

TESE

1131

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica  
da Utilização da Energia Solar em  
Estações Rádio Base (ERB's)**

**KARINA PEREZ MOKARSEL CARNEIRO**

**ITAJUBÁ - Dezembro**

**2001**

**E F E I**

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**



**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E  
ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DA  
ENERGIA SOLAR EM ESTAÇÕES RÁDIO  
BASE (ERB's)**

**Karina Perez Mokarzel Carneiro**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Orientador**

**Prof. Dr. José Antônio Cortez**

**Co-Orientador**

**Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá**

**Itajubá, Dezembro de 2001**

CLASS.	697.7(043.2)
CUTTER.	C.289
TOMBO.	1131



ESCOLA CENTRAL DE ENGENHARIA DE TAMBORA

INSTITUTO DE MESTRADO

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E  
ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DA  
ENERGIA SOLAR EM ESTÁGIOS RÁPIDOS  
BARRA (RJ)

Karlus Peter Michael Göttsche

INSTITUTO DE MESTRADO  
ESCOLA CENTRAL DE ENGENHARIA DE TAMBORA  
CAMPUS BARRA, RUA ABRILHADO FERREIRA  
DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador

Prof. Dr. João Antônio Cordeiro

Coo-Orientador

Prof. Dr. José Carlos de Sá

Impressão: Dezembro de 1981

## AGRADECIMENTOS

A minha filha, Thaís, ao meu companheiro Renato e aos meus pais Hélio e Maria Aparecida pelo apoio, carinho e dedicação.

ao professor José Augusto L. Leite pelo apoio e brilhante orientação neste trabalho;

ao professor José Carlos de Toledo pelo incentivo e ao meu colega José Luiz de

Almeida, Marcos de Oliveira, e Wilson Luiz Lima, a Rosângela Aparecida de Oliveira e Vanessa Alexandra Araújo Neves, integrantes do grupo de pesquisa em Física, pela paciência e contribuição de suas ideias e conhecimentos.

à Escola Federal de Engenharia de Itajubá (FEIT), pela comodidade de trabalhar neste local;

ao Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) pelo apoio e comodidade de trabalhar neste local;

à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro e administrativo para a realização deste trabalho;

à Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR) pelo apoio financeiro e administrativo para a realização deste trabalho.

à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CNPq) pelo apoio financeiro e administrativo para a realização deste trabalho.

Meu obrigado.

A minha filha Thaís, ao meu  
companheiro Renato e aos meus pais  
Hélio e Maria Aparecida pelo apoio,  
carinho e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

À minha filha Thaís, ao meu companheiro Renato e aos meus pais Hélio e Maria Aparecida pelo apoio, amor e dedicação;

ao professor José Antônio Cortez pelo apoio e brilhante orientação neste trabalho;

ao professor Jocélio Souza de Sá pela amizade, incentivo e co-orientação neste trabalho;

à Giuliana Pereira de Bittencourt, à Milena Cazu Rosa, à Rosilene Aparecida de Oliveira e à Vanessa Alexandra Anacleto Nunes, integrantes do grupo de iniciação científica, pela amizade e contribuição na realização deste trabalho;

à Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), pela oportunidade de realização deste trabalho;

ao Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), pelo apoio e estímulo ao longo destes anos;

à Telemig Celular, principalmente na pessoa de Rogério Alves Figueiredo pela contribuição com informações fundamentais para a conclusão deste trabalho;

à Heliodinâmica, principalmente ao Nelson J. Ferro pelo fornecimento de informações valiosas para a realização deste trabalho;

à Cemig, à Instel Montagens Elétricas Ltda, à Decisa Engenharia e Comércio Ltda, à Texas Instruments e à Quark pela contribuição com importantes informações para a execução deste trabalho;

meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O aumento das preocupações, em nível internacional, com o problema relativo à economia de energia tem ajudado a convencer que as tecnologias alternativas devem ocupar um papel fundamental nas futuras estratégias para a produção e uso de energia elétrica. Nas telecomunicações, a energia solar apresenta-se como uma das soluções para áreas afastadas e ainda não eletrificadas, especialmente num país como o Brasil onde se encontram bons índices de insolação em qualquer parte do território.

Por meio do efeito fotovoltaico, a energia contida na luz do sol pode ser convertida diretamente em energia elétrica. Este método de conversão apresenta como vantagens sua simplicidade de instalação, inexistência de qualquer peça mecânica móvel, baixa manutenção e a confiabilidade dos sistemas. Além disso, os sistemas fotovoltaicos apresentam-se como uma fonte silenciosa, não poluente e renovável de energia elétrica, reduzindo quase que completamente as perdas por transmissão de energia devido à proximidade entre geração e consumo.

O objetivo principal desta pesquisa foi o de apresentar uma forma alternativa para o suprimento de energia elétrica em Estações Rádio Base (ERB's). Foi desenvolvido um programa computacional, o GUES, de uso geral para o projeto básico de sistemas fotovoltaicos, compreendendo o sistema gerador e os demais equipamentos auxiliares e que permite fazer a análise econômico-financeira da implantação do sistema fotovoltaico comparado ao sistema convencional (que utiliza linha de transmissão) no suprimento à ERB's.

Com a utilização deste software também é possível determinar a potência máxima para a qual a implantação do sistema fotovoltaico se torna economicamente mais viável comparado com o sistema convencional. Foi levada em consideração, para esta análise, a distância da ERB ao ponto mais próximo de uma linha de transmissão já existente e o número de meses a partir do qual o sistema fotovoltaico se torna mais atrativo, economicamente, em relação ao sistema convencional.

## ABSTRACT

Internationally, the increase of preoccupations, about the problem concerning energy economy has helped to convince that alternative technologies must play an essential role in the future strategies related to production and use of electrical energy. In telecommunications, solar energy presents as one of the solutions to the areas located far from central areas and not electrified yet, specially in a country like Brazil, where we can find good insolation levels in any part of the territory.

Through photovoltaic effect, the energy contained in sun light can be converted directly into electrical energy. This conversion method presents advantages like simplicity of installation, inexistence of any movable mechanical part, high level of reliability of systems and low maintenance costs. Furthermore, photovoltaic systems is presented as a silent source, not causing pollution and a renewable form of electrical energy, reducing, almost completely, the losses by energy transmission, due to the proximity between production and consumption.

The main goal of this research is to present an alternative way to the supplying of electrical energy in Radio Base Stations (ERB). A computing program was developed, GUES, of general use to the basic project of photovoltaic systems, comprising the generator system and the other auxiliary equipments and to enable an economic-financial analysis of photovoltaic system implantation compared to a conventional one supplying an ERB.

The use of this software also permits to determine the maximum potency to that one the implantation of photovoltaic system becomes more attractive economically speaking, if compared with the conventional system. It was taking into consideration the distance from an ERB to the nearest point of a transmission line that already exists and the number of months from that one the photovoltaic system becomes more economic concerning the conventional system.

## SIMBOLOGIA

2G	Segunda geração do sistema de comunicação móvel celular.
2,5G	Geração intermediária entre o 2G e o 3G.
3G	Terceira geração do sistema de comunicação móvel celular.
A <sub>1</sub>	Secionador a Vazio.
A <sub>2</sub>	Disjuntor de Alta Tensão.
A <sub>3</sub>	Disjuntor de Baixa Tensão.
AMPS	Advanced Mobile Phone System.
AN, BN e CN	Tensões senoidais de referência.
a-Si	Silício amorfo.
CA	Corrente Alternada.
C <sub>BLT</sub>	Custo total com as baterias do sistema convencional.
C <sub>BPV</sub>	Custo total com as baterias do sistema fotovoltaico.
CC	Corrente Contínua.
CCC	Central de Comutação e Controle.
CdTe	Telurieto de Cádmio.
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais.
CEPT	Conference of European Posts and Telegraphs.
C <sub>iLT</sub>	Custo de implantação do sistema convencional.
C <sub>iPV</sub>	Custo de implantação do sistema fotovoltaico.
CIS	Diseleniureto de Cobre e Índio.
C <sub>L</sub>	Custo total com a linha de transmissão.
C <sub>LT</sub>	Custo do sistema convencional corrigido.
C <sub>mLT</sub>	Custo mensal do sistema convencional.
COPOM	Conselho de Política Monetária.
C <sub>PL</sub>	Custo total com as placas solares.
C <sub>PV</sub>	Custo do sistema fotovoltaico corrigido.
C <sub>Ret</sub>	Custo com os retificadores.
C <sub>Sub</sub>	Custo com a subestação junto a ERB.
CuInSe <sub>2</sub>	Diseleniureto de cobre e índio.
CZ	Czochralski.

D1, D2, D3	Diodos de roda livre.
D4, D5 e D6	Diodos de roda livre.
D	Distância mínima entre co-células.
$D_{km}$	Distância, em km, da ERB à uma subestação ou LT já instalada.
DSP	Processador Digital de Sinal.
EM	Estação Móvel.
ERB	Estação Rádio Base.
ETSI	European Telecommunication Standards Institute.
$G_1, G_2, G_3$	Transistores de potência.
$G_4, G_5$ e $G_6$	Transistores de potência.
GaAs	Arseniato de Gálio.
GPP	Processador de Propósito Geral.
GSM	Group Special Mobile.
IEC	International Electrotechnical Commission.
M	Fator de multiplicação.
MIPS	Milhões de Instruções por Segundo.
n	Número de meses para o qual se deseja obter o custo corrigido.
$N_{BLT}$	Número de baterias para o sistema convencional.
$N_{BPV}$	Número de baterias utilizadas para o sistema fotovoltaico.
$N_{PL}$	Número de placas solares.
$P_W$	Potência, em Watts, requerida pela ERB.
PWM	Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso.
QDBT	Quadro de Distribuição em Baixa Tensão.
$R_{kWh}$	Custo do kWh.
$R_{Bat}$	Custo unitário da bateria de 100Ah operando em 12V.
$R_{kmLT}$	Custo da linha de transmissão por km.
$R_{PL}$	Custo unitário da placa solar de 45W operando em 12V.
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.
T	Taxa de juros Selic.
TFS:H	Filme Fino de Silício:Hidrogênio.
$TiO_2$	Dióxido de Titânio.
$T_r$	Transformador.
$U_{na}$	Sinal de referência.



## SUMÁRIO

Dedicatória	II
Agradecimentos	III
Resumo	IV
Abstract	V
Simbologia	VI
Sumário	IX

### CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1 – Aspectos Gerais	1
I.2 – Breve Histórico da Indústria Fotovoltaica	4
I.3 – Vantagens do Sistema de Potência Fotovoltaico	6
I.4 – Exemplos de Aplicações	8
I.5 – Estado da Arte da Produção e Utilização da Energia Fotovoltaica	10
I.6 – Estrutura da Dissertação	12

### CAPÍTULO II – SISTEMAS DE POTÊNCIA FOTOVOLTAICO E CONVENCIONAL

II.1 – Fornecimento da Energia Elétrica Fotovoltaica	13
II.1.1 – Introdução	13
II.1.2 – Componentes de um Sistema Fotovoltaico	14
A – Placa Solar	15
A.1 – Combinação de Células	15
A.2 – Corrente na Placa	17
A.3 – Combinação de Placas Solares	17
A.4 – Eficiência de Conversão	18
A.5 – Tipos de Células	19
A.5.1 – Espesso Cristalino	19
“CZ” ou Silício Monocristalino	19
Silício Policristalino Fundido	20
Fita de Silício	20

A.5.2 – Filmes Finos (Policristalino)	21
Filme Fino de Silício:Hidrogênio (TFS:H)	21
Diseleniureto de Cobre Índio	22
Conjugado Tfs/Cis ou Célula com Multijunção	23
A.6 – Concentrador de Células	23
B – Bateria	24
B.1 – Desempenho das Baterias em um sistema fotovoltaico	25
B.2 – Ciclo da Carga e Descarga das Baterias	26
B.3 – Ciclo Sazonal	27
B.4 – Tipos de Baterias Usadas no Sistema Fotovoltaico	28
C – Regulador de Carga	29
D – Inversor	29
II.2 – Fornecimento da Energia Elétrica Convencional	33
II.2.1 – Introdução	33
II.2.2 – Subestação Abaixadora	34
A – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA)	34
B – Seccionador a Vazio	36
C – Disjuntor de Alta Tensão	36
D – Disjuntor de Baixa Tensão e QDBT	36
E – Transformador	37
II.2.3 – Qualidade de Energia Elétrica	37
<b>CAPÍTULO III – ESTAÇÃO RÁDIO BASE</b>	
III.1 – Introdução	38
III.2 – Constituição da Célula	39
III.3 – Reutilização das Frequências	40
III.4 – Composição do Sistema Celular	42
III.5 – Descrição da Estação Rádio Base (ERB)	44
III.6 – Consumo de Energia Elétrica na ERB	44

## **CAPÍTULO IV – DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS RELATIVOS A AMBAS AS SOLUÇÕES**

IV.1 – Introdução	46
IV.2 – Custos do Sistema fotovoltaico	46
IV.3 – Custos com o Sistema Convencional	49
IV.3.1 – Custo de Implantação	50
IV.3.2 – Custo Mensal Referente ao Consumo de Energia Elétrica	52
IV.4 – Análise dos Custos de Ambos os Sistemas	52
IV.4.1 – Sistema Fotovoltaico	53
IV.4.2 – sistema Convencional	54
IV.5 – Comparação Econômica entre o Sistema Fotovoltaico e o Sistema convencional	55

## **CAPÍTULO V – DESCRIÇÃO DO SOFTWARE GUES**

V.1 – Introdução	57
V.2 – Entrada de Dados	57
V.3 – Primeira Janela	58
V.4 – Segunda Janela	59
V.5 – Terceira Janela	60
V.6 – Quarta Janela	62
V.7 – Quinta Janela	64
V.8 – Sexta Janela	65
V.9 – Observações	67

## **CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES**

### **REFERÊNCIAS**

### **BIBLIOGRAFIA**

### **APÊNDICE: Física e Construção**

73

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### I.1 – ASPECTOS GERAIS

O Brasil tem passado por uma das maiores crises energéticas que se tem conhecimento. A situação atual pouco faz lembrar o passado de abundância e eficiência deste setor. Após anos de consumo de eletricidade barata, sem risco de escassez, o consumidor está tendo de adaptar-se, forçadamente, ao novo modelo, que implica em economia de energia e elevação das tarifas cobradas no mercado.

O racionamento de energia elétrica, as sobretaxas e a ameaça de apagões são, contudo, ações a curto prazo que não perdurarão por muito tempo, podendo se repetir. Aos poucos, a necessidade da sociedade moderna de consumir mais eletricidade se tornará inevitável devido ao aumento da população. Portanto, a escassez de energia comprometerá o desenvolvimento do país.

Obras de infra-estrutura para o setor elétrico exigem muito investimento, coisa que o governo brasileiro não fez. O governo sentiu-se desobrigado de investir porque as empresas de energia elétrica, antes estatais, foram incluídas no plano de privatização. Já foram privatizadas grandes empresas de geração e de distribuição de energia elétrica, como a Light, no Rio, a Eletrosul, hoje Gerasul, na região Sul, a Eletropaulo e as companhias elétricas desmembradas da Cesp, em São Paulo. Mas a iniciativa privada não fez investimentos significativos na ampliação do sistema de geração e distribuição de energia elétrica.

No Brasil, mais de 90% da energia é produzida nas hidrelétricas, que dependem de água em níveis adequados em seus reservatórios para gerar energia. Infelizmente, neste ano, a ausência de chuvas foi das maiores das últimas décadas, prejudicando a produção de

energia. Além disso, os potenciais hídricos mais baratos já foram explorados. E, embora o país ainda possua uma infinidade de áreas para instalação de usinas, a distância das localidades aumenta ainda mais o custo da energia, porque grande parte das bacias hidrográficas está localizada na região norte do país, e, para trazer a energia até os grandes centros urbanos, principalmente para o Sudeste, o custo é maior por causa da transmissão. É importante ressaltar também o desastre ecológico da construção de usinas hidrelétricas na região norte, devido às grandes áreas inundadas e à destruição das riquezas naturais do solo.

As usinas térmicas a gás natural devem ter participação crescente no setor energético nos próximos anos. O Programa de Geração Distribuída (Progedis) sugere que pequenas unidades de produção sejam instaladas em empresas, supermercados, shoppings, hospitais e hotéis, usando o gás natural que hoje está sobrando, tanto nos poços da bacia de Campos quanto no gasoduto proveniente da Bolívia. Porém, as usinas termoelétricas queimam enormes quantidades de gás e óleo, cujos resíduos comprometem a qualidade do ar que respiramos e afetam drasticamente o meio ambiente, sem contar com as oscilações de preço no mercado internacional, muitas vezes de origem política.

Um sistema misto pode dar melhores resultados para o Brasil. Desta forma, o país conseguiria desenhar um novo modelo energético, incluindo não apenas as fontes tradicionais, mas também as pequenas centrais com diferentes fontes primárias. Este novo modelo energético evitaria a dependência das fontes tradicionais, dispendiosas e distantes dos principais pontos de consumo. Além disso, garantiria energia em regiões mais distantes, levando a esses locais desenvolvimento, educação, saúde e gerando novos empregos.

É importante observar que as fontes alternativas de geração de energia, como o uso da biomassa do bagaço de cana, do lixo urbano, da energia solar, da energia eólica, etc, também garantem a proteção do meio ambiente, baixos custos e o atendimento a locais aonde a rede elétrica convencional não chega ou não é confiável.

Entre as formas não convencionais de geração de energia elétrica, como a eólica e a biomassa, os sistemas de potência fotovoltaicos (PV) surgiram com uma importante opção. Por meio do efeito fotovoltaico, a energia contida na luz do sol pode ser convertida

diretamente em energia elétrica. Este método de conversão energética apresenta como principais vantagens a simplicidade de instalação, a facilidade de expansão, a confiabilidade dos sistemas, a redução das perdas por transmissão da energia devido à proximidade entre geração e consumo e o baixo custo de manutenção. Além disso, os sistemas fotovoltaicos são fontes silenciosas e não poluentes. Sua fonte de energia, o sol, é inesgotável e pode ser capturada em praticamente qualquer lugar do Brasil. Estes fatos revelam um futuro promissor para os sistemas fotovoltaicos, sendo o custo do investimento inicial e a área necessária para a instalação dos coletores solares as principais barreiras atuais para o aumento de sua utilização.

O Brasil tem imenso potencial para a produção de energia solar. Sua extensão territorial e os altos níveis de irradiação solar são fatores que justificariam investimentos nesse tipo de fonte energética. Somam-se a estas justificativas o fato de que, para cada metro quadrado de coletor solar instalado, é possível evitar, em média, a inundação de 56 metros quadrados de áreas férteis na construção de novas usinas hidrelétricas ou também economizar, em média, por ano, 55 kg de gás de cozinha, 66 litros de diesel ou 215 kg de lenha.

Desenvolvidos inicialmente para atender às necessidades de fornecimento de energia em satélites, os módulos fotovoltaicos são hoje amplamente utilizados na Terra. Os sistemas fotovoltaicos são principalmente utilizados em locais remotos não servidos por linhas de transmissão como, por exemplo, em áreas rurais, em comunidades remotas, nas telecomunicações e na navegação.

Neste trabalho será analisada a utilização da energia solar nas telecomunicações, especificamente em sistemas de comunicação celular. Os sistemas de comunicação são de suma importância para o desenvolvimento de um país e não podem ficar a mercê de racionamentos e apagões. Portanto, propõe-se a utilização da energia solar como uma das soluções para se desvincular o suprimento de energia elétrica das Estações Rádio Base (ERB's), principalmente aquelas situadas em localidades remotas ou de difícil acesso, do fornecimento de energia elétrica convencional.

Os sistemas fotovoltaicos podem trabalhar em conjunto com outras fontes de energia convencionais para oferecer maior diversidade e menor ocorrência de falhas. Os únicos

impactos ambientais negativos associados aos sistemas fotovoltaicos são a química potencialmente tóxica usada durante a sua fabricação e a necessidade de grandes espaços físicos requeridos pelos módulos, quando se necessita obter potências elétricas elevadas.

O objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização da energia solar para o suprimento de energia elétrica em Estações Rádio Base (ERB's), principalmente as instaladas distantes de subestações e de linhas de transmissão de energia elétrica ou as que estão situadas em locais de difícil acesso.

Um dos resultados mais importantes deste trabalho foi o desenvolvimento de um software que fornece os custos do sistema fotovoltaico, incluindo os painéis solares, as baterias e demais equipamentos auxiliares, e do sistema convencional utilizando linhas de transmissão. O software também determina a potência máxima de uma ERB que torna o sistema solar mais atrativo economicamente, comparado ao sistema convencional. Foram levados em consideração a distância da ERB ao ponto mais próximo de uma subestação ou de uma linha de transmissão e o número de meses para o qual se deseja que o sistema solar seja mais econômico em relação à linha de transmissão.

## **I.2 – BREVE HISTÓRICO DA INDÚSTRIA FOTOVOLTAICA**

A primeira notícia que se teve sobre o fenômeno fotovoltaico foi em 1839, quando o físico francês, Edmund Becquerel, descobriu o efeito fotovoltaico em um experimento com uma célula eletrolítica feita com dois eletrodos de metal colocados em uma solução condutora elétrica. A geração de energia aumentou quando a célula foi exposta à luz, porém nenhuma explicação foi fornecida. No início do século XX, Albert Einstein expôs uma explicação para um fenômeno similar, o “efeito fotoelétrico”, que trouxe o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento das células fotovoltaicas existentes hoje.

No efeito fotoelétrico, quando a luz incide sobre uma superfície metálica, libera fotoelétrons que podem ser detectados sob a forma de corrente saindo do metal. Einstein explicou o fenômeno observado através do conceito de níveis de energia “quantizada”, e

descreveu a luz como sendo um fluxo de pequenas partículas chamadas “fótons” ou partículas de energia de luz. Quando os fótons colidem com o metal, alguns elétrons são liberados do átomo de metal. Em 1921, Albert Einstein ganhou o Prêmio Nobel pela sua teoria explicando o efeito fotoelétrico.

Durante o ano 1930, outras aplicações do conceito de quantum levaram ao desenvolvimento de uma maneira alternativa de se analisar matéria e energia, chamada Mecânica Quântica. As descobertas feitas pelo *Bell Telephone Research Laboratories*, em 1950, levaram ao transistor e à primeira célula solar de estado sólido.

A corrida espacial que aconteceu no final da década de 1950 e início dos anos 1960 estimulou a melhoria da eficiência e dos projetos das células solares. Tais células são perfeitas fontes de potência elétrica para os satélites porque são resistentes, leves e têm a confiabilidade necessária para sistemas de baixa potência. Em 17 de março de 1958 foi lançado o Vanguard I, o primeiro satélite alimentado com sistemas fotovoltaicos, que operou por 8 anos. Em 23 de julho de 1962, foi lançado o satélite Telstar, o primeiro satélite comercial de telecomunicações, projeto do Bell Telephone Laboratories.

