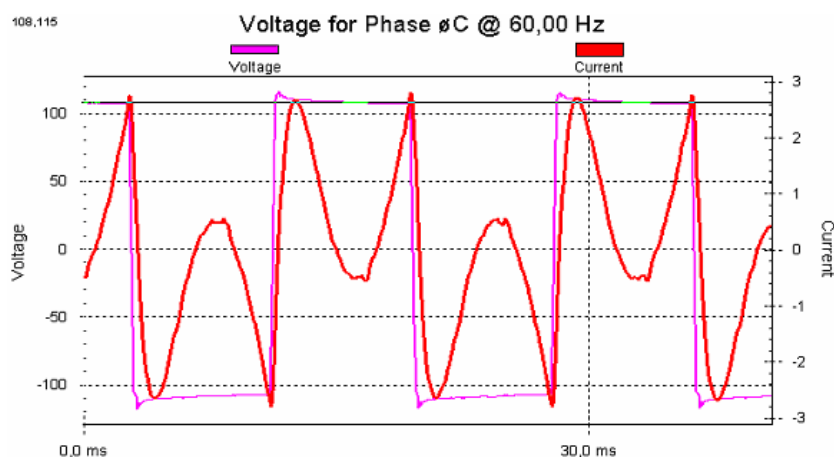
As forma de onda obtida para alimentação senoidal, quadrada modificada e quadrada, respectivamente, são mostradas nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6:



**Figura 4.4 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms– Motor Monofásico.**



**Figura 4.5 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms– Motor Monofásico.**



**Figura 4.6 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada 110V rms– Motor Monofásico.**

- Carga 3: Monitor

Primeiramente, adquiriram-se os parâmetros elétricos da carga para tensão de 110 V e comparamos com os valores nominais disponibilizados pelo fabricante:

**Tabela 4.5 - Comparação dos valores medidos e dos dados nominais do monitor.**

Grandezas	Frequência 60 Hz	
	Valores Medidos	Valores Nominais
Tensão	108,67	110
Corrente (A rms)	0,750	1,2
Potência (W)	46,456	70



Os parâmetros para os 3 tipos de forma de onda estão mostrados na tabela 4.6:

**Tabela 4.6 - Parâmetros elétricos para o monitor em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada).**

Grandezas	Frequência 60,00 (Hz) – Tensão: 110 Vrms		
	Senoidal	Quadrada Modificada	Quadrada
<b>Tensão (V rms)</b>	108,67	108,35	107,58
<b>Corrente (A rms)</b>	0,75	0,56	0,46
<b>Corrente Máxima do Ciclo (A)</b>	2,35	2,81	1,41
<b>Potência Aparente (kVA)</b>	0,082	0,061	0,049
<b>Fator de Potência</b>	0,57	0,76	0,92
<b>Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)</b>	81,31	71,26	59,82
<b>Potência Calculada (W)</b>	46,46	46,11	45,53

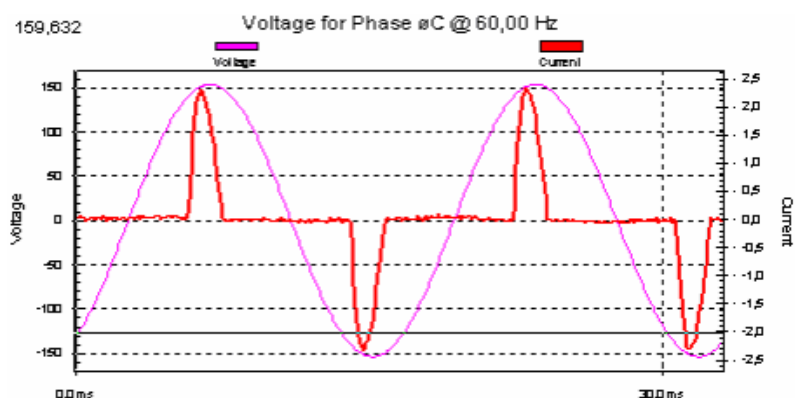
As medidas para tensão senoidal (110 V rms e frequência 60 Hz) são consideradas referências.

O monitor, por possuir uma fonte chaveada, onde a tensão da rede primeiro precisa ser transformada em tensão contínua para depois abastecer os circuitos do aparelho. Essa transformação funciona como um filtro, e o funcionamento do aparelho não é diretamente influenciado por variações na forma de onda da tensão de alimentação. A corrente apresentou uma redução para as formas de onda quadrada modificada e quadrada, respectivamente de 25% e 39%, enquanto a potência se manteve praticamente constante.

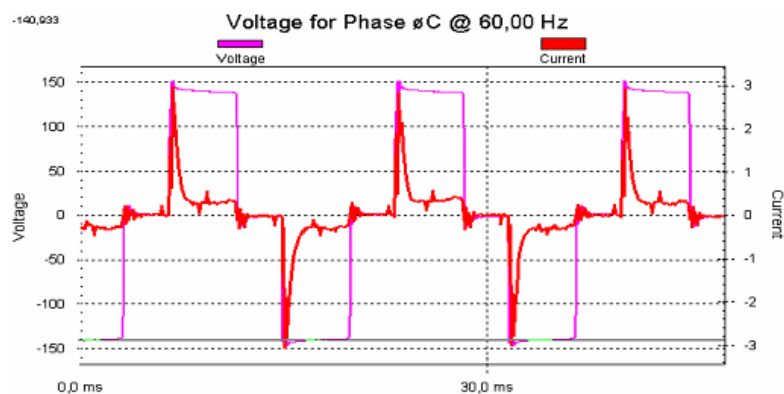
Como cargas não-lineares tipicamente apresentam distorção harmônica de corrente, para alimentação com onda senoidal o valor de 81.31% é considerado normal. As formas de onda não-senoidais inclusive reduziram os valores de THDi.

