



**SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL  
FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

**DIMENSIONAMENTO DO USO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS  
PARA INSTALAÇÕES DE PEQUENO CONSUMO ATRAVÉS  
DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Salvador  
2008

**GUILHERME ANDRIOTTI GAMA**

**DIMENSIONAMENTO DO USO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS  
PARA INSTALAÇÕES DE PEQUENO CONSUMO ATRAVÉS  
DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec como requisito final para obtenção do título de Tecnólogo em 26/6/2008. Orientador: Professor Dr. Edmarcio Antonio Belati.

Salvador  
2008

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
SENAI Cimatec

---

Gama, Guilherme Andriotti

Dimensionamento do uso de energias renováveis para instalações de  
pequeno consumo através de simulação computacional. Guilherme  
Andriotti Gama. -Salvador, 2008.  
37f.

1. Simulação 2. Energias renováveis. I. título

CDD 621.042

---

## Resumo

Com a demanda cada vez maior de energia, novas soluções para aumentar sua geração precisam ser implementadas. Porém, não é apenas necessário aumentar sua geração, mas gerá-la de forma limpa e sustentável. Existem diversos dispositivos capazes de converter a energia oriunda dos recursos renováveis em energia elétrica sem produzir resíduos, a exemplo de células fotovoltaicas e aerogeradores. Tais dispositivos podem trabalhar em conjunto, garantindo um modelo sustentável e limpo de geração de energia, capaz de suprir a demanda de uma residência parcialmente ou até totalmente, tornando-a independente da concessionária de energia. Este trabalho trás um estudo, realizado com simulação matemática, que mostra a viabilidade econômica de implantação de um sistema de geração alternativa em uma residência localizada em Salvador-BA.

**Palavras Chaves:** Simulação, Energias renováveis, MATLAB, Eólica, Solar.

## **Abstract**

Due a growing demand of energy, new solutions to raise the generation need to be implemented. Although, it's not just necessary increase the generation, but generate it in a clean and sustainable way. There are many devices capable to convert energy from natural resources into electric energy without produce waste, for example photovoltaic cells and wind turbines. These devices can work together, granting a sustainable and clean model of energy generation, capable to supply the demand of a house partially or totally, becoming independent of the energy concessionaire. This paper brings a study, realized with mathematical simulations, that shows the economical feasibility of the implementation of an alternative generation system in a house at Salvador-BA.

**Keywords:** Simulation, Renewable energy, MATLAB, Eolic, Solar.

## Índice de Figuras

Figura 1. Mapa conceitual.....	12
Figura 2. Diagrama exemplificando um processo de transformação de energia.....	15
Figura 3. Potencial energético das marés em MW/km.....	20
Figura 4. Oferta interna de energia no Brasil segundo o Ministério de Minas e Energia em 2006 (versão editada).....	21
Figura 5. Consumo de energia elétrica interna em GW, retirada da EPE (Empresa de Pesquisa Energética).....	21
Figura 6. Recursos energéticos do mundo, retirado do portal <i>Energy Revolution</i> (disponível em <a href="http://www.energyblueprint.info">http://www.energyblueprint.info</a> ).....	22
Figura 7. Junção PN.....	24
Figura 8. Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício genérica.....	24
Figura 9. Esquemático de uma instalação de aquecedor solar.....	26
Figura 10. Detalhes de uma turbina eólica moderna.....	27
Figura 11. Interação entre os dispositivos responsáveis pela geração alternativa ....	29
Figura 12. Estrutura básica da simulação.....	30
Figura 13. Perfil sazonal da radiação solar incidente na cidade de Salvador – BA ...	31
Figura 14. Simulação em diagrama blocos no Simulink.....	33
Figura 15. Gráfico Representando Tempo X Custo.....	36

## Sumário

Índice de Figuras.....	7
1 - Introdução .....	10
1.1 - Objetivo geral.....	11
1.2 - Objetivos específicos .....	11
1.3 - Revisão Teórica .....	12
1.4 - Metodologia .....	13
2 - Fundamentação Teórica .....	14
2.1 - Conceito de Energia.....	14
2.2 - Formas de Energia.....	14
2.3 - Leis da Conservação .....	14
2.4 - Energias Renováveis .....	15
2.5 - Tipos de Energia Renováveis .....	15
2.5.2 - Energia Eólica.....	16
2.5.3 - Biomassa .....	17
2.5.4 - Geotérmica .....	18
2.5.5 - Hídrica.....	18
2.5.6 - Oceanos.....	19
3 - Balanço Total de Energia no Brasil.....	20
4 - Oferta das Energias Solares e Eólicas.....	21
5 - Dispositivos Geradores .....	22
5.1 - Células Fotovoltaicas .....	22
5.2 - Aquecedores Solares.....	24
5.3 - Aerogeradores .....	26
6 - Impactos Sociais e Ambientais .....	27
7 – Cenário.....	28
7.1 - Controladores de Carga.....	28
7.2 - Inversor de Frequência .....	28
7.3 - Bateria Elétrica.....	29
8 – Estrutura das Simulações.....	30
8.1 - Ferramentas Para Desenvolvimento.....	30
8.2 – Estrutura Geral do Simulador .....	30

8.3 – Estudo de Caso Utilizando as Simulações.....	33
8.3 – Análise de Custo do Estudo de Caso.....	35
6m <sup>2</sup> de coletores solares de alto rendimento: R\$ 1560,00.....	36
9 – Considerações Finais.....	36
9.1 – Paradigma da Geração.....	37
Referências.....	38

## 1 - Introdução

Devido ao impacto ambiental e social causados pelas fontes de geração de energia tradicionais, tornou-se imperativo pensar e adotar soluções para criação de sistemas e dispositivos capazes de gerar energia oriunda de fontes renováveis produzindo eletricidade e causando impactos substancialmente menores que os métodos convencionais. A energia também vem se tornando um bem cada vez mais caro, tornando necessário buscar alternativas para reduzir o custo e os impactos ambientais de sua geração.

Dentro desse contexto, existem projetos concretizados desde aerogeradores de pequeno porte para instalações domiciliares, até parques eólicos capazes de gerar centenas de Mega Watts. Atualmente diversos países já estão tirando proveito de recursos naturais para geração de energia limpa, como por exemplo Portugal, que possui 106 parques eólicos e 703 turbinas eólicas gerando ao todo aproximadamente 1.131 MW de potência (*dados de fevereiro de 2006 retirados do portal [www.energiasrenovaveis.com](http://www.energiasrenovaveis.com)*). Há também projetos para geração de energia solar através de células fotovoltaicas, garantindo luz em comunidades distantes do sistema de distribuição convencional. Existem também modelos de moradias que se utilizam de ambos os meios de geração aliados aos aquecedores solares de água, e outros dispositivos eletrônicos, agindo em conjunto para uma geração integrada e economia de energia elétrica.

Dos trabalhos pesquisados, foi identificado softwares de cunho puramente comercial visando o dimensionamento de tais instalações, a exemplo do *Valentin EnergieSoftware* (disponível em <http://www.valentin.de>).

A principal contribuição deste projeto é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de dimensionar instalações e realizar uma previsão de custos dos dispositivos que geram eletricidade e aquecem água através das fontes renováveis de energia.

## 1.1 - Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é gerar um modelo no MATLAB capaz de simular o funcionamento das células fotovoltaicas, aquecedores solares e aerogeradores nas diversas condições de geração (fatores sazonais e regionais), com o objetivo de coletar dados para servir de embasamento para uma previsão de custos e dimensão da instalação destes dispositivos.

## 1.2 - Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em avaliar quantitativamente e qualitativamente os dados coletados através das seguintes atividades:

- a. Analisar o desempenho do sistema;
- b. Comparar com os perfis de consumo e geração de energia elétrica convencional;
- c. Obter a relação custo & benefício da instalação deste sistema, a curto, médio e longo prazo;
- d. Avaliar os impactos ambientais e socioeconômicos;
- e. Analisar a viabilidade do sistema de geração de energia limpa para uma instalação doméstica.

A Figura 01 consiste num mapa conceitual, uma ferramenta para organizar e representar o conhecimento, demonstrando de forma macro os tópicos abordados neste projeto de pesquisa e a relação entre os mesmos.

