

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL
PARA PROJETO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO
SUPRIMENTO DE ELETRICIDADE A PEQUENAS
COMUNIDADES RURAIS

Dissertação de mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Agrícola, na área de concentração
em Construções Rurais e Ambiente.

JOSÉ ADRIANO MARINI

Orientador: Prof. Dr LUIZ ANTONIO ROSSI

CAMPINAS
JANEIRO DE 2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M338d Marini, José Adriano
Desenvolvimento de programa computacional para
projeto de sistemas fotovoltaicos no suprimento de
eletricidade a pequenas comunidades rurais / José
Adriano Marini.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientadores: Luiz Antonio Rossi
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia solar na
agricultura. 3. Visual Basic (Programa de computador).
I. Rossi, Luiz Antonio. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.
Título.

DEDICATÓRIA

A uma pessoa especial, que não me ofereceu apenas sua mão, seu coração, mas todo seu ser e me ensinou a valorizar o amor e as pessoas ao invés de seres inanimados.

Com muito amor para,

Aleandra

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas acompanharam-me ao longo dos dois anos que passei na elaboração deste trabalho. Algumas estiveram mais próximas, outras mais distantes, mas todas sempre atentas, carinhosas e otimistas para com os rumos que escolhi para desvendar. A todos os amigos que direta ou indiretamente ajudaram-me a chegar até aqui, gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos.

Particularmente quero agradecer a alguns amigos que, quase diariamente, estiveram ao meu lado nos melhores e piores momentos deste importante pedaço de vida:

Ao Professor Doutor Luiz Antonio Rossi pela orientação atenta e cuidadosa ao longo de cada dia de trabalho e pelas tantas e valiosas discussões que sem dúvida ajudarão para além de minha vida acadêmica.

À Unicamp pelo seu espaço físico e sua Biblioteca Central que muito me auxiliaram. À Faculdade de Engenharia Agrícola e aos seus funcionários que tornaram viável a realização deste trabalho, e também ao Laboratório de Informática da FEAGRI por seus computadores que foram essenciais para que o programa pudesse ser elaborado.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro sem o qual a realização deste trabalho seria impossível.

Aos Institutos de Meteorologia (CEPAGRI e INPE) pelos dados de radiação fornecidos.

Aos meus amigos da FEAGRI e de outros lugares: Ronaldo, Celso, Aristóteles, Edgar e a Marta, Aninha e Rosângela, e muitos outros que me acompanharam nos momentos de intenso trabalho e nas horas de lazer.

Aos meus pais, Osvaldo e Isaura, pela atenção e auxílio nos momentos bons e maus do caminho.

E a todos aqueles que de alguma forma ajudaram a colocar uma pedrinha para calçar a estrada de minha vida ...

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 A energia solar	4
2.1.1 Geometria solar	4
2.2 As células solares	5
2.2.1 Características das células fotovoltaicas	7
2.3 Componentes de um sistema fotovoltaico	8
2.3.1 Módulos fotovoltaicos	9
2.3.2 O sistema de acumulação de energia	10
2.3.2.1 Ciclos de vida ou vida útil	10
2.3.3 Elementos de regulação de potência	11
2.3.3.1 Reguladores de carga	12
2.3.4 Inversores de tensão	13
2.3.5 Fios, conexões e suportes	13
2.4 Sistemas fotovoltaicos	14
2.4.1 Sistemas isolados	14
2.4.2 Sistemas conectados à rede elétrica	14
2.4.2.1 Sistemas residenciais	14
2.4.2.2 Sistemas fotovoltaicos centrais	15
2.4.3 Vantagens e desvantagens dos sistemas fotovoltaicos	16
2.4.4 Aplicações mais comuns	17
2.5 As cargas elétricas	18
2.5.1 Parâmetros característicos de uma carga	19
2.5.2 Características da rede elétrica convencional	19
2.5.3 Características de instalações fotovoltaicas	20

2.6	Pesquisas sobre energia solar fotovoltaica	21
2.6.1	Panorama internacional	21
2.6.2	Os sistemas fotovoltaicos no Brasil	23
2.7	Os impactos da eletrificação rural	25
2.7.1	Energia solar fotovoltaica no meio rural	26
2.8	Análise econômica	27
2.8.1	Métodos de avaliação econômica	27
2.8.1.1	Método de avaliação da vida útil econômica	28
2.8.1.2	Método do custo benefício	30
2.8.1.3	Método do retorno do investimento	30
2.8.2	Conversão de custos e aplicações para um mesmo período de referência	31
2.8.2.1	Tratamento da inflação	31
2.8.3	Custos dos sistemas fotovoltaicos	32
2.8.3.1	Custos dos módulos fotovoltaicos	32
2.8.3.2	Elementos periféricos	33
3.	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	Linguagem Visual Basic	35
3.2	Modelo NAD	36
3.3	Estimativa da radiação solar	37
3.3.1	Radiação solar no plano coletor	37
3.3.2	Direção da radiação direta	38
3.3.3	Radiação extraterrestre	41
3.3.4	Tratamento da radiação	42
3.3.5	Radiação média incidente em superfície inclinada	44
3.3.6	Dados de radiação	45
3.4	Operação dos módulos fotovoltaicos	46
3.5	Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos	47
3.6	Dimensionamento do Grupo-Gerador com Sistema de Armazenamento de Energia	50
3.6.1	Dimensionamento das baterias	51
3.6.2	Dimensionamento do grupo gerador e carregador de bateria	51
3.7	Análise econômica	52

3.7.1	Custo de investimento	53
3.7.2	Custo de operação e manutenção	57
3.7.3	Custo de combustível e transporte	58
3.7.4	Custo de suprimento pelo sistema de geração	59
3.7.5	Custos atuais	60
3.7.6	Custo anual de geração	61
3.7.7	Benefício Líquido	62
3.8	Método de dimensionamento	63
3.8.1	Variáveis utilizadas pelo programa	63
4.	RESULTADOS	67
4.1	Manual de utilização do programa	67
4.2	Algoritmo básico	89
4.3	Simulações do programa	90
4.3.1	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	91
4.3.2	Análise Econômica	95
4.3.3	Gráficos	102
4.4	Comentários e análise dos resultados	103
4.5	Validação	105
5.	CONCLUSÕES	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

Lista de figuras

	Página
Figura 1: Exemplos de painéis solares de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis	7
Figura 2: Componentes de um sistema fotovoltaico	8
Figura 3: Sistema fotovoltaico centralizado para fornecimento de eletricidade a um pequeno aeroporto e a uma agrovila no sul da Itália	15
Figura 4: Sistema fotovoltaico suprindo a energia consumida pelo sistema de iluminação de uma residência no estado do Maranhão	18
Figura 5: Produção mundial de módulos em Wp	32
Figura 6: Redução do preço do Wp dos módulos fotovoltaicos	33
Figura 7: Composição do custo a) inicial e b) anualizado de sistemas fotovoltaicos	34
Figura 8: Ângulos solares	39
Figura 9: Configuração do sistema grupo-gerador	50
Figura 10: Capa do Manual de Instruções de uso do programa desenvolvido	67
Figura 11: Tela de abertura do programa	69
Figura 12: Tela do menu principal	70
Figura 13: Tela de entrada de dados	71
Figura 14: Tela de dados dos componentes	75
Figura 15: Tela de dados das cargas	77
Figura 16: Tela 1 das demandas horárias das cargas	79
Figura 17: Tela 2 das demandas horárias das cargas	80
Figura 18: Tela 3 das demandas horárias das cargas	81
Figura 19: Tela 4 das demandas horárias das cargas	82
Figura 20: Tela dos resultados do dimensionamento	83
Figura 21: Tela dos resultados da análise econômica	86
Figura 22: Tela de conversão monetária para Dólar	88
Figura 23: Fluxograma do modelo computacional	89
Figura 24: Gráfico do custo de geração elétrica para cargas de 10 kWh e 1 kW pico	102
Figura 25: Gráfico do custo de geração elétrica para cargas de 45 kWh e 5 kW pico	103

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 1: Radiação média mensal kWm^2/dia	46
Tabela 2: Ângulo e orientação dos módulos solares de acordo com os modos de operação	46
Tabela 3: Dia característico recomendado para cada mês	65
Tabela 4: Cálculo das principais variáveis envolvendo energia solar	66
Tabela 5: Parâmetros técnicos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico	90
Tabela 6: Parâmetros econômicos para realização de análises econômicas	90
Tabela 7: Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico com suprimento diário de 500 W	92
Tabela 8: Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico com suprimento diário de 1000 W	93
Tabela 9: Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico com suprimento diário de 5000 W	94
Tabela 10: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com valor do Wp a US\$ 2,00	96
Tabela 11: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com valor do Wp a US\$ 5,00	96
Tabela 12: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com valor do Wp a US\$ 9,00	96
Tabela 13: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com valor do Wp a US\$ 20,00	97
Tabela 14: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com valor do Wp a US\$ 2,00	97

Tabela 15: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com valor do Wp a US\$ 5,00	97
Tabela 16: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com valor do Wp a US\$ 9,00	98
Tabela 17: Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com valor do Wp a US\$ 20,00	98
Tabela 18: Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,80 (DI=0,8)	98
Tabela 19: Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,90 (DI=0,9)	99
Tabela 20: Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,80 (DI=0,8)	99
Tabela 21: Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,90 (DI=0,9)	99
Tabela 22: Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, para carga próxima a rede	100
Tabela 23: Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, para cargas distantes 10 km da rede	100
Tabela 24: Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, para cargas distantes 20 km da rede	100
Tabela 25: Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, para carga próxima a rede	101
Tabela 26: Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, para cargas distantes 10 km da rede	101

Tabela 27: Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, para cargas distantes 20 km da rede	101
Tabela 28: Dimensionamento de sistema fotovoltaico feito por Camargo (2000)	106
Tabela 29: Dimensionamento de sistema fotovoltaico feito por Boilly (1998)	107
Tabela 30: Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de demanda diária de 8,984 kWh com 1 kW pico	108
Tabela 31: Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de demanda diária de 44,92 kWh com 5 kW pico	108
Tabela 32: Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica da rede elétrica para suprimento de demanda diária de 8,984 kWh com 1 kW pico	109
Tabela 33: Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica da rede elétrica para suprimento de demanda diária de 44,92 kWh com 5 kW pico	109

RESUMO

Nas últimas duas décadas, sistemas de suprimento de energia, que utilizam recursos renováveis, têm sido empregados como opção para fazerem parte da solução do problema de fornecimento de energia às comunidades rurais isoladas e às áreas remotas.