Contudo, as células destinadas a operar no espaço são muito caras, tornando-as inviáveis para o uso na Terra, onde há necessidade de se ter baixos custos. No início de 1970 houve uma corrida à procura de fontes de energia alternativas e a fotovoltaica foi vista como uma possível solução. Entretanto, os primeiros módulos terrestres não foram produzidos em massa porque foram praticamente construídos à mão e com células destinadas à satélites rejeitadas para tal aplicação.

No final de 1970, a indústria fotovoltaica atraiu o interesse de grandes companhias de energia e agências governamentais. Com seus investimentos, houve uma grande aceleração no desenvolvimento dos módulos. Hoje, os módulos são fabricados com o intuito de se preservar o meio ambiente e de se atender a regiões situadas em locais de difícil acesso, não servidos pela rede pública de energia elétrica ou onde esta não é confiável.

Com o avanço da tecnologia, diminuindo consideravelmente o preço do sistema fotovoltaico, e com a escassez dos combustíveis convencionais, o número de aplicações

onde a potência elétrica fotovoltaica é uma alternativa econômica vem crescendo, prometendo um grande futuro para esta indústria.

### I.3 – VANTAGENS DO SISTEMA DE POTÊNCIA FOTOVOLTAICO

Quando comparados aos outros sistemas de potência convencionais, os sistemas de potência fotovoltaicos apresentam muitas vantagens e benefícios. Entre eles podemos citar:

*Energia limpa* – o sistema fotovoltaico não gera nenhum tipo de poluição.

*Redução do custo de operação e manutenção* – Os custos de operação, de manutenção e de pessoal para a execução de tais serviços, principalmente em aplicações localizadas em áreas remotas, são reduzidos, pois, usualmente, um sistema fotovoltaico típico opera por mais de 25 anos com manutenção semestral ou anual para limpeza das placas solares e para verificação do nível de água das baterias.

*Diminuição dos custos com mão de obra e transporte para instalação em lugares remotos* – O projeto e a instalação simples do sistema fotovoltaico implica em custos menores, pois pode ser utilizada mão-de-obra semi-especializada na sua instalação. Além disso, todos os componentes são modulares e de fácil transporte para as localizações distantes.

*Eliminação da dependência da disponibilidade de combustível* – Em sistemas convencionais, a disponibilidade de combustível pode ser reduzida em tempos de crise, devido a problemas econômicos ou fatores relacionados ao tempo. Os sistemas fotovoltaicos independem destes fatores, pois utilizam como matéria-prima a energia solar, a qual é encontrada em abundância em praticamente qualquer lugar do planeta, sem a necessidade de qualquer outro tipo de combustível.

*Aumento da confiabilidade* – A simplicidade dos sistemas de potência fotovoltaicos reduz a probabilidade de falhas. Além disso, as perdas por transmissão de energia são reduzidas quase que completamente devido à proximidade entre geração e consumo.

*Redução das emissões eletromagnéticas* – Os sistemas de potência fotovoltaicos possuem pequena ou nenhuma emissão eletromagnética, tornando-os mais adequados para aplicações onde as emissões devem ser reduzidas.

*Possibilidade de expansão no futuro* – Normalmente, os sistemas de potência são projetados visando um crescimento futuro. Isto faz com que o custo inicial seja alto. Os sistemas de potência fotovoltaicos são modulares, portanto podem ser fácil e rapidamente expandidos, sempre que houver necessidade de aumento de carga, sem a necessidade de troca dos equipamentos já existentes.

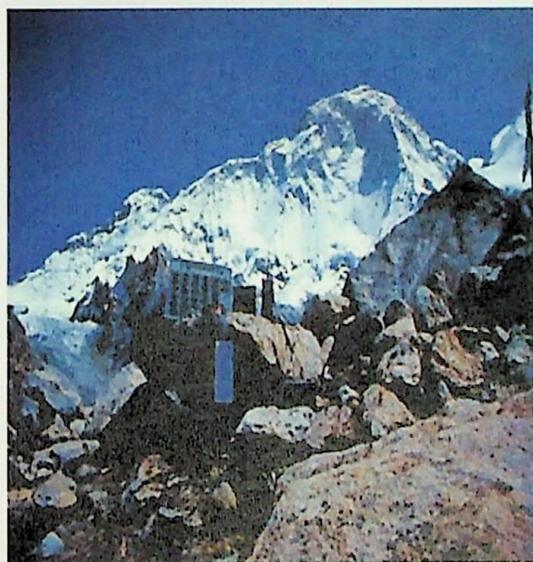
*Diminuição da vulnerabilidade do fornecimento de energia* – Sistemas que dependem de fontes de potência centralizadas, quer seja linha de transmissão ou gerador, são vulneráveis à falha total se a fonte principal for danificada, o que já não ocorre com o sistema fotovoltaico.

*Aumento das opções de aplicações* – Com a eliminação da necessidade de freqüentes manutenções e reabastecimento, as localizações distantes ou de difícil acesso podem ser escolhidas para local equipamentos que necessitem de energia, tais como os repetidores de microondas e ERB's. Isto pode criar opções para novas aplicações ou para melhorar os sistemas já existentes.

*Operação em qualquer tipo de meio ambiente* – Os módulos operam muito bem e sem falhas em qualquer tipo de meio ambiente. Podem resistir a ventos frios e chuvas de granizo.

#### I.4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

O sistema fotovoltaico é modular, portátil e de fácil instalação, portanto pode ser utilizado em diversas áreas de atividades tais como: Repetidoras remotas de rádio e TV, telefonia celular convencional ou por satélite, telemonitoramento, radiotransmissão, controle de tráfego, camping e motor-homes, barcos, iluminação pública, sinalização marítima, satélites, irrigação, postos de saúde de lugarejos, etc. A figura I.1 ilustra algumas aplicações do sistema fotovoltaico.



Expedição brasileira ao Himalaia – 1982 [A]



Posto de saúde [A]



Módulos solares em nave espacial [B]



Posto fiscal - São Paulo – 1988 [A]



Repetidora de microondas Embratel – 1985 [A]



Bombeamento comunitário - Nordeste – 1989 [A]

Fig. I.1 – Exemplos de aplicações do sistema fotovoltaico.

## I.5 – ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

A produção mundial de energia elétrica, utilizando células e módulos solares fotovoltaicos, em 1990 foi de aproximadamente 40 MW e, em 1998, girou em torno de 120 MW. As vendas mundiais têm aumentado a uma taxa média de aproximadamente 15% a cada ano durante a última década, sendo mais lenta em alguns mercados e mais rápida em outros. Conta-se com um crescimento contínuo deste mercado a uma taxa em torno de 15% na próxima década. Com esta taxa, a capacidade de produção mundial seria de 1000 MW para o ano de 2010. A figura I.2 mostra um gráfico representativo desta situação.

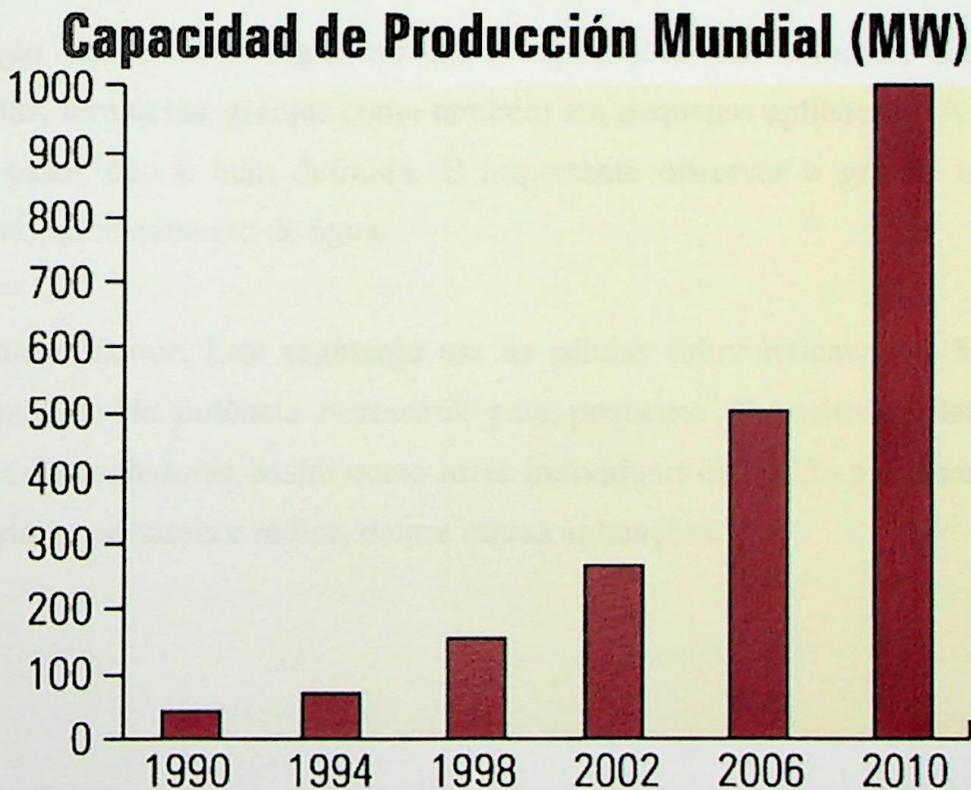


Fig. I.2 – Capacidade de produção mundial de energia elétrica com a utilização de células e módulos solares [C]

Um prognóstico de mercado em áreas específicas de aplicações mostra como a potência fotovoltaica é usada ao redor do mundo. As principais áreas de aplicações estão listadas abaixo em ordem decrescente de utilização:

**Sistemas interligados:** São tipicamente sistemas em escala da ordem de MegaWatts (MW), conectados diretamente a uma rede convencional. A potência elétrica é gerada somente durante as horas do dia com luz solar e consumida no local da geração (como em edifícios comerciais) ou alimenta o sistema de serviço público (com linhas de transmissão) e é consumida como uma parte normal do sistema de potência.

**Industrial:** Esta tem sido a área de maior aplicação nos últimos 30 anos, incluindo telecomunicações, sistemas de proteção, telemetria, sistemas de navegação e instalações de difícil manuseio por estarem situadas em lugares remotos.

**População Rural:** este segmento inclui aplicações em cabanas, casas, aldeias, clínicas, escolas, farmácias, granjas como também em pequenas aplicações. A demanda de carga nestes casos não é bem definida. É importante observar a grande utilização da energia solar no bombeamento de água.

**Consumidor/indoor:** Este segmento usa as células fotovoltaicas para fornecer uma pequena quantidade de potência necessária para pequenos dispositivos eletrônicos tais como relógios e calculadoras, assim como luzes individuais de jardim e pequenos módulos para computadores portáteis e rádios, dentre outras aplicações.

## I.6 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este item explana sobre a estrutura da dissertação, descrevendo sucintamente cada capítulo.

O capítulo 1 introduz o tema apresentado, faz um breve histórico e mostra as principais vantagens e algumas aplicações do mesmo.

O capítulo 2 descreve o sistema de potência fotovoltaico. Mostra como é a geração de energia utilizando coletores solares. Expõe na forma esquemática os principais equipamentos que compõe o sistema de potência fotovoltaico fazendo uma descrição sucinta de cada um deles. Descreve também o sistema convencional utilizando linha de transmissão.

O capítulo 3 explana sobre a constituição de um sistema celular. Aborda principalmente a Estação Rádio Base, trazendo um diagrama em blocos de suas partes componentes.

No capítulo 4 são determinados os custos relativos aos sistemas de fornecimento de energia elétrica. Num primeiro momento aborda os custos relativos à energia solar e, posteriormente, os custos relativos ao sistema convencional.

O capítulo 5 apresenta a comparação econômica entre o sistema fotovoltaico e o sistema convencional. Estabelece uma equação que permite calcular a potência máxima que uma ERB deve ter para que o sistema fotovoltaico seja mais atrativo economicamente, comparado com a linha de transmissão.

No capítulo 6 é apresentada uma descrição do software através de um exemplo.

O capítulo 7 apresenta as conclusões resultantes da elaboração deste trabalho. São, ainda, sugeridas novas idéias para a continuação do trabalho, bem como uma discussão sobre uma política que vise fontes alternativas de geração de energia elétrica.

## **CAPÍTULO II**

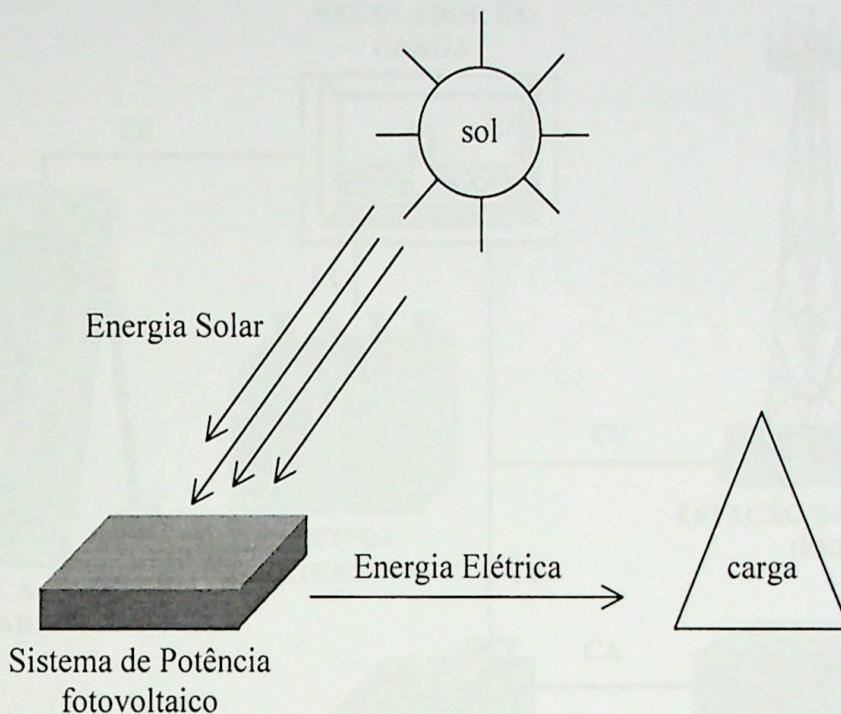
### **SISTEMAS DE POTÊNCIA FOTOVOLTAICO E CONVENCIONAL**

#### **II.1 – FORNECIMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA**

##### **II.1.1 - INTRODUÇÃO**

Um sistema de potência fotovoltaico (PV) é uma fonte completa de potência que usa células solares. Tais células são dispositivos semicondutores, principalmente o silício cristalino (ver Apêndice 1).

Quando um material semicondutor é iluminado pela luz, fótons penetram o material. Tais fótons carregam energia, mas são eletricamente neutros. Os Fótons com bastante energia podem colidir com elétrons e desalojá-los de suas ligações gerando pares elétron-lacuna além daqueles gerados termicamente. O fóton desaparece sendo que a maior parte de sua energia transferida para o elétron e uma pequena parte convertida em calor. Os elétrons tornam-se livres para viajarem através do material semicondutor como uma condução de elétrons, carregando carga negativa e energia utilizável. É no momento da liberação do elétron que a energia solar se transforma em energia elétrica. Portanto, ao absorver luz, a célula produz uma pequena corrente elétrica unidirecional produzida por uma diferença de potencial de 12 V, que pode ser aproveitada como mostrado na figura II.1. A seguir serão descritos os componentes do sistema fotovoltaico necessários para a geração desta corrente.



**Fig. II.1 – Esquema de um sistema de potência fotovoltaico.**

## II.1.2 – COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos são muito flexíveis e podem ser usados em várias configurações. Algumas cargas, como bombas d'água utilizadas para irrigação, podem ser conectadas diretamente à placa solar, ao contrário de outras que exigem o uso de baterias.

No caso em estudo, os equipamentos que compõem o sistema de potência fotovoltaico (Fig. II.2) incluem as placas solares e sua estrutura de montagem, a qual pode ser fixa ou móvel para rastrear o sol durante o dia; o regulador de carga e as baterias recarregáveis, tendo como carga a Estação Rádio Base (ERB). Como o sistema de ar condicionado da ERB funciona em corrente alternada, o conjunto que compõe o sistema fotovoltaico é acrescido de um inversor.

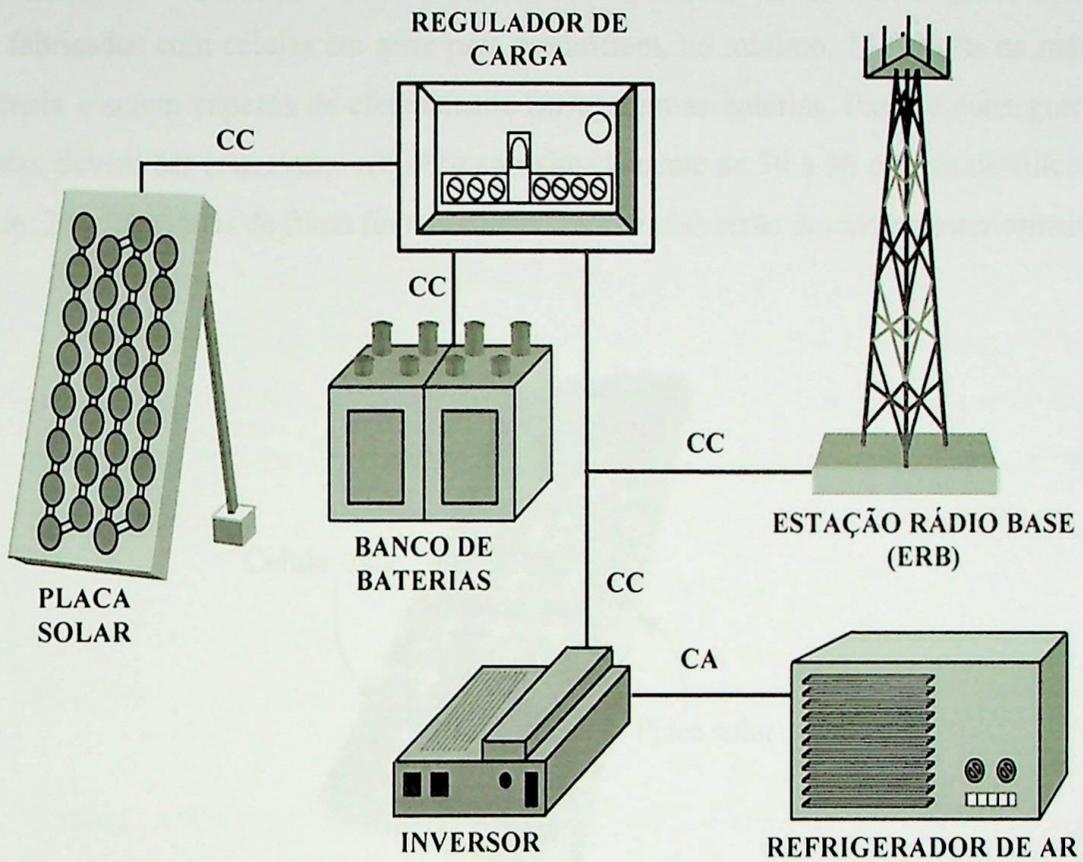


Fig. II.2 – Componentes de um sistema fotovoltaico

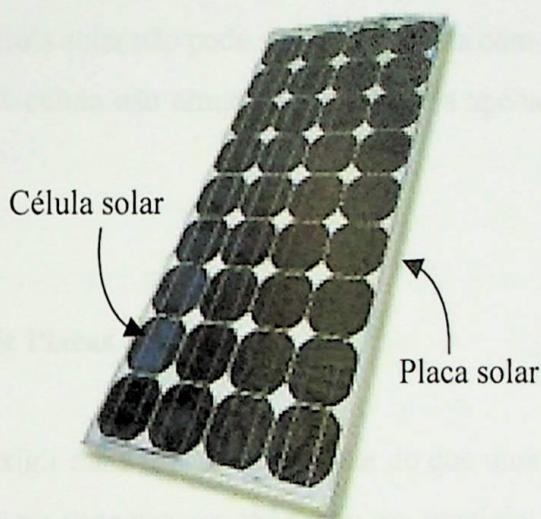
## A – Placa Solar

### A.1 – Combinação de Células

As células solares podem ser combinadas em série ou em paralelo para aumentar a tensão e a corrente. As conexões em série permitem o somatório das tensões das células enquanto que as conexões em paralelo permitem o somatório das correntes das células.

A placa solar é um conjunto de células conectadas em série e às vezes em paralelo para produzir tensão e corrente pré-definidas (Fig. II.3). No caso da ERB, o conjunto de placas é ligado a um banco de baterias de 12V cada uma, sendo que cada uma delas necessita de 14 a 15 Volts para ser completamente carregada. Portanto, como a tensão de

um módulo é a soma das tensões de todas as células conectadas em série, muitos módulos são fabricados com células em série para produzirem, no mínimo, 14,5 Volts na máxima potência e serem capazes de efetivamente carregarem as baterias. Para se conseguir esta tensão, devem ser conectadas em série aproximadamente de 30 a 36 células de silício CZ ou de 24 a 28 células de filme fino de silício. Tais células serão descritas posteriormente.



**Fig. II.3 – Placa solar composta por células solares conectadas em série [D]**

Se uma determinada aplicação necessitar de tensão superior a 12 Volts, mais células podem ser convenientemente conectadas. A exigência de tensão de uma carga determina o número de células que devem ser conectadas em série ou em paralelo.

Para satisfazer mercados diferentes, a maioria dos fabricantes produz uma variedade de módulos projetados com diferentes números de células conectadas em série e/ou em paralelo, e usando diferentes tamanhos de células.

## A.2 – Corrente na Placa

Os elétrons liberados pela colisão com os fótons fluem de uma célula para outra através de condutores. Na célula seguinte, são novamente atingidos por fótons, recebem mais energia potencial e movem-se para a próxima célula e assim sucessivamente. Finalmente deixam a última célula da placa e fluem para a carga.

Para cada elétron que deixa a célula, existe um outro que retorna da carga para repô-lo. Neste sentido, a célula solar não pode ser descarregada como uma bateria e nem pode se esgotar de elétrons. A célula não armazena energia, ela apenas converte a energia da luz em energia elétrica.

## A.3 – Combinação de Placas Solares

Se uma carga exigir mais tensão ou corrente do que uma placa pode produzir, várias placas solares podem ser conectadas em série e/ou em paralelo. Esta combinação de placas fornece potência em qualquer quantidade, dependendo do número de placas conectadas e da luminosidade existente, variando desde poucos miliWatts (mW) para alimentarem calculadoras e relógios, até alguns MegaWatts (MW) para grandes consumidores. A potência em corrente contínua pode ser usada diretamente ou ser armazenada em baterias para uso posterior.

Quando as placas são conectadas em série, o fluxo de corrente é o mesmo através de cada placa e a tensão resultante é a soma das tensões em cada placa. Quando as placas são conectadas em paralelo, a tensão sobre cada placa é a mesma e as correntes que passam pelas placas são somadas para produzir a corrente final.