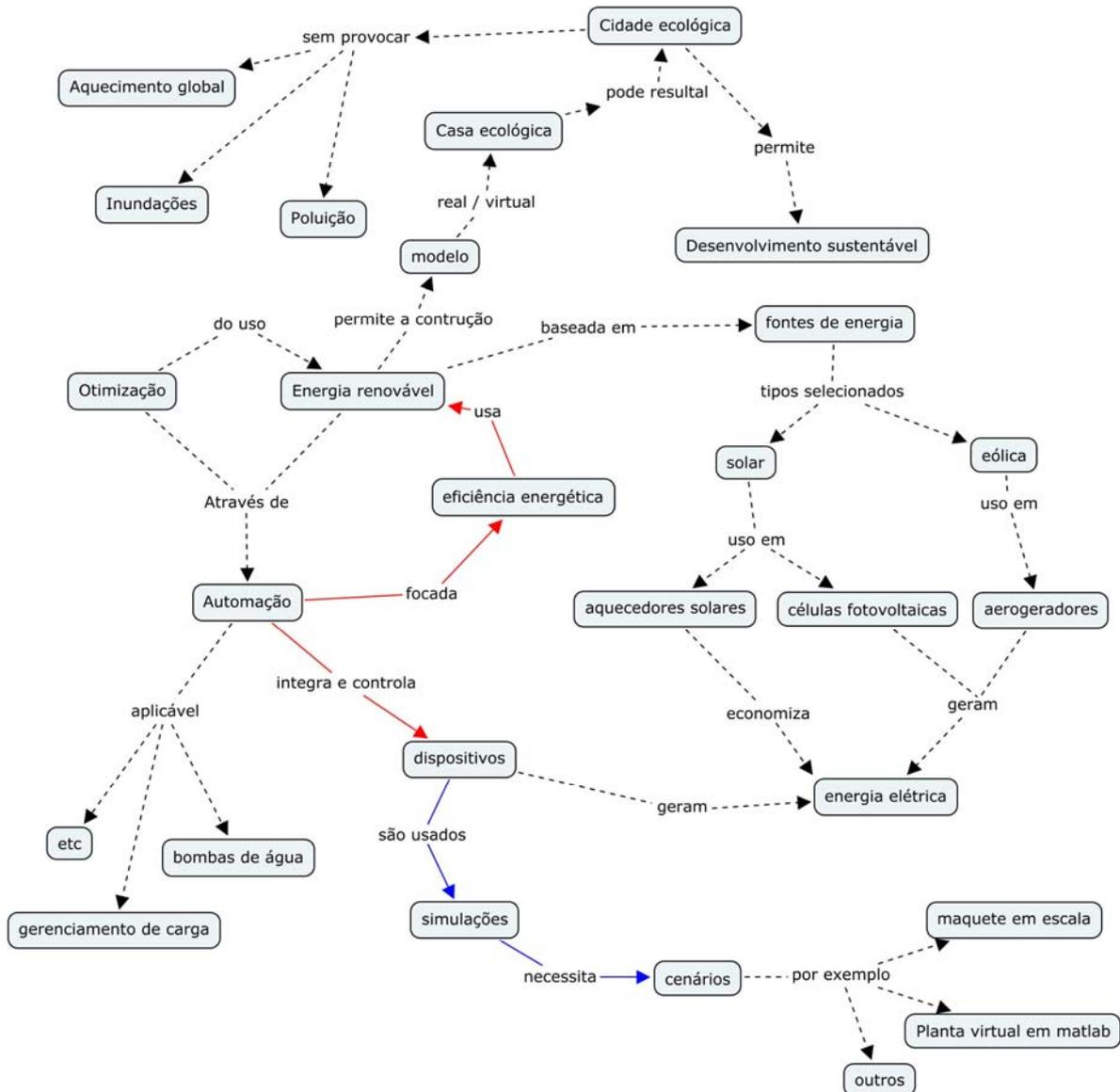


Figura 1. Mapa conceitual.

### 1.3 - Revisão Teórica

Os meios atuais de geração de energia causam grande degradação ao planeta. A utilização de energias renováveis aliadas a eficiência energética, podem gerar um modelo de cidade ecológica, propondo um cenário de geração sustentável sem a produção de resíduos.

## 1.4 - Metodologia

Será realizado um estudo do uso dos recursos naturais para geração de energia elétrica e água quente, visando suprir a demanda de tais elementos em uma casa ou moradia qualquer. As simulações matemáticas participarão como meio de obtenção e previsão de dados para uma avaliação do custo & benefício da adoção de um sistema alternativo de geração de tais recursos. Esse estudo seguirá os seguintes passos:

1. Estudo dos seguintes dispositivos:
  - a. Projetos existentes focados no aproveitamento das energias limpas;
  - b. Células fotovoltaicas;
  - c. Aquecedores solares para água;
  - d. Sistemas de armazenamento térmico (boilers);
  - e. Aerogeradores;
  - f. Sistema de armazenamento (baterias);
  - g. Sistema de controle de carga para as baterias.
  
2. Estudo da dinâmica das fontes alternativas, sol (irradiação solar) e ventos (velocidade e direção), para prever fatores de grande pertinência a serem levados em consideração nas simulações como o comportamento de tais elementos devido a mudanças regionais e sazonais;
  
3. Geração de um modelo em MATLAB capaz de simular o funcionamento dos dispositivos nas mais diversas condições de geração, demanda e consumo, com o objetivo de coletar dados e dimensionar as instalações conforme os objetivos dados como dados de entrada da simulação;

## 2 - Fundamentação Teórica

### 2.1 - Conceito de Energia

Energia possui varias definições, cada uma gerada a partir do seu meio de aplicação específica, seja mecânica, elétrica ou calorífica. Há também definições mais filosóficas, com por exemplo a de Aristóteles: *“energia é realidade em movimento”*. Atualmente a mais usada e encontrada nos livros é: *“energia é a medida de capacidade de efetuar trabalho”*, porém a definição mais adequada foi a proposta por James Clark Maxwell em 1872: *“a energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a essa mudança”*.

### 2.2 - Formas de Energia

Fisicamente a energia apresenta-se de diversas formas. A fonte fundamental de energia do universo provem de reações nucleares no interior das estrelas, assim como o sol, em um processo físico onde há fusão de dois núcleos atômicos liberando significativas quantidades de energia. Semelhante a energia nuclear, existe a energia atômica, caracterizada pela fissão de átomos resultando também na liberação de significativas quantidades de energia.

Outra importante forma de energia é a que está presente na forma de ligações entre os átomos e moléculas, mais conhecida como energia química. Proveniente das reações químicas de combustão ou de oxirredução nas baterias, é também a mais poluente, devido a liberação de gases e particulados gerados nas reações de combustão de materiais como gasolina, álcool, óleo combustível e lenha. Existem também as energias mecânica, elétrica e térmica, que comumente são geradas através das formas citadas anteriormente. [Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos- p3, 2001]

### 2.3 - Leis da Conservação

Os processos energéticos consistem basicamente na transformação de um tipo de energia em outras. Um exemplo deste processo é a energia térmica irradiada pelo

sol que passa por uma sucessão de transformações como as ilustradas na Figura 02 logo abaixo:

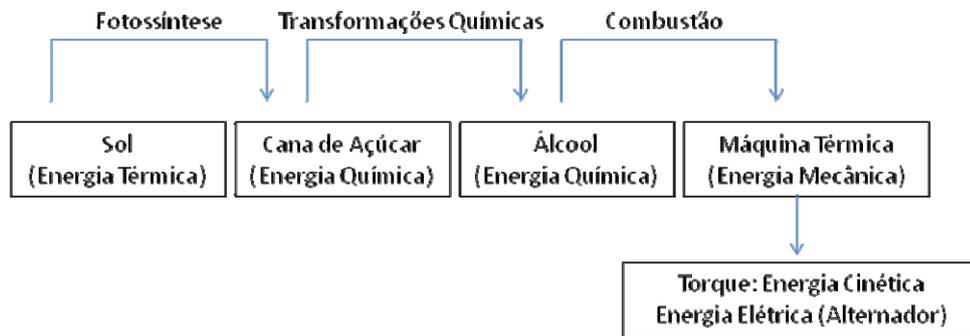


Figura 2. Diagrama exemplificando um processo de transformação de energia.

Essas relações físicas ilustradas na Figura 02 se sustentam na *Lei da Conservação de Energia*. Segundo este postulando, a energia não se cria nem se destrói, apenas se transforma de uma forma para outra. A lei da conservação de energia também é conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica. Ela permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas quantificando fluxos energéticos. Deste conceito surge a análise de eficiência energética, introduzindo um parâmetro presente em todos os sistemas de transformação de energia e trabalho: o rendimento. Este parâmetro tem origem basicamente nas inevitáveis perdas térmicas nos processos de conservação de energia e geração de trabalho, e pode ser obtido pela razão entre a energia produzida e a energia consumida ou recebida.

## 2.4 - Energias Renováveis

Consideradas como energias alternativas ao modelo energético tradicional, a energia renovável é obtida de uma fonte limpa e ilimitada, proveniente dos recursos naturais capazes de se regenerar, portanto virtualmente inesgotável. Um grande exemplo é o sol, pois independente da quantidade de energia que a humanidade consuma dele em um dia, no dia seguinte a disponibilidade de energia solar será a mesma.

## 2.5 - Tipos de Energia Renováveis

Existem diversas fontes de energias renováveis, dentre as mais comuns estão:

1. Solar;

2. Eólica;
3. Biomassa;
4. Geotérmica
5. Hídrica;
6. Oceanos.

Estas diversas fontes são descritas em detalhes a seguir.