Neste trabalho, especificamente para a geração de eletricidade através de painéis fotovoltaicos, será desenvolvido um modelo matemático de simulação com metodologia apropriada e original. Ele será utilizado para projetar sistemas de suprimento de energia elétrica que atenderão cargas comunitárias (iluminação pública e de escolas e creches, refrigeração em centros de saúde, irrigação, telecomunicações e lazer) e cargas residenciais (iluminação, refrigeração, rádio e televisão, bombeamento de água, etc.).

O programa computacional foi avaliado e testado através da simulação de situações experimentais ou elaboradas por outros pesquisadores, comparando alguns aspectos dos resultados obtidos.

Além do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de forma simples e eficiente, ele também fornece uma análise econômica dos componentes envolvidos no projeto e uma comparação com uma provável expansão da rede elétrica convencional e com um sistema grupo gerador que atenderia o mesmo consumo de energia, tornando-se uma ferramenta importante para todos aqueles que desejem projetar sistemas fotovoltaicos e não tem algum conhecimento técnico sobre o assunto.

ABSTRACT

In the last two decades, systems of supply of energy, that use renewable resources, they have been used as option for us to be part of the solution of the problem of supply of energy to the isolated rural communities and the remote areas.

In this work, specifically for the generation of electricity through panels photovoltaics, a mathematical model of simulation will be developed with appropriate and original methodology. He will be used to project systems of electric power supply that will assist community loads (public illumination and of schools and day cares, refrigeration in centers of health, irrigation, telecommunications and leisure) and residential loads (illumination, refrigeration, radio and television, water bombeament, etc.).

The software was evaluated and tested through the simulation of experimental situations or elaborated by other researches, comparing some aspects of the obtained results.

Besides the project of photovoltaic systems in a simple and efficient way, it also supplies an economical analysis of the components involved in the project and a comparison with a probable expansion of the conventional electric net and with a system generating group that would assist the same consumption of energy, becoming an important tool for all those that want project systems photovoltaics and it doesn't have some technical knowledge on the subject.

1. INTRODUÇÃO

O suprimento energético a comunidades rurais isoladas e a áreas remotas tem sido um constante desafio, principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, devido às enormes disparidades econômicas e sociais e, muitas vezes, às dimensões geográficas destes países.

Possibilitar a cada habitante de uma comunidade o acesso aos bens energéticos essenciais (e a outros serviços e benefícios) é uma forma de integração social, distribuição de renda e de encaminhamento nos rumos do desenvolvimento sustentado, em especial quando fontes energéticas renováveis e características técnicas e sócio-econômicas locais são priorizadas. Ou seja, quando se privilegia a geração descentralizada ou distribuída de energia e as tecnologias mais adequadas para atender as necessidades energéticas básicas daquelas comunidades.

Por ser considerada segura, confiável, limpa, não produzir ruído, de fácil operação e pelos seus múltiplos usos finais, a energia elétrica é considerada nobre. Nas políticas de desenvolvimento rural, ela sempre é posta como requisito essencial para a modernização e progresso da zona rural, pelo menos no seu objetivo mais fundamental, ou seja, atender, inicialmente, as necessidades básicas daquelas populações.

O elevado custo de fornecimento de energia elétrica às comunidades rurais, implícito no modelo tradicional de redes elétricas, e os subsídios aos sistemas energéticos convencionais, que impedem o desenvolvimento de sistemas de produção e uso locais de energia, contribuíram muito para a atual situação da falta de suprimento de energia elétrica no meio rural.

Há algum tempo, os sistemas de suprimento de energia alternativa descentralizados, utilizando recursos renováveis, tem sido empregados no atendimento a comunidades mais isoladas. Vários tipos destes sistemas tem sido relatados por muitos autores, os quais descrevem métodos que demonstram serem aqueles sistemas economicamente viáveis e/ou tecnicamente factíveis. O avanço da tecnologia, principalmente nas áreas solar e eólica, vem criando opções para a geração de eletricidade de forma não poluente.

A energia fotovoltaica constitui-se numa solução interessante para áreas remotas com muita radiação solar e sem eletricidade. Os sistemas fotovoltaicos são usados para gerar

energia elétrica para instalações de: bombeamento de água, refrigeração, iluminação, telecomunicações, etc. Estes sistemas estão tornando-se, cada vez mais, uma opção interessante à medida que sua confiabilidade aumenta e o custo por watt está diminuído.

Uma característica intrínseca a esta forma de geração de energia é a modularidade, ou seja, novos módulos podem ser adicionados à medida que a carga solicitar. Outra característica importante é que a fonte geradora está próxima das cargas, evitando-se, assim, gastos com sistemas de transmissão.

Portanto, nas áreas rurais e regiões remotas, os sistemas fotovoltaicos são agora uma alternativa interessante à rede elétrica para o suprimento de eletricidade a uma diversidade de pequenas aplicações.

O Brasil possui requisitos favoráveis para a aplicação de tecnologia fotovoltaica na área rural. Estes são: elevada intensidade de radiação solar por longos períodos, o que garante confiabilidade à operação dos sistemas; grande parte (70%) da população rural não tem acesso à energia elétrica; a rede elétrica se encontra muito afastada desta população e o consumo médio mensal está próximo de 40 kWh.

Além disto, o sistema fotovoltaico oferece muitas vantagens: não possui partes rotativas, tem longa vida útil, a manutenção é mínima, não gera poluição ou ruído, não requer combustível, exceto o Sol, é modular ou expansível, é leve e fácil de transportar e está disponível o ano todo.

Basicamente, o projeto de um sistema fotovoltaico consiste na determinação da quantidade necessária de módulos para atender uma determinada solicitação de carga elétrica. Invariavelmente, o número de módulos sempre depende de dois fatores: quanto de eletricidade é exigido e quanta radiação está disponível. Ou seja, deve-se buscar a compatibilização entre a demanda e a oferta.

Também, devido à natureza aleatória desta fonte renovável, há a necessidade da utilização conjunta de sistemas de armazenamento de energia para suprir as cargas nas horas de pouca ou nenhuma incidência do recurso primário (radiação solar). Ainda, do ponto de vista de concepção de projeto, os sistemas fotovoltaicos, em nível rural, podem ser descentralizados, híbridos, isolados e interligados à rede elétrica tradicional.

Desta forma, a análise e o projeto de sistemas fotovoltaicos tornam-se mais complexos quanto mais parâmetros climáticos e técnicos são considerados. A maioria dos

fabricantes de módulos fotovoltaicos e companhias na América do Norte e na Europa, que desenvolvem projetos, possui programas computacionais complexos para auxiliar no projeto e seleção dos vários componentes de sistemas fotovoltaicos isolados. Quando disponibilizados, estão escritos no idioma do país de origem ou em inglês, o que dificulta sua utilização de forma ampla.

Diante dos contornos definidos e das perspectivas apresentadas, identificou-se a necessidade de elaborar uma maneira para sistematizar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de forma fácil, rápida e com racionalização de equipamentos e recursos financeiros.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho foi gerar um programa computacional, com metodologia e linguagem apropriadas, para auxiliar na análise e no projeto de sistemas fotovoltaicos destinados ao suprimento de pequenas comunidades rurais.

Foi utilizada a linguagem Visual Basic por fornecer um resultado final simples e eficiente, tornando o programa acessível a pessoas que não possuam algum conhecimento em dimensionamentos fotovoltaicos.

O programa computacional desenvolvido tem a característica de ser o mais amigável possível para uso, já que se pretende disponibilizá-lo para instituições governamentais municipais, estaduais e federais, entidades de classe rurais e cooperativas agrícolas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A década de 70 pode ser descrita como a década da consciência energética. Eventos tais como o acidente nuclear da Usina Three Miles Island e o embargo do petróleo árabe durante os anos de 1973 e 1974, com a rápida aceleração inflacionária, mudaram profundamente o conceito do uso de energia e aumentaram as pesquisas sobre fontes alternativas de energia (GROUMPOS & PAPAGEORGIOU, 1986).

Em quase um século e meio, desde que o efeito fotovoltaico foi observado em 1839, a tecnologia passou de uma curiosidade experimental para uma ciência completamente desenvolvida. Células solares, originalmente feitas à mão, são feitas agora em uma base de linha de produção. A geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico é agora uma tecnologia já dominada (GROUMPOS & PAPAGEORGIOU, 1986).

2.1 A Energia Solar

O Sol é uma estrela de tamanho médio cuja distância em relação à Terra varia devido à excentricidade da órbita terrestre. Define-se uma grandeza denominada de unidade astronômica, $ua = 1,496^8$ km como sendo a distância média entre a Terra e o Sol.

Do total da energia que a Terra recebe dentro da atmosfera terrestre, 34% é difundida no espaço pelos gases e poeiras da atmosfera ou refletidos pelas nuvens e volta para o espaço, 19% são absorvidos pelas diferentes camadas da atmosfera e os outros 47% restantes chegam a Terra e são absorvidos na forma de calor

O Brasil, pela sua situação privilegiada e climatologia, está particularmente favorecido, cada metro quadrado de seu território recebe em um ano aproximadamente 1.500 kWh de energia. Esta energia pode ser usada diretamente, ou ser transformado em outras formas úteis como, por exemplo, em eletricidade.

2.1.1 Geometria Solar

A Terra move-se em torno do sol (translação) descrevendo uma órbita elíptica, completando uma revolução por ano e girando em torno de seu eixo polar uma vez por dia (rotação). Esse eixo possui uma inclinação de $23,45^\circ$ com a normal do plano da órbita terrestre. Devido a esta inclinação, à medida que a Terra orbita em torno do Sol, os raios

solares incidem mais diretamente em um hemisfério que no outro (Laboratório de Energia Solar da UFSC, 2001).

No equador, as estações são muito parecidas: todos os dias do ano o Sol fica 12 horas acima do horizonte e 12 horas abaixo. A única diferença é a altura do Sol: em 21/06 o Sol cruza o meridiano em $23,45^\circ$ ao norte do Zênite; em 21/09 o Sol cruza o meridiano em $23,45^\circ$ ao sul do Zênite, e no resto do ano, entre esses dois pontos. Portanto, a altura do Sol ao meio dia no equador não muda muito ao longo do ano. Por isto, não existe muita diferença entre inverno, verão, primavera ou outono. À medida que se afasta do equador, as estações ficam mais acentuadas. A diferença torna-se máxima nos pólos (Laboratório de Energia Solar da UFSC, 2001).

2.2 As Células Solares

O efeito fotoelétrico acontece quando um material é irradiado com energia luminosa apropriada e gera corrente elétrica. O silício convenientemente modificado é o melhor material para obter este efeito, em termos econômicos.

Este material é utilizado na confecção das células solares atuais cujas principais características são:

1. Possuem um absorvente ótico que converte os fótons em pares eletrônicos;
2. Existe um campo elétrico interno que separe estas cargas;
3. Tem contatos nos extremos dos semicondutores para conexão com uma carga externa.