### A.4 – Eficiência de Conversão

No projeto de um sistema de fornecimento de energia elétrica que utiliza placas solares, a eficiência de conversão é um dado importante na escolha entre um tipo ou outro de célula fotovoltaica ou entre usar um sistema fotovoltaico ou um outro sistema de geração de energia elétrica.

Eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica é a proporção de energia solar que a célula converte em energia elétrica. Para comparação, os primeiros equipamentos fotovoltaicos convertiam em torno de 1% a 2% da energia solar em energia elétrica. Os equipamentos de hoje convertem de 7% a 17%. No entanto, o custo de fabricação dos equipamentos fotovoltaicos é diretamente proporcional à sua eficiência, o que também é um fator de grande peso no projeto dos sistemas de fornecimento de energia elétrica.

Até o momento, a maior eficiência obtida para um painel de células solares é de 29,5%, porém, seu alto preço inviabiliza o seu uso. Para se ter uma idéia da variação dos preços destas células, células com eficiência de 16,5%, as mais utilizadas, custam 10% das de 17,5%, ou seja, o crescimento do preço é praticamente exponencial em relação ao crescimento da eficiência.

A figura II.4 compara a eficiência dos principais tipos de células solares. Tais células serão descritas posteriormente.

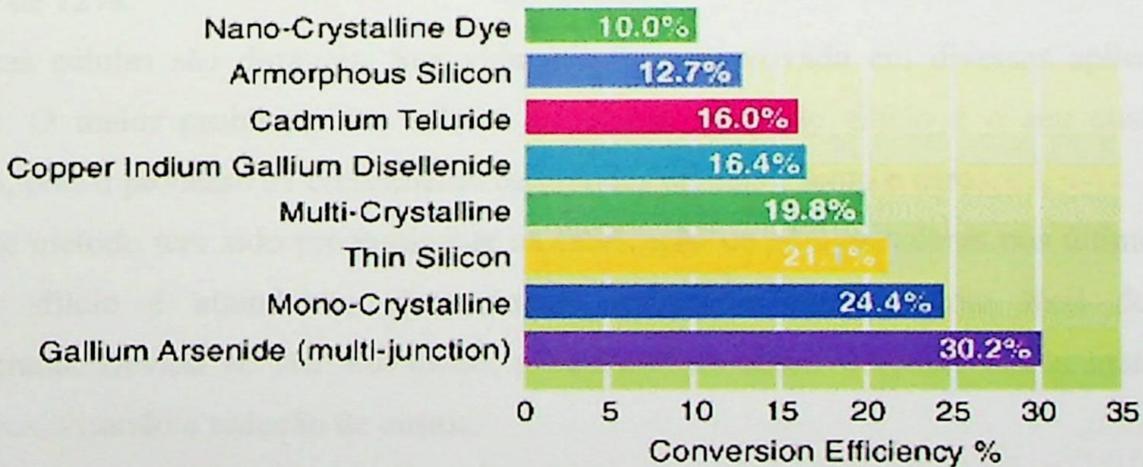


Fig. II.4 – Eficiência de conversão dos principais tipos de células solares [E].

## A.5 – Tipos de Células

Existem vários materiais semicondutores fotovoltaicos, contudo a classificação dos materiais hoje utilizados é baseada na espessura do silício. Os materiais fotovoltaicos são divididos em espesso cristalino (fatiado após a fundição do cristal ou crescido em fitas) e em filme fino policristalino ou amorfo, ou seja, depositado em camadas finas ou em substratos.

### A.5.1 – Espesso Cristalino

#### “CZ” ou Silício Monocristalino

No processo Czochralski ou método CZ, as células de silício monocristalino são manufaturadas fundindo-se grandes pedaços de silício puro em um forno de crescimento de cristal e solidificando-o lentamente como um grande cristal cilíndrico. O cristal cilíndrico é então fatiado formando “wafers” circulares de espessura entre 0,1 a 0,3 mm. Se os lados do cilindro forem cortados antes, formando um bloco, os “wafers” serão quadrados. Neste processo os átomos de silício ficam alinhados. A eficiência típica dos módulos finais fica em torno de 12%.

Estas células são duráveis. Sua vida útil foi comprovada em diversas aplicações espaciais. O maior problema das células de cristal único de silício é o seu custo de produção, pois o processo de crescimento de grandes cristais é lento e caro.

Este método tem sido predominante na fabricação de células solares nos últimos 30 anos. O silício é abundante, eletricamente estável e relativamente fácil de ser manufaturado. Devido ao seu alto custo, pesquisadores desenvolveram outros materiais alternativos, visando a redução de custos.

### **Silício Policristalino Fundido**

Uma das alternativas para as células de cristal único de silício são as células de silício policristalino. Estas células apresentam um custo menor de fabricação porque não requerem o crescimento de um grande cristal, porém sofrem redução de eficiência em torno de 2%.

Para a fabricação do silício policristalino, cria-se um bloco de silício fundindo-se grãos de silício puro em um molde com formato retangular. Quando o silício for resfriado lentamente, ele se solidifica no formato do bloco. Porém, neste processo, os átomos não ficam alinhados no bloco todo como no método CZ. Como nas células CZ, os “wafers” policristalinos são produzidos fatiando-se o grande bloco com o uso de serras.

Nas fronteiras entre os grãos, é possível que ligações atômicas defeituosas interfiram no fluxo de corrente, produzindo uma saída ligeiramente mais baixa comparada ao método CZ.

### **Fita de Silício**

O processo de fatiamento nos dois métodos anteriores é dispendioso, pois normalmente converte de 40 a 50% do material em pó. Isto acontece porque a espessura dos “wafers” e da lâmina da serra são aproximadamente iguais, variando de 0,250 mm a 0,375 mm.

Um método de produção de “wafers” que evita estas perdas é o de crescimento em fita fina de silício fundido. As fitas crescem de um cadinho de silício fundido e são puxadas pela ação capilar entre as faces de um molde cúbico de grafite. A espessura da fita é igual à dos “wafers”, não sendo necessária a utilização de serras. Tais fitas são facilmente quebradas para a produção de “wafers” retangulares.

É possível obter taxas de crescimento muito rápidas, porém a velocidade resulta em estruturas policristalinas. Se o processo de puxamento for feito com cuidado, consegue-se obter estruturas próximas às do cristal puro.

A eficiência das fitas de silício é similar a do silício policristalino.

### A.5.2 – Filmes Finos (Policristalino)

Todos os métodos anteriores produzem uma célula como um bloco único que fornece aproximadamente 0,5 Volts cada. Isto significa que muitas células devem ser conectadas para produzirem a tensão requerida. Os passos de interconexão e laminação são caros, elevando o custo do produto final.

Os filmes finos policristalinos são fabricados pelo depósito de camadas de material semicondutor sobre um substrato de vidro, plástico ou metal. Existem várias técnicas de deposição como eletrodeposição, pulverização e alta taxa de evaporação, todas elas relativamente mais baratas que a exigida para o crescimento do cristal de silício.

As camadas de semicondutores possuem apenas algumas centenas de átomos. O módulo é construído como uma unidade, eliminando assim, os mecanismos de interconexão. O tamanho da célula pode ser modificado facilmente, tornando a construção de placas de diferentes potências de saída, para diferentes aplicações e produtos, mais fáceis e com custo mais baixo. Contudo estas células são menos eficientes que as células de cristal único.

Uma importante característica de algumas placas solares de filme fino sobre substratos de vidro ou plástico é que a luz que não é utilizada para desprender elétrons pode atravessá-las devido a sua espessura (1.000 – 2.000 nm). Isto significa que é possível a construção de filmes semitransparentes. Teto solar de carros, escotilha de barcos e vidros de edifícios, por exemplo, podem ser feitos para produzirem potência elétrica utilizável e também servirem como janelas.

#### **Filme Fino de Silício:Hidrogênio (TFS:H)**

O filme fino de liga de silício:hidrogênio, também conhecido com silício amorfo (a-Si), representa a tecnologia atual predominante de produção em massa. Por serem baratos, os filmes finos são amplamente usados em produtos eletrônicos que exigem baixas potências como: calculadoras, relógios e em placas fotovoltaicas. O problema destas placas

é a baixa eficiência, que fica em torno de 6%, perdendo mais de 50% de sua eficiência quando expostas ao sol, sem mencionar a degradação das placas com o tempo.

Sólidos amorfos, como o vidro comum, são materiais onde os átomos não são arranjados em uma ordem peculiar, como o cristal de silício puro. Eles não formam uma estrutura cristalina por inteiro e contêm um grande número de estruturas e ligações defeituosas. É muito grande a probabilidade de um elétron liberado pela luz se recombinar com uma lacuna antes que ele possa ser retirado da placa para utilização. Neste caso, a energia do fóton absorvida pelo elétron se perde sob a forma de calor.

O silício amorfo pode ser produzido em temperaturas menores que os materiais anteriores e pode ser depositado em substratos de baixo custo. Isto reduz o custo final do produto. Outros materiais têm sido desenvolvidos para aumentar a eficiência e diminuir a degradação do filme fino de silício amorfo, mantendo os baixos custos. Materiais como: arsenieto de gálio (GaAs), diseleniureto de cobre e índio ( $\text{CuInSe}_2$ ), telurieto de cádmio (CdTe) e dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) têm sido usados nas células de filme fino, com variadas eficiências e custo de produção. O filme fino de dióxido de titânio, recentemente desenvolvido, é muito interessante por ser transparente e poder ser usado em janelas.

### **Diseleniureto de Cobre e Índio**

O diseleniureto de cobre e índio, normalmente abreviado para CIS, é uma combinação de materiais semicondutores que se apresenta como uma grande promessa para a indústria fotovoltaica.

A resposta espectral do CIS estende-se do meio da faixa visível e chega até perto da região do infravermelho do espectro solar, o que disponibiliza mais luz para ser usada pelas células. Eficiências maiores que 12% tem sido conseguida em pequenos equipamentos, e acima de 10% em módulos que abrangem grandes áreas.

### **Conjugado TFS/CIS ou Células com Multijunção**

Atualmente, os equipamentos fotovoltaicos mais comuns usam junção única para criar um campo elétrico dentro do semicondutor. Em uma célula fotovoltaica de junção única, apenas os fótons com energia igual ou superior à banda de energia do material da célula podem liberar elétrons. Em outras palavras, a resposta espectral das células de junção única está limitada à porção do espectro do sol que está acima da banda de energia de absorção do material, e os fótons de baixa energia não são usados.

Uma maneira de contornar esta limitação é empilhar duas (ou mais) células diferentes, com bandas de energia diferentes, para gerar tensão. O empilhamento é feito com decréscimo das bandas de energia. A célula de cima absorve os fótons de alta energia e deixa passar o resto dos fótons para serem absorvidos pelas células de bandas de energia menores. Estas células são denominadas células multijunção (também chamadas de células em cascata ou tandem). Equipamentos com multijunção apresentam alta eficiência de conversão porque convertem grande parte do espectro da luz solar em eletricidade.

Equipamentos de pesquisa com módulos de multijunção usando silício amorfo e diseleniureto de cobre e índio (CIS) conseguiram eficiência acima de 15,5%, e está previsto alcançar de 18 a 20%.

A combinação de alta eficiência e baixo custo torna esta tecnologia muito interessante.

#### **A.6 – Concentrador de Células**

Uma das opções para melhorar o desempenho de um sistema fotovoltaico é usar um concentrador óptico que foca a luz solar, através de lentes, em uma pequena área onde são localizadas as células fotovoltaicas. Isto aumenta a intensidade da luz solar que chega em tais células (é similar ao uso de lupas), aumentando a eficiência de conversão. A eficiência fica em torno de 26%.

A principal razão de se usar concentradores é diminuir a área coberta por células solares. As células solares são os componentes mais caros do sistema fotovoltaico.

Consegue-se reduzir o custo total destes sistemas diminuindo-se a quantidade de material requerido para as células solares, devido ao uso de lentes e espelhos do concentrador que são mais baratos do que as células solares.

O concentrador produz sobre a superfície da célula intensidades de luz de 10 a 500 vezes maiores que a intensidade normal do sol. No entanto, este fato gera excesso de calor sobre a célula diminuindo a sua vida útil.

A aplicação do concentrador é indicada para áreas onde o céu limpo é predominante, ou seja, para áreas que recebem grande parte da luz solar direta, como nos desertos. Locais que permanecem nublados na maior parte do ano ou onde neva não são indicados devido ao espalhamento da luz.

## **B – Bateria**

A principal função das baterias no sistema de potência fotovoltaico é permitir que a carga opere quando tal sistema não puder supri-la. Isto ocorre toda noite, em dias nublados ou durante dias ou semanas de mau tempo. O banco de baterias do sistema fotovoltaico deve ser especificado pela sua autonomia, ou seja, sua habilidade de operar independentemente de qualquer geração.

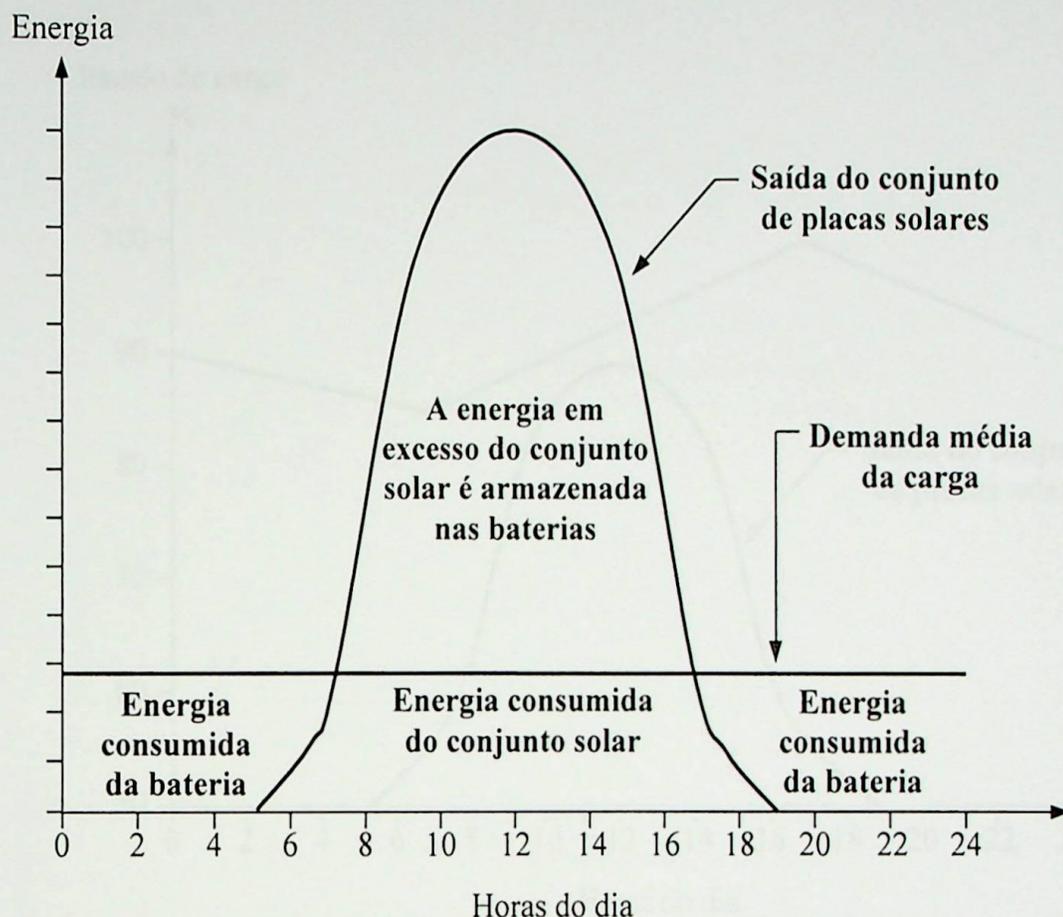
Outra importante função da bateria é alimentar uma carga que exija um nível de corrente superior ao que o conjunto fotovoltaico pode gerar. O conjunto fotovoltaico tem que ser especificado para suprir a energia total necessária para alimentar a carga durante o dia, porém, não deve ser especificado para suprir um aumento da demanda da carga em um determinado instante. A bateria deve atuar como um “buffer”, suprimindo grandes correntes para a carga por um curto período de tempo e ser lentamente carregada pelo conjunto fotovoltaico durante o dia.

Um terceiro propósito das baterias no sistema fotovoltaico é nivelar a ampla variação da tensão produzida pelo conjunto de placas solares, pois as baterias operam com uma estreita faixa de variação de tensão.

## B.1 – Desempenho das Baterias em um Sistema Fotovoltaico

Normalmente, o banco de baterias e o conjunto de placas solares trabalham juntos para alimentarem os equipamentos que compõem a ERB. A energia flui diretamente das placas para os equipamentos da ERB durante o dia, ou somente das baterias durante a noite ou ainda podem vir de uma combinação adequada de ambas as fontes.

A figura II.5 mostra o compartilhamento da demanda da carga entre o conjunto solar e o banco de baterias. Durante a noite, toda energia requerida pela carga é suprida pelo banco de baterias. Nas primeiras horas da manhã, a corrente produzida pelo conjunto fotovoltaico vai aumentando. Enquanto ela estiver menor que a demanda de corrente exigida pela carga, ambos, conjunto fotovoltaico e banco de baterias, suprem a carga. Quando a corrente do conjunto fotovoltaico ultrapassa a demanda média de corrente da carga, ele não só supri inteiramente a carga como também estoca o excesso de energia no banco de baterias. Finalmente, à tarde a corrente produzida pelo conjunto fotovoltaico começa a cair. Quando a corrente do conjunto fotovoltaico cai abaixo da demanda da carga, o banco de baterias começa a suprir a diferença e a descarregar-se. À noite, o conjunto fotovoltaico não produz corrente e toda a demanda da carga é novamente suprida pelo banco de baterias.



**Fig. II.5 – Compartilhamento da demanda da carga entre o conjunto solar e o banco de baterias**

## B.2 – Ciclo de Carga e Descarga das Baterias

A interação entre a carga, o banco de baterias e o conjunto de placas fotovoltaicas resulta em um ciclo diário de descarga e recarga das baterias. A figura II.6 mostra um exemplo simplificado de um ciclo diário de carga e descarga das baterias de 15%. As baterias terminam a parte clara do dia totalmente carregadas ou próximo disso e se descarregam durante a noite. No outro dia as baterias são novamente recarregadas pelo conjunto de placas fotovoltaicas.

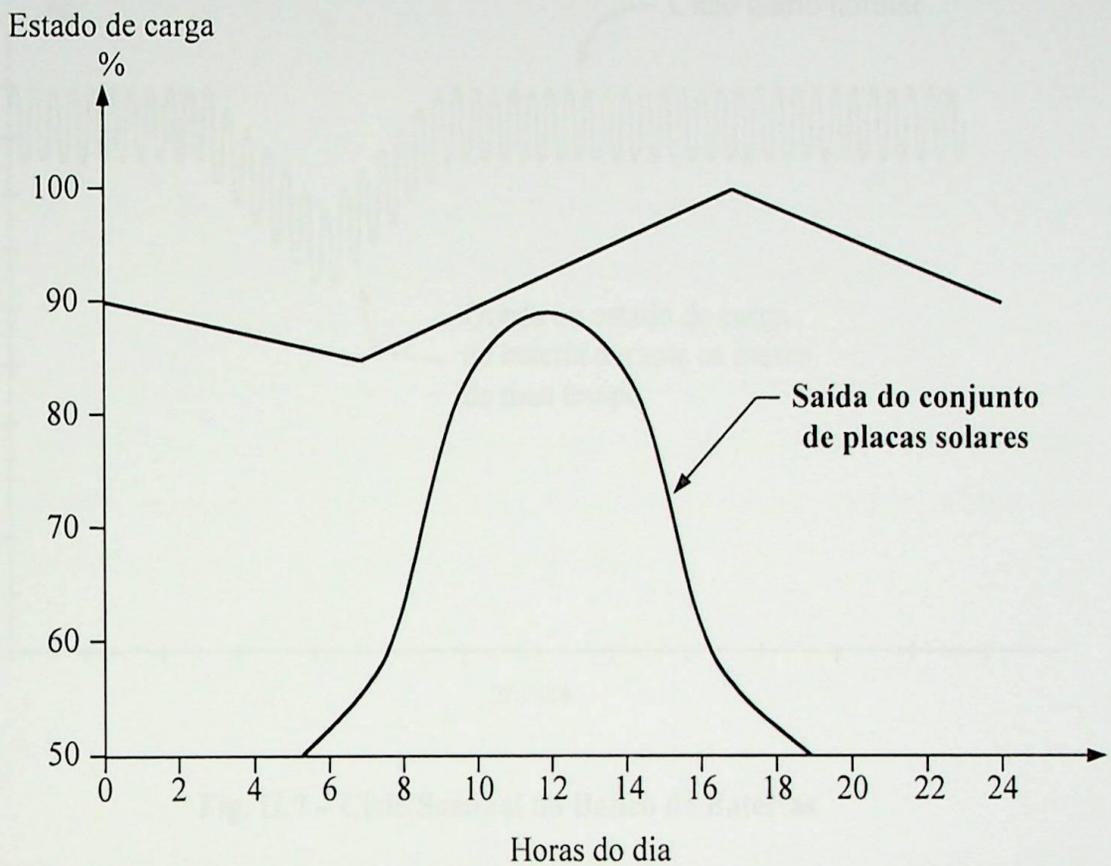


Fig. II.6 – Ciclo diário das Baterias de 15%

### B.3 – Ciclo Sazonal

Ao longo do ano existem períodos com baixa insolação. Se o conjunto de placas fotovoltaico for dimensionado grande o bastante para suprir energia durante estes períodos, o custo do sistema fotovoltaico será elevado, o que o tornará inviável economicamente, e durante o resto do ano haverá desperdício de energia.

O conjunto de placas deve, então, ser especificado para suprir energia na maioria dos dias do ano, e permitir que o banco de baterias forneça a diferença durante os curtos períodos de baixa insolação, como mostrado na figura II.7. Geralmente, a queda no ciclo da bateria não deve ultrapassar 30% nos períodos com baixa insolação.