As forma de onda obtida para alimentação senoidal, quadrada modificada e quadrada, respectivamente, são mostradas nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9:

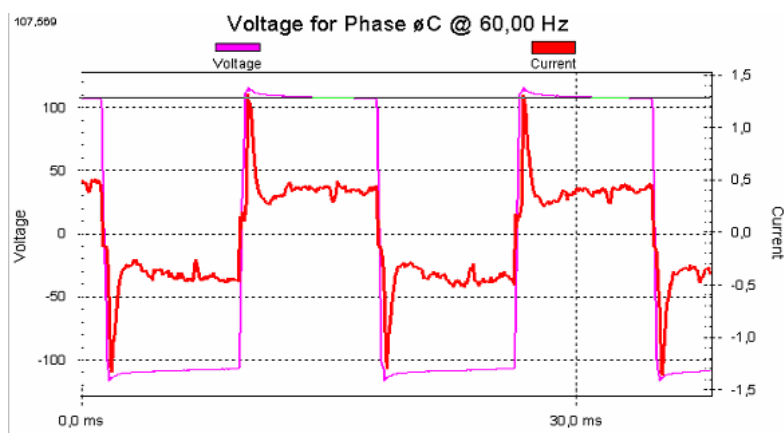
:



**Figura 4.7 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms – Monitor.**



**Figura 4.8 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms– Monitor.**



**Figura 4.9 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada 110V rms – Monitor.**



- Carga 1 + Carga 2 + Carga 3

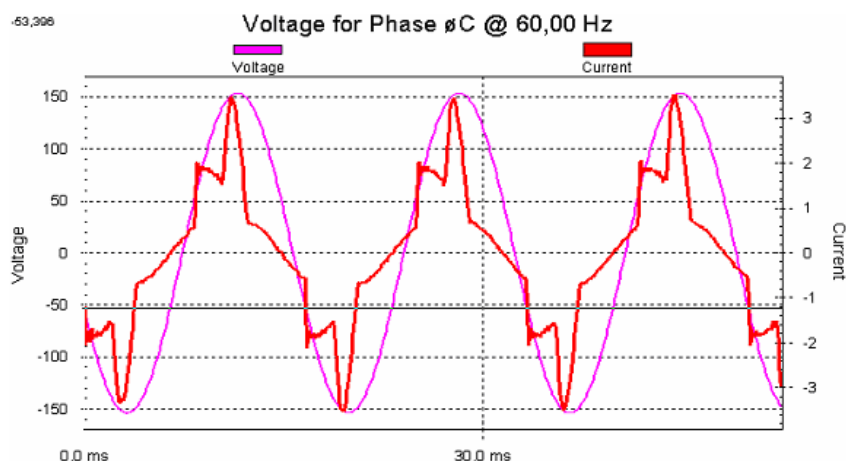
Com as três cargas ligadas ao mesmo tempo, coletou-se os parâmetros para os 3 tipos de forma de onda, mostrados na tabela 4.7

**Tabela 4.7 - Parâmetros elétricos para carga 1 + carga 2 + carga 3, em diferentes formas de onda (senoidal pura, quadrada modificada e quadrada).**

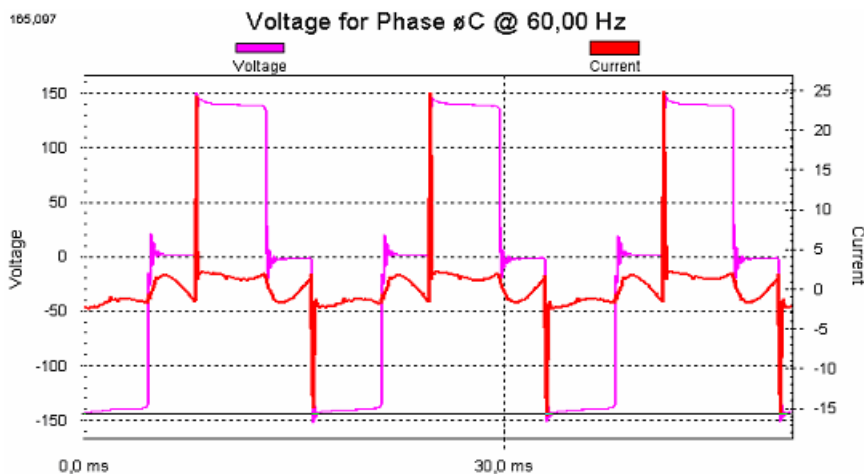
Grandezas	Frequência 60,00 (Hz) – Tensão: 110 Vrms		
	Senoidal	Quadrada Modificada	Quadrada
Tensão (V rms)	108,72	108,5	107,51
Corrente (A rms)	1,55	2,74	2,06
Corrente Máxima do Ciclo (A)	3,57	24,87	14,16
Potência Aparente (kVA)	0,169	0,297	0,221
Fator de Potência	0,85	0,57	0,64
Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)	37,82	68,11	81,86
Potência Calculada (W)	143,239	169,455	141,741

O comportamento das cargas em conjunto se caracteriza principalmente pela soma das correntes, prejudicando principalmente o desempenho do sistema que utiliza forma de onda quadrada modificada. Pode-se observar que a corrente máxima do ciclo, nesse caso, atingiu o valor de 24.87 A, valor muito superior ao apresentado para tensão senoidal, de 3.57 A, ou seja, para uma mesma carga, a forma de onda quadrada modificada consome muito mais energia que a forma de onda senoidal e demanda maior esforço térmico, e até mesmo quadrada. Isso se constitui uma desvantagem, principalmente para sistemas isolados com grande limitação de geração de energia.

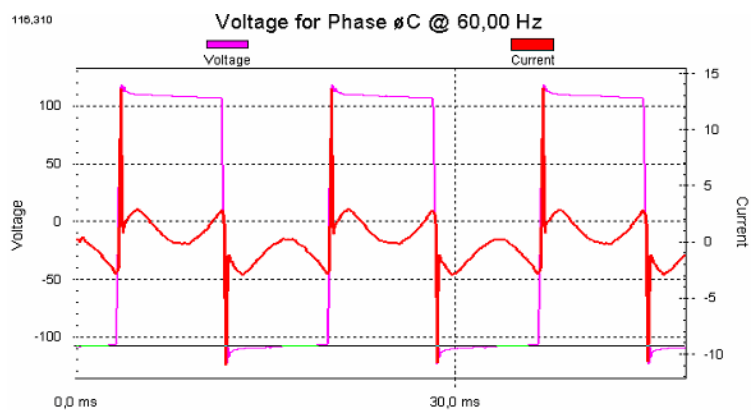
As formas de onda obtida para alimentação senoidal, quadrada modificada e quadrada, respectivamente, são mostradas nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12:



**Figura 4.10 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms – Carga 1 + Carga 2 + Carga 3.**



**Figura 4.11 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação quadrada modificada 110V rms – Carga 1 + Carga 2 + Carga 3.**



**Figura 4.12 - Forma de Onda da Tensão e Corrente para alimentação senoidal 110V rms – Carga 1 + Carga 2 + Carga 3.**



## 4.2 SIMULAÇÃO DO ARRANJO GERADOR ASSÍNCRONO – EFEITOS DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NAS CARGAS.