Segundo o CENSOLAR (2000), quanto ao seu processo de fabricação, seu rendimento e seu custo, as células solares dividem-se em:

a) Células monocristalinas

São as células formadas por um só tipo de cristal, são muito caras e difíceis de serem obtidas. Apesar disto alcançam os melhores rendimentos, algo em torno de 12%

b) Células policristalinas

Constituem-se basicamente de silício, mesclado com arsênio e gálio, são um agregado de materiais. São mais fáceis de serem obtidas e conseguem um rendimento nada desprezível, (15%). Não duram muito tempo, porém são ideais para locais com condições ambientais muito ríspidas, como em altas montanhas e desertos.

c) Células amorfas

São as mais baratas, menos resistentes e com um rendimento muito baixo, em torno de 6% que tendem a diminuir com o envelhecimento. São utilizadas em calculadoras e aparelhos em que a energia necessária é muito baixa.

Segundo o Laboratório de Energia Solar da UFSC (2001), em termos de aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de maturidade e utilização os silícios cristalino, c-Si; o silício amorfo hidrogenado, a-Si:H ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio, CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio CuInSe₂ ou CIS. Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te) ou muito raros (Te, Se, In, Cd), ou ambos, o que inicialmente se mostrou um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias.

O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta [mais de 25 % da crosta terrestre é silício (HAMMOND, 1992)] e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima (SHAH, 1992).

O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro aproximado de 10cm) relativamente espessas (300-400 µm), ilustrados na figura 1. O custo de produção destes painéis solares é, no entanto, bastante elevado e as possibilidades de reduzi-los já foram praticamente esgotadas, razão pela qual esta tecnologia é desconsiderada por muitos analistas como séria competidora com formas convencionais de geração de potência em larga escala. O c-Si segue sendo, ainda, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala (Laboratório de Energia Solar da UFSC, 2001).

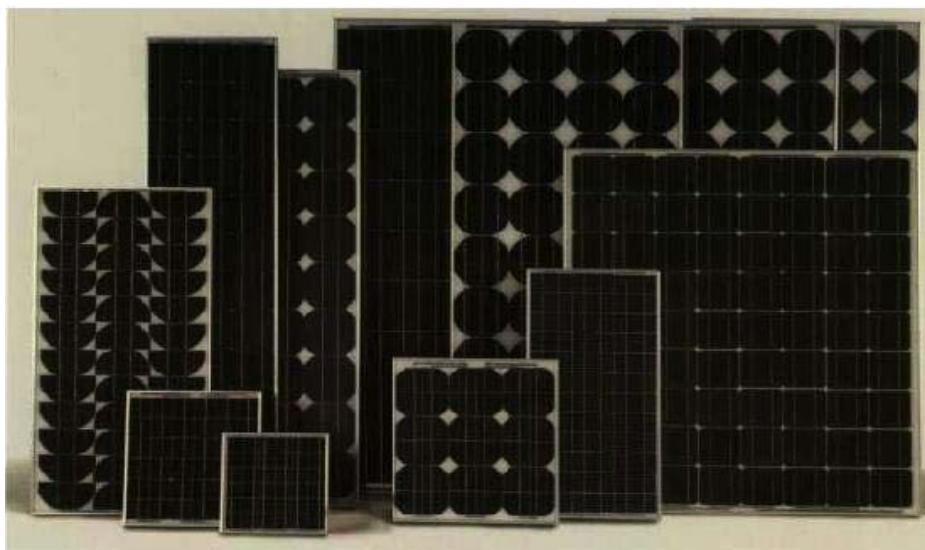


Figura 1. Exemplos de painéis solares de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis

Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de $1\ \mu\text{m}$) de material ativo semiconductor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos destas tecnologias.

2.2.1 Características das células fotovoltaicas

De acordo com a EUROPEAN COMMISSION (1999), as células fotovoltaicas tem uma espessura entre 200 e 400 micras e uma superfície de 8 a $10\ \text{cm}^2$. No que se refere à potência que proporcionam os sistemas fotovoltaicos, uma mesma célula fornece valores diferentes quando se altera a intensidade de radiação que ela recebe.

Por este motivo, normalmente, a potência nominal das células se mede em Watt pico (Wp), que é a potência que uma célula pode fornecer com uma radiação constante de $1000\ \text{W/m}^2$ a uma temperatura de 25° . Por exemplo, uma instalação de 10 Wp indica uma potência de 10 W quando tem uma irradiação de $1000\ \text{W/m}^2$ a 25°C . Em geral uma célula individual tem uma potência de 1Wp, o que significa que para esta potência teremos valores de tensão de aproximadamente 0,5 V e correntes de 2A.

Para a obtenção das potências utilizadas por equipamentos elétricos normalmente utilizados pelos consumidores há a necessidade de se unir um certo número de células com a finalidade de se obter as tensões e correntes desejadas.

2.3 Componentes de um sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico de produção de energia elétrica compreende o agrupamento de módulos de painéis fotovoltaicos e de outros equipamentos convencionais, que transformam ou armazenam a energia elétrica para que possa ser utilizada (LYRA, 1991).

Os principais constituintes de um sistema fotovoltaico de geração de eletricidade são: conjunto de painéis ou módulos fotovoltaicos, controlador de carga, sistema para armazenamento de energia (baterias) e inversor CC/CA, figura 2.

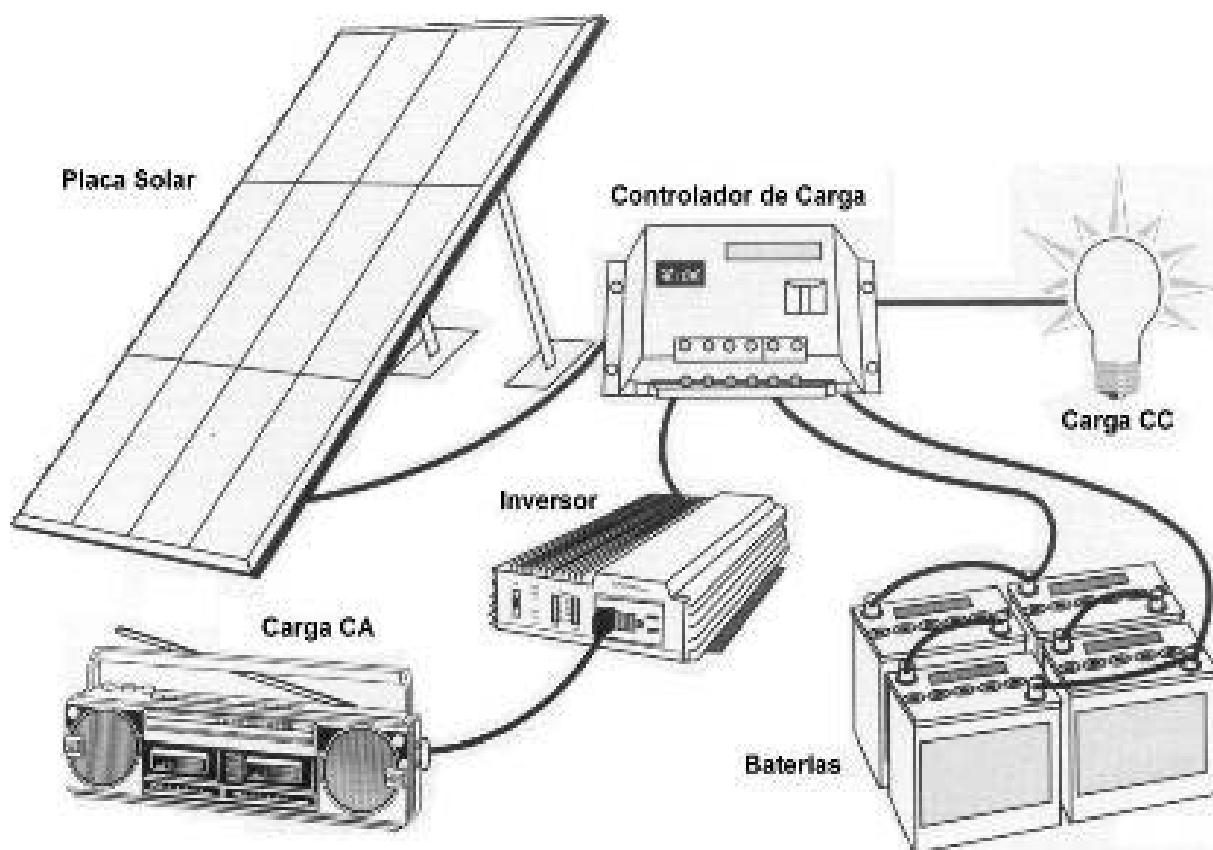


Figura 2. Componentes de um sistema fotovoltaico

2.3.1 Módulos fotovoltaicos

Estes dispositivos podem ser construídos com diferentes tipos de materiais, como já citado, os mais utilizados são o silício, Si; o arseneto de gálio, GaAs e o telureto de cádmio, CdTe, todos materiais semicondutores. Dependendo do processo de fabricação, são formadas estruturas atômicas denominadas monocristalinas, policristalinas ou amorfas, dependendo de como ocorra a distribuição dos átomos no material.

O silício é o material mais comum na fabricação das células solares que compõem os módulos. Cada célula de silício produz aproximadamente 0,5 V de sob a luz solar. Voltagens maiores são produzidas quando várias células são conectadas em séries, como em um módulo. (ROBERTS, 1990).

A interligação dos módulos em série ou paralelo define as características de saída em tensão e corrente.

A estrutura de sustentação dos módulos utiliza materiais comuns tais como madeira, aço galvanizado ou alumínio. Além do suporte, a estrutura deve permitir o agrupamento e interligação dos módulos de forma simples. Podem ainda estar presentes no arranjo, dispositivos de orientação do painel segundo o movimento do Sol. O rastreamento do Sol pode ser parcial, ou seja, movimento em torno de um eixo, ou total com movimentação em dois eixos, visando aumentar a energia gerada pelo painel fotovoltaico (PALZ, 1981).

O módulo fotovoltaico é o componente elementar do sistema fotovoltaico e pode conter entre 20 e 40 células solares, geralmente dispostas em quatro linhas paralelas, produzem corrente contínua de 12 ou 24 Volts e proporcionar valores de potência que oscilam entre 5 e 100 Wp. Normalmente, as células são encapsuladas em silicone e fechadas com uma carcaça periférica metálica, constituindo os módulos fotovoltaicos. Na parte de trás é acoplada uma caixa na qual estão os diodos e os contatos elétricos. Os painéis têm uma estrutura rígida o suficiente para garantir muitos anos de geração elétrica.