### 2.5.1 - Energia Solar

A energia solar representa a maior parcela dentre as demais em termos de oferta. Segundo o portal *Energy Revolution* (disponível em <http://www.energyblueprint.info>) a taxa de energia que a terra recebe do sol é 2850 vezes maior do que a consumida atualmente e com a tecnologia atual, a energia solar que pode ser aproveitada representa 3,8 vezes a demanda atual mundial.

A radiação solar pode ser convertida em eletricidade através das células fotovoltaicas ou energia térmica nos coletores solares comumente usados para aquecer água. Ambos os meios de geração necessitam de acumuladores que conservem a energia produzida. Para a eletricidade gerada são usadas baterias elétricas, acumulando a mesma em forma de energia química. Já para os coletores solares, a energia térmica é acumulada em *boilers*, que são tanques de água isolados termicamente para manter a temperatura da água aquecida.

Junto com a eólica, esta é uma das mais promissoras fontes de energia alternativas para substituir as tradicionais. O problema atual da energia solar é fazê-la funcionar de forma suficientemente econômica para que possa ser utilizada em larga escala. Este é um problema que assume caráter mundial, e conseqüentemente soluções virão. [Uso da Energia Solar no Brasil, 2007]

### 2.5.2 - Energia Eólica

A energia eólica é a energia oriunda dos ventos. Ela é muito utilizada desde a antiguidade para gerar trabalho nos moinhos de vento, que por sua vez eram usados para moer cereais ou bombear água. O vento resulta do deslocamento de massas de ar, derivado dos efeitos das diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões

distintas, essas diferenças de pressão têm uma origem térmica estando diretamente relacionadas com a radiação solar e os processos de aquecimento das massas de ar. É interessante observar que na verdade a energia eólica é gerada por mais um processo de transformação de energia oriunda do sol.

A energia cinética dos ventos, resultante do deslocamento das massas de ar, é transformada em energia mecânica através de aerogeradores, também chamadas de turbinas eólicas. Estes dispositivos possuem hélices ou pás que através de um binário, medida de força rotacional exercida sobre um eixo, causado pelo vento geram um torque no rotor. Este rotor está acoplado em um gerador elétrico, produzindo eletricidade.

Nos últimos 20 anos, a energia eólica se tornou a fonte de energia com a maior taxa de crescimento mundial. Atualmente as turbinas eólicas são fabricadas com muita sofisticação e empregam bastante tecnologia, gerando altos níveis de eficiência. Existem diversas turbinas disponíveis no mercado com uma grande gama de tamanhos e potências, variando de poucos KW até mais de 5000KW ultrapassando mais de 100 metros de altura sendo capazes de produzir energia para mais de 1000 casas.

A implantação de parques eólicos geram certos impactos, como poluição sonora oriunda dos ruídos gerados pelos aerogeradores, poluição visual devido a concentração destes dispositivos em áreas que geralmente são afastadas dos grandes centros urbanos e a morte de aves que esporadicamente se chocam com as turbinas de maior porte. [Portal das Energias Renováveis, 2007]

### 2.5.3 - Biomassa

A energia oriunda da biomassa consiste no aproveitamento da energia química acumulada nos derivados recentes dos organismos vivos. Através da fotossíntese, as plantas capturam energia do sol e transformam-na em energia química. Esta energia pode ser convertida em várias formas de energia. Dessa forma a biomassa pode considerar-se um recurso natural renovável.

A biomassa é utilizada na produção de energia a partir de processos como a combustão de material orgânico produzido e acumulado em um ecossistema depois de passar ou não por algum processamento. Os principais materiais são:

- a) Lenha;
- b) Bagaço de cana de açúcar;
- c) Biodiesel, produzido a partir da mamona, do dendê e da soja;
- d) Bioetanol ou etanol celulósico, produzido alternativamente através da hidrólise enzimática da celulose;
- e) Etanol (Álcool), feito a base do sumo extraído da cana de açúcar, do milho ou da beterraba;
- f) Biogás, uma mistura de metano com CO<sub>2</sub> obtidos pela decomposição de materiais com o lixo e alimentos em biodigestores.

Durante a revolução industrial, com o advento da tecnologia a vapor, o uso da biomassa tornou-se primordial para a obtenção de energia mecânica com aplicações na indústria e no setor de transportes. Atualmente junto com os derivados do petróleo, ainda domina o mercado de combustíveis para motores de combustão interna, caldeiras e turbinas de propulsão.

#### 2.5.4 - Geotérmica

É a energia obtida do calor proveniente do interior da terra. Esta é transmitida a superfície por condução ou através de fluxos de água ou gêiseres, com temperatura e pressão suficiente para gerar trabalho através da expansão do vapor em uma turbina ligada a um gerador elétrico.

A energia geotérmica é de difícil aproveitamento, porém este fator não impediu que diversos projetos de usinas fossem implementados, como os existentes na Itália, México e Califórnia.

#### 2.5.5 - Hídrica

Uma das formas de energia mais usadas no Brasil, a energia hidráulica contribui com uma parcela de 14,8% de toda produção interna de energia (*dados de 2006 do Ministério de Minas e Energia*), e possui a maior parcela de participação na geração de eletricidade brasileira.

A energia hidráulica é obtida a partir da energia potencial de uma massa de água. A água acumulada em rios e lagos, podem formar fluxos de escoamento em formas de queda d'água transformando a energia potencial acumulada por diferenças de cota de altura em energia cinética. Esse potencial cinético gera movimento no eixo das turbinas hidráulicas das centrais hidroelétricas, gerando eletricidade. A depender da tecnologia empregada, esses sistemas de geração podem alcançar uma eficiência de 80%, que comparado aos demais meios de geração de eletricidade mostra-se bastante elevado.

Por existir um ciclo da água, evaporação e precipitação, a energia hidráulica é considerada como um recurso renovável, pois dependendo dos efeitos sazonais, a água sempre retorna aos rios e lagos, com exceção nos casos onde a interferência do homem é extrema, ou há mudanças naturais na geografia de um local ao ponto de gerar processos de desertificação, secas e erosão.

#### 2.5.6 - Oceanos

Mais conhecida como energia das marés, esta fonte de geração baseia-se no aproveitamento do deslocamento das águas (movimento ondulatório natural do mar) e as diferenças de temperatura dos oceanos para produzir trabalho que será convertido em eletricidade. Dentre os meios alternativos de produção de energia, este é o menos explorado, fato que contrasta com seu potencial, pois atualmente é uma das formas de energia que apresenta alta capacidade de geração, tendo em conta a força das ondas e a imensidão dos oceanos. Na Figura 03, pode-se visualizar a distribuição mundial deste recurso disponível em águas profundas em MW/km.



Figura 3. Potencial energético das marés em MW/km. Fonte: [http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/oceanos\\_fonte.asp](http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/oceanos_fonte.asp)

O sistema mais comum de geração consiste em um dispositivo no qual a elevação da onda numa câmara de ar provoca a saída do ar lá contido, o movimento do ar pode fazer girar uma turbina. A energia mecânica da turbina é transformada em energia elétrica através do gerador.

A conversão de energia a partir das ondas apresenta claras semelhanças com a eólica. Dado que as ondas são produzidas pela ação do vento. Os dois recursos apresentam idêntica irregularidade e variação sazonal.

### 3 - Balanço Total de Energia no Brasil

O gráfico a seguir traz as parcelas de produção de energia no Brasil também conhecida como oferta interna.

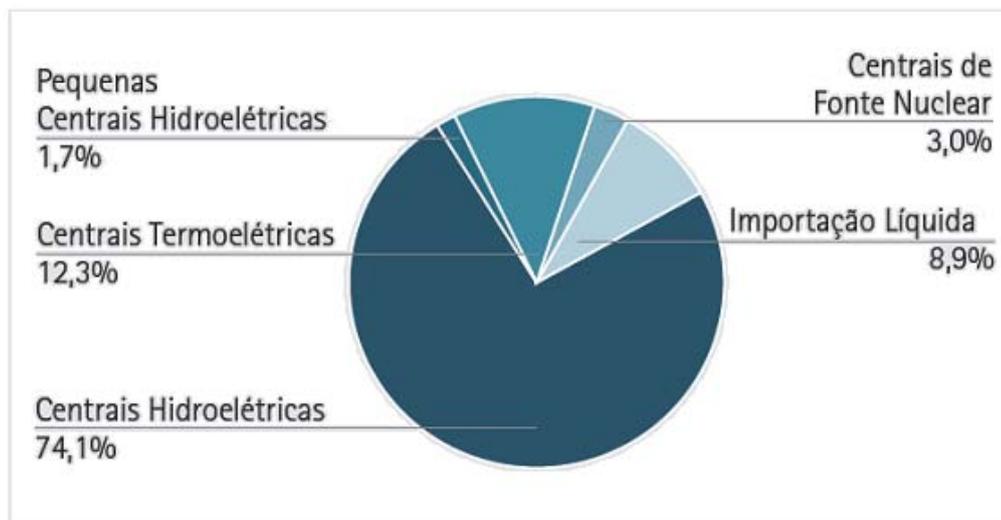


Figura 4. Oferta interna de energia no Brasil segundo o Ministério de Minas e Energia em 2006 (versão editada). Fonte: <http://www.mme.gov.br>

Com a maior parcela de energia oriunda das centrais hidroelétricas (74,1%), o Brasil é um país com altíssimo índice de proveito de seus recursos naturais renováveis. A Figura 05 demonstra o histórico de consumo de energia elétrica interna em GW.