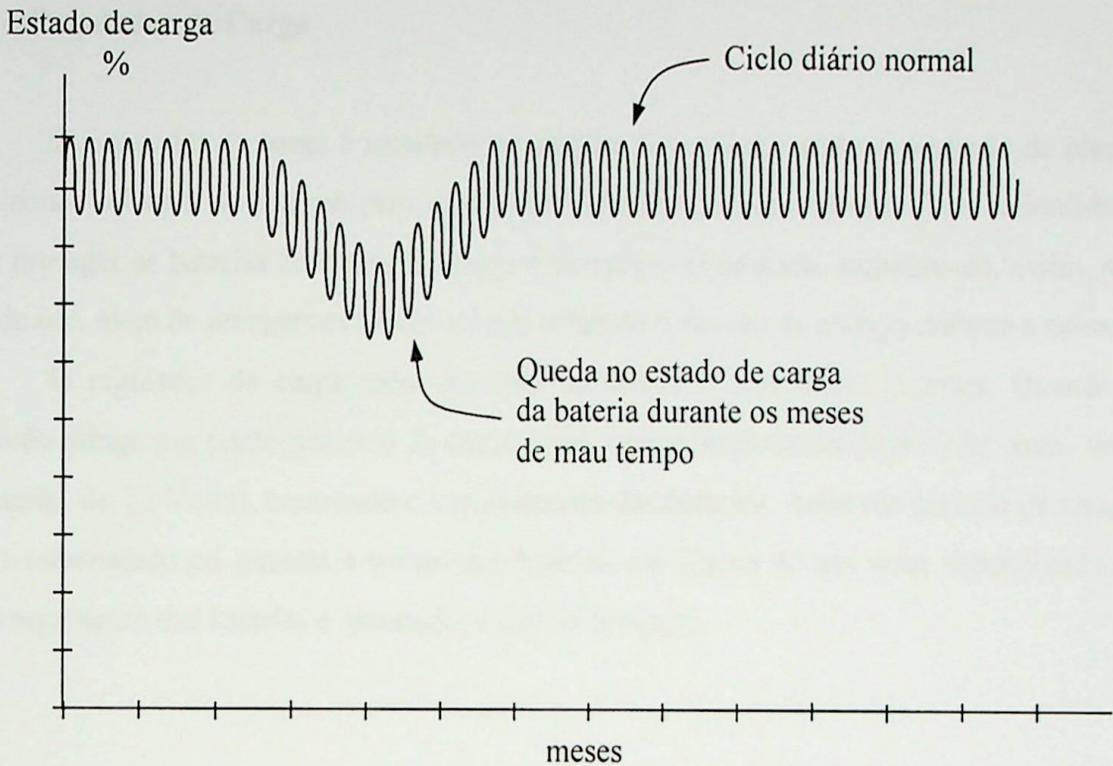


Fig. II.7 – Ciclo Sazonal do Banco de Baterias

#### B.4 – Tipo de Bateria usada no Sistema fotovoltaico

Não existe um tipo especial de bateria para o sistema fotovoltaico. O tipo de bateria mais utilizada nestes sistemas é a bateria selada que requer pouca ou nenhuma manutenção. Tal bateria é produzida com uma tecnologia que reduz significativamente seu consumo interno de água durante sua utilização em condições normais (tensão entre 13,8 e 14,8 Volts). Em caso de sobrecarga (tensões superiores, às mencionadas acima), o consumo de água se eleva.

As diferenças entre uma bateria sem manutenção e uma tradicional são basicamente as ligas de chumbo de que são feitas as grades e o grau de pureza dos demais materiais utilizados (como o óxido de chumbo, água e ácido). A bateria selada apresenta várias vantagens, por exemplo, a perda de água a um ritmo várias vezes menor, não sendo necessário adicionar água até o final de sua vida útil; ela é extremamente mais resistente à sobrecarga e descarrega-se muito mais lentamente, tanto em estoque quanto em uso.

### C – Regulador de Carga

O regulador de carga é instalado no sistema fotovoltaico entre o conjunto de placas solares e o banco de baterias para controlar o carregamento das baterias. Tem a finalidade de proteger as baterias contra sobrecargas e descargas excessivas, aumentando, assim, sua vida útil, além de proteger as placas solares evitando o retorno da energia durante a noite.

O regulador de carga monitora constantemente a tensão das baterias. Quando a tensão atinge um ponto próximo da carga total (aproximadamente 14,4 Volts para uma bateria de 12 Volts), encerra-se o carregamento das baterias. Após um período de tempo pré-selecionado ou quando a tensão das baterias cai abaixo de um valor especificado, o carregamento das baterias é retomado, e o ciclo se repete.

### D – Inversor

Como o sistema de ar condicionado da ERB funciona com corrente alternada, torna-se necessária a utilização de um inversor. O inversor auto-comutado, também denominado de conversor de frequência, permite a produção de corrente alternada a partir de uma fonte de corrente contínua.

A figura II.8 mostra a configuração básica do inversor alimentado por um conjunto de baterias, como ocorre na ERB. Tal inversor é de tensão imposta constante, ou seja, do tipo PWM (Pulse Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso) que é uma forma de controle de tensão por recorte onde os tiristores ou transistores de potência são ligados e desligados de modo a obter na saída o valor de tensão desejada. As chaves  $G_1$ ,  $G_3$ ,  $G_5$ ,  $G_4$ ,  $G_6$  e  $G_2$  são transistores de potência, enquanto que os diodos  $D1$ ,  $D3$ ,  $D5$ ,  $D4$ ,  $D6$  e  $D2$  são denominados “diodos de livre circulação”, que tem por finalidade a limitação de sobretensões durante os processos de comutação.

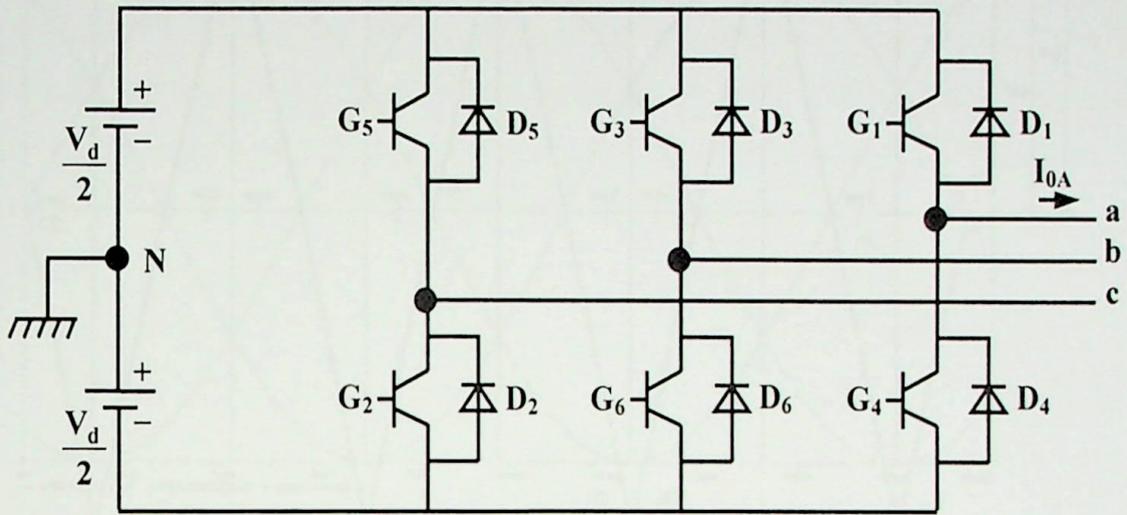


Fig. II.8 – Configuração básica do inversor auto-comutado

A figura II.9 mostra, a título de exemplo, uma forma de operação das chaves e a forma de onda da tensão resultante entre as fases.

Basicamente, o chaveamento dos transistores para a obtenção da forma de onda da tensão de saída do inversor é definido pela comparação de três tensões senoidais de referência (AN, BN e CN), defasadas entre si de  $120^\circ$  com uma onda portadora triangular.

Conforme mostra a figura II.9, a comparação entre a referência AN e a portadora é usada para o chaveamento de G<sub>1</sub> e G<sub>4</sub>, a comparação entre a referência BN e a portadora é usada para o chaveamento de G<sub>3</sub> e G<sub>6</sub> enquanto que a comparação entre a referência CN e a portadora é usada para o chaveamento de G<sub>5</sub> e G<sub>2</sub>.

Fig. II.9 – Comparação das Tensões de Referência de Tensão de Saída do Inversor [1].

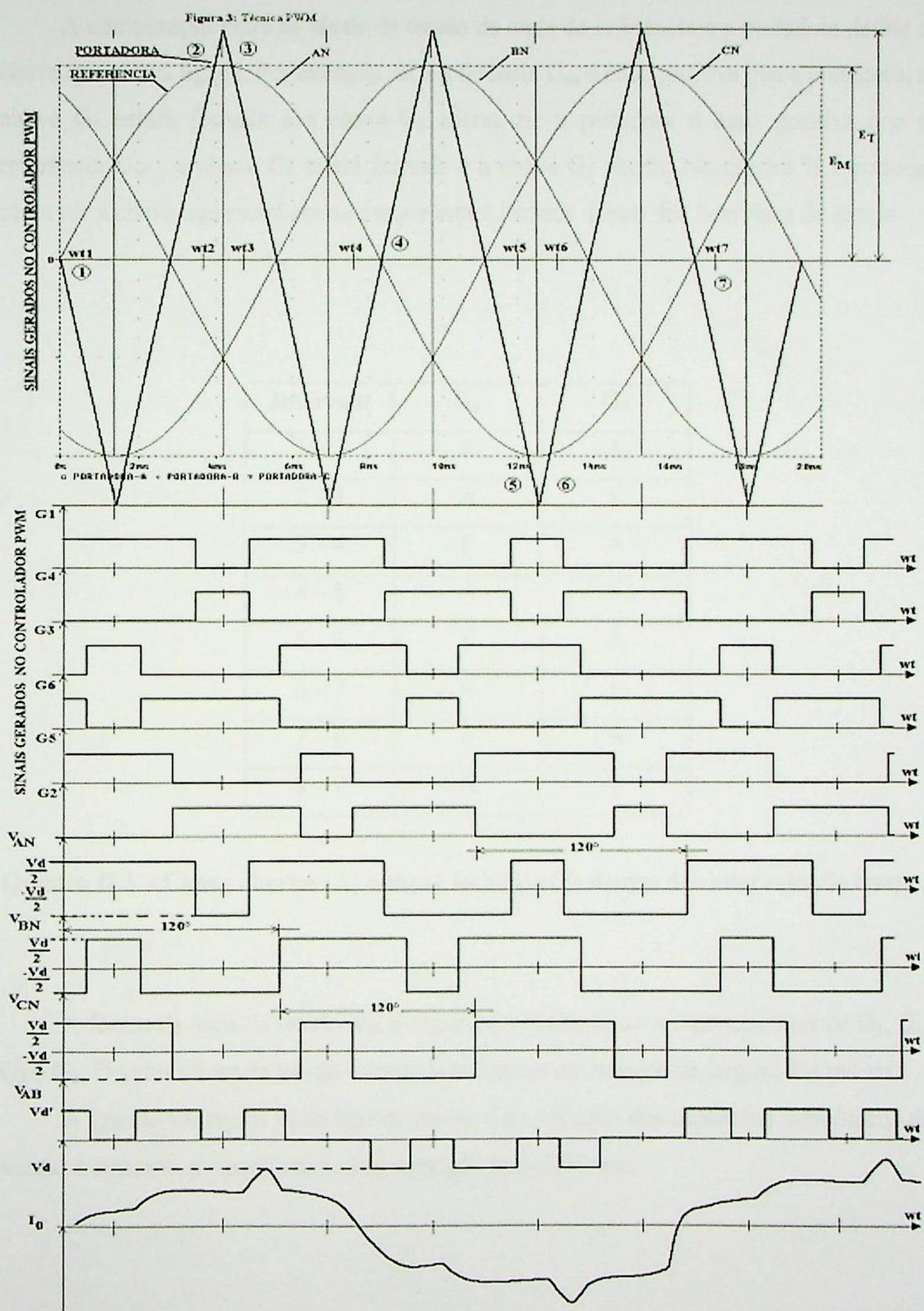


Fig. II.9 – Geração dos Pulsos de Tensão de Saída do Inversor [F].

A comparação entre os níveis de tensão da onda de referência e a portadora define a chave que estará ligada. Por exemplo, se a referência  $U_{an}$  é mais positiva que a portadora, a chave  $G_1$  estará fechada e a chave  $G_4$  aberta. Se a portadora é mais positiva que a referência  $U_{an}$ , a chave  $G_4$  estará fechada e a chave  $G_1$  aberta. No quadro II.1 pode-se observar a chave que estará aberta e a que estará fechada dentro dos intervalos de tempo.

Intervalo	$G_1$	$G_4$
1 – 2	F	A
2 – 3	A	F
3 – 4	F	A
4 – 5	A	F
5 – 6	F	A
6 – 7	A	F
7 – 8	F	A
8 – 9	A	F

**Quadro II.1 – Chave abertas (A) e chave fechadas (F) dentro dos intervalos de tempo.**

A forma de onda da tensão  $V_{ab}$  é obtida considerando os comportamentos de  $G_1$ ,  $G_4$ ,  $G_3$  e  $G_6$ . O valor eficaz da tensão é controlado através da variação da largura dos pulsos.

A grande vantagem deste tipo de inversor é a redução dos conteúdos harmônicos de tensão e corrente, proporcionando uma operação mais eficiente.

## II.2 – FORNECIMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA CONVENCIONAL

### II.2.1 – INTRODUÇÃO

A maior parte das ERB's instaladas em locais remotos, senão todas instaladas no Brasil, são alimentadas de forma convencional, ou seja, a alimentação é retirada da rede de distribuição de 13,8 kV disponíveis em centros urbanos.

A energia elétrica é levada até a ERB neste nível de tensão através de linha convencional. No local, o nível de tensão é reduzido para 220V/127V em uma outra subestação abaixadora.

A figura II.10 mostra, de forma esquemática, um diagrama dos componentes do sistema convencional para o fornecimento de energia elétrica em ERB's.

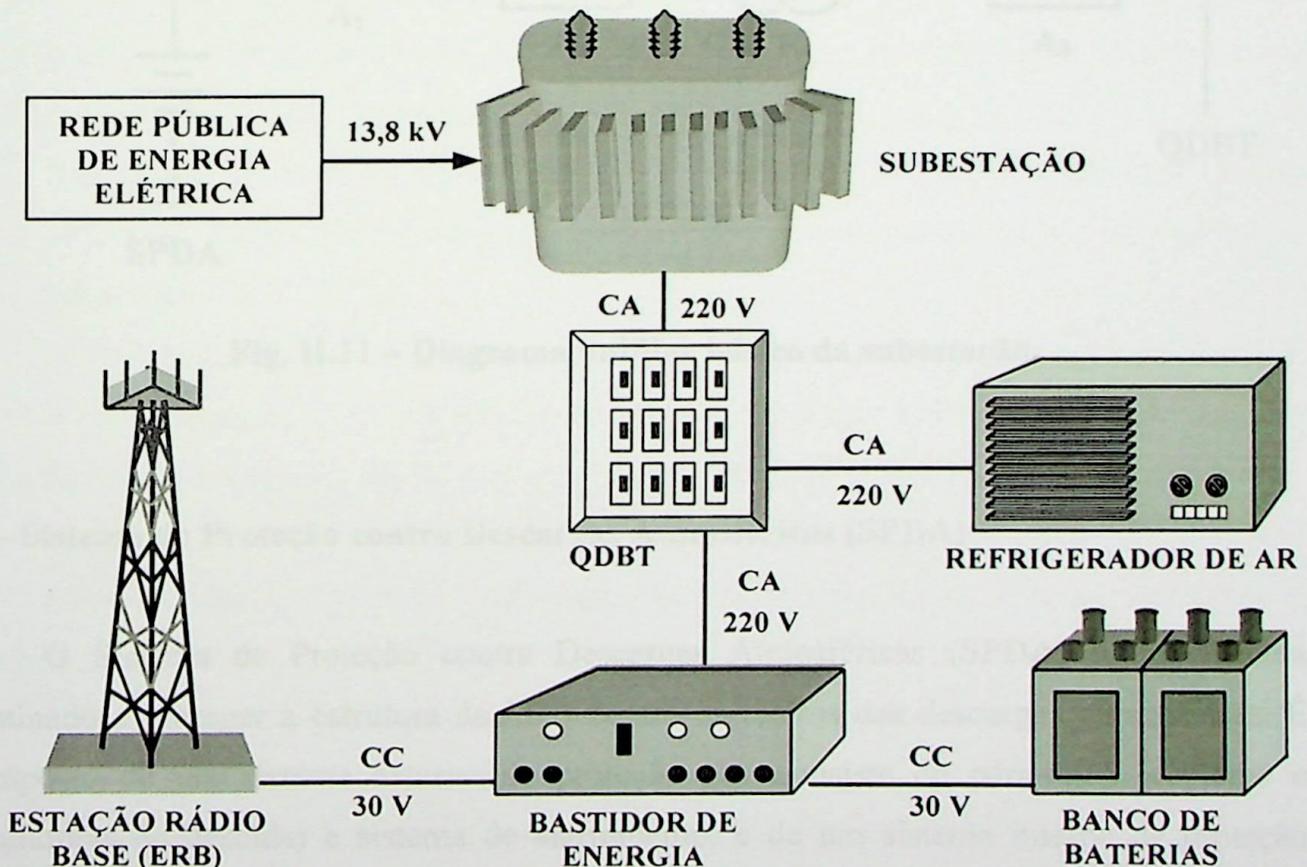


Fig.II.10 – Componentes do sistema convencional de suprimento de energia elétrica em ERB's (a subestação está representada pelo transformador).

## II.2.2 – SUBESTAÇÃO ABAIXADORA

Pelo fato da subestação ser a parte mais importante deste sistema, serão descritos aqui seus principais componentes. Tal subestação reduz a tensão de 13800V para 220V/127V instaladas nas proximidades da ERB.

A figura II.11 mostra o diagrama unifilar básico da subestação onde, SPDA é o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, composto do pára-raios e do aterramento,  $A_1$  é um seccionador a vazio,  $A_2$  é um disjuntor de alta tensão,  $T_r$  é um transformador,  $A_3$  é um disjuntor de baixa tensão e QDBT é o Quadro de Distribuição em Baixa Tensão.

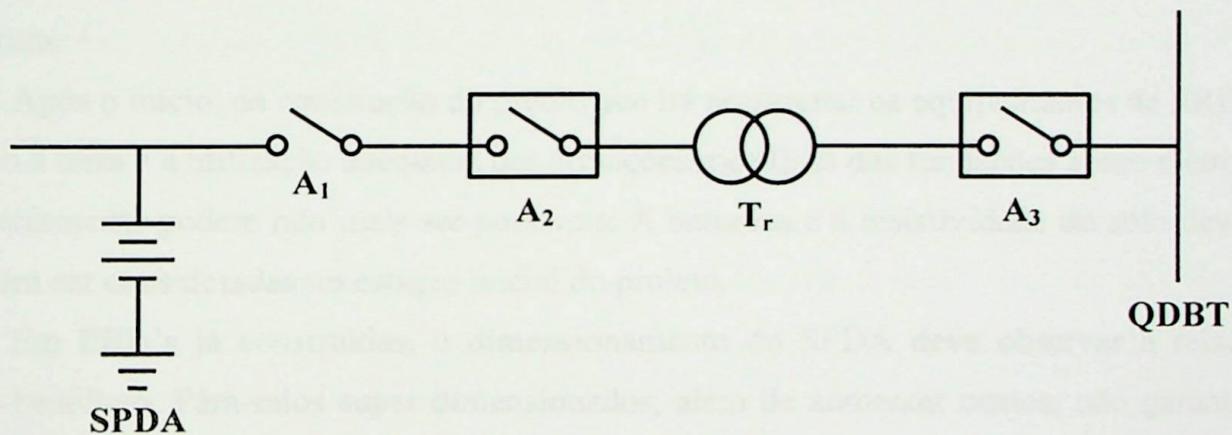


Fig. II.11 – Diagrama unifilar básico da subestação.

### A – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é um sistema destinado a proteger a estrutura da ERB contra os efeitos das descargas atmosféricas. É composto de um sistema externo de proteção que consiste de pára-raios (captore e condutores de descida) e sistema de aterramento, e de um sistema interno de proteção composto de um conjunto de dispositivos que reduzem os efeitos elétricos e magnéticos da corrente de descarga atmosférica dentro da ERB. Um SPDA deve ser instalado

principalmente em ERB's situadas em locais com alta densidade de descargas atmosféricas, isoladas, ou com altura superior a 25 metros.

O funcionamento do pára-raios consiste em oferecer um trajeto eficiente às correntes de descargas, conduzindo-as à dispersão no solo, evitando o seu contato com a edificação e os possíveis prejuízos aos equipamentos da ERB.

O sistema de aterramento é a parte mais importante do SPDA. Quando ocorrer uma descarga elétrica, o mesmo deve permitir que a corrente flua sem muita resistência. Normalmente, recomenda-se uma resistência elétrica de terra para sistema de pára-raios de no máximo 10 Ohms, conforme a NBR 5419/Fev.2001.

O tipo e o posicionamento do SPDA devem ser estudados cuidadosamente no estágio de projeto da ERB, a fim de se aproveitar ao máximo os elementos condutores da própria estrutura.

Após o início da construção do prédio que irá armazenar os equipamentos da ERB, o acesso à terra e a utilização adequada das armações metálicas das fundações como eletrodo de aterramento podem não mais ser possíveis. A natureza e a resistividade do solo devem também ser consideradas no estágio inicial do projeto.

Em ERB's já construídas, o dimensionamento do SPDA deve observar a relação custo-benefício. Pára-raios super dimensionados, além de aumentar custos, não garantem maior eficiência.

A implantação e a manutenção de sistemas de proteção (pára-raios) é normalizada, internacionalmente, pela IEC (International Electrotechnical Commission) e, em cada país, por entidades próprias como a ABNT (Brasil), NFPA (Estados Unidos) e BSI (Inglaterra).

Somente projetos elaborados com base nestas normas podem assegurar uma instalação eficiente e confiável. Entretanto, esta eficiência nunca atingirá os 100%, e mesmo estas instalações estão sujeitas a falhas de proteção. As mais comuns são a destruição de pequenos trechos do revestimento das fachadas das ERB's, ou de quinas da edificação ou ainda de trechos de telhados.

Existe outro caso de descargas elétricas, que utiliza outro tipo de proteção, que são as descargas elétricas nas redes de distribuição de energia elétrica e telefônica. Essas descargas penetram na ERB através da mesma fiação de alimentação entre o poste/padrão e o quadro de distribuição interno. Estas descargas podem danificar os equipamentos

eletrônicos da ERB. Para proteção contra tais descargas deve-se utilizar pára-raios de baixa tensão.

A vistoria geral dos componentes deve ser efetuada periodicamente, assegurando a eficiência do sistema implantado. As medições devem ser executadas com equipamentos apropriados, de alta precisão. Devem ser feitas também vistorias preventivas após reformas que possam alterar o sistema e toda vez que a edificação for atingida por descarga direta.

## **B – Seccionador a Vazio**

Conforme mostrado na figura II.11, o seccionador a vazio  $A_1$  tem por finalidade permitir a manutenção do disjuntor de alta tensão  $A_2$ . O seccionador é dispensável caso o disjuntor utilizado seja do tipo extraível.

Quando a solução envolve a utilização do seccionador a vazio e do disjuntor, deve ser previsto um intertravamento entre ambos, garantindo que, no desligamento, o disjuntor seja operado antes do seccionador e, na ligação, o seccionador seja operado antes do disjuntor.

## **C – Disjuntor de Alta Tensão**

O disjuntor  $A_2$  pode ser fixo ou extraível. Geralmente é um disjuntor com pequeno volume de óleo contendo as proteções usuais (sobre-carga, curto-circuito e sobre-tensão).