A área média dos módulos é de aproximadamente meio metro quadrado. Um metro quadrado de módulos produz uma energia equivalente a 0,2 a 0,3 kW/h nos dias nublados e 0,5 a 0,6 kW/h em dias ensolarados.

Com o propósito de oferecer tensões e potências para atender as mais diferentes aplicações, os painéis podem ser conectados em série e em paralelo, variando assim suas características de suprimento energético.

A produção de eletricidade pelos sistemas fotovoltaicos não é constante, estando vinculada à duração e à quantidade de luz solar incidente em nosso planeta. Desta forma, em certos locais do planeta, normalmente nos meses de inverno, quando a luminosidade é menor, conseqüentemente a produção energética também será menor.

2.3.2 O Sistema de Acumulação de Energia

O acumulador de energia é um componente de extrema importância para os sistemas fotovoltaicos, sendo responsável por adaptar as diferentes taxas de produção e demanda de energia, armazenando-a quando a produção superar a demanda e entregando-a ao sistema no caso contrário.

Em algumas aplicações específicas, utilizam-se acumuladores de níquel-cádmio. No entanto, o preço do Ah (Ámpere-hora) destes acumuladores é aproximadamente 30 vezes mais elevado que o dos acumuladores automotivos e entre 4 e 5 vezes mais caro que um acumulador de chumbo ácido estacionário. Por esta razão, a utilização de acumuladores de níquel cádmio restringe-se a situações excepcionais, como é o caso de aplicações onde as temperaturas de operação são extremamente baixas (OLIVEIRA, 1997).

Em alguns casos, a presença de acumuladores eletroquímicos é dispensável. O sistema fotovoltaico usado para o bombeamento de água é exemplo de um caso específico onde é mais interessante acumular a energia armazenando a própria água. Nesta seção ênfase é dada aos acumuladores eletroquímicos de chumbo-ácido (Pb-ácido) por serem estes os mais freqüentemente usados em sistemas fotovoltaicos autônomos.

2.3.2.1 Ciclos de vida ou vida útil

Denomina-se ciclo de um acumulador ao processo de carregar e descarregar. A repetição de ciclos é denominada de processo de ciclado ou simplesmente ciclagem. Ao se descarregar repetidamente os acumuladores eletroquímicos, diminui-se, progressivamente, a capacidade total destes. Isto ocorre porque, com o aumento da superfície dos eletrodos, originado pelas sucessivas recargas, criam-se tensões mecânicas internas, fazendo com que o material ativo se desprenda e caia. Com isto, perde-se material e, conseqüentemente, capacidade de acumular energia. Esta perda na capacidade aumenta com o número de cargas e

descargas e, principalmente, com o aumento da profundidade de descarga adotada em cada ciclo (LORENZO, 1994).

Segundo este autor, realizado um determinado numero de ciclos, a capacidade da bateria diminui, de forma a inviabilizar seu uso. Costuma-se assumir como limite de utilização da bateria quando sua capacidade após os ciclos diminui para 80% da capacidade nominal. O número de ciclos que uma bateria suporta até atingir sua capacidade final é denominada vida útil da bateria.

Devido a características particulares, intrínsecas à tecnologia fotovoltaica, as baterias são submetidas a sucessivas descargas e recargas. O consumo energético dos sistemas fotovoltaicos autônomos ocorre muitas vezes durante o período noturno, quando não há possibilidade de geração fotovoltaica. Para isto, utilizam-se os armazenadores de energia.

Ao longo do dia, os geradores fotovoltaicos devem ser capazes de recarregar o subsistema de acumulação para que estes possam abastecer o consumo da noite seguinte, sem que a profundidade de descarga limite da bateria seja ultrapassada. O sistema deve, preferencialmente, ser projetado para que os acumuladores atinjam apenas a profundidade de descarga diária estabelecida. Como a irradiação incidente na superfície terrestre é dispersa em várias direções, é difícil prever o tamanho ótimo do gerador, abastecendo a carga de forma a garantir que os acumuladores estejam submetidos apenas ao processo de descarga normal ou estabelecido teoricamente.

2.3.3 Elemento de regulação de potencia

Em geral, para garantir a vida útil do sistema de armazenamento, são utilizados reguladores de carga. Este equipamento é utilizado para proteger os acumuladores, cortando o abastecimento energético das baterias quando a bateria estiver totalmente carregada ou desconectando a carga dos acumuladores quando estes atingem a profundidade de descarga limite (OLIVEIRA, 1997).

Estes elementos possuem grande importância na diminuição das falhas, no aumento da probabilidade de perda de carga e na proteção dos equipamentos que constituem os sistemas fotovoltaicos.

Para os sistemas solares que utilizam baterias recarregáveis, é preciso protegê-los contra os seguintes problemas:

- a) risco de danos nos fios ou fogo provocado por curto-circuito,
- b) sobrecarga das baterias,
- c) excessiva descarga das baterias.

Um regulador de carga é usado para proporcionar esta proteção

2.3.3.1 Reguladores de carga

Para maximizar a vida útil das baterias, deve-se evitar situações de sobrecarga e descarga profunda.

Existem basicamente dois tipos de reguladores: os que são conectados em paralelo e aqueles que são conectados em série. Os reguladores conectados em paralelo são constituídos de transistores que dissipam a potencia gerada em excesso, quando a tensão nos pólos da bateria atingir um determinado valor. A tensão de corte recomendada é de 2,45V/elemento quando a temperatura for de 25° C. Neste caso, é conveniente instalar um diodo de bloqueio entre a bateria e o transmissor para evitar dissipação de energia das baterias através dos transistores. Este tipo de procedimento é aconselhável para sistemas pequenos, com correntes de carga < 10 A (COPETTI, 1993).

Os reguladores conectados em série, desconectam os painéis das baterias quando a tensão atinge um determinado valor pré fixado. O interruptor utilizado pode ser um dispositivo eletromecânico (relê) ou estático (transistor MOS).

Para a proteção de sobrecarga, desconecta-se o gerador fotovoltaico da bateria quando a tensão em seus pólos atinge cerca de 2,45V/elemento, voltando a conectá-la quando a tensão cair para 2,2 V/ elemento. Para proteção da descarga excessiva, desconecta-se a carga da bateria quando a tensão em seus pólos atingir um valor determinado pela profundidade de descarga máxima estipulada para o subsistema de acumulação em questão. O controlador de carga volta a conectar a carga na bateria quando a tensão nos pólos desta atingir cerca de 2,1 V/elemento. Estes valores de tensão podem variar segundo o tipo e o regime de trabalho dos acumuladores (OLIVEIRA, 1997).

2.3.4 Inversores de tensão

Os inversores de tensão são usados em um sistema solar elétrico para converter voltagem em corrente contínua para voltagem em corrente alternada. Isto se torna necessário quando se usa equipamentos que trabalham apenas em voltagens alternadas (ROBERTS, 1990).

Os inversores de carga de boa qualidade são caros. Também, tornam os sistemas fotovoltaicos mais complicados, pois é adicionada uma outra unidade que pode falhar e ser de difícil reparo. Além disto, ocorre diminuição no rendimento global do sistema, já que existem perdas no processo de inversão de corrente.

Um outro uso para os inversores de tensão está em sistemas que cobrem uma grande área. A seção dos cabos para longas distâncias é reduzida quando a operação se dá em voltagens mais elevadas, reduzindo consequentemente os custos destes sistemas.

Devem trabalhar em regime de 70 a 90% de carga, faixa onde a eficiência está entre 85 a 90 % (ROBERTS, 1991).

2.3.5 Fios, conexões e suportes

Os fios, conexões e suportes, são responsáveis por transmitir a energia, por conectar, um com os outros, os diversos componentes que fazem parte do sistema e fornecer sustentação física aos painéis. É importante tomar cuidado com estes elementos das instalações, em muitos casos deixados de lado por serem, em geral, considerados de menor importância em relação ao sistema como um todo.

A utilização de fios impróprios pode gerar perdas, tornando a energia gerada ainda mais cara. Os suportes e fixações devem ser escolhidos e instalados de forma a garantir um longo período de vida útil (tipicamente 20 anos) sob exposição a diversas condições climáticas (ROBERTS, 1991).

Estes componentes do sistema não representam aumento significativo nos custos da instalação como um todo. Portanto, economizar neste quesito não representará elevados ganhos financeiros, além de expor o sistema a falhas ou até danificar-se.

No caso de uma instalação fotovoltaica autônoma, as seções dos fios devem ser escolhidas de modo a evitar perdas significativas no transporte da energia.

2.4 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos para a produção de energia elétrica podem ser divididos em duas categorias principais: sistemas isolados ou conectados à rede elétrica.

2.4.1 Os sistemas isolados

Os sistemas isolados são usados para eletrificar comunidades que se situam em locais distantes da rede elétrica ou de difícil acesso e não são atendidas por algum motivo, pela concessionária através da rede elétrica convencional.

Nestes sistemas, há necessidade de se armazenar energia elétrica para garantir a continuidade do fornecimento nos momentos em que não há energia luminosa.

Esses sistemas podem ser usados de forma periódica ou permanente, garantindo um serviço semelhante ao fornecido pela rede elétrica.

A característica modular dos sistemas permite dimensionar a carga e a tensão de acordo com as necessidades e os próprios usuários fazem os ajustes destinados aos usos particulares e específicos.

2.4.2 Sistemas conectados à rede elétrica

As companhias elétricas permitem que os produtores autônomos de eletricidade conectem-se à rede elétrica, desde que atendidas exigências técnicas cabíveis. Desta forma, é possível a grandes fornecedores vender a possível energia excedente produzida, a preços estabelecidos pelo Órgão Regulador, provendo eletricidade à rede nos momentos em que o consumo de eletricidade se torne elevado.

Os sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica convencional podem ser divididos em duas categorias:

2.4.2.1 Sistemas residenciais

Estes sistemas constituem-se por um conjunto de painéis fotovoltaicos instalados sobre o telhado da casa e deveriam fornecer a quantidade de energia necessária para alimentar os eletrodomésticos de uma casa normal. Em perspectiva, estes tipos de sistemas poderiam incrementar de modo significativo a energia elétrica produzida pelos grandes produtores de

eletricidade, desenvolvendo um modelo de geração elétrica mais eficiente pelo território do país (ENERGY, RESOURCE & TECHNOLOGY, 2001).

O elemento fundamental deste sistema é o inversor. Este dispositivo converte a corrente contínua em corrente alternada, tornando-a com características semelhante àquela fornecida pelo sistema da rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica não precisam do sistema de armazenamento.

2.4.2.2 Sistemas fotovoltaicos centrais

Os sistemas centralizados consistem em centralizar a produção de energia fotovoltaica em um local e distribuí-la aos consumidores através da rede elétrica convencional, muito utilizados em pequenas agrovilas e instalações isoladas no continente Europeu (figura 3).