A frequência no arranjo turbina hidrocínética utilizando gerador assíncrono e cargas AC, na prática, varia aproximadamente 5 Hz em relação à frequência nominal de 60 Hz. Na simulação experimental, busca-se validar ou não o funcionamento das cargas, para essa variação, a partir da análise do comportamento elétrico em uma faixa maior de frequências.

- Carga 1: Lâmpadas Fluorescentes

**Tabela 4.8 - Comportamento do conjunto de lâmpadas fluorescentes circulares (22W+32W) com tensão senoidal em diferentes frequências.**

### Carga 1 - Lâmpadas Fluorescentes

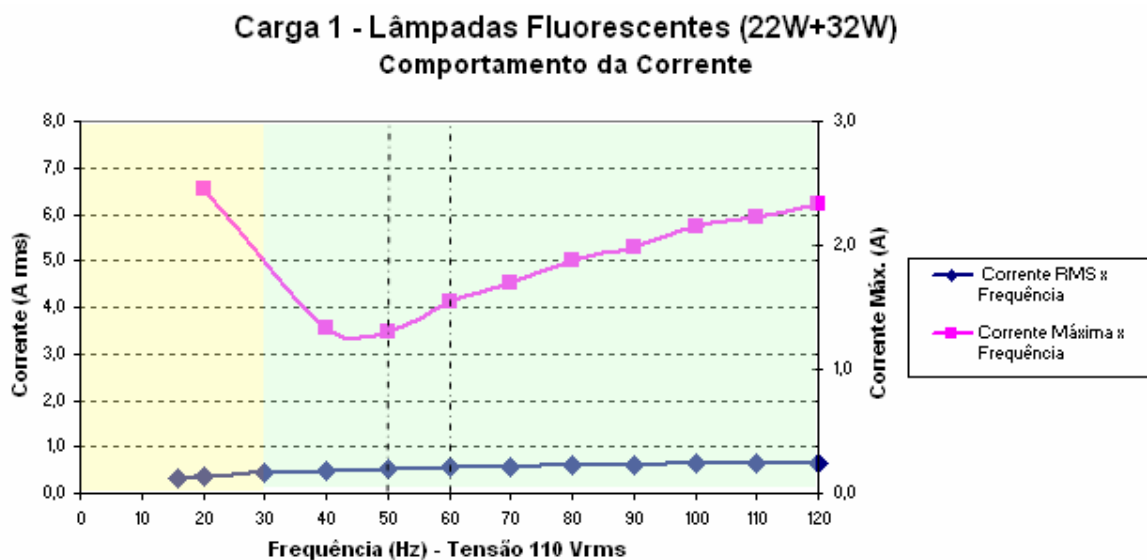
Grandezas	Frequências (Hz) - Tensão 110 Vrms					
	16,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00
Tensão (V)	109,47	109,15	108,71	108,63	108,63	108,68
Corrente (A)	0,330	0,370	0,440	0,490	0,530	0,570
Corrente Máxima (A)	-	2,450	-	1,330	1,310	1,550
Potência Aparente (kVA)	0,036	0,040	0,048	0,053	0,058	0,062
Fator de Potência	0,42	0,44	0,50	0,54	0,56	0,58
Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)	-	94,540	-	-	-	59,05
Potência Calculada (W)	15,173	17,770	23,916	28,743	32,241	35,930

Grandezas	Frequências (Hz) - Tensão 110 Vrms					
	70,00	80,00	90,00	100,00	110,00	120,00
Tensão (V)	108,75	108,78	108,85	108,95	109,05	109,20
Corrente (A)	0,580	0,600	0,620	0,630	0,650	0,660
Corrente Máxima (A)	1,700	1,880	1,980	2,150	2,220	2,340
Potência Aparente (kVA)	0,063	0,065	0,067	0,069	0,071	0,072
Fator de Potência	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57
Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)	63,48	66,20	68,53	70,89	72,44	73,28
Potência Calculada (W)	36,584	37,855	39,142	39,810	40,403	41,081

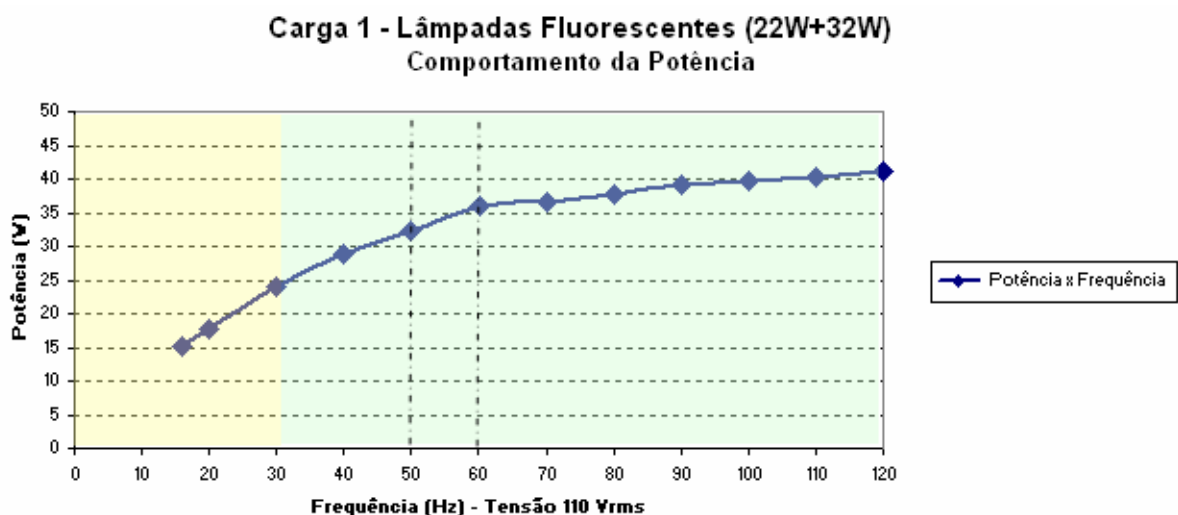




A variação da frequência produziu variação na luminosidade, que pode ser percebida pela alteração dos valores de potência. Tal variação produziu redução significativa na luminosidade apenas em 30 Hz, e cintilação em 20 Hz, comprometendo a utilização do produto nesta frequência.