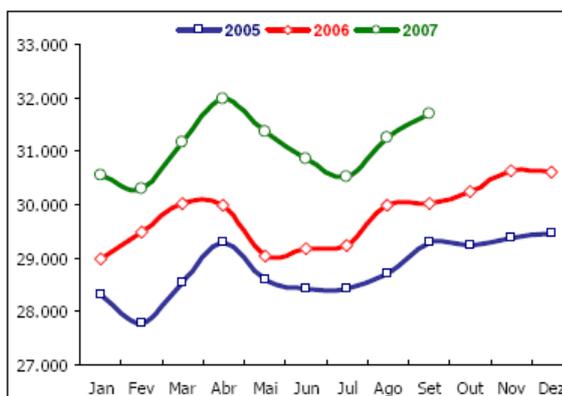


Figura 5. Consumo de energia elétrica interna em GW, retirada da EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Fonte: <http://www.mme.gov.br>

## 4 - Oferta das Energias Solares e Eólicas

O Brasil com oito mil quilômetros de costa, uma média de 7 horas de sol por dia, ventos intensos e 12% de toda água doce do planeta fazem do Brasil o país com um dos maiores potenciais energéticos do mundo. A análise dos dados de vento de vários locais no nordeste do Brasil confirmaram as características dos ventos existentes na região do nordeste: velocidades médias de vento altas, pouca variação nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano, características que

geram um cenário favorável a utilização de turbinas eólicas. Estima-se que o potencial eólico do nordeste é da ordem de 6000MW.

Quase a totalidade da energia incidente sobre a terra é proveniente do sol, em forma de radiação eletromagnética. Esta radiação está distribuída da seguinte forma: 3% de ultravioleta, 42% de visível e 55% de infravermelho. Essa radiação emitida pelo sol em um período de 24h é equivalente a  $3,0 \times 10^{32}$  Joules (unidade de energia, um joule é o trabalho necessário para exercer a força de um Newton pela distância de um metro), podendo com a tecnologia dos dispositivos captadores atuais, suprir em 3.8 vezes a demanda diária de energia mundial. [Energy Blueprint, 2007]

O Brasil tem um potencial estimado de produção de energia solar de 15 trilhões de MWh, porém, essa fonte ainda não faz parte da matriz energética brasileira. Figura 06 apresenta os recursos energéticos mundiais de acordo com a sua disponibilidade.

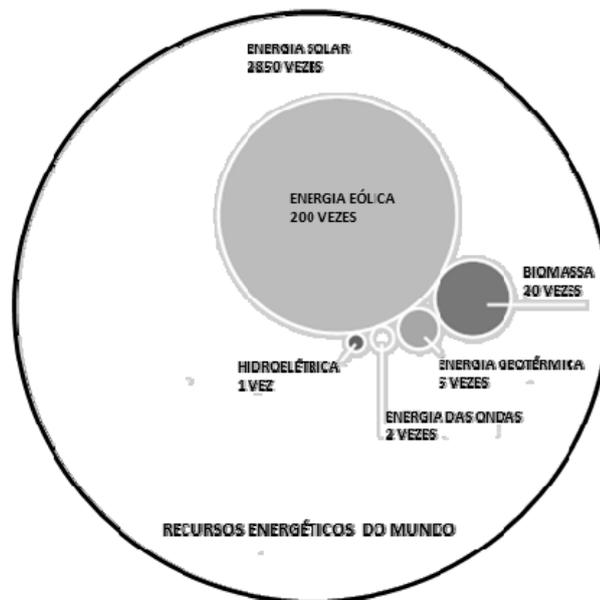


Figura 6. Recursos energéticos do mundo. (*Energy Revolution, 2006*). Fonte: <http://www.energyblueprint.info/resources.0.html>

## 5 - Dispositivos Geradores

Nesta sessão, são apresentados os diversos dispositivos geradores de energia oriunda dos recursos renováveis.

### 5.1 - Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos capazes de converter energia luminosa gerada pelo sol, ou qualquer outra fonte de luz, em um potencial elétrico. Estes dispositivos são formados por camadas semicondutoras dopadas de silício. O silício é um semi-metal de símbolo Si de número atômico 14 (14 prótons e 14 elétrons) com massa atômica igual a 28u. À temperatura ambiente, o silício encontra-se no estado sólido, e é o segundo elemento mais abundante na face da terra. Este semi-metal é um péssimo condutor de eletricidade, pois não possui elétrons livres para mover-se pela sua estrutura cristalina possibilitando a condução de corrente elétrica. Tal característica pode ser modificada adicionando-se impurezas ao silício, processo conhecido como dopagem. Este processo pode gerar dois tipos de materiais semicondutores: semicondutor tipo N (negativo) e tipo P (positivo). O tipo N é obtido a partir da adição de uma pequena quantidade de fósforo ao silício. O fósforo é um não-metal de símbolo P, número atômico 15 (15 prótons e 15 elétrons) e massa atômica igual a 31u. Ao se ligar com o silício, acaba compartilhando 4 elétrons, e pelo fato de possuir 5 elétrons na sua banda de valência, a estrutura cristalina terá agora elétrons livres. O silício tipo N por possuir cargas negativas livres é um condutor muito melhor que o silício puro. Para obter um semicondutor tipo-P, é usado boro como elemento dopante. O boro é um semi-metal de símbolo B, número atômico 5 (5 prótons e 5 elétrons) com massa atômica 11u. Como este semi-metal possui apenas 3 elétrons em sua banda de valência, ao se ligar com silício surgirão buracos oriundos deste déficit de cargas negativas. Agora em vez de ter elétrons livres, o silício tipo-P tem buracos livres. Os buracos também chamados de lacunas, na verdade, são apenas a ausência de elétrons, então eles possuem carga oposta (positiva).

Uma célula fotovoltaica é formada pela junção destes dois materiais semicondutores, formando uma junção PN. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado N passam ao lado P onde encontram os buracos que os capturam. Isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado N, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P. Este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado N. Se uma junção PN for exposta a fótons com energia suficiente, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna, se isto acontecer na região

onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção, processo ilustrado na Figura 07. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas [How Stuff Works, 2000]. A Figura 08 ilustra a estrutura básica de uma célula.

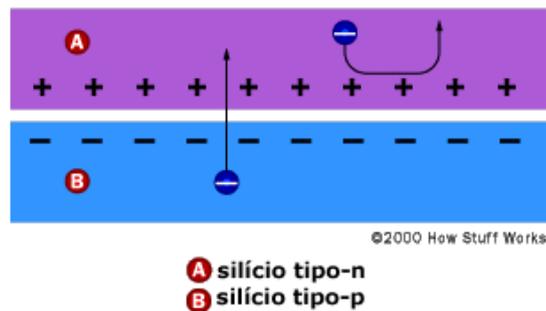


Figura 7. Junção PN.

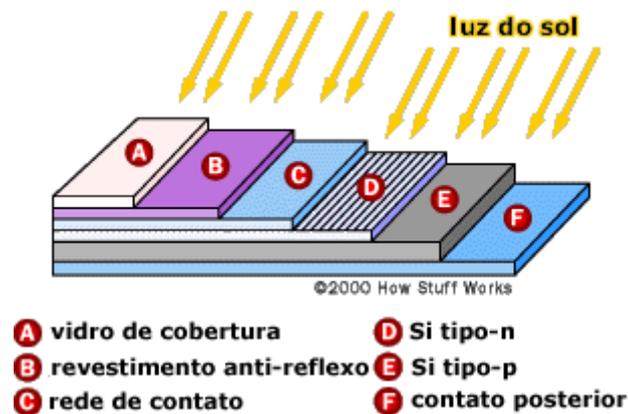


Figura 8. Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício genérica. Fonte: <http://ambiente.hsw.uol.com.br/celulas-solares1.htm>

## 5.2 - Aquecedores Solares

Os aquecedores solares são dispositivos utilizados para aquecer a água a partir da captação da radiação solar. Também chamados de coletores, esses sistemas empregam a conversão termodinâmica de energia. De um modo geral esses dispositivos são constituídos de uma caixa termicamente isolada na parte inferior, contendo sobre esse isolamento um feixe de tubos por onde passam a água. A parte

superior do coletor está fechada por um vidro. Existem vários projetos de fabricação artesanal destes dispositivos usando sucata, principalmente garrafas PET (Poli Tereftalato de Etila) descartadas, gerando modelos de coletores de diferentes formatos, porém, todos possuem o mesmo princípio de funcionamento, acumulando e transmitindo calor para um fluido.