Com os valores atuais da eficiência da transformação da energia solar em eletricidade, uma planta de um megawatt, capaz de fornecer energia a mil consumidores, abrangeria uma área equivalente a quatro campos de futebol. Assim, o tamanho da propriedade é um dos principais problemas para o uso de sistemas fotovoltaicos centralizados.



Figura 3. Sistema fotovoltaico centralizado para fornecimento de eletricidade a um pequeno aeroporto e a uma agrovila no sul da Itália.

2.4.3 Vantagens e desvantagens dos sistemas fotovoltaicos

Segundo o Energy Resources & Technology (2001) dos Estados Unidos, os sistemas fotovoltaicos apresentam as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens

1. A maneira de operar sistemas fotovoltaicos é mecanicamente simples, não há partes móveis e as células não necessitam de manutenção,
2. As células fotovoltaicas geram eletricidade em corrente contínua que pode ser armazenada em baterias e usada em um amplo intervalo de voltagens dependendo da configuração do banco de baterias,
3. A produção de eletricidade pelo processo fotovoltaico é silenciosa e não produz óxidos de carbono ou outros gases tóxicos durante seu uso,
4. O uso destes sistemas, como fonte renovável de eletricidade ajuda a reduzir a dependência com relação aos combustíveis fósseis,
5. Os sistemas fotovoltaicos permitem o uso de iluminação elétrica e outros equipamentos em áreas isoladas onde conexões com a rede elétrica convencional são muito caras ou não estão disponíveis e
6. A maioria das aplicações operam em corrente alternada, embora alguns equipamentos são feitos para operar em corrente contínua. Inversores de corrente de alta eficiência (que mudam a corrente contínua em corrente alternada, usada na grande maioria das casas e construções) são agora disponíveis a custos relativamente baixos.

Desvantagens

1. A eletricidade produzida é ainda muito cara relativamente àquela produzida por outros meios,
2. As células fotovoltaicas devem ser iluminadas para criar eletricidade. Sombras de nuvens, árvores ou construções próximas reduzem o rendimento dos sistemas fotovoltaicos. Baterias devem ser usadas para armazenar eletricidade para uso durante as horas em que não há luz solar

3. Sistemas fotovoltaicos que são conectados as linhas convencionais de corrente alternada devem proporcionar energia que seja compatível com este fornecimento e requererem equipamentos especiais de interconexão,
4. Baterias necessitam de manutenção periódica e trocas
5. Alguns materiais usados na fabricação dos painéis fotovoltaicos são tóxicos e
6. Um dos principais componentes das células fotovoltaicas é o silício, encontrado na areia, o que pode causar danos ao ambiente durante o processo de extração.

2.4.4 Aplicações mais comuns

Os sistemas fotovoltaicos têm se difundido comercialmente em todos os casos em que é necessário dotar de corrente elétrica lâmpadas, motores, televisores, etc. situados em localidades isoladas nas quais as conexões com a rede elétrica envolvem custos muito elevados em comparação às pequenas quantidades de energia requerida.

Alguns exemplos do uso de sistemas fotovoltaicos:

- Casas isoladas: As residências rurais e as casas isoladas são as habitações que mais utilizam sistemas fotovoltaicos residenciais (figura 4),
- Iluminação pública: Postes de iluminação pública e sinalização de estradas ,
- Irrigação: bombas de irrigação em propriedades agrícolas
- Lazer: Os sistemas fotovoltaicos podem ser usados adequadamente para carregar baterias de serviço de reboques, camping e barcos de recreação.
- Sistemas de comunicação: Atualmente uma das aplicações de grande sucesso dos sistemas fotovoltaicos é a alimentação de estações de telefonia fixa, das antenas repetidoras de televisão e dos sistemas de telefonia portáteis via satélite, devido às suas características confiáveis e por proporcionar operações completamente automáticas.
- Sistemas de navegação e coleta de dados: Os sistemas de sinalização para navegação marítima (como as bóias flutuantes) e aéreas, situados em lugares isolados são alimentados freqüentemente através de sistemas fotovoltaicos. As estações para a coleta de dados sísmicos, climáticos e ambientais, para a pesquisa de incêndios ou neblina também estão cada vez mais sendo supridas por pequenos sistemas fotovoltaicos.

- Indústria aeroespacial: Uma das primeiras utilizações das células solares foi na indústria aeroespacial com o objetivo de prover energia elétrica os satélites lançados no espaço, ainda na década de sessenta.

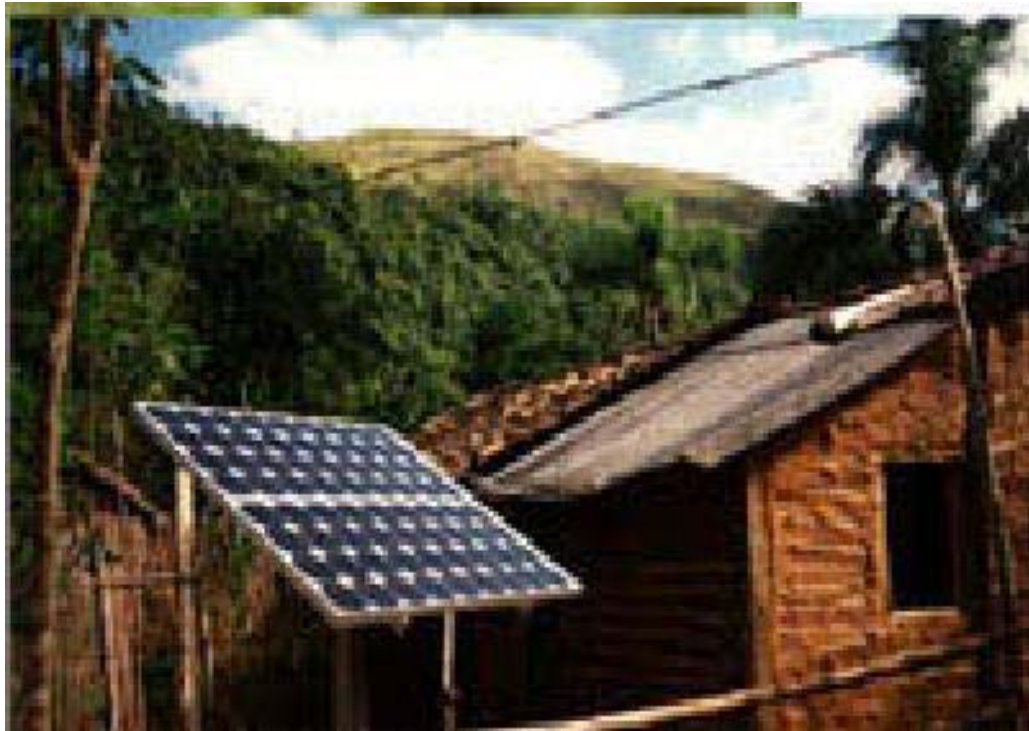


Figura 4. Sistema fotovoltaico suprimindo a energia consumida pelo sistema de iluminação de uma residência no estado do Maranhão – Brasil.

2.5 As cargas elétricas

Um sistema fotovoltaico é estruturado de acordo com a carga elétrica que vai abastecer. Conhecer as características da carga, qual a sua magnitude e como ocorre o consumo energético médio permite dimensionar adequadamente o sistema, visando ter um risco de déficit mínimo a um mínimo custo.

Normalmente os aparelhos utilizados em residências e propriedades rurais requerem tensões de 120 ou 220 V em corrente alternada, que é a fornecida pela rede elétrica convencional. Como os geradores fotovoltaicos fornecem em torno de 12 V em corrente contínua, faz-se necessário a utilização de sistemas inversores de tensão, que não apenas

elevam aos valores desejados as tensões produzidas como também transformam as correntes contínuas em alternadas.

2.5.1 Parâmetros característicos de uma carga

Sobre o ponto de vista do dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, cada carga elétrica individual caracteriza-se por 3 parâmetros: tensão, corrente e perfil de consumo (curva de demanda individual)

Para estruturar um sistema fotovoltaico é imprescindível estimar em que momento do dia, mês, ano estará ocorrendo o consumo. Isto permitirá conhecer:

- o consumo energético médio de cada período considerado
- a simultaneidade entre consumo e geração
- a demanda máxima de energia e seu período de duração

2.5.2 Características da rede elétrica convencional

Dependendo da carga a ser alimentada e das perspectivas de expansão do sistema, as linhas de distribuição (LD) no meio rural podem ser polifásicas ou monofásicas. Como as necessidades energéticas do consumidor rural de baixa renda são pequenas e por haver pouca perspectiva de aumento da demanda de energia elétrica, devido a fatores sócio-econômicos, o modelo mais utilizado, atualmente, para as linhas de distribuição é a linha monofásica com retorno por terra (MRT).

Como esta linha transmite eletricidade numa tensão de 7.97 kV e o consumidor utiliza tensão de 220 V, é necessário acrescentar ao sistema subestações (SE). Estas subestações são formadas por transformadores monofásicos com potência aparente de 5 kVA, atendendo no máximo cinco consumidores, assumindo que cada um necessite de uma potência média de 1,0 kVA. As ligações entre as subestações e os consumidores são realizadas por linha em baixa tensão (BT) de alumínio ou aço (COSTA et al, 2000).

Assim, os elementos a serem analisados na instalação de energia elétrica via rede convencional seriam:

- a) custo de investimento: custo dos fios condutores de energia do ramal já instalado até a propriedade e custo do transformador monofásico,
- b) custo de operação e manutenção da rede,
- c) custo da energia fornecida pela concessionária.

2.5.3 Características de instalações fotovoltaicas

Um sistema fotovoltaico residencial destina-se a satisfazer as necessidades de bem estar e lazer, tais como: ligação de um rádio, de um televisor, de uma geladeira, de algumas lâmpadas e de uma pequena bomba d'água. Esse sistema fotovoltaico residencial consiste de módulos (40 – 100 Wp) que geram corrente elétrica em DC e é armazenada em baterias (50-150 Ah) (COSTA et al, 2000).

A tecnologia atual de fabricação de módulos fotovoltaicos faz com que sua vida útil, garantida pelos fabricantes, supere 20 anos. Os outros componentes não têm apresentado maiores problemas para sistemas fotovoltaicos de pequeno porte (ROBERTS, 1990).

Desta forma, devem ser determinados os custos ao longo de 20 anos de funcionamento de uma instalação típica, levando em conta o investimento inicial, a reposição de peças e equipamentos e a manutenção e operação do mesmo. Estes custos são divididos em:

- a) custo de investimento: corresponde ao preço na compra do módulo fotovoltaico, bateria, controlador de carga, suporte para o módulo, unidades de controle e inversores de carga,
- b) custo de reposição, operação e manutenção,
- c) custo anual: o sistema fotovoltaico tem a vantagem de não apresentar custos anuais, uma vez que não emprega combustíveis (COSTA & ECK, 2000).