**Figura 4.13 - Comportamento da Corrente no Conjunto Lâmpadas Fluorescentes em diferentes frequências.**



**Figura 4.14 - Gráfico Frequência vs Potência (Calculada)**



Nos gráficos, os traços pontilhados indicam a faixa de operação nominal das lâmpadas, a área verde indica região onde o funcionamento não foi comprometido e a área amarela indica região onde a utilização das lâmpadas apresenta-se comprometido.

- Carga 2: Motor Monofásico

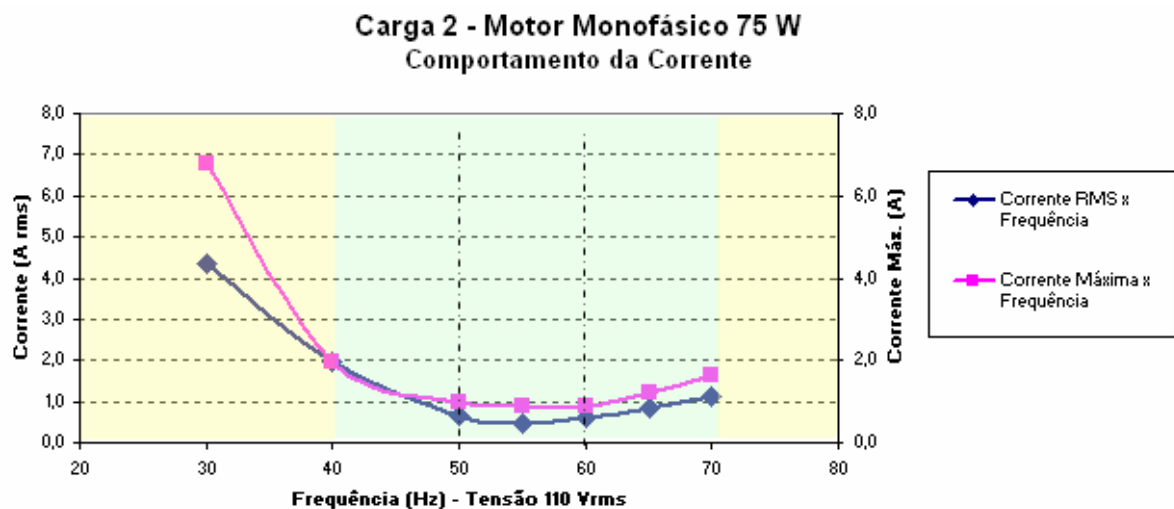
**Tabela 4.9 - Comportamento do motor monofásico 75W com tensão senoidal em diferentes frequências.**

**Carga 2 - Motor Monofásico 75W**

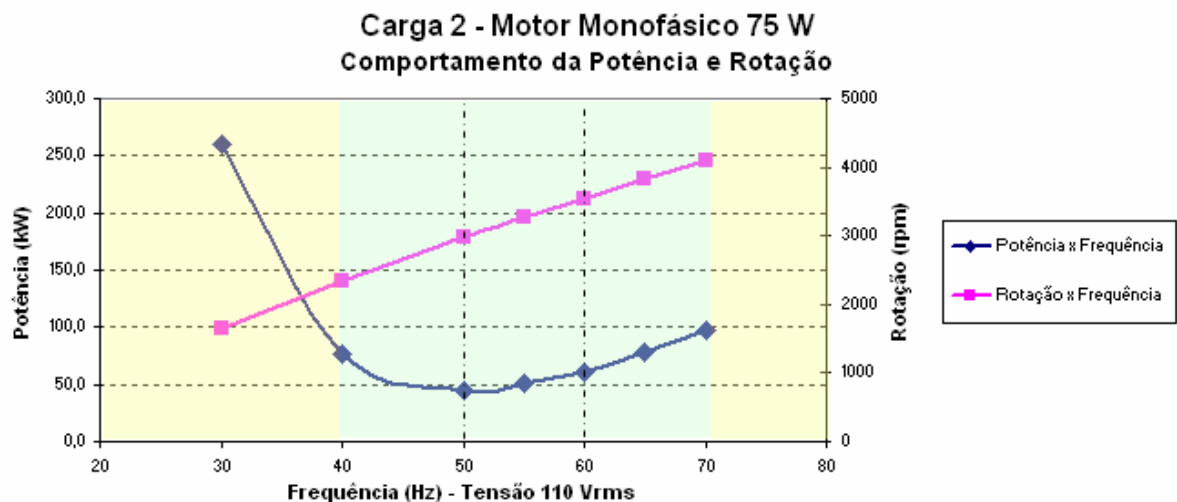
Grandezas	Frequências (Hz) - Tensão 110 Vrms						
	30,00	40,00	50,00	55,00	60,00	65,00	70,00
<b>Tensão (V)</b>	108,74	108,66	108,68	108,70	108,65	108,80	108,79
<b>Corrente (A rms)</b>	4,350	1,960	0,650	0,480	0,600	0,830	1,100
<b>Corrente Máxima do Ciclo (A)</b>	6,780	1,960	0,990	0,900	0,890	1,220	1,630
<b>Potência Aparente (kVA)</b>	0,473	0,213	0,071	0,052	0,065	0,090	0,120
<b>Fator de Potência</b>	0,55	0,36	0,64	0,97	0,94	0,86	0,82
<b>Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)</b>	17,43	9,47	5,14		5,380	3,65	2,12
<b>Temperatura de Equilíbrio (°C)</b>	>65 <sup>1</sup>	54,5	50,1	51,0	50,5	59,0	59,5
<b>Rotação (rpm)</b>	1660	2350	2971	3260	3540	3822	4093
<b>Potência Calculada (W)</b>	260,16	76,67	45,21	50,61	61,28	77,66	98,13

Obs.: 1) Temperatura não entrou em regime permanente no tempo de 15 minutos, ultrapassando o valor de 65°C, quando o ensaio foi finalizado, por motivos de segurança.