A capacidade de curto-circuito geralmente não é muito alta e depende muito da localização da ERB.

## **D – Disjuntor de Baixa Tensão e QDBT**

O disjuntor de baixa tensão localiza-se dentro do quadro de distribuição de baixa tensão (QDBT), servindo como equipamento de manobra em condições normais ou anormais de operação.

O QDBT alimenta as diversas cargas da ERB através de disjuntores ou de fusíveis. Os refrigeradores de ar e o bastidor de energia são alimentados com corrente alternada. No bastidor de energia, a corrente é retificada para alimentar os equipamentos que compõem a ERB e o banco de baterias. No caso do fornecimento de energia principal (neste caso, a rede pública) falhar, o suprimento de energia elétrica será feito pelo banco de baterias.

## **E – Transformador**

O transformador trifásico geralmente é do tipo triângulo-estrela. A relação de transformação é de 13800V/220V. Sua forma construtiva é convencional e comum aos transformadores de distribuição.

### **II.2.3 – Qualidade de Energia Elétrica**

Hoje, com a crescente necessidade de automação dos processos, a rede elétrica vem sendo cada vez mais alvo constante de cargas não lineares. Estas cargas, ao mesmo tempo em que poluem a rede elétrica promovendo distorções nas formas de onda de correntes e tensões, são bem mais sensíveis aos efeitos criados por estas distorções. Estes fatos prejudicam a qualidade da energia elétrica.

Com a concorrência, a competitividade do setor elétrico brasileiro vem induzindo as empresas concessionárias a oferecerem uma melhor qualidade dos serviços prestados aos seus clientes. Convém salientar que a influência da qualidade de energia elétrica na operação de ERB's ainda não está totalmente analisada e quantificada. Descargas atmosféricas, tensões desequilibradas, oscilações transitórias ou permanentes da tensão são características que influenciam de forma negativa a alimentação da forma convencional.

# CAPÍTULO III

## ESTAÇÃO RÁDIO BASE

### III.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordada a Estação Rádio Base (ERB) que é uma das partes que compõe um sistema de comunicação móvel celular. O objetivo do capítulo é o de fornecer uma visão geral da telefonia móvel e da ERB sem, contudo, se aprofundar no assunto.

O primeiro sistema de comunicação celular utilizava um sistema analógico e foi desenvolvido na Europa na década de 80. Desta primeira geração de sistemas móveis celulares, pode-se citar como exemplo o sistema AMPS (Advanced Mobile Phone System).

Posteriormente, foram desenvolvidos diversos sistemas no mundo. Isto levou a incompatibilidades entre eles devido a forma de envio de dados, protocolos e frequências de comunicação. Em 1982 foi realizada a "Conference of European Posts and Telegraphs (CEPT)" onde se formou um grupo denominado "Group Special Mobile (GSM)", com o objetivo de estudar e desenvolver um sistema móvel que obedecesse alguns padrões: boa qualidade de voz, eficiência espectral, terminais pequenos e baixos custos, suporte para "roaming" (visitante) internacional, capacidade para suportar "handheld" terminais (computador de mão), suportar uma larga área de novos serviços e utilidades. Em 1989, a responsabilidade passou para o "European Telecommunication Standards Institute (ETSI)" que, em 1990, publicou as especificações do GSM. Tal padrão generalizou-se então pelo resto do mundo. Esta segunda geração de sistemas celulares utiliza sistemas digitais.

A "Terceira Geração Wireless" é um termo genérico usado como referência para a próxima geração de Sistemas Móveis de Comunicação. O Sistema 3G irá fornecer uma gama de serviços de transferência de voz, texto e dados, em alta velocidade. Será possível

conversar entre dois telefones celulares com uma vídeo câmera sem interrupções, conectar-se rapidamente ao escritório e acessar documentos, navegar na internet em alta velocidade, acessar música MP3 com agilidade, atuar nas bolsas de valores seguramente. Os sistemas 3G também são sistemas digitais. Sua operação teve início em 2001 no Japão.

É comum ouvirmos também falar de sistemas 2,5G. Esse termo se refere aos sistemas celulares com serviços e taxas adicionais àquelas oferecidas pelos sistemas 2G, porém ainda não caracterizados como 3G.

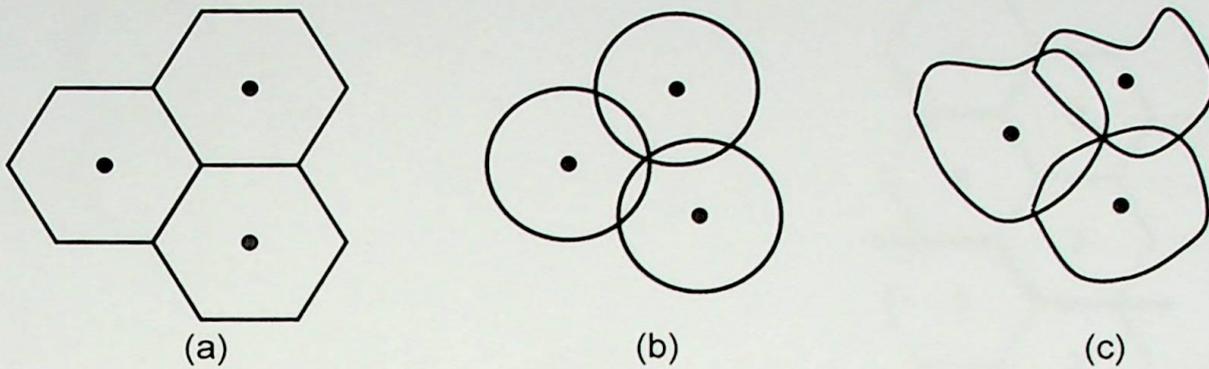
### III.2 – CONSTITUIÇÃO DE CELULA

Uma determinada região geográfica a ser coberta pelo serviço móvel celular é dividida em sub-regiões chamadas células. O tamanho da célula varia de acordo com o tráfego local (número de conversações simultâneas). Quanto maior o tráfego, menor será a célula correspondente, uma vez que o número de canais por célula é limitado. Em áreas centrais de uma cidade, por exemplo, as células são menores do que as células das áreas suburbanas.

O sistema celular, em princípio, divide esta área em células hexagonais de igual tamanho (Fig. III.1(a)), de tal forma que as estações rádio base (ERB's) estejam localizadas no centro das mesmas. Tal formato não é conseguido na prática, porém, os projetistas o usam para simplificar o planejamento. A forma circular (Fig. III.1(b)) representa a irradiação uniforme de potência em todas as direções a partir da ERB. Na prática, a área de cobertura real de uma célula é uma forma irregular (Fig. III.1(c)), pois a propagação depende de vários fatores como: obstrução por morros, declives de terrenos, lagos, edificações, vegetação, etc.

A localização da ERB, muitas vezes, não é no centro da célula, mas em posições topográficas favoráveis à melhor cobertura da mesma.





**Fig. III.1 – Área de cobertura do Serviço Móvel Celular. (a) Célula hexagonal – Fictícia, (b) Célula circular – Ideal e (c) Célula irregular – Real.**

### III.3 – REUTILIZAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS

O conceito básico de padrões celulares é a possibilidade de reutilização das frequências alocadas ao sistema, isto é, as frequências utilizadas em uma célula podem ser reutilizadas em outra célula. As células que utilizam as mesmas frequências são chamadas de co-células. As co-células devem ser posicionadas a uma distância mínima ( $D$ ), determinada pelo nível máximo de interferência entre co-canais aceito pelo sistema.

O conjunto de canais disponíveis no sistema é alocado a um grupo de células denominado *cluster* (conjunto de 1, 4, 7 ou 12 células), e essas mesmas frequências podem ser reutilizadas em outro *cluster*, respeitando-se a distância mínima de reutilização para a alocação das frequências nas células do *cluster*.

Quanto menor o *cluster*, maior será o número de canais por célula, e assim maior o tráfego local. Por outro lado, quanto menor a distância de reutilização, maior o nível de interferência no sistema.

A figura III.2 mostra a distância  $D$  de reutilização de frequências entre co-células comparada com o raio  $R$  da célula em *clusters* de (a) uma célula, (b) quatro células, (c) sete células e (d) doze células.

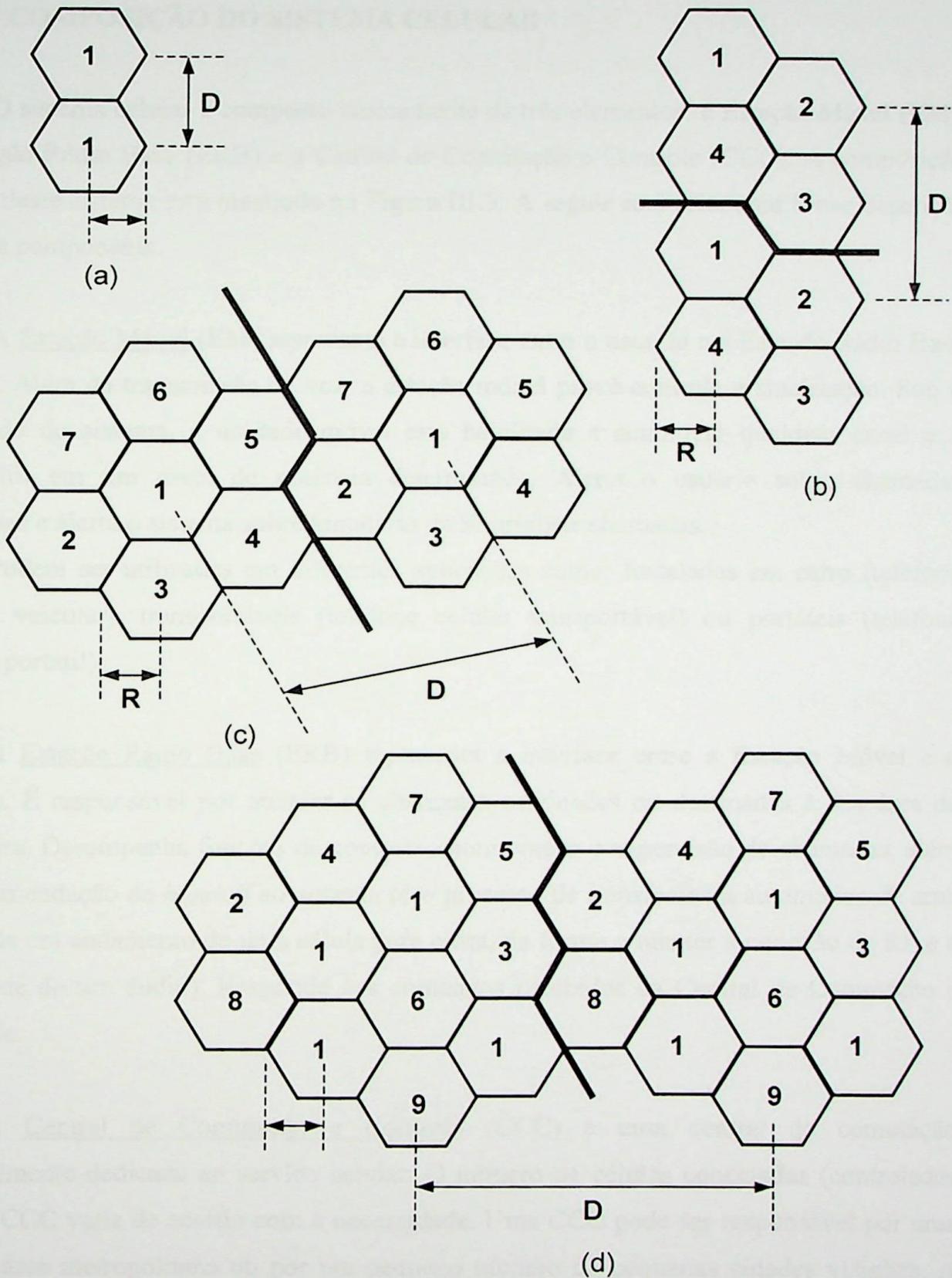


Fig. III.2 – Distância  $D$  de reutilização de freqüências entre co-células comparado com o raio  $R$  da célula em *clusters* de (a) uma célula, (b) quatro células, (c) sete células e (d) doze células.

### III.4 – COMPOSIÇÃO DO SISTEMA CELULAR

O sistema celular é composto basicamente de três elementos: a Estação Móvel (EM), a Estação Rádio Base (ERB) e a Central de Comutação e Controle (CCC). A composição básica deste sistema está mostrada na Figura III.3. A seguir será feita uma breve descrição de cada componente.

A Estação Móvel (EM) representa a interface entre o usuário e a Estação Rádio Base (ERB). Além da transmissão de voz, a estação móvel provê controle e sinalização. Sob o comando do sistema, a unidade móvel está habilitada a sintonizar qualquer canal e a transmitir em um nível de potência determinado. Alerta o usuário sobre chamadas recebidas e alerta o sistema sobre tentativas de se originar chamadas.

Podem ser utilizadas em diferentes aplicações como: Instaladas em carro (telefone celular veicular), transportáveis (telefone celular transportável) ou portáteis (telefone celular portátil).

A Estação Rádio Base (ERB) representa a interface entre a Estação Móvel e o sistema. É responsável por atender às chamadas originadas ou destinadas à sua área de cobertura. Desempenha funções de controle, monitoração e supervisão de chamadas, além da recomendação de *handoff* ao sistema (é o processo de transferência automática de uma chamada em andamento de uma célula para outra, de forma a manter a conexão de RF e a qualidade de seu áudio). Responde aos comandos recebidos da Central de Comutação e Controle.

A Central de Comutação e Controle (CCC) é uma central de comutação especialmente dedicada ao serviço celular. O número de células conectadas (controladas pela) à CCC varia de acordo com a necessidade. Uma CCC pode ser responsável por uma grande área metropolitana ou por um pequeno número de pequenas cidades vizinhas. A área servida por uma CCC é chamada de Área de Serviço.

Um assinante móvel dentro de sua área de serviço é chamado assinante *home*. Se um assinante sair de sua área de serviço e for para outra área de serviço ele é denominado

*roamer*. As principais funções da CCC relacionam-se com o tratamento, monitoração e controle dos canais-rádio do sistema (*paging* - procura de assinantes, *handoff*, *roaming*).

A CCC estabelece a interface entre ERB's de sua área de serviço e entre ERB's de áreas de serviços diferentes. Também se comunica com as centrais públicas de comutação, constituindo-se em um meio de acesso entre o sistema fixo e o sistema celular.

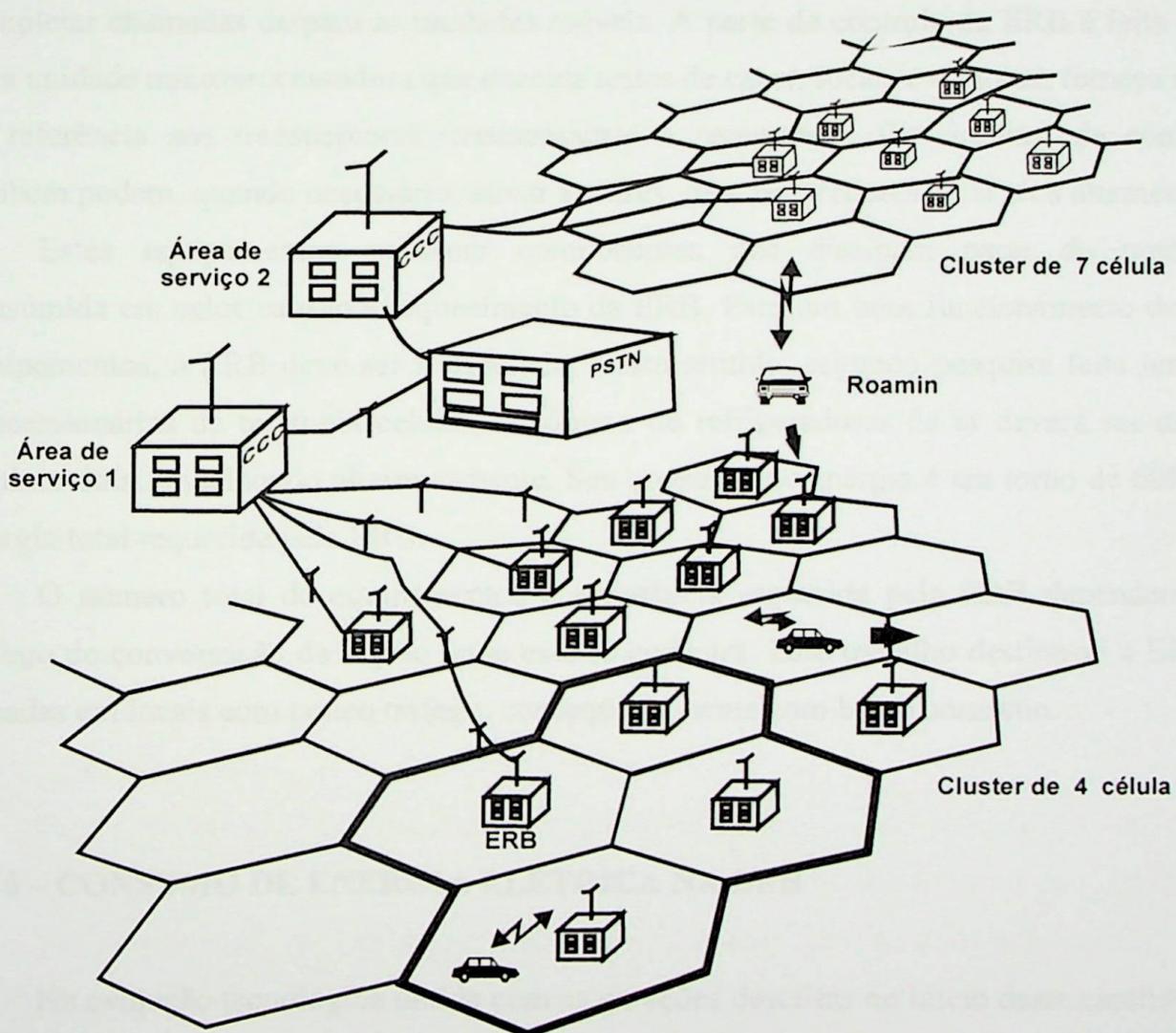


Fig. III.3 – Composição Básica de um Sistema Celular.

### III.5 – DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO RÁDIO BASE (ERB)

A principal função de uma ERB é transmitir e receber sinais de RF e conseqüentemente fornecer os canais físico e lógico usados na rede de comunicação de rádio.

A ERB consiste de duas partes: a de rádio e a de controle. Os equipamentos de rádio compreendem transmissores, receptores, amplificadores, combinadores e antenas. Tais equipamentos são responsáveis por todas as tarefas necessárias para se estabelecer e completar chamadas de/para as unidades móveis. A parte de controle da ERB é feita com uma unidade microprocessadora que executa testes de canal, locais e remotos, fornece sinal de referência aos transceptores (transmissores e receptores). Os circuitos de controle também podem, quando necessário, ativar as luzes, os refrigeradores de ar e os alarmes.

Estes equipamentos possuem componentes que dissipam parte da potência consumida em calor causando aquecimento da ERB. Para um bom funcionamento de tais equipamentos, a ERB deve ser refrigerada. Neste sentido, segundo pesquisa feita junto a concessionárias de telefonia celular, o número de refrigeradores de ar deverá ser de no mínimo dois, trabalhando alternadamente. Seu consumo de energia é em torno de 60% da energia total requerida pela ERB.

O número total de equipamentos e a potência requerida pela ERB dependem do tráfego de conversação da região onde esta se encontra. Este trabalho destina-se a ERB's situadas em locais com pouco tráfego, conseqüentemente com baixo consumo.

### III.6 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ERB

Na evolução tecnológica obtida com as gerações descritas no início deste capítulo, as metas a serem atingidas por parte das empresas fabricantes de componentes para os telefones celulares e para os equipamentos utilizados nas Estações Rádio Base são: aumento do desempenho dos equipamentos, redução da potência consumida, redução do tamanho dos componentes e redução do custo.

De acordo com empresas do ramo, hoje o consumo de energia elétrica da telefonia celular representa 60% do consumo das telefônicas. A corrida dos fabricantes pela redução do consumo de energia é favorável à utilização do sistema solar.

Os fabricantes têm trabalhado na redução do consumo de quase todos os componentes dos equipamentos da ERB, tais como: amplificadores operacionais, conversores de sinal A/D (Analogico/Digital) e D/A (Digital/Analogico), processadores (DSP – Digital Signal Processor - Processador Digital de Sinal, responsável pelo tratamento dos sinais em tempo real e GPP – General Purpose Processor - Processador de Propósito Geral, responsável pelo controle da ERB), conversores DC/DC. Dois pontos devem ser ressaltados nesta corrida para a redução do consumo:

i) O desempenho dos processadores DSP e GPP é medido em MIPS (Milhões de Instruções por Segundo). O consumo destes processadores é fornecido em W/MIPS (Watts por MIPS). A cada nova geração de processadores esta relação é reduzida. Por exemplo, na família de processadores DSP TMS320C5000<sup>TM</sup> da Texas Instruments [G], utilizado na telefonia celular, a geração C54x tem desempenho de 30 a 532 MIPS e consumo de 0,32 mW/MIPS. A geração aprimorada C55x apresenta performance de 288 a 600 MIPS com consumo de 0,05 mW/MIPS.

ii) Uma grande parte da energia consumida pela ERB é dissipada sob a forma de calor. Alguns componentes dos equipamentos da ERB trabalham com tensões menores que 24Vcc, dentre outras, com 5Vcc, 3,3Vcc e 1,8Vcc. Estas tensões são utilizadas para a redução do consumo de energia. Porém, para isso são necessários conversores DC/DC de 24Vcc para tais tensões.

Os conversores DC/DC das primeiras gerações utilizam fontes lineares que possuem eficiência abaixo de 60% e dissipam grande parte da potência sob a forma de calor. Com isso, são necessários refrigeradores de ar para manter um bom funcionamento dos equipamentos. Como visto anteriormente, hoje os refrigeradores são responsáveis por 60% da energia consumida pela ERB. Nas gerações 2,5G e 3G os conversores DC/DC utilizam fontes chaveadas que possuem eficiência acima de 90%. Com o aumento da eficiência, a dissipação de calor é menor, diminuindo, assim, o aquecimento na ERB. Este fato promove uma redução do consumo com refrigeração de ar.

# **CAPÍTULO IV**

## **DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS RELATIVOS A AMBAS SOLUÇÕES**

### **IV.1 – INTRODUÇÃO**

O objetivo principal deste trabalho, como já foi declarado anteriormente, é a proposição de uma solução alternativa para alimentação de Estações Rádio Base. Este objetivo vem ao encontro da preocupação do governo brasileiro relativa à crise vigente, ou seja, da energia elétrica. Evidentemente que qualquer solução tem como ponto importante a ser analisado aquele referente à custos. A seguir serão apresentados os custos referentes ao sistema fotovoltaico e ao sistema convencional. Ao final deste capítulo estes custos serão comparados. As equações descritas neste capítulo aplicam-se a qualquer moeda, porém, para o desenvolvimento do software utilizou-se o Real.