2.6 Pesquisas sobre Energia Solar Fotovoltaica

2.6.1 Panorama Internacional

Até a metade da década de 70 nenhuma importância foi dada ao uso da tecnologia fotovoltaica fora do programa espacial. Todavia, com a crise do petróleo em 1973/74 e conseqüente aumento do preço dos combustíveis fósseis, desenvolveu-se o interesse pela utilização terrestre da geração fotovoltaica.

A partir daí, surgiram as indústrias fotovoltaicas públicas e privadas, centros de pesquisas e universidades iniciaram estudos e pesquisas e os próprios governos interessados na utilização dessa nova fonte começaram a incentivar contribuindo financeiramente para que a tecnologia fotovoltaica se tornasse mais competitiva.

Em um período de poucos anos, várias empresas incursionaram neste campo. Os principais fabricantes de células fotovoltaicas podem ser classificados geograficamente em quatro grupos: Estados Unidos, Japão, Europa e os outros países, que começaram a ter um papel importante a partir de 1982.

Várias experiências vem sendo desenvolvidas no mundo, tanto no aspecto da instalação de centrais e sistemas solares fotovoltaicos, projetos de centrais autônomas, sistemas distribuídos, sistemas híbridos e aplicações de consumo, como no desenvolvimento de modelagem e ferramental para simulações de desempenho desses sistemas.

O CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energia Solar), um Centro exclusivamente dedicada a formação técnica em energia solar, de reconhecido prestígio entre as empresas deste setor, disponibiliza pela internet de alguns programas dedicados aos sistemas fotovoltaicos, no entanto tais programas estão em inglês, necessitando que o usuário conheça este idioma e os termos técnicos a ele relacionados, além do que aqueles destinados ao dimensionamento estão em versão demo e não há qualquer referência a análise de viabilidade econômica.

Nos Estados Unidos o Southwest Technology Development Institute New México State University tem em seu site vários programas orientados ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, além de oferecerem também avaliações econômicas dos mesmos, no entanto requerem que o usuário tenha noções de Inglês além de conhecer termos técnicos específicos destes sistemas.

A empresa Retscreen do Canadá possui em seu site um programa elaborado em Excel com uma interface extremamente simples e amigável, oferecendo inclusive a opção de se proceder a análise econômica dos componentes dimensionados em várias moedas internacionais, mas novamente requerem o conhecimento de outro idioma, no caso o francês.

O governo do México, através do CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energia) possui em seu site uma ferramenta de dimensionamento e avaliação técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos isolados contidos no programa ConaeFV2.0 que possui dois níveis de utilização, um básico para usuários iniciantes e outro avançado para aqueles usuários que desejem modificar os dimensionamentos sugeridos pelo programa, além de possuir um manual de operação bem didático, mas o dimensionamento apenas é realizado para as principais cidades mexicanas, contidas em um arquivo de dados, invalidando-o para outras localidades.

O programa desenvolvido pela SEI (Sistemi Energetici Integrati) integrado Ministério de Energia da Itália possibilita uma simulação de sistemas fotovoltaicos baseado em um modelo de perdas de carga, tão preciso quanto o modelo abordado pelo Univolt, porém destinado apenas a cargas maiores que aquelas requeridas por pequenas propriedades.

Estes são alguns exemplos de inúmeros programas disponíveis pela internet porém, nestes casos além do simples conhecimento de outros idiomas há a necessidade de conhecimento de termos técnicos nestes idiomas.

No meio acadêmico internacional vários projetos têm sido desenvolvidos com o objetivo de oferecer simulações em sistemas solares fotovoltaicos, no entanto são muito difíceis de serem obtidos por pessoas que vivem em comunidades isoladas e entidades rurais afastadas dos grandes centros urbanos e que na maioria das situações não possuem acesso a internet; como o desenvolvido por Saha, já em 1981 pelo Departamento de Física da Universidade de Kalyane, em West Bengal, que realizou um programa de dimensionamento sistemas fotovoltaicos para o suprimento de eletricidade a pequenas vilas ou aldeias na Índia.

O programa desenvolvido neste trabalho difere-se substancialmente dos exemplos citados por destinar-se especificamente a propriedades rurais isoladas, possuindo uma interface amigável e de fácil utilização por qualquer pessoa, independente de conhecimentos técnicos específicos de sistemas fotovoltaicos, o dimensionamento exige poucas inserções de

dados e dá-se de forma clara e objetiva, possibilitando uma execução do projeto rápida e precisa.

2.6.2 Os sistemas fotovoltaicos no Brasil

No Brasil o interesse pela utilização da energia solar é recente e teve início a partir de meados da década de 70 onde empresas e instituições de ensino e pesquisa, produção e comercialização de células fotovoltaicas.

Existem muitos poucos programas disponibilizados ao público em geral facilmente acessíveis pela internet. O Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul possui um software livre para download dividido em alguns módulos que abrangem o cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas, a distribuição espectral da energia solar e uma parte que ajudará o usuário a dimensionar a instalação e os componentes de sistemas fotovoltaicos, porém além de oferecer um dimensionamento a usuários em geral, não se especificando a qualquer nicho de atividade, exige do usuário um bom conhecimento técnico para seu uso, o que o inviabiliza para muitos usuários em potencial.

Outro Laboratório que possui um programa disponibilizado pela internet é aquele pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, cuja principal característica é a extrema precisão com que trata dados de radiação exigindo por vezes conhecimentos técnicos avançados sobre o assunto.

No entanto, a grande maioria dos programas tanto de projetos como de simuladores de sistemas fotovoltaicos restringe-se ao meio acadêmico e, mesmo disponibilizados para qualquer pessoa que deseje fazer seu uso, dificilmente estarão ao seu alcance.

Neste módulo podemos citar um programa de dimensionamento híbrido eólico-fotovoltaico desenvolvido pelo Prof Dr. Luiz Antonio Rossi da Unicamp, que exige do usuário a inserção contínua de dados de utilização horária de cargas durante o período sobre o qual se deseja o dimensionamento das fontes energéticas. Posteriormente, em conjunto com Boily et al (1998), desenvolveram um projeto para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para comunidades rurais, no entanto o mesmo ainda exigia conhecimentos mais profundos sobre consumo e dimensionamentos para que os dados pudessem ser inseridos de forma correta no programa.

Um projeto específico para o bombeamento de água foi desenvolvido por Santos (1995) pelo IEE da Universidade de São Paulo, estando disponível para pessoas que tem a necessidade de realizar o bombeamento em suas propriedades porém não possuem eletricidade disponível. O programa não atende porém outras demandas por cargas. Na mesma época Posorski (1996) também desenvolveu um programa similar voltado ao bombeamento no meio rural que seria mais uma ferramenta para o suprimento de água nestas regiões.

Costa & ECK (2000) também ofereceram sua contribuição neste campo, desenvolvendo um “Modelo Sustentável de Difusão de Tecnologia Fotovoltaica para uso Residencial” implantado em áreas rurais no estado de Pernambuco, mas tal modelo restringia-se a ações efetivas de implementação e não sobre a elaboração de software para dimensionamentos.

O GEDAE (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de alternativas Energéticas), vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Pará muito tem contribuído para o avanço na pesquisa de sistemas fotovoltaicos na Região Amazônica, implantando e avaliando diversos tipos de sistemas destinados tanto ao atendimento de cargas em comunidades isoladas quanto a cargas utilizadas por pequenas agroindústrias, porém não consta em seu rol de projetos desenvolvidos qualquer software elaborado pelos mesmos para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

Outro grupo importante no estudo de sistemas solares é o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos pertencente ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo que além de implantar e avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos também possui alguns programas desenvolvidos por seu corpo de pesquisadores, como aquele citado acima desenvolvido por Santos (1995) ou outro desenvolvido por Oliveira (1997) direcionado a eletrificação de residências de baixo consumo.

Na parte de avaliação econômica cita-se o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina onde Bazzo et al (1999) desenvolveu um “Sistema para análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema isolado híbrido diesel/fotovoltaico entre outros, tendo sempre Roberto Ruther à frente da equipe.

2.7 Os impactos da eletrificação rural

Até hoje os programas de eletrificação rural tradicionalmente implantados foram restritos e excludentes, tratando setores que hoje são marginais na economia rural com total indiferença quanto à oferta de energia elétrica, deixando-os às escuras

Devido à falta de energia elétrica nas propriedades, o agricultor tem de retirar, manualmente, água do poço e é impedido de realizar irrigações necessárias, diminuindo sua produção e aumentando a carência financeira e alimentar destas propriedades.

Pequenos produtores de baixa renda não são capazes, geralmente, de fazer uso intensivo de energia, demorando muito para agregar novos equipamentos na produção. Suas propriedades se espalham por áreas muito distantes das redes elétricas, de difícil acesso, muitas vezes sem estrada, constituindo um mercado que não compra e não cresce, cujo suprimento implica altos custos, sendo considerado pelas concessionárias como um mercado pouco rentável, como afirmam COSTA et al (2000).

Segundo GOMES (2001), 62% de todas as propriedades e domicílios rurais estão localizados nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, que juntas possuem um índice de eletrificação rural de 28%.

Desta forma, pode-se notar que ainda há muito o que se fazer em termos de eletrificação a nível rural no Brasil e, segundo SANTOS et al (1999), a desigualdade de distribuição de renda entre as regiões citadas acima e seus estratos sociais agrava as deficiências existentes de acesso à energia elétrica.

RAMANI (1992) analisando trabalhos que relatam os impactos que a eletrificação rural causou em diferentes países de terceiro mundo pode concluir que a chegada da energia elétrica causa de início uma grande demanda por aparelhos elétricos, vindo a beneficiar a economia urbana. Porém, para que haja um crescimento econômico significativo há a necessidade de se agregarem outros benefícios tais como investimentos em infra-estrutura de produção, comercialização e transporte.

No que diz respeito à produtividade, RAMANI (1992) identificou uma correlação evidente entre o aumento desta e a chegada da eletricidade, sendo mais acentuado quando esta eletrificação é combinada com benefícios complementares como o financiamento para outros equipamentos agrícolas, principalmente os de sistemas de irrigação.

Em seu trabalho, GOMES (2001) cita uma interessante observação colhida com o PROLUZ (Programa Luz no Campo) qual seja: com o completo atendimento de todos os domicílios rurais em um determinado ramal, em um prazo de quatro anos, surge uma nova demanda por ligações que, ao estabilizar-se, acaba resultando , na média, em mais 50% de domicílios eletrificados além dos previstos. Averiguou-se que essas ligações eram resultantes, como regra geral , do surgimento de novos domicílios, como pequenos armazéns, bares e postos de gasolina, e não de novas propriedades, o que tem, sem dúvida, uma forte correlação com a eletrificação e exerce um papel positivo na geração de novos empregos.