A variação da frequência limitou a experiência para o caso do motor principalmente porque a temperatura aumentou bastante, tanto para a redução da frequência quanto para o aumento da mesma. A região sem restrições de operação ficou entre 40 Hz e 70 Hz, com temperaturas de equilíbrio em 54.5°C e 59.5°C, respectivamente.



**Figura 4.15 - Gráfico Corrente Rms vs Frequência e Corrente Máxima vs Frequência.**



**Figura 4.16 - Gráfico Potência vs Frequência e Rotação vs Frequência**

Pode-se observar que a rotação varia linearmente com a frequência, já as correntes, a potência e a temperatura aumentam com o aumento e redução da frequência. Para 30 Hz, a potência atinge o valor de 260 W, mais de 4 vezes o valor da potência para frequência nominal.

- **Carga 3: Monitor**

Como já comentado, a presença de fonte chaveada no monitor reduz a influência das variações na forma de onda da alimentação no funcionamento do aparelho. Para a variação de frequência, tal comportamento também é esperado.



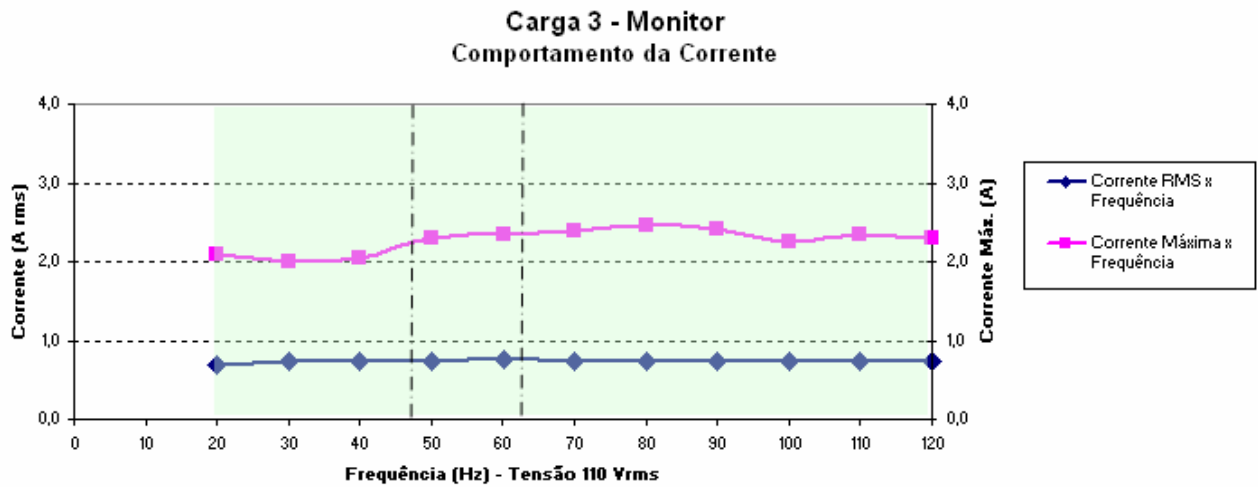
**Tabela 4.10 - Medidas das características elétricas do monitor para diferentes frequências.**

**Carga 3 – Monitor Samsung**

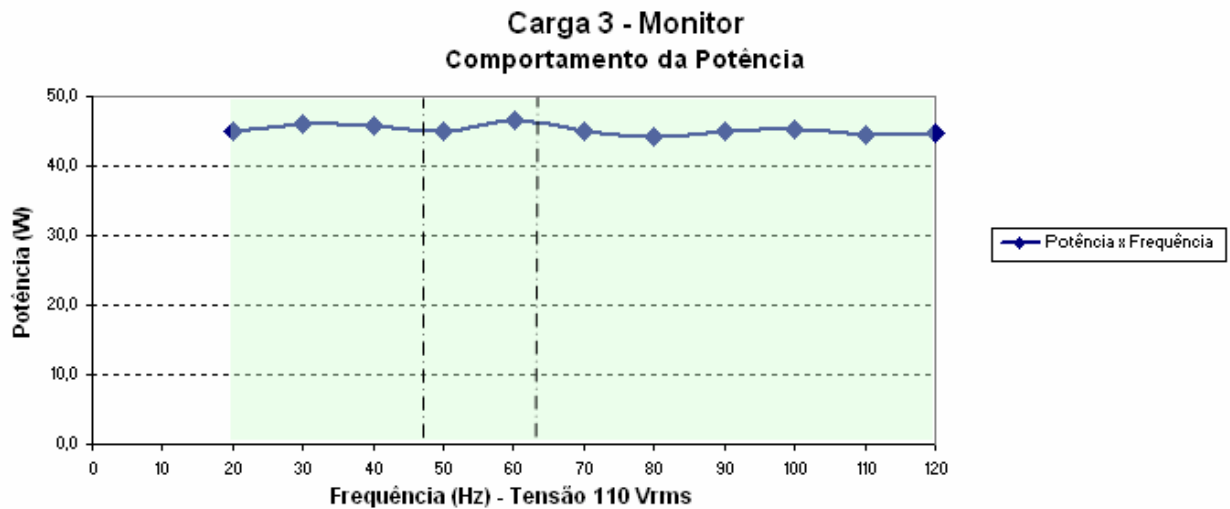
Grandezas	Frequências (Hz) - Tensão 110 Vrms				
	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00
<b>Tensão</b>	109,11	108,69	108,63	108,64	108,67
<b>Corrente (A)</b>	0,700	0,730	0,740	0,740	0,750
<b>Corrente Máxima do Ciclo (A)</b>	2,100	2,000	2,050	2,300	2,350
<b>Potência Aparente (kVA)</b>	0,076	0,079	0,080	0,080	0,082
<b>Fator de Potência</b>	0,59	0,58	0,57	0,56	0,57
<b>Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)</b>	76,420	79,210	80,810	81,350	81,310
<b>Potência Calculada</b>	45,062	46,019	45,820	45,020	46,456