### **IV.2 – CUSTOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO**

É importante observar que os custos relativos ao sistema fotovoltaico referem-se apenas à implantação. A partir daí não ocorrem custos referentes ao consumo de energia elétrica. Os custos de manutenção são baixos, conforme já mencionado anteriormente.

Conforme levantamento feito junto à empresas especializadas neste tipo de sistema de suprimento de energia elétrica, principalmente junto a Heliodinâmica [A], a parcela maior do custo do sistema refere-se às placas e baterias. Os acessórios indicados a seguir representam 10% do custo das placas e baterias. Esses acessórios são:

- Suportes de alumínio necessários à fixação das placas solares.
- Regulador de carga usado para proteção das baterias contra sobrecargas e descargas excessivas, além de proteger as placas evitando o retorno da energia.
- Inversores auto-comutados usados para alimentação com corrente alternada do sistema de ar condicionado.
- Fios e conectores.

Desta forma, tem-se:

$$C_{iPV} = 1,1(C_{PL} + C_{BPV}) \quad (01)$$

Onde  $C_{iPV}$  é o custo de implantação do sistema fotovoltaico,  $C_{PL}$  é o custo total com as placas solares e  $C_{BPV}$  é o custo total com as baterias do sistema fotovoltaico.

Para definição dos custos relativos às placas solares foi tomada como base a utilização de placas de 45W. Cada placa gera em média 120 Wh/dia, conforme informação do fabricante, tomando como região o interior do Estado de São Paulo.

A decisão para utilização de placas de 45W foi tomada com base em sugestões de fabricantes. Evidentemente que as equações indicadas a seguir podem ser adaptadas para outro tipo de placa ou de região.

Desta forma, o número de placas necessário à produção da potência requerida, admitindo o fornecimento de energia durante todo o dia (24 horas), é:

$$N_{PL} = \frac{P_W \times 24}{120} = 0,2 \times P_W \quad (02)$$

Onde  $N_{PL}$  é o número de placas solares e  $P_W$  é a potência, em Watts, requerida pela ERB.

O custo total das placas ( $C_{PL}$ ) será:

$$C_{PL} = N_{PL} \times R_{PL} = 0,2 \times P_W \times R_{PL} \quad (03)$$

Onde  $R_{PL}$  é o custo unitário da placa solar de 45W operando em 12V.

Conforme discutido no capítulo II, o excesso de energia elétrica gerado pelas placas solares durante o dia deve ser armazenado nas baterias para, posteriormente, alimentar a ERB durante a noite.

De acordo com pesquisas realizadas junto a fabricantes, para cada placa de 45W operando em 12V serão usadas duas baterias, em série, de 100Ah operando em 12V. Desta forma, garante-se energia suficiente para três dias totalmente sem luz. Deve-se observar que em dias nublados o conjunto de placas solares gera energia, porém em quantidades menores que nos dias ensolarados. Este fato, conforme descrito anteriormente, faz com que o banco de baterias se carregue, mas não por completo.

O número de baterias necessário para o sistema fotovoltaico, então, será:

$$N_{BPV} = 2 \times N_{PL} = 0,4 \times P_W \quad (04)$$

Onde  $N_{BPV}$  é o número de baterias utilizadas para o sistema fotovoltaico.

Portanto:

$$C_{BPV} = 0,4 \times P_W \times R_{Bat} \quad (05)$$

Onde  $R_{Bat}$  é o custo unitário da bateria de 100Ah operando em 12V.

Assim, o custo de implantação do sistema fotovoltaico é obtido com a substituição das equações (03) e (05) na equação (01):

$$C_{iPV} = 1,1(0,2 \times P_W \times R_{PL} + 0,4 \times P_W \times R_{Bat}) \quad (06)$$

Logo,

$$C_{iPV} = (0,22 \times R_{PL} + 0,44 \times R_{Bat}) P_W \quad (07)$$

### IV.3 – CUSTOS COM O SISTEMA CONVENCIONAL

O sistema convencional de suprimento de energia elétrica é o sistema mais utilizado no Brasil. A maioria das ERB's já instaladas no Brasil recebe energia através de linhas de transmissão trifásicas de 13800V e, em uma subestação próxima a ERB, a tensão é abaixada para 220V/127V.

Deve-se ressaltar que os custos relativos ao sistema convencional compõe-se do custo da implantação do sistema e do custo mensal referente ao consumo de energia elétrica.

Para a análise de tais custos foi feito um levantamento junto às concessionárias e empresas do ramo de energia elétrica. Contou-se com a colaboração principalmente da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), da Decisa Engenharia e Comércio Ltda e da Instel Montagens Elétricas Ltda.

### IV.3.1 – CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

No cálculo dos custos relativos à implantação do sistema convencional, devem ser levadas em consideração quatro parcelas. São elas: custo com a linha de transmissão, custo com a subestação abaixadora localizada próxima à ERB, custo com as baterias e custo com os retificadores. Sendo assim,

$$C_{iLT} = C_L + C_{Sub} + C_{BLT} + C_{Ret} \quad (08)$$

Onde  $C_{iLT}$  é o custo de implantação do sistema convencional,  $C_L$  é o custo total com a linha de transmissão,  $C_{Sub}$  é o custo com a subestação junto a ERB,  $C_{BLT}$  é o custo total com as baterias do sistema convencional e  $C_{Ret}$  é o custo com os retificadores.

De acordo com empresas de Telefonia Celular, geralmente a ERB está localizada de 2 a 5 km de um ponto de fornecimento de energia elétrica, podendo se estender dependendo da região onde esta vai ser instalada e das condições de acesso à tal ERB. Portanto, no custo total da linha de transmissão, deve-se considerar a distância, em quilômetros, a que a ERB se encontra de uma subestação ou de uma linha de transmissão já instalada. Então:

$$C_L = D_{km} \times R_{kmLT} \quad (09)$$

Onde  $D_{km}$  é a distância, em km, da ERB à uma subestação ou LT já instalada e  $R_{kmLT}$  é o custo da linha de transmissão por km.

O levantamento do custo da subestação próxima a ERB deve ser realizado junto à concessionária de energia elétrica da região onde está localizada a ERB ou por empresas especializadas em projetos e instalações de subestações. Incluí-se neste levantamento os custos com o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (para-raios para alta e baixa tensões e sistema de aterramento), com o seccionador a vazio, com o disjuntor de alta

tensão, com o transformador, com o disjuntor de baixa tensão e com o quadro de distribuição em baixa tensão, além dos custos de infra-estrutura e de montagem.

As baterias usadas no sistema de alimentação convencional também são de 100Ah operando em 12V, como no sistema fotovoltaico. Para uma autonomia de 10h com tensão de 24 V, o número de baterias necessárias será:

$$N_{BLT} = \frac{P_w}{24 \times 100} \times 2 \times 10 = \frac{P_w}{120} \quad (10)$$

Onde  $N_{BLT}$  é o número de baterias para o sistema convencional.

Portanto:

$$C_{BLT} = \frac{P_w}{120} \times R_{Bat} = 8,3333 \times 10^{-3} \times P_w \times R_{Bat} \quad (11)$$

Onde  $C_{BLT}$  é o custo total com as baterias do sistema convencional.

A especificação e o custo do carregador de baterias envolve muitas variáveis e seu custo não é linear, portanto neste cálculo será utilizado orçamento obtido em empresas do ramo.

Logo, o custo de implantação do sistema convencional é obtido substituindo as equações (09) e (11) na equação (08):

$$C_{iLT} = D_{km} \times R_{kmLT} + C_{Sub} + 8,3333 \times 10^{-3} \times P_w \times R_{Bat} + C_{Ret} \quad (12)$$

### IV.3.2 – CUSTO MENSAL REFERENTE AO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

O custo mensal do sistema convencional refere-se ao consumo mensal de energia elétrica da Estação Rádio Base.

Considerando 10% do total deste custo como sendo taxas e eventuais multas por baixo fator de potência, tem-se:

$$C_{mLT} = P_W \times 10^{-3} \times 24 \times 30 \times 1,1 \times R_{kWh} \quad (13)$$

$$C_{mLT} = 0,792 \times P_W \times R_{kWh} \quad (14)$$

Onde  $C_{mLT}$  é o custo mensal do sistema convencional e  $R_{kWh}$  é o custo do kWh.

### IV.4 – ANÁLISE DOS CUSTOS DE AMBOS OS SISTEMAS

Como foi mostrado neste capítulo, os custos relativos ao sistema fotovoltaico referem-se apenas ao custo de implantação. No sistema convencional, além do custo de implantação do sistema, existe um adicional mensal relativo ao consumo de energia elétrica.

Para a análise da viabilidade de se usar um sistema ou outro, o custo com o investimento inicial, ou seja, de implantação do sistema, deve ser corrigido mensalmente. A taxa de juros (T) utilizada será a Selic que é uma taxa definida pelo COPOM – Conselho de Política Monetária. É uma taxa com variação mensal.

O custo mensal do sistema convencional também será corrigido com esta mesma taxa de juros.

#### IV.4.1 - SISTEMA FOTOVOLTAICO

Neste item será equacionada a correção dos custos com o sistema fotovoltaico, que se resume apenas ao investimento inicial.

A cada mês o custo inicial é corrigido segundo a taxa de juros como a seguir:

$$1^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iPV} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)$$

$$2^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iPV} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^2$$

⋮

$$n^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iPV} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n$$

Portanto,

$$C_{PV} = C_{iPV} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n \quad (15)$$

Onde  $C_{PV}$  é o custo do sistema fotovoltaico corrigido,  $T$  é a taxa de juros (Selic) e  $n$  é o número de meses para o qual se deseja obter o custo corrigido.

## IV.4.2 – SISTEMA CONVENCIONAL

No sistema convencional, além da correção do custo de implantação do sistema, deve-se equacionar também a correção do custo relativo ao consumo de energia elétrica.

$$1^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right) + C_{mLT}$$

$$2^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^2 + C_{mLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right) + C_{mLT}$$

$$3^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^3 + C_{mLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^2 + C_{mLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right) + C_{mLT}$$

⋮            ⋮

$$n^{\circ} \text{ mês} \Rightarrow C_{iLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n + C_{mLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^{n-1} + C_{mLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^{n-2} + \dots \\ \dots + C_{mLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right) + C_{mL} \quad (16)$$

Analisando a equação (16) conclui-se que a parcela referente ao consumo de energia elétrica representa a soma dos termos de uma Progressão Geométrica (PG), logo:

$$C_{LT} = C_{iLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n + C_{mLT} \frac{\left(1 + \frac{T}{100}\right)^n - 1}{\frac{T}{100}} \quad (17)$$

Onde  $C_{LT}$  é o custo do sistema convencional corrigido.

#### IV.5 – COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE O SISTEMA FOTOVOLTAICO E O SISTEMA CONVENCIONAL

Este item aborda a comparação econômica entre o sistema de potência fotovoltaico e o sistema convencional para o suprimento de energia elétrica em ERB's.

O objetivo é determinar uma equação que forneça a potência máxima que uma ERB deverá ter para que o sistema fotovoltaico se torne mais atrativo, economicamente, comparado com o sistema convencional. Foi levada em consideração a distância a que a ERB se encontra de uma subestação ou de uma linha de transmissão já instalada e o número de meses para o qual se deseja que o sistema solar seja mais econômico que o sistema convencional.

Para isto deve ser feita a comparação entre o custo do sistema fotovoltaico corrigido ( $C_{PV}$ ) e o custo do sistema convencional corrigido ( $C_{LT}$ ).

$$C_{PV} = C_{LT} \quad (18)$$

Substituindo as equações (15) e (18) na equação (19), tem-se:

$$C_{iPV} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n = C_{iLT} \times \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n + C_{mLT} \frac{\left(1 + \frac{T}{100}\right)^n - 1}{\frac{T}{100}} \quad (19)$$

$$C_{iPV} = C_{iLT} + C_{mLT} \frac{\left(1 + \frac{T}{100}\right)^n - 1}{\frac{T}{100} \left(1 + \frac{T}{100}\right)^n} \quad (20)$$

Para efeito de simplificação faz-se,

$$M = \frac{\left(1 + \frac{T}{100}\right)^n - 1}{\left(1 + \frac{T}{100}\right)^n \times \frac{T}{100}} \quad (21)$$

Logo,

$$C_{iPV} = C_{iLT} + C_{mLT} \times M \quad (22)$$

Onde M é um fator de multiplicação.

Para se obter a potência máxima para a qual o sistema fotovoltaico seja mais econômico que a linha de transmissão, substitui-se as equações (07), (12) e (14) na equação (22):

$$P_w = \frac{D_{km} R_{kmLT} + R_{Sbt} + C_{Ret}}{0,22 R_{PL} + 0,43167 R_{Bat} - 0,792 R_{kWh} M} \quad (23)$$

# CAPÍTULO V

## DESCRIÇÃO DO SOFTWARE GUES

### V.1 – INTRODUÇÃO

O software desenvolvido nesta pesquisa (GUES) tem por objetivo fazer um projeto básico do sistema de suprimento de energia elétrica da ERB com a utilização de painéis fotovoltaicos e realizar uma comparação de custos com a utilização do sistema convencional (com linha de transmissão) para alimentação da ERB's. Fornece também a área a ser utilizada pelas placas solares. Esta informação permite ao usuário analisar a viabilidade técnica de se usar este tipo de suprimento de energia elétrica, considerando a área disponível para instalá-las. Tem o objetivo também de calcular a potência máxima que uma ERB deve ter para que o sistema fotovoltaico seja economicamente mais viável que a linha de transmissão.

A descrição do software será feita com a utilização de um exemplo de aplicação.

### V.2 – ENTRADA DE DADOS

O usuário poderá optar por utilizar um dado obtido do mercado ou utilizar uma informação do banco de dados do software. O banco de dados é composto por informações obtidas na época do desenvolvimento do software. Os dados referentes aos custos são tomados em relação ao valor do dólar americano. Assim, se a opção for pelo banco de dados, será necessário que o usuário entre com o valor do dólar do dia da pesquisa.

O usuário poderá acessar o banco de dados utilizando o botão “otmzd” na opção desejada.

### V.3 – PRIMEIRA JANELA

A primeira janela (Fig. V.1) faz uma apresentação dos objetivos do software.

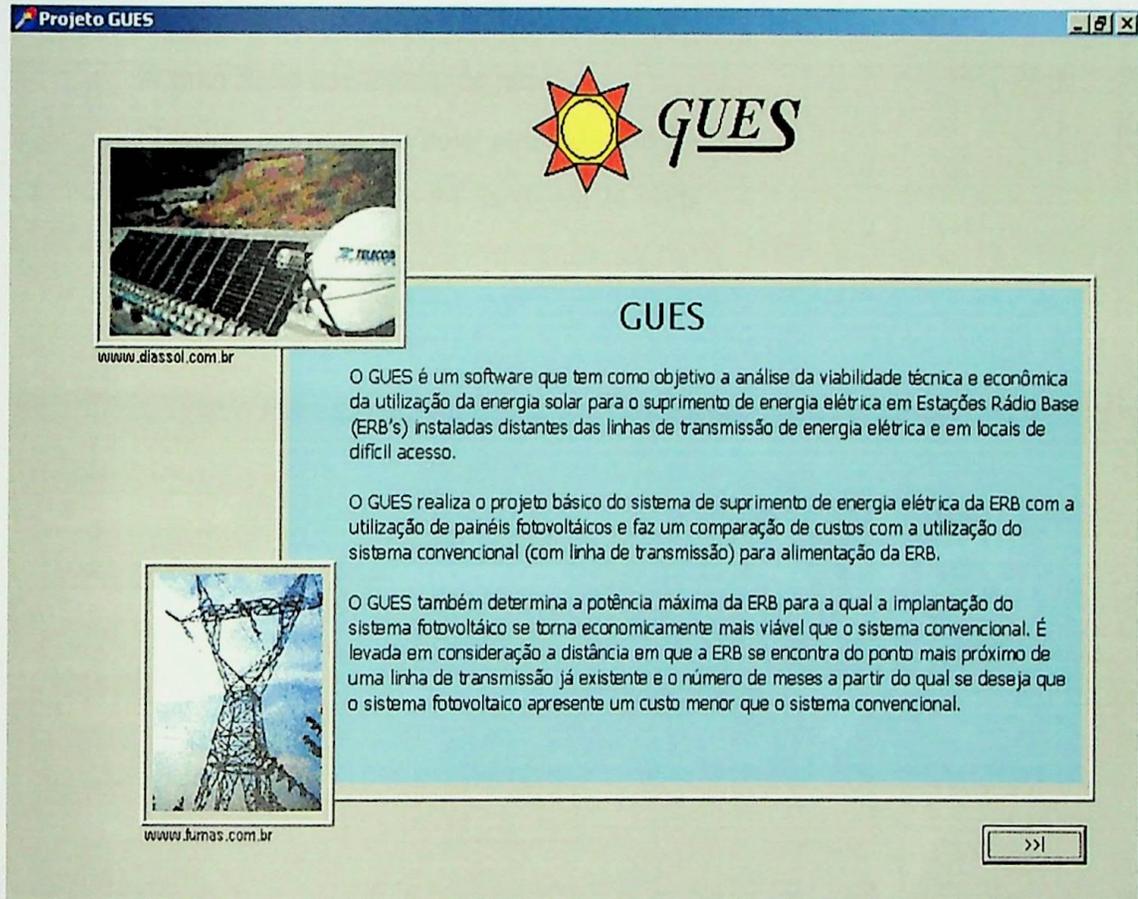
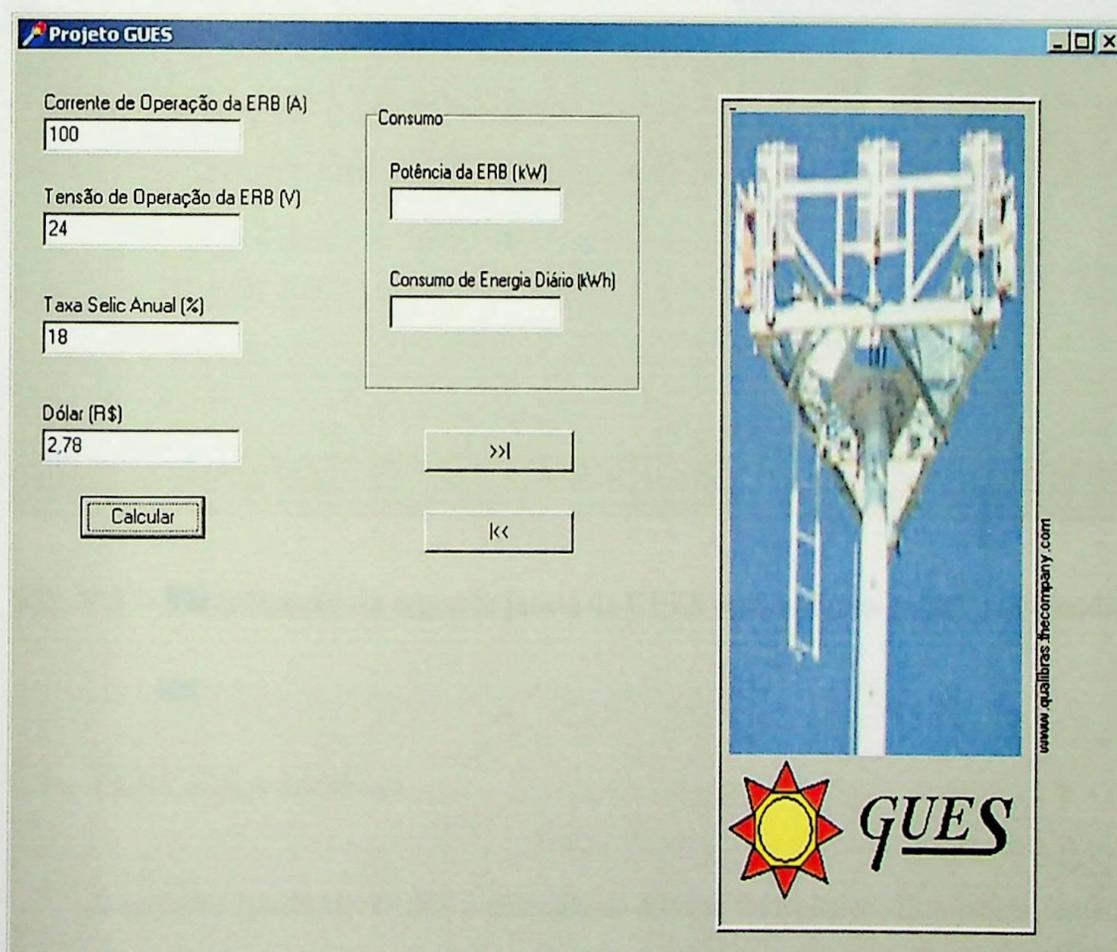


Fig. V.1 – Visualização da primeira janela do GUES.

#### V.4 –SEGUNDA JANELA

Na segunda janela de visualização do GUES, encontram-se como dados de entrada (Fig. V.2):

- A corrente de operação da ERB, em Ampères.
- A taxa Selic anual (taxa de juros).
- O valor, em reais, do dólar americano do dia.
- A tensão de operação foi fixada em 24 Volts.



The screenshot shows the 'Projeto GUES' window. On the left, there are four input fields: 'Corrente de Operação da ERB (A)' with value 100, 'Tensão de Operação da ERB (V)' with value 24, 'Taxa Selic Anual (%)' with value 18, and 'Dólar (R\$)' with value 2.78. Below these is a 'Calcular' button. In the center, a 'Consumo' box contains 'Potência da ERB (kW)' and 'Consumo de Energia Diário (kWh)' fields, with '>>' and '<<' buttons below. On the right is a vertical image of a tower with a ladder, a 'www.qualitros.inecompany.com' URL, and the GUES logo (a red star with a yellow sun) and the text 'GUES'.

Fig. V.2 – Visualização da segunda janela do GUES com os dados de entrada.

A segunda janela fornece como saída a potência de operação da ERB em kW e o consumo diário em kWh, como mostrado na figura V.3.