De acordo com CORONADO (1993) não se pode deixar de lembrar o aumento de emprego e renda nas indústrias gerados pelo crescimento na demanda por equipamentos elétricos, como bombas d'água, televisores, rádios, refrigeradores, chuveiro elétrico, ventiladores e outros. Esta curva de demanda de um novo consumidor rural só vai estabilizar-se após um intervalo de sete anos.

2.7.1 Energia solar fotovoltaica no meio rural

Visando minimizar o êxodo de pessoas do meio rural para o centro urbano, que nele buscam melhor qualidade de vida, a implantação da energia solar fotovoltaica no meio rural pode ser uma alternativa no sentido de atingir parcialmente esta expectativa, já que no campo o homem também terá benefícios, que permitirão seu desenvolvimento sócio-econômico, tais como iluminação, conservação de alimentos, comunicação e água encanada (SILVA, 2000).

Esta fonte renovável oferece múltiplas vantagens para o suprimento energético para áreas rurais, pois é de origem local, facilita a produção em pequena escala, não é poluente e nem agride a natureza.

Entre as tecnologias que aproveitam as fontes renováveis de energia, a tecnologia fotovoltaica se apresenta como uma das melhores opções para fornecer energia elétrica de maneira confiável. O uso da energia solar, recurso natural e abundante, é um fator determinante no desenvolvimento sócio-econômico, comercial e agroindustrial das comunidades rurais.

Em fazendas, módulos fotovoltaicos alimentam geladeiras, iluminação, recepção de TV, radiocomunicação e cercas elétricas para confinamento de animais.

Na Amazônia, redes extensas de comunicação via microondas da Embratel tem sua energia totalmente fornecida por painéis fotovoltaicos.

Postos de saúde em áreas remotas do território nacional são dotados de sistemas que alimentam geladeiras, iluminação e bombas d'água, proporcionando à população carente o acesso a vacinas, soros e medicamentos vitais para sua sobrevivência.

Escolas rurais possibilitam a alfabetização noturna de adultos através do uso de módulos fotovoltaicos para iluminação de salas de aula.

No Nordeste brasileiro, sistemas fotovoltaicos de bombeamento abastecem de água vilas e povoados, irrigando propriedades e contribuindo para a fixação do homem na terra.

Em aldeias indígenas, o acesso do índio a medicamentos e vacinas é garantido por geladeiras alimentadas por módulos fotovoltaicos.

2.8 Análise econômica

Para verificar se uma tecnologia é um investimento economicamente viável, é necessário recorrer ao uso de modelos de análise que avaliem tanto os custos do investimento quanto os benefícios implícitos no mesmo, indicando qual o benefício econômico que poderá ser obtido ou não.

Neste tópico serão descritos os métodos de análise microeconômica que podem ser usados na avaliação do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, além de considerar os benefícios provenientes da própria geração energética.

2.8.1 Métodos de Avaliação Econômica

Dentre os modelos econômicos que se propõem a fazer estas análises, pode-se identificar os mais comuns, que são: o método da taxa de retorno, o método da relação custo/benefício, o método do tempo ou período de retorno e o método de avaliação da vida útil ou MVP (Método do Valor Presente). Os métodos de avaliação econômica de sistemas energéticos diferem essencialmente na maneira em que relacionam custos e economias e, mesmo estando relacionados entre si, não são necessariamente métodos que se substituem um pelo outro, pois tratam de tipos diferentes de decisões de investimentos; assim para alguns tipos de decisões, a escolha de um método é mais importante do que outro.

Por alocar um orçamento limitado, entre várias oportunidades de investimentos disponíveis, o método do custo/benefício e o método da taxa de retorno são os mais recomendados porque pode fornecer ao usuário uma melhor seleção dos projetos que proporcionarão um retorno total maior para um determinado nível de investimento. Quando se deseja um retorno rápido de um investimento (como por exemplo, reembolsar um empréstimo em curto prazo), o método do período de retorno pode fornecer as informações mais úteis.

2.8.1.1 Método de avaliação da vida útil econômica ou Método do Valor Presente

Quando os custos de investimento são elevados e os benefícios resultantes são distribuídos em função do tempo – como ocorre na maioria das aplicações com fontes energéticas – é conveniente fazer-se uma análise econômica sobre a vida útil do equipamento a ser utilizado antes de realizar o investimento.

O método que avalia a vida útil econômica é geralmente usado para avaliar um investimento cujos benefícios principais ocorram no decorrer de um determinado período de tempo; embora o termo “vida útil econômica” seja um método específico de medição de desempenho econômico, é também freqüentemente utilizado em um sentido mais amplo em todos os métodos que avaliam os custos e benefícios de aplicações sobre um determinado período de tempo, correlacionando o tempo com o aumento ou diminuição do capital investido (RUEGG & SAV, 1980).

Este método de avaliação calcula o valor presente total dos custos associados a cada sistema de energia alternativo em consideração. A alternativa que apresentar o menor custo total será a mais viável economicamente, desde que satisfaça as exigências do investidor.

a) Valor presente da vida útil econômica

Assumindo-se que os cálculos envolvem diferentes vidas úteis dos componentes de um sistema energético solar, é necessário fixar um período para análise. Geralmente, este período correspondente à maior vida útil dentre aquelas dos vários componentes. Em seguida leva-se para este horizonte a vida útil dos demais componentes, tendo finalmente o mesmo período de tempo para se avaliar os custos totais do investimento (RUEGG & SAV, 1980).

b) Valor da vida útil por unidade de energia

Um modo ligeiramente diferente de usar o método de análise econômica da vida útil sobre investimentos em energia solar é comparar a vida útil em função de valores anuais por unidade de energia gerada. Supondo-se que o sistema de energia solar atenda as mesmas necessidades que são atendidas pelo sistema convencional e que o preço da energia convencional por unidade comprada é constante em relação à quantidade comprada, os cálculos serão mais simplificados. Neste caso, a comparação de custos pode ser feita calculando-se os valores anuais do sistema solar com os gastos no mesmo período com a energia convencional.

Comparando-se os valores anuais de uma unidade de energia fornecida pelo sistema de energia solar com o custo unitário de energia convencional, pode-se identificar o tipo de energia com o custo mais baixo.

c) Vantagens, desvantagens e aplicações indicadas pelo método de análise da vida útil econômica.

De acordo com RUEGG & SAV (1980), este método é eficiente para se determinar se um sistema de energia solar pode reduzir os custos totais dos gastos energéticos de uma determinada aplicação. Também é útil para se determinar o tamanho ideal em termos econômicos de um sistema solar, mostrando os impactos positivos e negativos de um investimento em termos de vida útil do equipamento.

Teoricamente o tamanho de um projeto em energia solar só deveria ser aumentado se o retorno naquele investimento fosse maior ou igual ao retorno econômico fornecido por outros tipos de investimentos disponíveis.

O método de análise econômica da vida útil é freqüentemente usado para comparações globais entre projetos de fonte alternativa e entre esta e o fornecimento de energia convencional. Este método é usado ainda para se determinar qual seria o tamanho economicamente viável de um modelo de fonte alternativa que pudesse competir com o sistema convencional (RUEGG & SAV, 1980).

2.8.1.2 Método do Custo/Benefício

Este método de análise em investimentos refere-se à relação econômica entre os custos totais de investimentos e os benefícios que serão alcançados, ambos traduzidos em valores anuais equivalentes. Como no método abordado anteriormente, este método está baseado nas taxas econômicas sobre os investimentos financeiros de mercado, porém expressa a relação entre investimentos e economias provenientes ao invés de valores quantitativos de dinheiro (SILVA et al, 2000).

Segundo estes autores, o critério que indica se as aplicações serão convenientes é quando se obtém um coeficiente igual ou inferior a 1 na relação entre os investimentos totais e os benefícios que serão obtidos, e que a ampliação do projeto possa ser feita até que se iguale ao coeficiente 1, quando então os custos estarão equiparados aos benefícios. Com este método é possível verificar se a alternativa é viável.

Este método oferece a vantagem de ter noção da rentabilidade de um investimento em termos qualitativos durante sua vida útil esperada, permitindo comparar projetos independentes entre si e classificando a rentabilidade de um investimento. No entanto este método não consegue determinar o tamanho ótimo economicamente de um projeto, porque o benefício tende a cair com o aumento do valor do investimento.

2.8.1.3 Método do Retorno do investimento

Este método de avaliação mede o tempo decorrido entre o ponto de investimento inicial e o ponto no qual este investimento terá tido seu retorno e, comparando com os custos da energia convencional, se é um investimento viável do ponto de vista econômico.

A principal vantagem deste método é sua facilidade de interpretação por qualquer pessoa. Sua atração também está no fato de que permite enfatizar a recuperação rápida de fundos de investimentos na medida em que analisa o tempo de retorno deste investimento, o que é mais interessante a investidores especulativos. Também, pode ser uma ferramenta importante a outros investidores, cujos recursos financeiros estejam disponíveis apenas por um determinado período de tempo, ou se há incertezas quanto à vida útil dos equipamentos nos quais os recursos foram aplicados. Porém, há uma dedicação exagerada na questão do tempo do retorno e pouca importância na rentabilidade global do investimento. Comparando-se diferentes alternativas dentro do investimento, pode-se reduzir muito seu período de retorno e,

conseqüentemente, podendo conduzir a decisões de investimentos ineficientes porque uma aplicação com um período de retorno maior pode ser muito mais lucrativo que um investimento com um tempo de retorno mais curto (RUEGG & SAV, 1980).

2.8.2 Conversão de custos e aplicações para um mesmo período de referência

Para estes autores, um passo necessário em cada um dos métodos de avaliação econômica citados é o ajuste dos vários tipos de custos a uma base de tempo equivalente ou comum. Este ajuste é necessário porque um investimento em energia solar resulta em despesas e benefícios que acontecem tanto no tempo presente quanto no tempo futuro, e há uma diferença entre o valor de uma moeda hoje e seu valor em algum momento futuro.

2.8.2.1 Tratamento da inflação

A remoção da inflação dos fluxos monetários é essencial para uma avaliação econômica válida em um investimento. Excluir a inflação significa medir o dinheiro em termos fixos de poder aquisitivo em um ano básico, o período no qual, geralmente, a decisão de investir será tomada. Há vários modos de se remover a inflação de fluxos monetários, resumidamente são eles: (1) excluir a inflação da análise logo de início, assumindo que todos os fluxos monetários são completamente e uniformemente alterados pela inflação de uma forma homogênea, permanecendo, desta forma, constantes em termos financeiros durante o ano base e (2) levar em conta que o valor esperado se altere de acordo com estimativas prévias de inflação e então aplicar um fator que altere estes valores para valores reais no final do ano base (HIRSCHEFELD, 1996).