Grandezas	Frequências (Hz) - Tensão 110 Vrms					
	70,00	80,00	90,00	100,00	110,00	120,00
<b>Tensão</b>	108,74	108,77	108,89	108,97	109,09	109,15
<b>Corrente (A)</b>	0,740	0,740	0,740	0,740	0,730	0,730
<b>Corrente Máxima do Ciclo (A)</b>	2,400	2,450	2,410	2,250	2,350	2,300
<b>Potência Aparente (kVA)</b>	0,080	0,080	0,081	0,081	0,080	0,080
<b>Fator de Potência</b>	0,56	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56
<b>Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)</b>	81,98	82,76	81,92	82,30	82,32	82,22
<b>Potência Calculada</b>	45,062	44,269	45,124	45,157	44,596	44,621

Praticamente todos os parâmetros se mantiveram constantes, mesmo para os extremos inferiores e superiores de frequência do experimento, que foram 20 Hz e 120 Hz. A fonte chaveada funciona como um filtro, fornecendo uma tensão constante aos circuitos do aparelho, que praticamente não são influenciados pela variação da frequência da rede. Pode-se dizer que o funcionamento do monitor é adequado em toda a região verde dos gráficos 4.17 e 4.18, não apresentando restrições.



**Figura 4.17 - Gráfico Corrente RMS vs Frequência e Corrente Máx. vs Frequência**



**Figura 4.18 - Gráfico Potência (Calculada) vs Frequência**

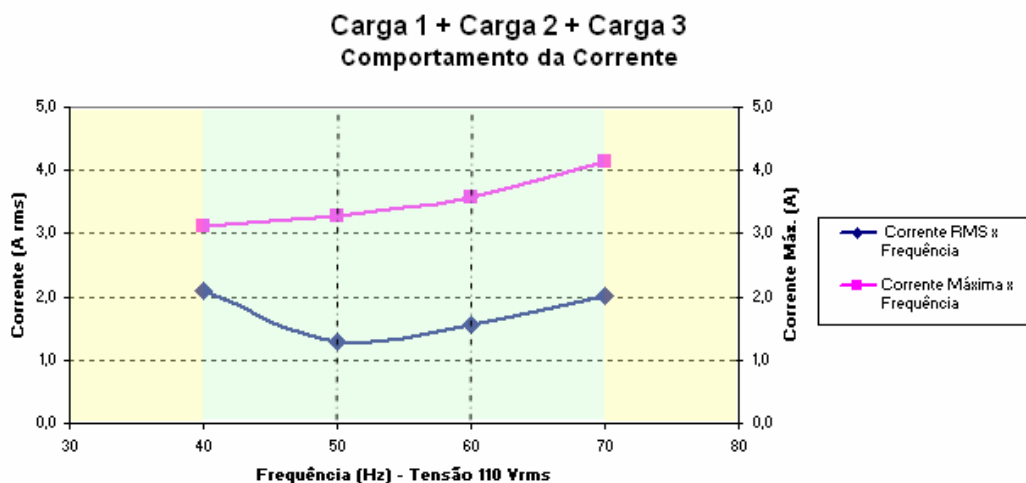
- Carga 1 + Carga 2 + Carga 3

Analogamente à análise do comportamento das cargas em conjunto para as formas de onda não-senoidais, aqui também se observa a soma das contribuições das cargas, principalmente do comportamento do motor nas correntes RMS e máxima do ciclo, além da potência.

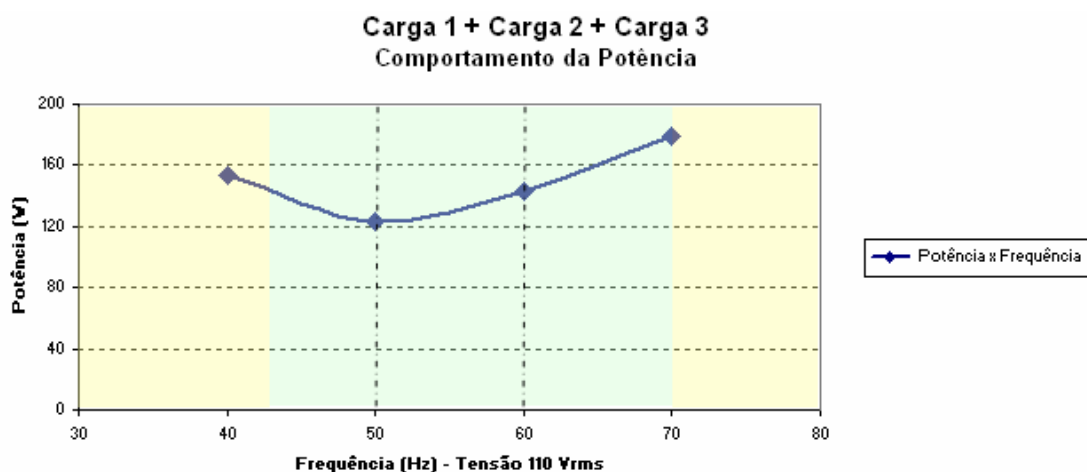


**Tabela 4.11 - Medidas das características elétricas das cargas em conjunto para diferentes frequências.**

Grandezas	Frequências (Hz) - Tensão 110 Vrms			
	40,00	50,00	60,00	70,00
Tensão (V)	108,68	108,69	108,72	108,81
Corrente (A)	2,110	1,300	1,550	2,010
Corrente Máxima do Ciclo (A)	3,110	3,290	3,570	4,140
Potência Aparente (kVA)	0,229	0,141	0,169	0,219
Fator de Potência	0,67	0,87	0,85	0,82
Distorção Harmônica de Corrente (I THD %)	-	46,930	37,820	30,540
Potência Calculada	153,641	122,928	143,239	179,341



**Figura 4.19 - Gráfico Corrente RMS vs Frequência e Corrente Máx. vs Frequência**



**Figura 4.20 - Gráfico Potência (Calculada) vs Frequência**



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÃO

O desenvolvimento e utilização de tecnologias para eletrificação rural descentralizada já se apresentam mais difundidos, evidenciado que o modelo de plantas centralizadas e distribuídas por redes não é imutável. Os projetos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias devem atender às demandas da sociedade e aos incentivos do governo no sentido de universalizar o acesso à energia.