Para acumular a água quente gerada nos coletores, torna-se necessário o emprego de reservatórios térmicos, também conhecidos como boilers. O segredo dos aquecedores solares está na união destes dois componentes que permitem a circulação da água já aquecida para dentro do reservatório, enquanto a água fria escoar para dentro dos aquecedores. A água circula entre os coletores e o reservatório térmico através de um sistema natural chamado termossifão. Nesse sistema, a água dos coletores fica mais quente e, portanto, menos densa que a água no reservatório. Assim a água fria “empurra” a água quente gerando a circulação. Esses sistemas são chamados de convecção natural ou efeito termossifão. A Figura 09 traz uma ilustração esquemática deste sistema. Quando os sistemas possuem grande porte, o efeito termossifão não consegue promover a circulação da água de forma eficiente, tornando-se necessário o emprego de pequenas bombas de água para circulação forçada. [SOLESTROL, 2007]

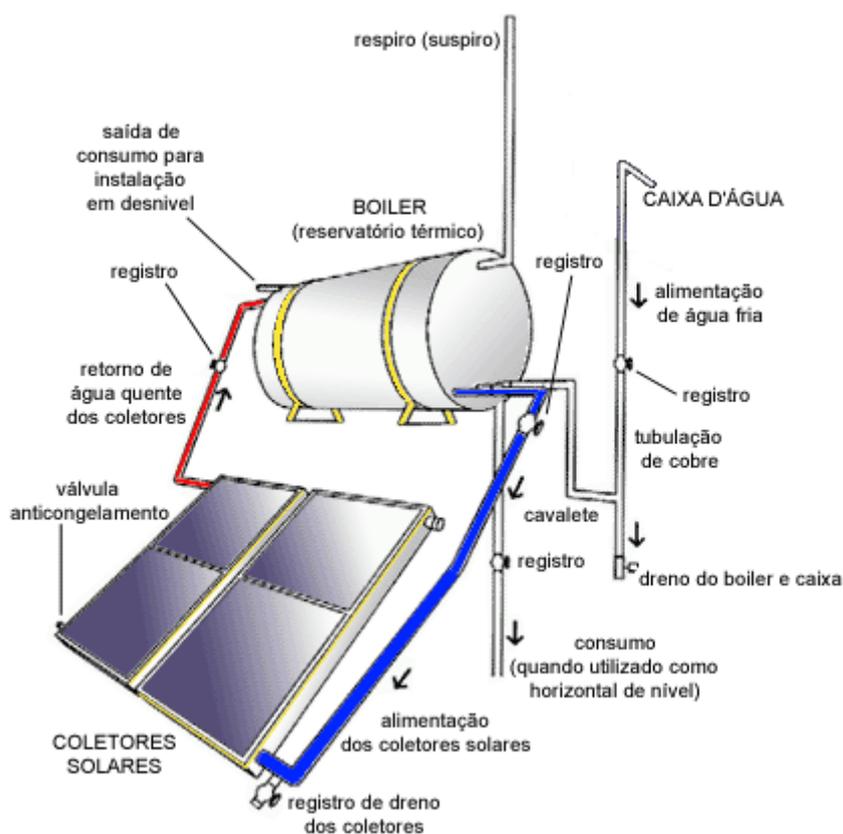


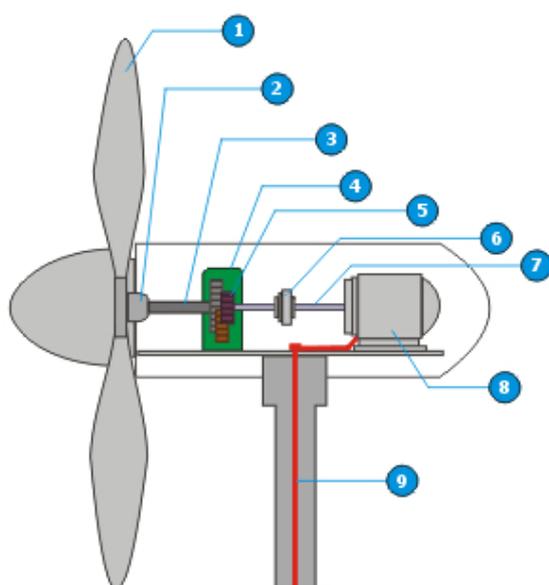
Figura 9. Esquemático de uma instalação de aquecedor solar. Fonte: <http://www.soletrol.com.br/educacional/comofunciona.php>

### 5.3 - Aerogeradores

Quando o ar se move rapidamente em forma de vento, ele traz consigo energia cinética capaz de ser convertida em trabalho. As pás de uma turbina eólica, são projetadas para capturar a energia cinética contida no vento e mover um eixo, gerando energia. Este é o princípio de funcionamento de qualquer dispositivo que gera trabalho a partir da energia cinética dos ventos, dês dos antigos moinhos de vento até as modernas turbinas eólicas.

Ao contrário do antigo projeto de moinho de vento holandês, que dependia muito da força do vento para colocar as pás em movimento, as turbinas modernas usam princípios aerodinâmicos mais sofisticados para capturar a energia do vento com mais eficácia. As duas forças aerodinâmicas principais que atuam sobre os rotores da turbina eólica são o empuxo, que atua perpendicularmente ao fluxo do vento, e o arrasto, que atua paralelamente ao fluxo do vento.

Os geradores eólicos produzidos hoje em dia agregam diversos sistemas embarcados de controle, no intuito de aumentar a eficiência de conversão de energia, aproveitando melhor os ventos. Esses sistemas embarcados consistem em uma série de sensores e atuadores controlados eletronicamente com a finalidade de sentir as mudanças de direção e intensidade do vento, que dificilmente comporta-se de maneira constante devido a fatores de sazonalidades, e alterar parâmetros físicos das turbinas como direção do rotor e ângulos de incidência ou passo das pás visando melhor aproveitamento dos ventos. A Figura 10 ilustra um sistema básico contido nas turbinas eólicas modernas de geração de energia elétrica.



Legenda:

- 1 - Pás do rotor;
- 2 - Rotor;
- 3 - Eixo do rotor de baixa velocidade;
- 4 - Caixa multiplicadora de velocidade;
- 5 - Sistemas de engrenagens;
- 6 - Freio mecânico;
- 7 - Eixo do gerador de alta velocidade;
- 8 - Gerador elétrico;
- 9 - Fios de transmissão elétrica;

Figura 10. Detalhes de uma turbina eólica moderna. Fonte: [http://www.makewiki.com/index.php/Crear\\_una\\_M%C3%A1quina\\_de\\_Movimiento\\_Perpetuo](http://www.makewiki.com/index.php/Crear_una_M%C3%A1quina_de_Movimiento_Perpetuo)

## 6 - Impactos Sociais e Ambientais

Com o emprego das fontes de energias renováveis, principalmente a eólica e a solar, como meio de geração de eletricidade substituindo o modelo tradicional, diversos impactos ambientais e sociais são evitados.

Com a redução do uso de combustíveis fósseis, haverá um decréscimo na poluição do solo e da água, causada pela mineração e processamento. A poluição atmosférica pela emissão de gases e partículas da combustão também será

reduzida drasticamente. E como estes são um dos principais fatores responsáveis pelo efeito estufa, haverá também uma redução deste fenômeno.

O emprego das energias renováveis, poderia também reduzir ou até substituir as usinas nucleares. Ultimamente tem se discutido muito o uso da energia nuclear como uma fonte promissora para o futuro, aumentando mais ainda o seu emprego. Em contraponto com seu uso há o alto risco de acidentes e sérios problemas com os rejeitos que continuam altamente perigosos durante muitos anos, sendo necessária uma estrutura segura para armazená-los durante um longo período de tempo.

Devido ao seu grande uso, e alto potencial de aproveitamento no Brasil, a energia hidráulica dificilmente cederia lugar ao uso das energias eólicas e solares. Porém, novos projetos de usinas hidroelétricas poderiam ser substituídos por fontes alternativas, e a vazão de água nas comportas das usinas poderia ser reduzida. A implantação de uma usina hidroelétrica gera grande impacto ambiental em função das alterações na paisagem, e social em função das inundações oriundas do represamento das águas expulsando os moradores locais.

## 7 – Cenário

Com base na tecnologia existente e disponível no mercado, foi definido um cenário que servirá de modelo para simulação matemática citada anteriormente no escopo dos objetivos gerais e específicos deste trabalho.

### 7.1 - Controladores de Carga

Os controladores fotovoltaicos gerenciam eletronicamente o sistema composto por: bateria, painel fotovoltaico e carga. Este gerenciamento protege o painel, controlando a carga e a descarga da bateria. Regula a tensão enviada pelo painel durante a carga e desliga a bateria quando sua carga está baixa, evitando assim que se descarregue totalmente, o que comprometeria sua vida útil.