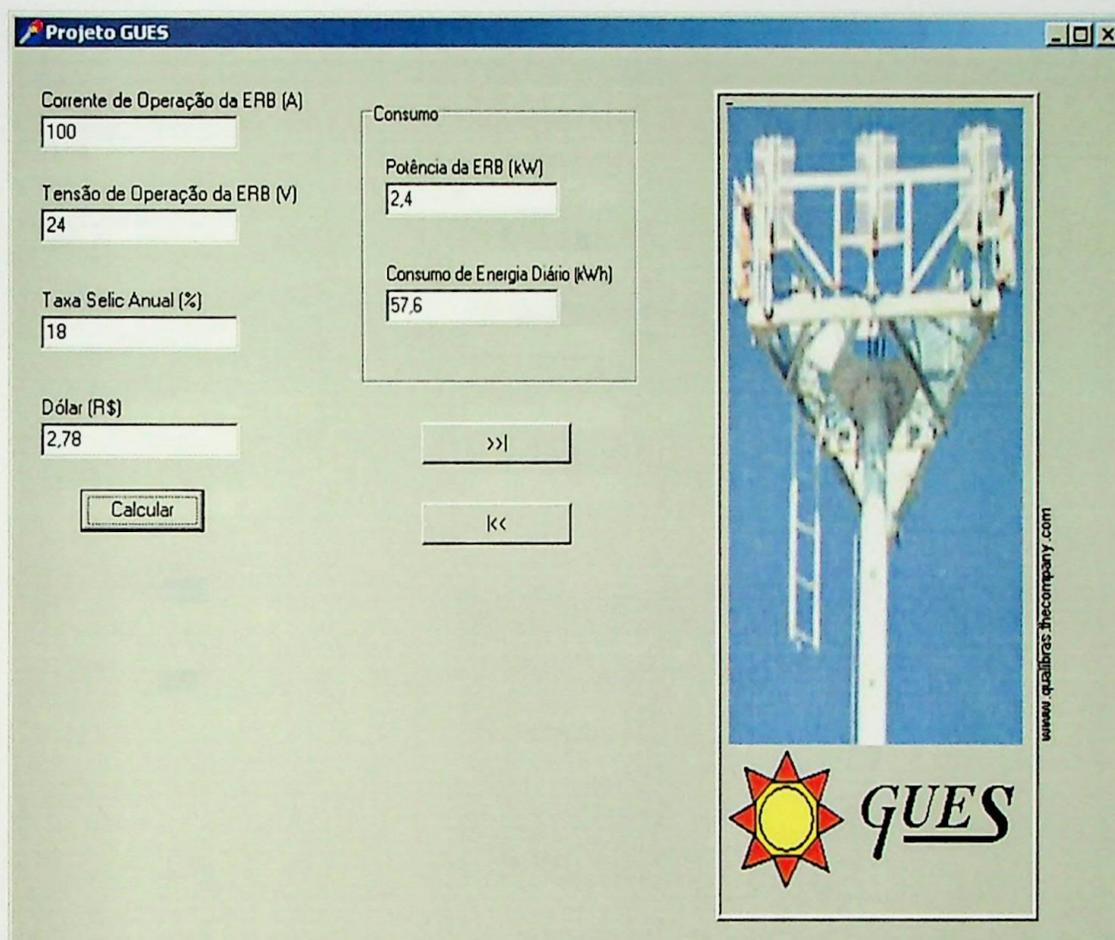


Fig. V.3 – Visualização da segunda janela do GUES com os dados de entrada e saída.

### V.5 – TERCEIRA JANELA

A terceira janela do GUES é dedicada ao sistema fotovoltaico. Esta janela fornece um projeto básico do sistema fotovoltaico e os custos de implantação do mesmo.

Inicialmente o usuário deve entrar com a potência fornecida por uma placa solar de 45W em um dia, com o custo da placa de 45W operando em 12V, com o custo da bateria

de 100Ah operando em 12V, com a largura e com o comprimento da placa. Estes dados são obtidos em manuais de fabricantes e revendedores destes produtos ou com informações extraídas do banco de dados através do botão “otmzd” (ver Fig V.4).

Fig. V.4 – Visualização da terceira janela do GUES com os dados de entrada.

Ao clicar sobre a tecla “calcular” o GUES fornecerá um projeto básico do sistema fotovoltaico (Fig V.5) mostrando o número de placas solares de 45W operando em 12V, o número de baterias de 100Ah operando em 12V, o número de reguladores de carga de 30A operando em 24V, o número de inversores com entrada de 12Vcc, saída 110Vac e potência de 1.000W e a área total a ser utilizada pelas placas solares. O GUES também fornecerá uma previsão dos custos de implantação do sistema solar. Serão mostrados os custos com

as placas solares, com as baterias, com os outros componentes do sistema e o custo total de implantação do sistema.

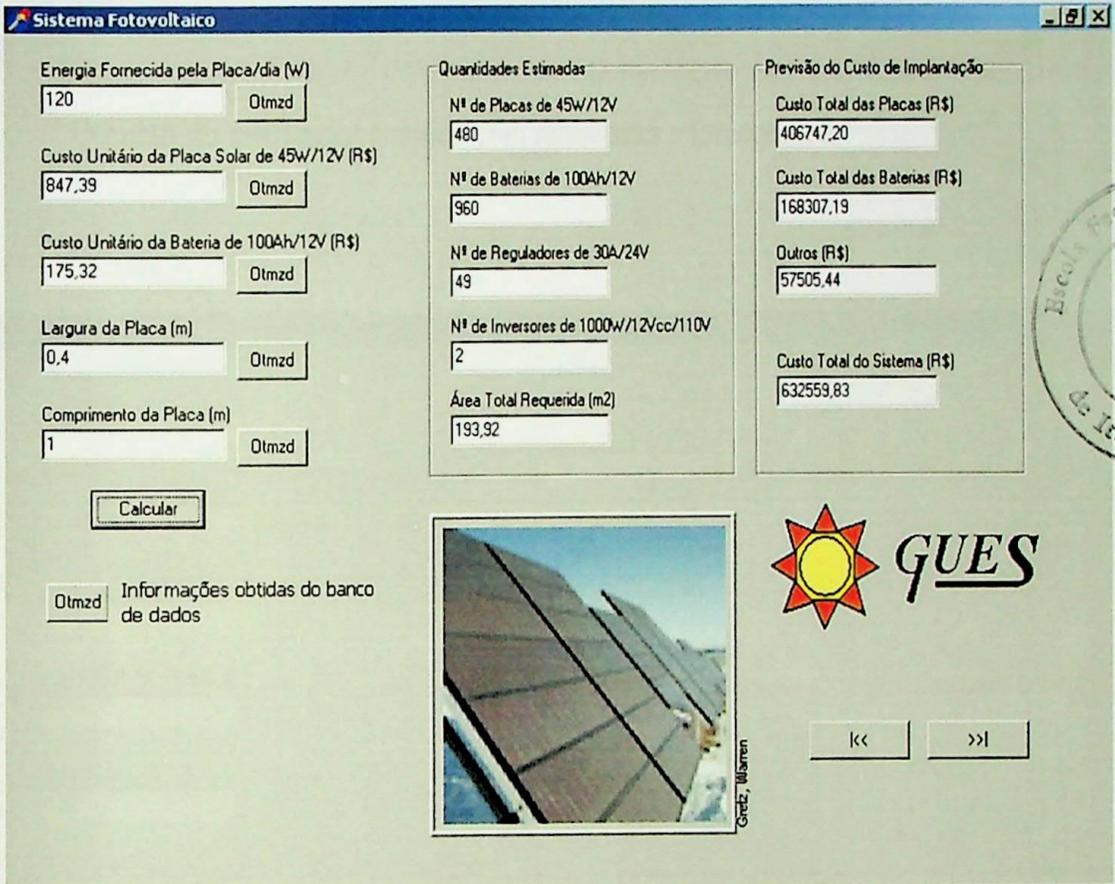


Fig. V.5 – Visualização da terceira janela do GUES com os dados de entrada e saída.

### V.6 – QUARTA JANELA

A quarta janela trata do sistema convencional. O usuário entrará com os dados relativos ao sistema convencional, como se vê na figura V.6. Dos dados a serem entrados, os seguintes são obtidos na concessionária de energia elétrica do local onde a ERB vai ser instalada:

- O custo da linha de transmissão por km.
- O custo da subestação localizada próxima à ERB.
- O custo do kWh.
- A distância, em km, da ERB até uma subestação ou linha de transmissão já instalada.

O custo do retificador é obtido com fabricantes e fornecedores.

The screenshot shows a software window titled "Linha de Transmissão". It features several input fields and buttons:

- Distância (km):** Input field containing "10".
- Previsão de Custo de Implantação R\$:** An empty output field.
- Custo da Linha/km (R\$):** Input field containing "16746,98" with an "Otmzd" button to its right.
- Custo da Subestação (R\$):** Input field containing "5582,32" with an "Otmzd" button to its right.
- Custo do Retificador (R\$):** Input field containing "5500".
- Custo do kWh(R\$):** Input field containing "0,22" with an "Otmzd" button to its right.
- Calcular:** A button to perform the calculation.
- Image:** A photograph of a high-voltage power line tower in a hilly landscape, with the URL "www.arnas.com.br" written vertically on the right side.
- Footer:** The GUES logo (a red star with a yellow sun) and the text "GUES". To the left, it says "Otmzd Informações obtidas do banco de dados". To the right, there are two navigation buttons: "||<" and ">||".

Fig. V.6 – Visualização da quarta janela do GUES com os dados de entrada.

Como saída esta janela fornece uma previsão do custo de implantação do sistema convencional, como visto na figura V.7.

**Linha de Transmissão**

Distância (km)

Custo da Linha/km (R\$)

Custo da Subestação (R\$)

Custo do Retificador (R\$)

Custo do kWh(R\$)

Informações obtidas do banco de dados

Previsão de Custo de Implantação R\$





Fig V.7 – Visualização da quarta janela do GUES com os dados de entrada e saída.

## V.7 – QUINTA JANELA

Nesta janela, mostrada na figura V.8, o usuário pode comparar o custo de implantação dos dois sistemas. Porém, deve ser levado em consideração que o sistema convencional apresenta um custo mensal de consumo de energia elétrica inexistente no sistema fotovoltaico.

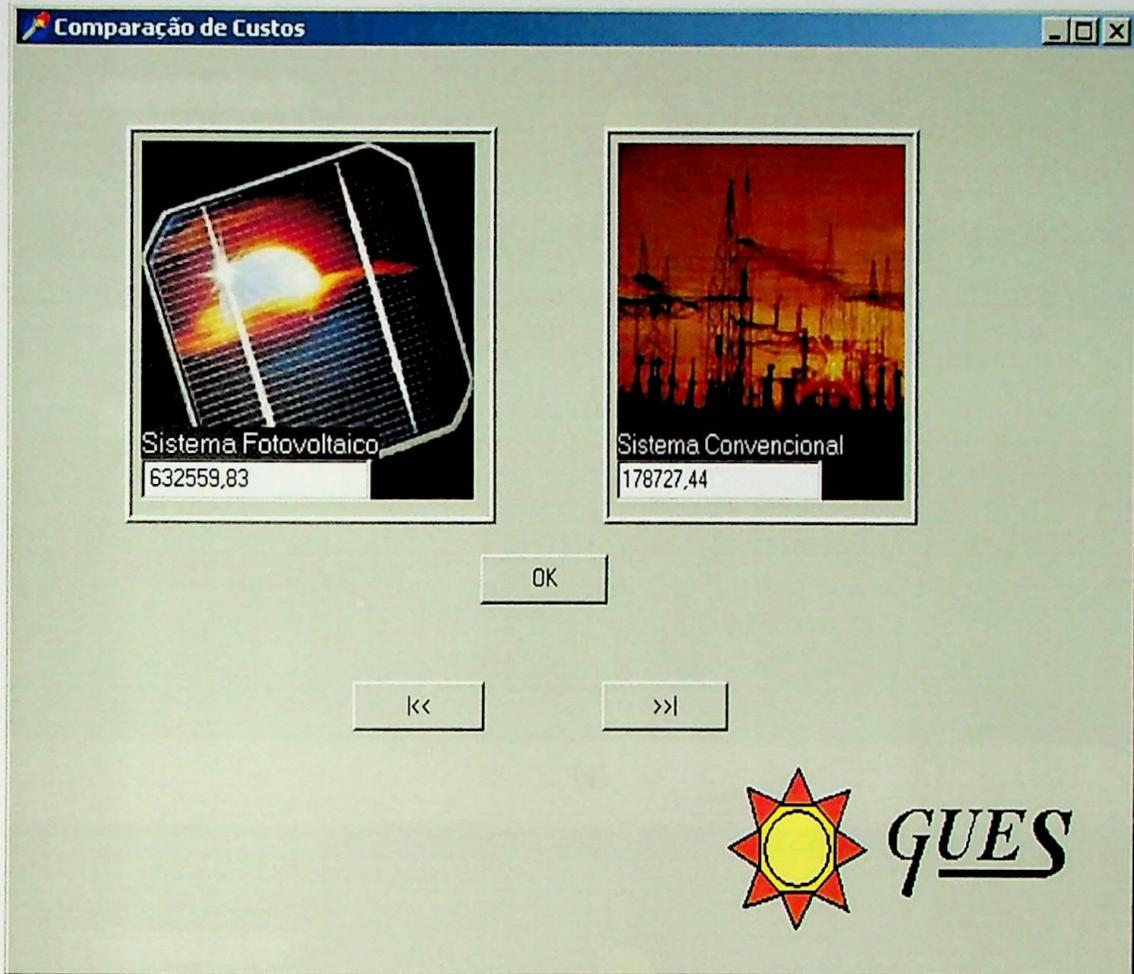
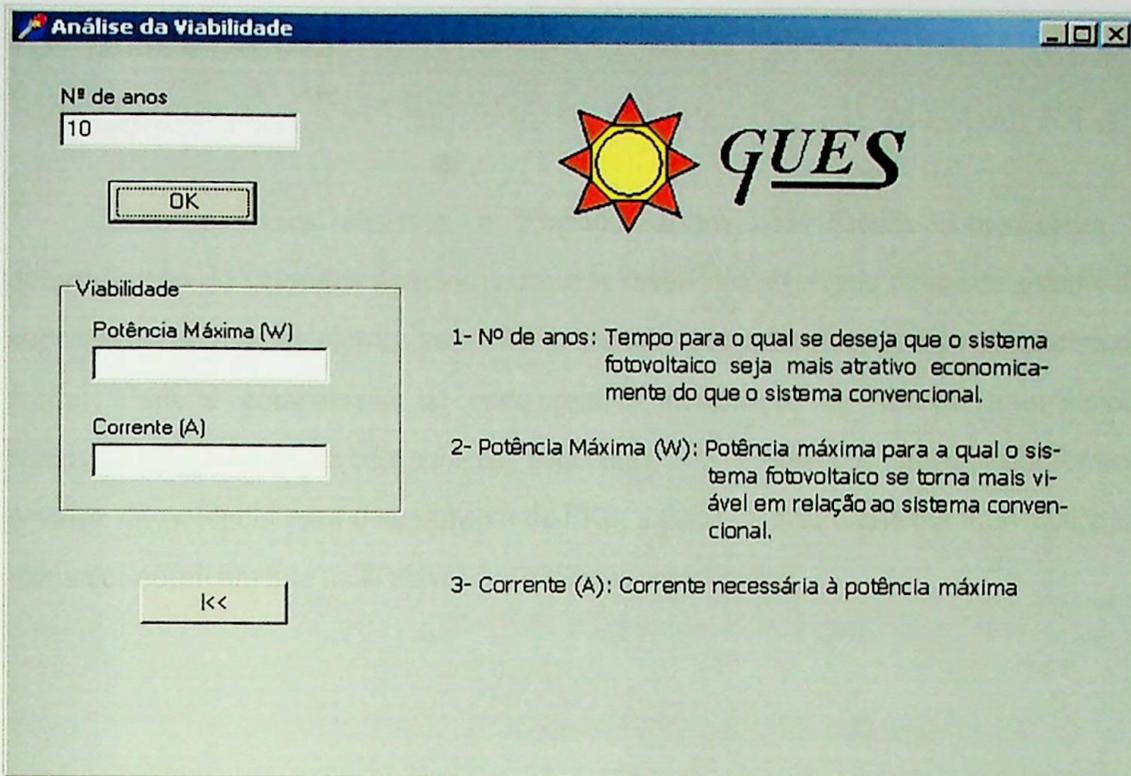


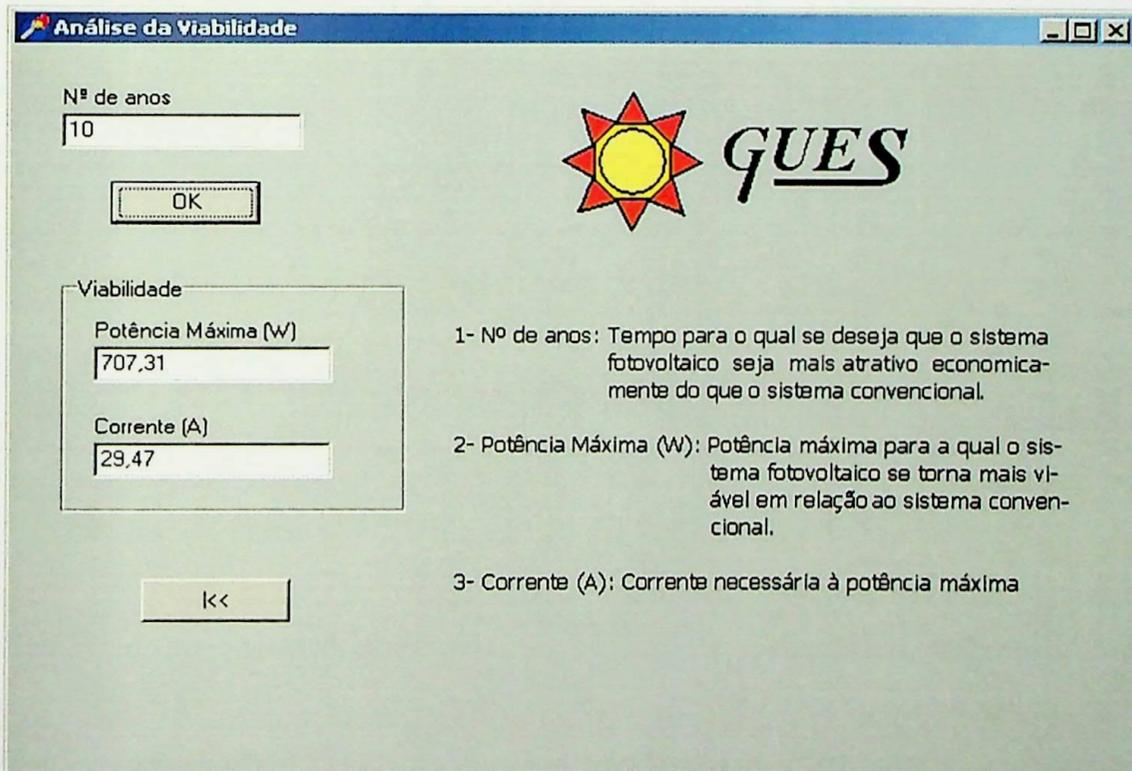
Fig. V.8 – Visualização da quinta janela do GUES.

## V.8 – SEXTA JANELA

A sexta janela do GUES determina a potência máxima que uma ERB deve ter para que o sistema fotovoltaico seja mais atrativo economicamente que o sistema convencional (com a utilização de linha de transmissão). Também fornece a corrente elétrica consumida para esta potência. O usuário deverá fornecer o número de anos para o qual se deseja obter esta potência (Fig V.9(a)). A Figura V.10(b) mostra os resultados obtidos.



(a)



(b)

Fig. V.9 – Visualização da sexta janela com (a) dados de entrada e (b) com dados de entrada e saída.

## **V.9 - OBSERVAÇÕES**

Como podemos observar, o programa desenvolvido facilita sobremaneira a determinação do valor dos diversos parâmetros envolvidos no projeto básico do sistema de suprimento de energia elétrica para ERB's, baseado em sistema fotovoltaico. Apresenta de forma clara a comparação de custo para a implantação do sistema fotovoltaico, relativamente ao sistema convencional, para uma mesma potência. A última janela fornece o valor da potência para o suprimento da ERB, a partir da qual o sistema fotovoltaico se torna economicamente mais viável que o sistema convencional.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

O Brasil tem passado por uma das maiores crises energéticas de que se tem notícia. É importante que eventuais racionamentos de energia elétrica não prejudiquem a operação dos sistemas de comunicação, principalmente o da telefonia celular. Por outro lado, é preocupação crescente, a nível mundial, a obtenção de energia elétrica a partir de fontes não poluentes e não agressivas ao meio ambiente. Além do mais, é desejável que a fonte primária seja abundante e independente de crises políticas ou ambientais.

É óbvio que a produção de energia elétrica a partir da energia solar atende às condições e necessidades expostas. Até algum tempo o custo deste sistema de geração de energia elétrica era proibitivo e restrito a situações muito particulares.

O objetivo principal deste trabalho foi mostrar que o custo, ainda que elevado, já começa a viabilizar esta alternativa também para sistema de comunicação móvel celular, considerando-se as necessidades acima mencionadas.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho pôde-se chegar a algumas conclusões, que são citadas a seguir:

- A alimentação a partir do sistema solar privilegia a Qualidade da Energia Elétrica na ERB em função do tipo de geração e da proximidade entre a fonte e a carga. No sistema convencional, esta qualidade pode ser influenciada, entre outros fatores, por descargas atmosféricas na linha de transmissão, que podem provocar desequilíbrios de fase, interferindo diretamente na operação do retificador responsável pelo suprimento de energia dos componentes mais importantes. As vezes estas descargas provocam o desligamento do sistema de alimentação.

- A manutenção da linha de transmissão e dos componentes da subestação é muito mais freqüente e onerosa do que a do sistema solar.
- A potência máxima da ERB para a qual o sistema solar é mais econômico que o sistema convencional vai crescer nos próximos anos, em função da redução do consumo dos componentes dos equipamentos e, mais importante ainda, em função da redução de produção de calor dos mesmos. Como já foi informado, 60% do consumo de energia elétrica da ERB refere-se ao sistema de refrigeração. Com a redução da produção de calor, o consumo do sistema de refrigeração será cada vez menor.

Além de permitir a comparação técnica e econômica dos dois sistemas de suprimento de energia da ERB, este trabalho disponibilizou um software que permite o projeto básico técnico e econômico de cada um destes sistemas.

Como sugestões para próximos trabalhos recomenda-se:

- A partir do software desenvolvido neste trabalho, criar um software interativo com banco de dados de fabricante de placas solares e acessórios de modo que, para um mesmo projeto, diversas soluções possam ser analisadas.
- Estender a comparação técnica e econômica para outras alternativas energéticas como a energia eólica e a proveniente de grupos geradores/diesel.