Além da preocupação em levar energia a toda a população, a questão ambiental constitui importante quesito, que deve fazer parte do planejamento de implementação de sistemas de eletrificação. Aliado a isso, o esgotamento dos combustíveis fósseis também contribui para o fortalecimento da busca de fontes de geração de energia que se enquadrem no contexto do desenvolvimento sustentável.

A Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília apresenta resultados avançados nesse sentido, com pesquisas na área de energias alternativas, como solar, biomassa, hidrocínética. A busca por eficiência e promoção do bem-estar social são características dos projetos aqui desenvolvidos.

Em relação ao projeto da turbina hidrocínética desenvolvido com sucesso pelo departamento de Engenharia Mecânica da UnB, muito pode ser aprendido com as experiências de outros projetos de eletrificação implantados, como o Prodeem. Em sistemas de eletrificação rural descentralizados, mostrou-se fundamental buscar sustentabilidade e baixa manutenção para que o funcionamento dos sistemas obtenha sucesso.

O aperfeiçoamento da turbina hidrocínética, que já se encontra na terceira geração, busca principalmente adequar à tecnologia para utilização em qualquer região do país, reduzindo custos de investimento, instalação e manutenção. A busca pela produção comercial da turbina procura remediar o alto custo de investimento. Diminuir as dimensões da turbina é necessário para minimizar os elevados gastos com instalação, levando-se em consideração



que a turbina pretende atender comunidades de difícil acesso, principalmente na Amazônia, onde se encontram a maior parte da população que não é atendida por qualquer forma de energia elétrica, e onde existe grande utilização dos geradores a diesel, que apresentam elevado custo de operação e manutenção, dificuldade do transporte do combustível e alto impacto ambiental causado pela queima de combustível fóssil.

A implantação de equipamentos de baixa manutenção é necessária, já que no contexto da eletrificação rural descentralizada, as comunidades não possuem condições técnicas de realizá-la. Experiências da má gestão de sistemas de energia alternativa indicam o abandono por parte da população apenas por falta de manutenção dos equipamentos. Além disso, o crescente número de sistemas implantados inviabiliza o fornecimento de manutenção por parte do agente executor dos projetos.

A turbina hidrocínética que utiliza o arranjo gerador CC com inversor e cargas CA possui a vantagem de integrar o gerador ao eixo da turbina, reduzindo o tamanho e peso. Porém, a complexidade do sistema, que conta com diversos equipamentos para garantir o fornecimento da energia e que constituem também um maior investimento, principalmente porque os preços dos inversores e das baterias podem chegar a uma considerável parcela do investimento total.

De acordo com os resultados experimentais, o projetista deve estar atento ao comportamento das cargas para a forma de onda do inversor utilizado. Os inversores de onda quadrada e quadrada modificada, apesar de apresentarem um investimento menor, necessitam de uma análise mais criteriosa quanto ao funcionamento das cargas, capacidade de geração etc., principalmente com relação a motores, que podem ter seu funcionamento prejudicado.

A turbina hidrocínética que utiliza geração CA possui a vantagem de apresentar um arranjo mais simples, já que não necessita de equipamentos especiais para a utilização da energia gerada. A manutenção das escovas do gerador deve ser realizada aproximadamente a cada seis meses, mas não apresenta maiores dificuldades, além de ser uma manutenção barata. O experimento que simulou o funcionamento das cargas em diferentes frequências validou a experiência prática das turbinas hidrocínéticas instaladas, que nunca apresentaram danos às cargas durante anos de funcionamento, apesar da ausência de controle da frequência da tensão gerada. A variação encontrada na prática, da ordem de 5 Hz, é muito menor do que a faixa de





variação considerada adequada para utilização das cargas, ou seja, onde o funcionamento não apresenta qualquer prejuízo.

Além das alternativas simuladas, existem outras com grandes possibilidades de solucionar os problemas encontrados, e que devem ser consideradas nos projetos de pesquisa, como os geradores de imã permanente e geradores de relutância variável.

Como sugestão para estudos futuros, é interessante que se realize uma análise mais aprofundada sobre o comportamento dos motores para formas de onda não-senoidais e em diferentes frequências, principalmente de geladeiras e freezers, que constituem cargas essenciais em sistemas de eletrificação. O comportamento de TVs também constitui um interessante campo para estudos futuros, já que estas cargas podem apresentar um comportamento diferente do monitor utilizado nos ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDABÓ, Ricardo. **Energia Eólica**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2002. 156p.
- ALTERNATIVE ENERGY STORE. The Alternative Energy Store. Produtos de energia Alternativa. Disponível em < [store.altenergystore.com](http://store.altenergystore.com)>. Acesso em: 08 dez. 2007.
- BALDINI, Ruberval. **Ambientalista pede maior uso da energia solar**. 04 junho 2007. Agência Brasil. Entrevista concedida a Vladimir Platonow. Disponível em <[www.agenciabrasil.gov.br](http://www.agenciabrasil.gov.br)>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- BARBOSA, Claudomiro Fábio de Oliveira et al.. **Situação da Geração Elétrica Através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas Frente à Universalização da Energia Elétrica**. AGRENER GD 2004 - 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, Unicamp - Campinas, out. 2004. Disponível em <[www.ufpa.br/gdae](http://www.ufpa.br/gdae)>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- BRASIL . Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243p. Disponível em <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- \_\_\_\_\_. **Banco de Informações de Geração**. Atualizado em 21/11/2007. Disponível em <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- BRASIL . Ministério das Minas e Energia - MME. **Programa Luz para Todos**, 2007. Disponível em < <http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- BRASIL-JUNIOR, Antônio C. P.; **Energia renovável para a Reserva do Maracá**. Brasília: Universidade de Brasília. 2007.
- CAMPOS, Fábio Galizia Ribeiro de. **Geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor estático duplo**. 2004. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo. 2004.
- CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA – CBEE. 2007. **Energia Eólica**. Disponível em <[www.eolica.org.br](http://www.eolica.org.br)>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. **Energia Eólica**. 2007. Disponível em <[www.cepel.br](http://www.cepel.br)>. Acesso em: 29 nov. 2007.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Energia Solar: princípios e aplicações**. 2007. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 29 nov. 2007.

\_\_\_\_\_. **Energia Eólica: princípios e aplicações**. 2007. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 29 nov. 2007.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS

HIDRELÉTRICAS – CERPCH. 2007. **Fontes Renováveis – Biomassa**. Disponível em <[www.cerpch.unifei.edu.br](http://www.cerpch.unifei.edu.br)>. Acesso em: 03 dez. 2007.