### 7.2 - Inversor de Freqüência

Esse dispositivo muitas vezes chamado apenas de inversor tem a função de transformar a tensão acumulada nas baterias, 12v corrente contínua, em uma tensão semelhante a fornecida pelas concessionárias de energia, 110v ou 220v corrente alternada à 60Hz, compatível com a grande maioria dos aparelhos eletrônicos domésticos . É importante enfatizar que inversor não produz energia, pelo contrário, consome cerca de 10 a 15% do consumo do equipamento utilizado.

### 7.3 - Bateria Elétrica

Sua função é acumular a energia produzida pelos geradores, módulo solar ou aerogeradores, e disponibilizá-la posteriormente para uso. Para esse tipo de aplicação são usadas baterias estacionárias de ciclo constante.

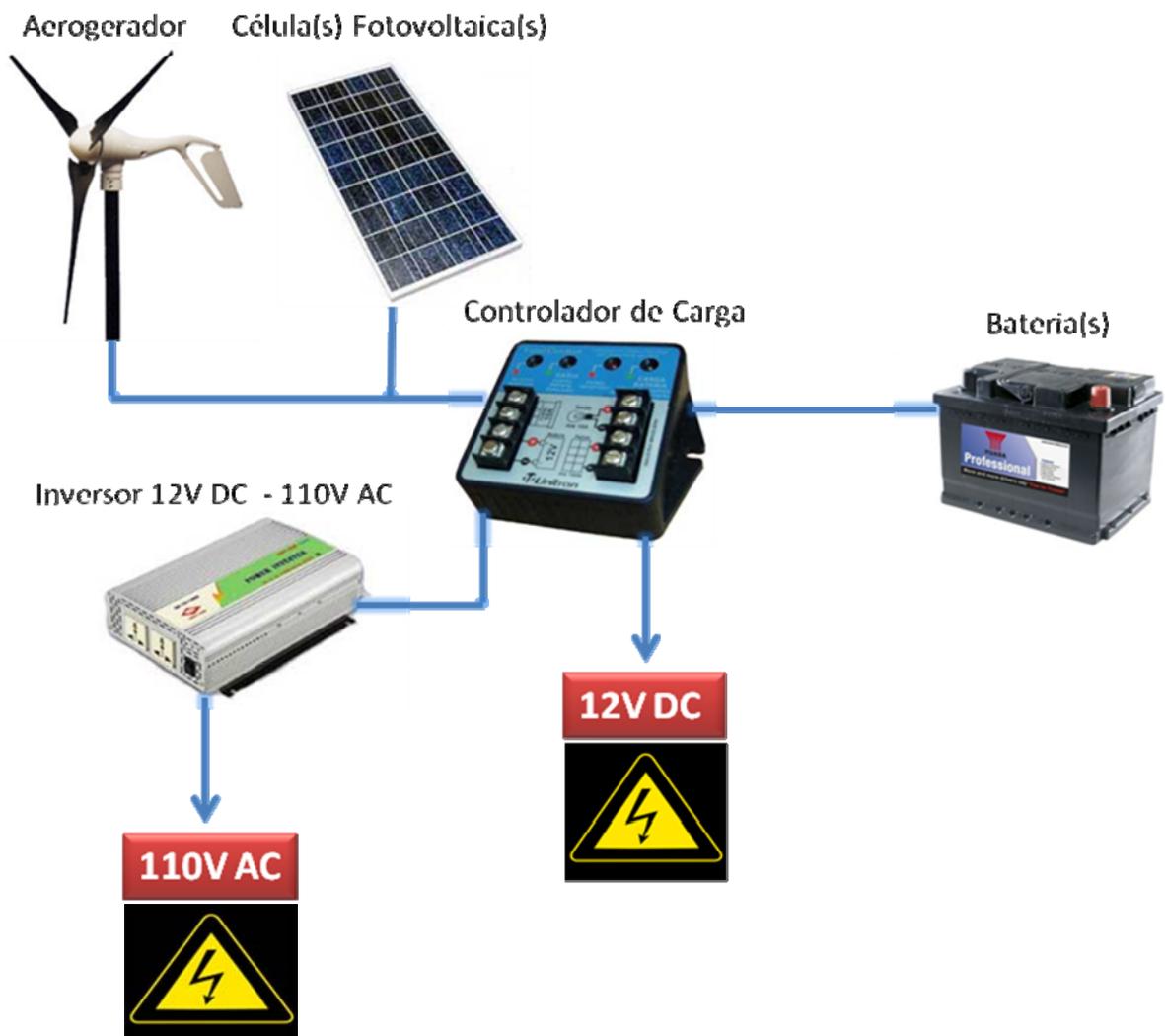


Figura 11 - Interação entre os dispositivos responsáveis pela geração alternativa

## 8 – Estrutura das Simulações

### 8.1 - Ferramentas Para Desenvolvimento

As simulações foram desenvolvidas a ferramenta matemática MATLAB; “MATLAB (*MATrix LABoratory*) é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.” [The MathWorks, 2008] O modelo matemático, estrutura com as equações algébricas que representam o sistema físico, foi construído dentro de uma ferramenta interna do MATLAB, o Simulink: um ambiente de digramas de blocos abrangente para simulação e criação de modelos matemáticos.

### 8.2 – Estrutura Geral do Simulador

Através do Simulink, em um diagrama de blocos fora montada a estrutura matemática com as equações e relações que governam os sistemas físicos. Estas equações descrevem o comportamento, saídas do sistema, dos dispositivos geradores (células fotovoltaicas, aquecedores solares e aerogeradores) mostrando como os mesmos se comportam a um determinado tipo de excitação, que são as entradas do sistema, como por exemplo, alguma variação na velocidade do vento ou na intensidade da irradiação solar. Essa estrutura segue o modelo da figura 12.



Figura 12. Estrutura básica da simulação.

O modelo matemático é dividido em três tipos básicos de blocos:

1 - Blocos primários: esses possuem a função de gerar as entradas de dados necessárias para a simulação. Alguns destes blocos apenas repassam os dados inseridos pelo executor da simulação, enquanto outros carregam com sigilo dados que não cabem ao usuário a serem informados, como por exemplo, o histórico médio da irradiação solar durante um ano ou o perfil de comportamento dos ventos durante um ano. A figura 13 apresenta o gráfico que é utilizado como base de dados para as simulações que envolvem o potencial energético solar.

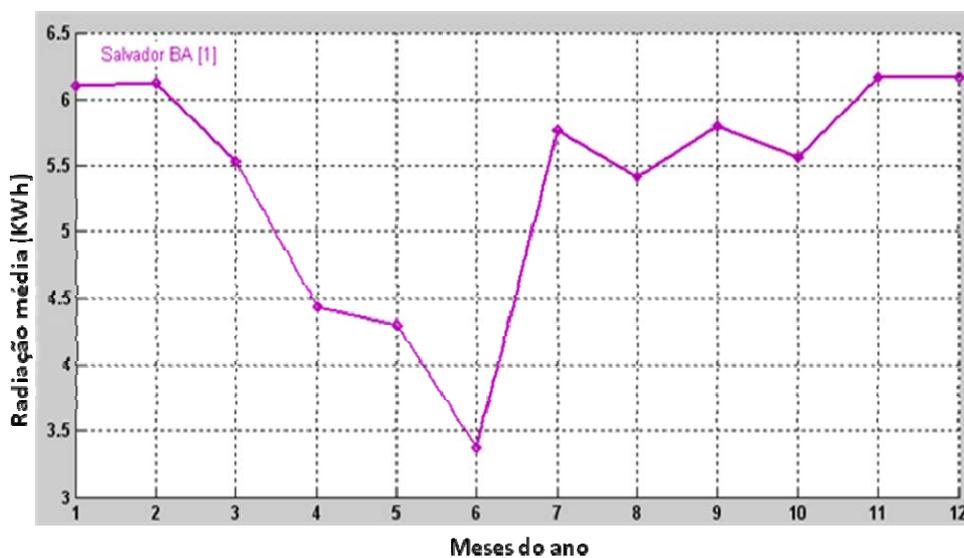


Figura 13 - Perfil sazonal da radiação solar incidente na cidade de Salvador – BA

Os dados utilizados para a criação deste perfil foram retirados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). Este centro tem como missão promover o desenvolvimento das energias solar e eólica através da difusão de conhecimentos, da ampliação do diálogo entre as entidades envolvidas e do estímulo à implementação de estudos e projetos. [CRESESB, 2008]

O CRESESB disponibiliza tais dados através de seu portal na internet. Estes dados são oriundos do programa SUNDATA, que por sua vez baseia-se no banco de dados CENSOLAR (1993) contendo valores de radiação média diária mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes.

Para este trabalho foram usados os dados fornecidos por este centro usando como referência as coordenadas geográficas  $-12.971^{\circ}\text{S}$  e  $38.511^{\circ}\text{W}$  que apontam para as proximidades do aeroporto internacional de Salvador na Bahia.

2 - Blocos secundários: nestes blocos estão contidas as equações matemáticas que descrevem os sistemas físicos. Através delas pode-se obter uma previsão com considerável fidelidade de como os dispositivos descritos anteriormente vão responder às excitações (entradas de dados).