## REFERÊNCIAS

- [A] [www.heliodinamica.com.br](http://www.heliodinamica.com.br)
- [B] <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/1999/solar.html>
- [C] [www.siemenssolar.com/market\\_opportunity.html](http://www.siemenssolar.com/market_opportunity.html)
- [D] [www.siemens.com](http://www.siemens.com)
- [E] [www.shell.com](http://www.shell.com)
- [F] CORTEZ, José Antônio in SANTOS, Afonso Henriques Moreira, et. al. *Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos*. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.
- [G] [www.ti.com](http://www.ti.com)



**BIBLIOGRAFIA**

- [1] BOSSI, Antônio, SESTO, Ezio, *Instalações elétricas*, São Paulo: Hemus, 1978. (Tradução de Eng<sup>o</sup> Carlos Antônio Lauand, Título original: Impianti elettrici, 6<sup>a</sup> ed. 1977).
- [2] CORTEZ, José Antônio in SANTOS, Afonso Henriques Moreira, et. al. *Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos*. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.
- [3] FUCHS, Rubens Dario, *Transmissão de energia elétrica: Linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente*, Rio de Janeiro: LTC (Livros Técnicos e Científicos), 1979.
- [4] <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/1999/solar.html>
- [5] MALVINO, Albert Paul. *Eletrônica*. Tradução de Aracy Mendes da Costa; revisão técnica Rodrigo Araês Caldas Farias. 1<sup>a</sup> ed, vol 1. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.
- [6] NEGRISOLI, Manoel Miranda, *Instalações elétricas: projetos prediais em baixa tensão*, 3<sup>a</sup> ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- [7] SIEMENS. *Photovoltaic technology and sistem design. Training manual*. 4<sup>a</sup> ed. California: Siemens Solar Industries, 1990.
- [8] [www.cemig.com.br](http://www.cemig.com.br)
- [9] [www.delphiauto.com](http://www.delphiauto.com)
- [10] [www.ericsson.com.br](http://www.ericsson.com.br)
- [11] [www.furnas.com.br](http://www.furnas.com.br)
- [12] [www.gnb.com](http://www.gnb.com)
- [13] [www.heliodinamica.com.br](http://www.heliodinamica.com.br)

- 
- [14] [www.inael.com](http://www.inael.com)
  - [15] [www.inatel.br](http://www.inatel.br)
  - [16] [www.instalpar.com.br](http://www.instalpar.com.br)
  - [17] [www.morningstarcorp.com](http://www.morningstarcorp.com)
  - [18] [www.moura.com.br](http://www.moura.com.br)
  - [19] [www.planetacelular.com.br](http://www.planetacelular.com.br)
  - [20] [www.rf.com.br](http://www.rf.com.br)
  - [21] [www.shell.com](http://www.shell.com)
  - [22] [www.siemens.com](http://www.siemens.com)
  - [23] [www.siemenssolar.com/market\\_opportunity.html](http://www.siemenssolar.com/market_opportunity.html)
  - [24] [www.statpower.com](http://www.statpower.com)
  - [25] [www.telemigcelular.com.br](http://www.telemigcelular.com.br)
  - [26] [www.ti.com](http://www.ti.com)
  - [27] [www.traceoffgrid.com](http://www.traceoffgrid.com)
  - [28] [www.widesoft.com.br](http://www.widesoft.com.br)
  - [29] YACOUB, Michel Daoud, *Foundations of mobile radio engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1993.

### CRISTAIS

Toda matéria é constituída de átomos. Em 1911, descobriu-se que a estrutura básica de um átomo de matéria qualquer é constituída por um núcleo constituído de prótons e nêutrons, com carga elétrica positiva. Não se sabe se os elétrons negativos estão distribuídos no espaço ao redor do núcleo, ou se estão distribuídos em camadas, partindo do núcleo para fora. Este tipo de estrutura constitui praticamente toda a massa do átomo, praticamente independentemente do elemento químico de que se trata.

A figura 1.1 representa de forma simplificada a estrutura de um átomo, em duas dimensões, em escala humana. Para isso, tomamos como ponto de partida a distância existente entre o núcleo e o elétron, que é da ordem de  $10^{-10}$  metros.

## APÊNDICE

# FÍSICA E CONSTRUÇÃO



Fig. 1.1 - Esquema simplificado de um átomo de matéria.

Um átomo pode ser considerado como um sistema de partículas em movimento. Para se caracterizar o movimento de um sistema de partículas, é necessário conhecer a posição e a velocidade de cada uma delas.

## 1 – CRISTAIS

Toda matéria é constituída de átomos. Rutherford, em 1911, descobriu que o átomo consiste de um núcleo de cargas positivas e neutras (prótons e nêutrons), que contém aproximadamente toda a massa do átomo; rodeando este núcleo positivo, estão os elétrons, carregados negativamente. A carga do próton é positiva e igual, em módulo, à carga do elétron; portanto, o átomo, como um todo é eletricamente neutro. Pelo fato de o próton conter praticamente toda a massa do átomo, permanecerá substancialmente imóvel, enquanto os elétrons se movem em torno dele em órbitas fechadas.

A figura A.1 representa, de forma esquematizada e em duas dimensões, um átomo isolado de silício que possui 14 prótons no núcleo. Dois elétrons percorrem a primeira órbita, oito elétrons a segunda e quatro deles encontram-se na órbita externa ou órbita de valência.

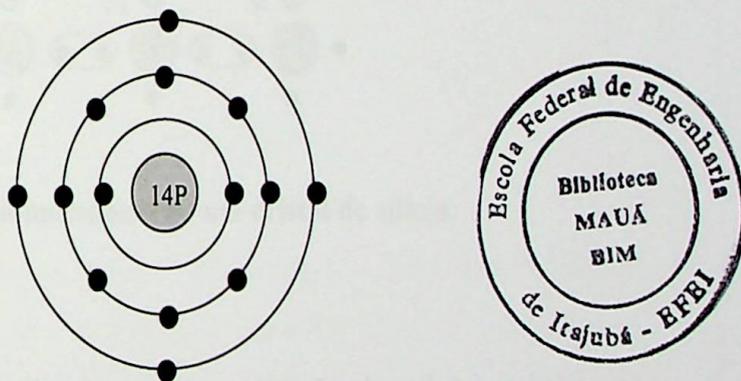
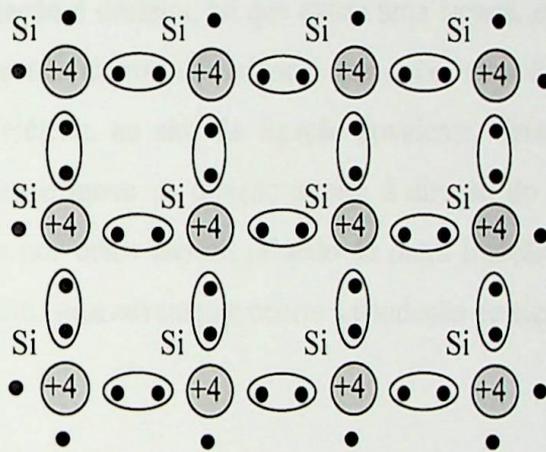


Fig. A.1 – Esquema bidimensional de um átomo de silício

Um átomo para ser quimicamente estável precisa de 8 elétrons na órbita de valência. Para se tornarem estáveis, portanto, os átomos podem se combinar formando um material.

Um átomo de silício isolado é tetravalente (possui quatro elétrons na sua órbita de valência); portanto para ser quimicamente estável, precisa combina-se com quatro outros átomos idênticos. Quando os átomos de silício combinam-se (ver Fig. A.2), eles se arranjam numa configuração chamada cristal. As forças que mantêm os átomos unidos são chamadas de ligações covalentes, isto é, os oito elétrons não pertencem exclusivamente a um dos átomos. Tais elétrons são compartilhados com os átomos vizinhos. Quando existe apenas um tipo de átomo, o material é chamado intrínseco ou puro.



**Fig. A.2 - Estrutura bidimensional de um cristal de silício.**

O silício é o material mais utilizado para a construção de células solares em aplicações comerciais porque é encontrado em abundância na Terra (é atualmente o segundo elemento mais abundante da Terra, só perdendo para o oxigênio). Porém, para ser usado nas células solares, precisa ser refinado com pureza de 99,9999%.

Outros materiais semicondutores como o arsenieto de gálio (GaAs), o sulfeto de cádmio (CdS) e o sulfeto de cobre (Cu<sub>2</sub>S) podem ser usados para a confecção de células fotovoltaicas, porém, os princípios descritos para o silício são comuns a todos.

## 2 – LACUNAS E CONDUÇÃO DE ELÉTRONS

Em temperaturas próximas do zero absoluto as ligações são muito rígidas e o cristal não possui elétrons livres, comportando-se como um isolante. Em temperatura ambiente, algumas ligações covalentes se desfazem devido à absorção de energia térmica do ambiente, gerando elétrons livres e lacunas. Ocorre condução pelo deslocamento aleatório destes portadores de carga através do cristal. A condução em um semiconductor intrínseco é muito baixa em temperatura ambiente, porque poucos elétrons conseguem ser excitados termicamente.

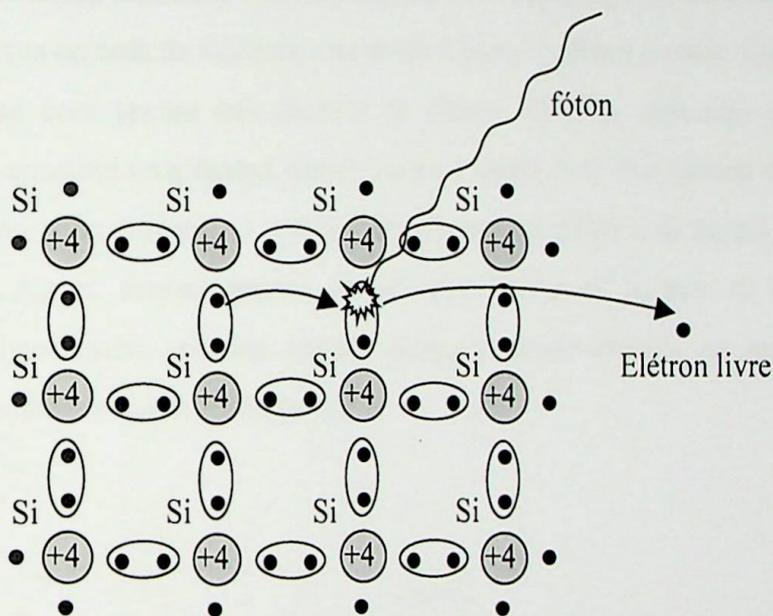
Quando uma ligação é desfeita, tal que exista uma lacuna, esta é relativamente fácil de ser preenchida por um elétron de valência que deixa uma ligação covalente de um átomo vizinho; este elétron, ao sair da ligação covalente, deixa outra lacuna. Assim, efetivamente, a lacuna se move na direção oposta à direção do elétron. A nova lacuna poderá ser preenchida por outro elétron oriundo de outra ligação covalente, que deixará uma outra lacuna. Assim, sucessivamente ocorre a condução de eletricidade.

## 3 – O EFEITO FOTOVOLTAICO

No nível atômico, a luz atua como um fluxo de partículas discretas chamadas *fótons*. Os fótons carregam energia, mas são eletricamente neutros. Quando um material semiconductor é iluminado pela luz, os fótons penetram no material. Os fótons com bastante energia podem colidir com elétrons e desalojá-los de suas ligações (ver Fig. A.3), gerando pares elétrons-lacunas além daqueles gerados termicamente. O fóton desaparece sendo a maior parte de sua energia transferida para o elétron e uma pequena parte convertida em calor. O elétron se torna livre para viajar através do material semiconductor como uma condução de elétrons, carregando carga negativa e energia utilizável. É no momento da liberação do elétron que a energia solar se transforma em energia elétrica.

Sempre que um elétron é libertado pela colisão com um fóton, sai atrás de uma ligação em que esteja faltando um elétron. Esta ligação incompleta é chamada lacuna. Um

elétron vizinho pode saltar de sua ligação e ocupar a lacuna, mas isto deixa uma lacuna onde o elétron saiu. Desta maneira a lacuna move dentro do material. Porém, quando uma lacuna for proveniente de um elétron perdido, existirá um desequilíbrio elétrico positivo. O movimento de uma lacuna aparenta ser um movimento de cargas positivas que se movem no sólido, embora o que realmente acontece é a ausência de um elétron que se move ali por perto. Neste contexto, a carga elétrica total do material é neutra.



**Fig. A.3 – Um elétron que escapa de uma ligação deixa uma lacuna. Quando uma lacuna é criada, um elétron próximo move-se para ocupá-la, o que gera um movimento de lacunas.**

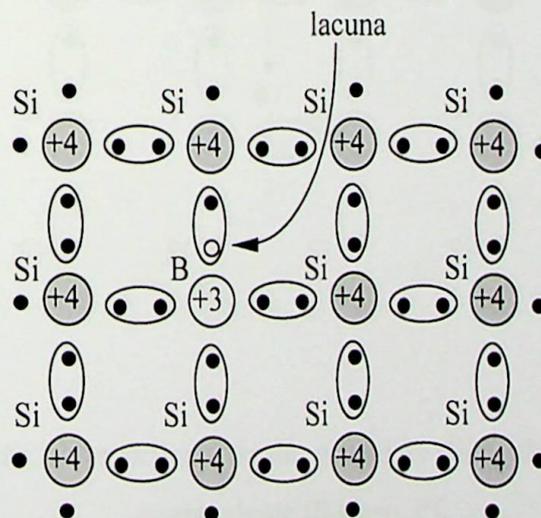
#### 4 – DOPANTES TIPO P E TIPO N

Na ausência de qualquer campo elétrico externo, os elétrons livres e energizados pelos fótons viajarão por pouco tempo e então se recombinarão com as lacunas. A energia transferida ao elétron pelo fóton é simplesmente perdida na estrutura do semiconductor em

forma de calor. Para se produzir corrente de saída utilizável, deve-se retirar os elétrons livres do semiconductor antes que eles se recombinem com as lacunas.

Uma das maneiras de se aumentar a condutividade de um semiconductor é introduzir uma pequena quantidade de impurezas no semiconductor intrínseco que contribua com excesso de lacunas ou elétrons. Os materiais que alteram as propriedades dos semicondutores são chamados de “dopantes”, o processo de introduzi-los nos semicondutores é chamado “dopagem” e o semiconductor formado é dito extrínseco ou dopado.

O semiconductor intrínseco pode ser dopado com impurezas trivalentes, com apenas três elétrons na sua camada de valência, tais como o boro, o gálio e o índio. Cada átomo de impureza liga-se com apenas três átomos de silício vizinhos, deixando uma ligação incompleta que constitui uma lacuna, como ilustra a figura A.4. Um elétron de um átomo de silício vizinho pode mover-se e ocupar esta lacuna, deixando uma lacuna no lugar de onde ele veio. Assim, sucessivamente, há um movimento de lacunas na estrutura do semiconductor. Isto resulta em uma região carregada positivamente. As impurezas são chamadas *aceitadoras* e o semiconductor *tipo p*.

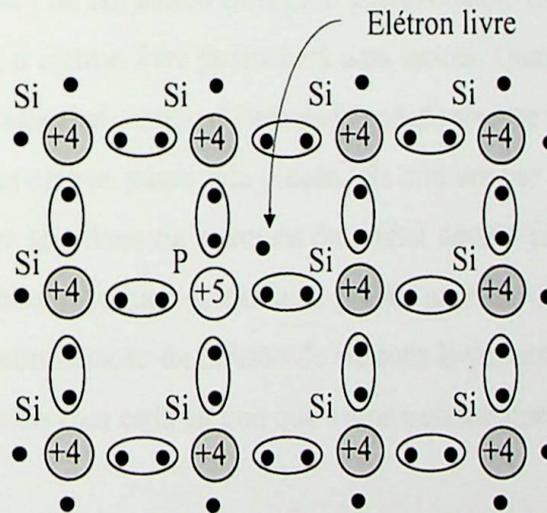


**Fig. A.4 - Estrutura bidimensional de um cristal de silício dopado com impureza trivalente (Boro, B).**

A concentração de impurezas em um semiconductor é muito baixa. No silício a dopagem deve ser da ordem de um átomo de impureza para  $10^7$  átomos de silício. Desta forma, as propriedades físicas e químicas são mantidas, alterando-se apenas as propriedades elétricas.

Se, agora, um átomo de silício da estrutura cristalina for trocado por um átomo pentavalente como o fósforo, o antimônio ou o arsênico, como mostrado na figura A.5, quatro dos cinco elétrons de valência contribuem para as ligações covalentes com átomos de silício vizinhos. O quinto elétron, fracamente ligado à estrutura, pode mover-se livremente sob a ação de um campo elétrico aplicado. Isto gera um movimento de partículas carregadas negativamente dentro do cristal. As impurezas são chamadas *doadoras* e o semiconductor obtido, *tipo n*.

A concentração de átomos de fósforo também deve ser baixa, porém, muito maior que a de boro, usualmente em torno de um átomo de fósforo para  $10^3$  átomos de silício.



**Fig. A.5 - Estrutura bidimensional de um cristal de silício dopado com impureza pentavalente (fósforo, P).**

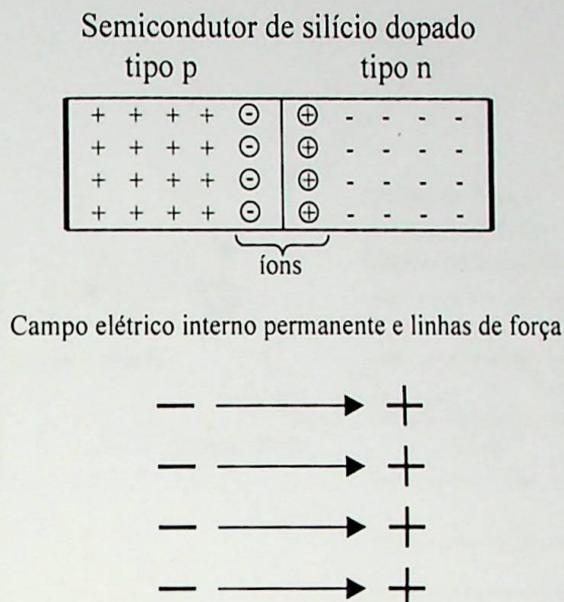
Observa-se que as impurezas dopantes produzem elétrons ou lacunas, porém a taxa de geração de pares elétrons-lacunas pelo efeito da agitação térmica continua a mesma do semicondutor intrínseco. Assim, na presença de um campo elétrico, a corrente é predominantemente de elétrons, no semicondutor tipo n, e de lacunas, no semicondutor tipo p.

## 5 – CRIAÇÃO DE UM CAMPO ELÉTRICO INTERNO

Nos semicondutores extrínsecos a corrente disponível é muito pequena para ser utilizada. Para que a corrente se torne útil, pode-se criar um único cristal juntando-se um cristal de silício dopado com boro (tipo p) e um cristal de silício dopado com fósforo (tipo n).

Os elétrons do lado n são atraídos pelas lacunas do lado p, assim ocorrem recombinações na região próxima da junção dos dois cristais. Quando um elétron livre sai da região n, a sua saída cria um átomo carregado positivamente (íon positivo) na região n. Ao entrar na região p, o elétron livre preencherá uma lacuna. Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (íon negativo).

Cada vez que um elétron passa pela junção, ele cria um par de íons, como mostrado na figura A.6. Os íons são fixos na estrutura do cristal devido às ligações covalentes. A medida em que o número de íons aumenta, a região próxima a junção age como uma barreira impedindo a continuação da difusão de elétrons livres através dela. A intensidade da região vai aumentando com cada elétron que a atravessa até que se atinja um equilíbrio.

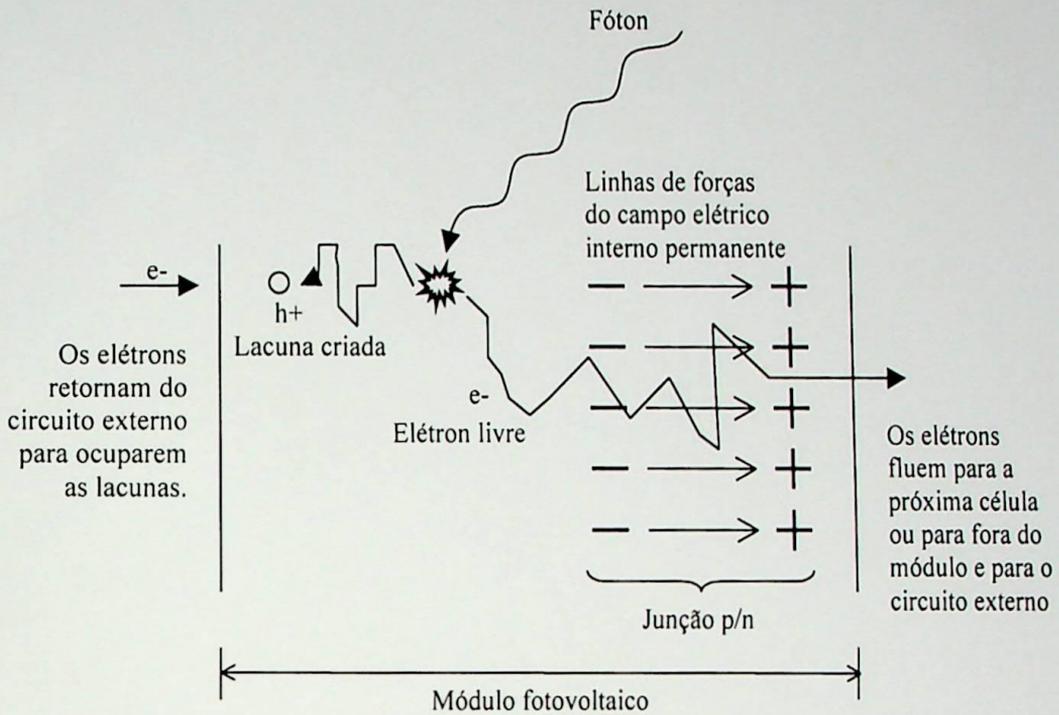


**Fig. A.6 – O par de íons formado na junção p/n cria um campo elétrico interno permanente no semicondutor que repele os elétrons em uma única direção, gerando corrente elétrica utilizável.**

Duas regiões de cargas equivalentes e opostas crescem nos dois lados da junção tipo-p/tipo-n, criando um campo elétrico. O campo elétrico age no sentido de repelir a penetração de elétrons do lado n e lacunas do lado p, impedindo as recombinações na junção. Qualquer carga movendo-se livremente e que entra na zona de influência do campo elétrico é imediatamente expulsa. Esta estreita zona é conhecida como região de depleção.

## 6 – O CAMPO ELÉTRICO INTERNO EXPULSA OS ELÉTRONS DA CÉLULA

Quando a luz penetra no semicondutor de uma célula fotovoltaica, os fótons colidem com os elétrons, liberando-os e fornecendo-lhes energia potencial. Os elétrons livres viajam até serem empurrados pelo campo elétrico através da junção p/n. Eles são forçados a saírem da célula e ficam disponíveis para utilização (ver Fig. A.7).



**Fig. A.7 – O campo elétrico interno expulsa os elétrons para a próxima célula ou para fora do módulo.**

Em aplicações práticas, células são conectadas em série, formando um módulo. Os elétrons fluem de uma célula para outra através de condutores. Na célula seguinte, os elétrons são novamente atingidos por fótons, recebem mais energia potencial e movem-se para a próxima célula e assim sucessivamente. Finalmente deixam a última célula do módulo e fluem para a carga.

Para cada elétron que deixa a célula, existe um outro que retorna da carga para repô-lo. Neste sentido, o equipamento PV não pode ser descarregado como uma bateria e nem pode se esgotar de elétrons. A célula fotovoltaica não pode armazenar energia, ela apenas converte energia da luz em energia elétrica.