\_\_\_\_\_. 2007. **Fontes Renováveis – Hidráulica**. Disponível em <[www.cerpch.unifei.edu.br](http://www.cerpch.unifei.edu.br)>. Acesso em: 03 dez. 2007.

\_\_\_\_\_. 2007. **Projetos – Turbina Hidrocinética**. Disponível em <[www.cerpch.unifei.edu.br](http://www.cerpch.unifei.edu.br)>. Acesso em: 03 dez. 2007.

COELHO, Suani Teixeira et al. **A importância e o potencial brasileiro da cogeração de energia a partir da biomassa**. In: SEMINÁRIO COGERAÇÃO DE ENERGIA, 2001, São Paulo. São Paulo, Gazeta Mercantil, 2001. p. painel /1-4 . Disponível em <[www.iee.usp.br](http://www.iee.usp.br)>. Acesso em: 7 dez. 2007.

ELETOBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. Conta de Consumo de Combustíveis. **Sistemas Isolados**, 2007. Disponível em <<http://www.eletobras.gov.br>>. Acesso em: 29 nov. 2007.

ELS, Rudi Henri van. et al. **Alternativa Energética Sustentável: Considerações Sobre Geração e Utilização de Energia de Recursos Renováveis em uma Comunidade de Castanheiros na Amazônia**. In: III Encontro da ANPPAS, Brasília, 2007.

FELIZOLA, Eduardo Ribeiro; MAROCCOLO, Julianna Fernandes; FONSECA, Maria Rita Souza. Identificação de áreas potenciais para implantação de turbina hidrocinética através da utilização de técnicas de geoprocessamento. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 2007. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 2549-2556.

FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS – FINATEC. 2007. **Destaque: Turbina Hidrocinética**. Disponível em <[www.finatec.org.br](http://www.finatec.org.br)>. Acesso em: 5 dez. 2007.

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ACRE – FUNTAC. 2007. **Energias Renováveis: Fogão Geraluz**. Disponível em <[www.funtac.ac.gov.br](http://www.funtac.ac.gov.br)>. Acesso em: 04 dez. 2007.

- GALDINO, Marco A.; LIMA, Jorge H. G.. PRODEEM – O Programa Nacional de Eletrificação Rural Baseado em Energia Solar. In: IX CBE - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 2002, Rio de Janeiro. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia. 2002.** Rio de Janeiro, 2002. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/Prodeem-CBE.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2007.
- GALHARDO, Marcos André Barros; PINHO, João Tavares. **Avaliação da Qualidade da Energia Fornecida por Sistemas Renováveis Isolados de Pequeno Porte.** AGRENER GD 2004 - 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, Unicamp - Campinas, out. 2004.
- GOLDEMBERG, José. Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**, Maio/Ago. 1998, vol.12, no.33, p.7-15. ISSN 0103-4014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40141998000200002&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40141998000200002&script=sci_arttext&tlng=en)>. Acesso em: 29 nov. 2007.
- GOUVELLO, Christophe de; MAIGNE, Yves. **Eletrificação Rural Descentralizada: Uma Oportunidade para a Humanidade, Técnicas para o Planeta.** 3. ed. Rio de Janeiro: CRESEB – CEPEL, 2003. 456 p.
- INOVA UNICAMP. Agência de Inovação da Unicamp. 2007. **Micro usina hidrelétrica.** Disponível em <[www.inova.unicamp.br](http://www.inova.unicamp.br)>. Acesso em 09 dez. 2007.
- JANNUZZI, Gilberto de Martino. **Uma Avaliação das Atividades Recentes de P&D em Energia Renovável no Brasil e Reflexões para o Futuro**, Campinas, SP: Energy Discussion Paper Nº 2.64-01/03, 2003. Disponível em: <<http://www.iei-la.org/documents/RelIEI%202-64-01-03.pdf>>. Acesso em 29 de novembro de 2007.
- MACEDO, Isaias C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2001. 12p. Disponível em <[www.cgee.org.br](http://www.cgee.org.br)>. Acesso em: 04 dez. 2007.
- MONTEIRO, José Roberto B. de A. **O motor síncrono com ímã permanente no rotor.** 2002. 180p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002. Disponível em <[igbt.sel.eesc.sc.usp.br/~betoets/](http://igbt.sel.eesc.sc.usp.br/~betoets/)>. Acesso em 09 dez. 2007.

PASSOS, Júlio César. Energia eólica: vantagens, desafios e eficiência. Revista on-line Instituto Humanitas Unisinos. 20 set. 2007. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/ihu>>. Acesso em: 03 dez. 2007.

PEREIRA, Edinaldo José da Silva; PINHO, João Tavares; VALE, Silvio Bispo do.

**Revitalização do sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel de Tamaruteua, município de Marapanim, Pará.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1, Fortaleza, 2007. Disponível em <[www.gdae.ufpa.br](http://www.gdae.ufpa.br)>. Acesso em: 29 nov. 2007.

RODRIGUES, Anna Paula de S. P.; BRASIL-JUNIOR, Antônio C. P.. **Otimização de turbinas hidrocínéticas através de algoritmo genético.** In: X Encontro de Modelagem Computacional. Rio de Janeiro, 2007.

ROMERO, Thiago. Eletricidade da biomassa. **Agência FAPESP.** São Paulo, 22 junho 2007, Especiais. Disponível em < [www.agencia.fapesp.br](http://www.agencia.fapesp.br) >. Acesso em: 7 dez. 2007.

SHAYANI, Rafael Amaral. **Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Isolado Utilizando Módulos de 32 Células.** 2006. 250 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOTELO, Guilherme G.; ROLIM, Luis G. B.; FERREIRA, Antonio C.. **Uso de uma máquina de relutância variável para armazenamento energético: uma aplicação para qualidade de energia.** In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMATICA, Rio Grande do Norte, 2002.

VIANNA, Affonso; VIEIRA, Leonardo dos Santos Reis; NASCIMENTO, Marcos Vinícius. **Manual de Aplicação de Sistemas Descentralizados de Geração de Energia Elétrica para projetos de Eletrificação Rural – Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCH's.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2000. 48 p.