3 – Blocos terciários: estes blocos possuem a função de capturar os dados oriundos da fase secundária em intervalos discretizados. Esses dados apresentam-se na forma de tabelas (*arrays*), e são usados para calcular valores médios e estimar custos.

Na figura 14, pode-se visualizar essas estruturas de blocos capturadas diretamente da tela do Simulink.

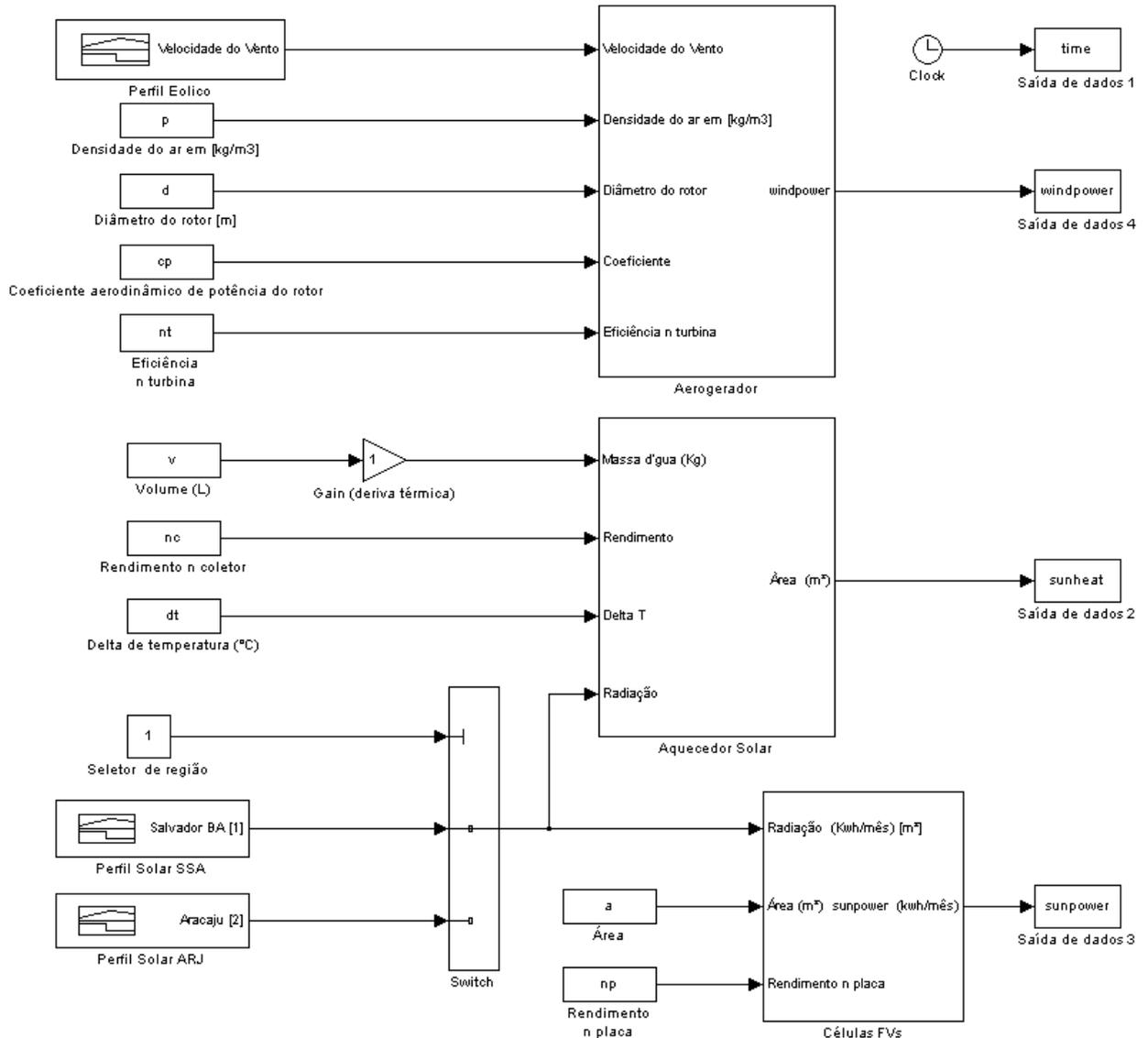


Figura 14 - Simulação em diagrama blocos no Simulink.

### 8.3 – Estudo de Caso Utilizando as Simulações

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo médio de energia residencial no Brasil é de 151 KWh/mês (projeções para 2008). Deste valor, estima-se que 25% a 60% é gasto para o aquecimento de água com chuveiros elétricos (dados retirados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2007). Com a posse destes dados, são traçados os objetivos de redução de consumo energético e auto-suficiência parcial ou total, a depender do nível de investimento financeiro.

Será adotado um exemplo comum para a realização de uma simulação, para uma residência na cidade de Salvador – BA onde moram 3 pessoas, com os seguintes objetivos:

1. Implantação de um sistema de aquecimento de água para o banho baseado em coletores solares; Segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), um banho de ducha de 15 minutos, com o registro meio aberto, consome 135 litros de água. Porém, 15 minutos é um tempo consideravelmente alto para o tempo médio de um banho. Mantendo esta mesma proporção para uma ducha de 10 minutos o consumo de água por banho passa a ser de 90 litros. Como em média uma pessoa toma 2 banhos por dia, para uma moradia onde residem 3 pessoas a demanda de água quente é de 540 litros.

É válido ressaltar que com a tecnologia atual disponível no mercado, para regiões onde o potencial solar é elevado com a Bahia, é possível obter água aquecida na ordem de 80°C, tornando necessário o uso de um circuito misto de água para promover a mistura com uma corrente fria. O excedente de água não utilizada é armazenada em boilers térmicos que a mantêm aquecida para o período da noite e para as primeiras horas do dia.

2. Devido a limitações financeiras que se tornam um grande empecilho para a implementação destes sistemas alternativos de geração, será considerado apenas a implantação de 2m<sup>2</sup> de células fotovoltaicas para geração de energia elétrica.
3. Tempo limite máximo de retorno financeiro do investimento de 5 a 7 anos. Lembrando que após completo o tempo de retorno dos custos iniciais, esses sistemas de geração agregarão apenas economias financeiras oriundas da parcela de energia gerada que não mais precisará ser comprada da concessionária. Levando em consideração que essas instalações possuem uma vida útil de 20 anos, serão obtidos 12 a 15 anos de economia.

4. Por se tratar de uma moradia localizada na zona metropolitana onde há muitas barreiras para livre circulação do vento a pequenas alturas, será descartado o uso de aerogeradores.

Tais objetivos geram os seguintes dados de entrada:

- Volume de água a ser aquecido diariamente: 540 l.
- Área de células fotovoltaicas: 2m<sup>2</sup>.
- Diâmetro do rotor dos aerogeradores: 0m.
- Temperatura média da água quente: 60°C.

Rodando as simulações foram obtidos os seguintes dados de saída:

Energia Solar:

- Média diária mensal: 2,87 kWh/dia
- Média mensal: 86,24 kWh

Energia Térmica:

- Área média: 5,68 m<sup>2</sup>

Considerando uma conta de luz que até então possuía um valor por volta de 151KWh mês, uma geração alternativa com média de 86,24 KWh mês representa 57,11% deste valor, que será diretamente refletido como uma redução no valor da conta de luz. Há também uma parcela de energia que será economizada no aquecimento de água que como dito anteriormente pode representar até 60% do valor da conta de luz em uma residência. Estes dois fatores unidos representam uma economia ainda maior, justificando o investimento financeiro na geração alternativa.

### 8.3 – Análise de Custo do Estudo de Caso

2 m<sup>2</sup> de células fotovoltaicas: R\$ 2090,00

Bateria estacionária de ciclo constante 100 ah: R\$ 250,00

Controlador de carga: R\$ 120,00  
 Inversor de frequência 400W: R\$ 175,00  
 Custos com instalação e fiação: R\$ 260,00  
 6m<sup>2</sup> de coletores solares de alto rendimento: R\$ 1560,00  
 Boiler térmico de 540 l com auxílio elétrico: R\$ 1800,00  
 Custos com instalação e encanamento: R\$ 90,00  
 Total: R\$ 6345,00

Custo do KWh fornecido pela concessionária de energia (Coelba): R\$ 0,48533

Considerando 86,24 KWh gerados pelas células fotovoltaicas mais 60% de economia agregado ao sistema de aquecimento solar, tem-se um total de 176.84 KWh mensais que não será mais adquirido da concessionária gerando uma economia de R\$ 85,83 ao mês. No período de um ano, esse valor será de R\$ 1029,91. O retorno financeiro será obtido em 6 anos e 2 meses.

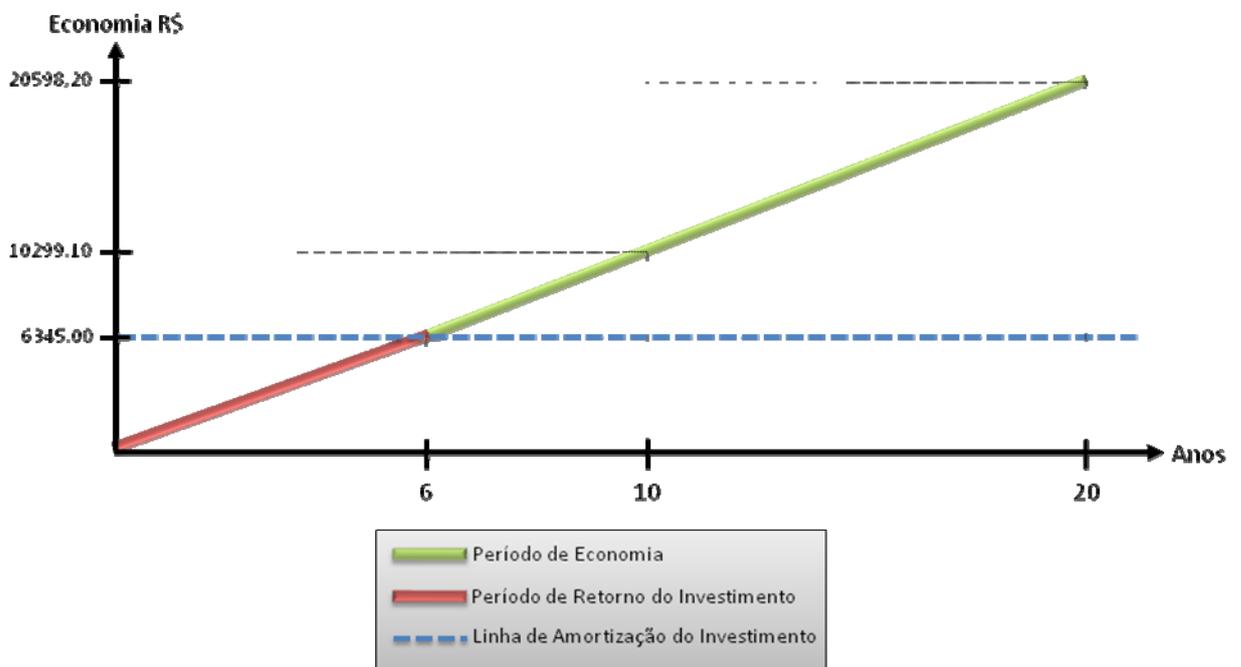


Figura 15 - Gráfico Representando Tempo X Custo

## 9 – Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentado um estudo de viabilidade de implantação de um sistema de energia alternativa aplicada a uma residência de Salvador-BA, que contou com um modelo matemático, representando o sistema físico, construído no Simulink, ferramenta interna do MATLAB. Os resultados mostraram que em poucos anos os custos de implantação são amortizados, demonstrado graficamente na figura 15, e que a longo prazo a aplicação se torna economicamente viável. Dependendo da carga, várias configurações podem ser utilizadas, como exemplo a adoção de aerogeradores que para áreas mais afastadas dos grandes centros urbanos como as localidades rurais, tornam-se uma ótima alternativa principalmente para suprir a demanda de equipamentos aplicados a irrigação ou tornar a propriedade auto-suficiente na produção de energia elétrica. Os aerogeradores também podem ser utilizados em uma configuração que operem juntamente com células fotovoltaicas, gerando energia de forma integrada suprimindo a demanda de potência nos períodos onde, por fatores sazonais, a oferta de uma das fontes naturais, solar ou eólica, torne-se baixa. Nesta configuração o sistema de geração torna-se mais confiável, pois, os picos e vales da oferta destes recursos naturais encontram-se em períodos opostos ou bem defasados.

## 9.1 – Paradigma da Geração

A adoção de um sistema alternativo de geração de energia não deve ser encarada apenas como uma questão econômica, mas também como um paradigma a ser quebrado: não é apenas necessário aumentar a geração de energia elétrica, mas gerá-la de forma limpa e sustentável. A quebra deste paradigma contribuiria para a redução em considerável escala dos problemas citados na secção 6 (Impactos Sociais e Ambientais) deste trabalho.

## Referências

Balanço Energético Nacional 2007, disponível em  
< <http://www.mme.gov.br> > . Acesso em: 11 dez. 2007.

BEZERRA, Arnaldo Moura. **Aplicações Térmicas da Energia Solar**. Segunda edição, João Pessoa, Editora Universitária/UFPb, 1986.

Centro Brasileiro de Energia Eólica, disponível em  
< [http://www.eolica.org.br/index\\_por.html](http://www.eolica.org.br/index_por.html) > . Acesso em: 10 dez. 2007.

COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. **Atlas De Energia Eólica Do Estado Da Bahia**. Bahia, Iberdrola Empreendimentos do Brasil S.A., 2000.

Como funcionam as células solares, disponível em:  
<<http://ambiente.hsw.uol.com.br/celulas-solares.htm>>. Acesso em 09 dez. 2007.

Enio Bueno Pereira, Fernando Ramos Martins, Samuel Luna de Abreu, Ricardo Rüther. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Primeira Edição, São Jose dos Campos 2006.

Eólica, Estado em Portugal, disponível em  
<[http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/eolica\\_pt\\_atualidade.asp](http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/eolica_pt_atualidade.asp)>.  
Acesso em: 07 out. 2007.

Luiz Augusto Horta Nogueira, Electo Eduardo Silva Lora, Flávio Neves Teixeira, Luiz Augusto Horta Nogueira, Jamil Haddad, Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama, Edson da Costa Bortoni, Afonso Henriques Moreira Santos, Roberto Akira Yamachita, Jamil Haddad, Augusto Nelson Carvalho, Marcelo José Pirani, Osvaldo José Venturini, Alexandre Augusto Simões, Manoel da Silva Valente de Almeida, André Ramon Silva Martins, Edson da Costa Bortoni, Afonso Henriques Moreira Santos, Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama, Valberto Ferreira da Silva,

José Antônio Cortez. **Conservação de Energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá, MG: FUPAI, Editora da EFEI, 2001.

Mônica Mello. Energia que renova. In. **Bahia Indústria, Revista Da Federação Das Indústrias Do Estado Da Bahia**. – Ano XVI, Nº 175, agosto 2007, 16-20p.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, disponível em <<http://www.sabesp.com.br>>. Acesso em: 22 jun. 2008.

Tabela de Tarifa e Preço Final de Energia Elétrica – COELBA, disponível em <[www.coelba.com.br](http://www.coelba.com.br)>. Acesso em: 23 jun. 2008.

The MathWorks, MATLAB, disponível em <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 19 jun. 2008.

**Uso da Energia Solar no Brasil**. CONPET (Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e do gás natural), disponível em: <[http://www.conpet.gov.br/noticias/noticia.php?id\\_noticia=487&segmento=>](http://www.conpet.gov.br/noticias/noticia.php?id_noticia=487&segmento=>)>. Acesso em: 13 dez. 2007.

Figura 3. Potencial energético das marés em MW/km. Disponível em: <[http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/oceanos\\_fonte.asp](http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/oceanos_fonte.asp)> Acesso 10 dez. 2007.

Figura 4. Oferta interna de energia no Brasil (versão editada). Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> . Acesso em: 11 dez. 2007.

Figura 5. Consumo de energia elétrica interna em GW. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>> . Acesso em: 11 dez. 2007.

Figura 6. Recursos energéticos do mundo (versão traduzida). Disponível em: <<http://www.energyblueprint.info/resources.0.html>>. Acesso 22 nov. 2007.

Figura 7. Junção PN. Disponível em:

<<http://ambiente.hsw.uol.com.br/celulas-solares1.htm>>. Acesso em: 14 dez. 2007.

Figura 8. Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício genérica. Disponível em:

<<http://ambiente.hsw.uol.com.br/celulas-solares1.htm>>. Acesso em: 14 dez. 2007.

Figura 9. Esquemático de uma instalação de aquecedor solar. Disponível em:

<<http://www.soletrol.com.br/educacional/comofunciona.php>>. Acesso em: 14 dez. 2007.

Figura 10. Detalhes de uma turbina eólica moderna. Disponível em:

<[http://www.makewiki.com/index.php/Crear\\_una\\_M%C3%A1quina\\_de\\_Movimiento\\_Perpetuohttp](http://www.makewiki.com/index.php/Crear_una_M%C3%A1quina_de_Movimiento_Perpetuohttp)>. Acesso em: 14 dez. 2007.

Fonte da Pesquisa de Preços 1:

Loja Virtual Solarforte, disponível em

<<http://www.solarforte.com.br/lojavirtual/default.php>>. Acesso em: 23 jun. 2008.

Fonte da Pesquisa de Preços 2:

Loja Virtual Brasilhobby, disponível em

<<http://www.brasilhobby.com.br/subcategoria.asp?NCat=61>>. Acesso em: 23 jun. 2008.