A escolha de atualizações depende em parte do padrão esperado de mudança de preço, sendo que a atualização mais simples é a primeira, ou seja, omitir a inflação na análise, permitindo que o resultado fique desta forma inalterado. Esta é uma forma de estimativa que na prática é amplamente aceita em análises que levam em conta a vida útil de equipamentos que necessitem de investimentos.

2.8.3 Custos dos Sistemas Fotovoltaicos

2.8.3.1 Custos dos Módulos Fotovoltaicos

Segundo conclusões do VI Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis (1998), a redução de preço dos módulos fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino era prevista tendo por base no aumento do rendimento energético (em laboratório 22%, e em fabricação comercial 14% em média), a diminuição da espessura e do desperdício na fabricação da célula e a otimização do custo de produção via novas técnicas e, também, agregando os benefícios de economia de escala.

Atualmente, a capacidade anual de fábricas de módulos fotovoltaicos é da ordem de 1 a 3 MWp, representando efetivamente linhas de produção piloto. A escala econômica de produção anual para uma planta industrial fotovoltaica é cerca de 25 MWp, segundo o Triangle Research Institute. (2000)

De acordo com o VI Encontro do Fórum Permanente de Energias Para o Fórum, a produção mundial de módulos em 1995 foi de 75 MWp, a partir de um crescimento de 15%. A figura 5 mostra a evolução da produção mundial de módulos nos últimos sete anos e a figura 6 ilustra com um gráfico a redução dos preços do Wp dos módulos fotovoltaicos para o período de 1980-1993, e a projeção até 2005.

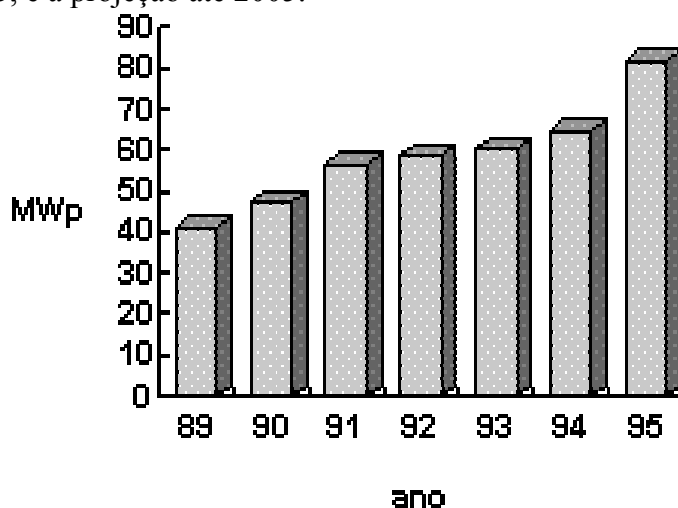


Figura 5. Produção mundial de módulos em MWp.

Fonte: DERRICK A, 1993.



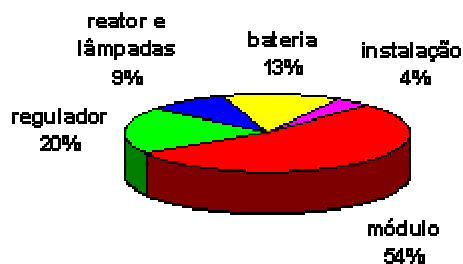
Figura 6. Redução do preço do Wp dos módulos fotovoltaicos.

Fonte: DERRICK A., (1993).

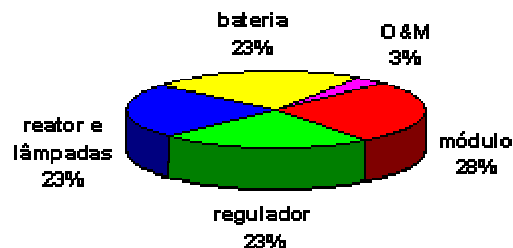
2.8.3.2 Elementos Periféricos

Em sistemas fotovoltaicos autônomos, o Brasil tem o maior potencial de produção industrial entre os países latino-americanos. Existe uma indústria eletro-eletrônica capaz de produzir os elementos auxiliares. A indústria de acumuladores automotivos está bem desenvolvida e, portanto, poucos investimentos são requeridos para a produção de acumuladores adaptados a energização rural fotovoltaica.

Com o objetivo de ilustrar os custos, considera-se uma residência familiar rural possuidora de iluminação, de rádio e televisão, (existem atualmente no Brasil aproximadamente quatro milhões de residências sem eletrificação). As figuras 7a e 7b representam, respectivamente, a composição do custo inicial (investimento) e anualizado do sistema fotovoltaico, admitindo o preço médio do módulo no mercado nacional de US\$ 9/Wp e considerando a vida útil de cada componente (20 anos para módulos, 4 anos para baterias, 10 anos para reguladores de carga, 5 anos para reatores eletrônicos e 2 anos para lâmpadas) a uma taxa de desconto de 10% ao ano.



a) Custo Inicial



b) custo anualizado

Figura 7. Composição do custo inicial e anualizado de sistemas fotovoltaicos

Fonte: Heliodinâmica (2001)

O preço do módulo na composição do investimento inicial é o mais importante (54%), sendo que para os custos anualizados, os elementos periféricos passam a representar a parcela mais significativa (69%), já que não há mais investimentos com os módulos e sim em reposições destes outros elementos.

O elevado custo dos elementos periféricos resultam também da ambígua definição de objetivos dos projetos de demonstração. Para os que lideram, geralmente empresas do setor elétrico, estes projetos são um meio para aprender a engenharia de um produto supostamente disponível. Como consequência os projetos são caros pelo seu tamanho, e sua estrutura não está voltada para inovar nem para aprender com os erros. Para os fabricantes de células e módulos as demonstrações constituem um meio para aumentar suas linhas de fabricação criando economia de escala, e inclusive para lançar novos produtos. Para os fabricantes de elementos periféricos, as demandas ainda pontuais não justificam alteração em suas linhas de produção, para a adaptação de seus produtos à tecnologia fotovoltaica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O desempenho de um programa computacional específico depende da disponibilidade de dados solares válidos e completos do local de análise. Assim, a previsão de energia solar disponível será feita através de algoritmos que indicam a radiação coletada por uma superfície tendo um ângulo de orientação e um ângulo de inclinação, para qualquer local sobre a superfície da Terra e em qualquer período do ano. Um local é caracterizado por sua latitude e sua longitude.

As equações que foram usadas para estimar a energia solar disponível, como método de cálculo, estão propostas pelo método proposto por FADIGAS (1993).

Pelo lado da demanda, a energia e a potência solicitadas serão calculadas das especificações das cargas em corrente contínua e em corrente alternada que serão alimentadas pelos módulos fotovoltaicos. No modelo existirão um arquivo de dados de cargas elétricas, bombas, etc e um arquivo de dados com os principais tipos de módulos fotovoltaicos disponíveis, inversores e controladores de carga.

3.1 Linguagem Visual Basic

A linguagem computacional escolhida para o desenvolvimento do software, que proporcionará o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos para uso em comunidades rurais é a Visual Basic, versão 6.

Considerando-se que esta linguagem nasceu de uma das primeiras linguagens de computadores, a Basic, ela mantém-se estruturada em suas extensões de nome de arquivos e convenções de nomenclatura de objetos padrões que possibilitam o acesso e manuseio por outros programadores de forma fácil e segura, sem a necessidade de se conhecer caracteres e definições complexas ou exclusivas para cada tarefa realizada.

Também, sabendo-se que um dos objetivos deste trabalho é possibilitar o acesso ao programa por pessoas com pouco ou nenhum conhecimento em informática, faz-se necessário à elaboração de uma interface simples, atraente e, principalmente, objetiva, facilitando o trabalho de inserção de dados e da coleta das informações desejadas, o que é obtido facilmente com esta linguagem.

De maneira geral, o Visual Basic é uma linguagem de programação Visual orientada a objetos (a partir da versão 4.0). Até a versão 3.0 ele era orientado a eventos, ou seja, com o Visual Basic em suas versões mais recentes é possível fazer programas para o sistema operacional Windows utilizando programação orientada a objetos (OOP).

Objetos são elementos definidos por Classes, as quais possuem Propriedades, Métodos e Eventos. Uma janela, um botão e um banco de dados são objetos.

Classes são os moldes dos objetos, definindo suas propriedades, seus métodos e seus eventos. Uma janela é muito diferente de um botão, mas os dois são objetos. Isso acontece porque eles são definidos por Classes diferentes.

Na maioria dos casos, a linguagem Visual Basic justifica-se por várias razões:

- Facilidade de uso: é muito mais fácil e produtivo desenvolver um aplicativo em Visual Basic;
- Melhor suporte e produtos de terceiros: consegue-se um controle personalizado para qualquer tipo de necessidade, pois a indústria tem como maior foco o Visual Basic.
- Acesso a banco de dados: é muito mais fácil no Visual Basic

3.2 Modelo “NAD”

O modelo “NAD” (Number of Autonomus Day ou Número de Dias Autônomos) constitui-se numa metodologia convencional de dimensionamento de sistemas de geração autônomos com armazenamento de energia.

Para sistemas fotovoltaicos, através do conhecimento da distribuição mensal da radiação solar incidente no plano coletor, determina-se a potência disponível utilizando a radiação solar média diária do mês menos favorável, ou seja, o mês que apresenta o menor índice de radiação solar, garantindo assim o atendimento da energia diária requerida.

A energia gerada pelo painel varia em função do ângulo de inclinação do Sol. Assim em painéis fixos, sem o rastreamento do Sol, deve-se calcular o ângulo de inclinação para que o painel receba energia solar de maneira maximizada com o transcorrer do ano.

A capacidade das baterias é determinada em decorrência da frequência dos dias de menor radiação ou da quantidade de dias nublados durante o transcorrer de um período de um ano e dos dias de armazenamento desejado (FADIGAS, 1993).

3.3 Estimativa da radiação solar

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos necessita de dados referentes à radiação solar do local onde serão instalados os painéis. Estas informações podem ser de estações solarimétricas, que fornecem dados da radiação solar no plano horizontal na frequência média mensal (FADIGAS, 1993).

A partir destes dados é possível estimar as radiações diárias ou ainda horárias, permitindo com isto avaliar o desempenho do equipamento em condições mais próximas da realidade, pois levam em conta as variações no comportamento dos componentes estudados.

A radiação emitida pelo Sol cobre comprimentos de onda desde 100nm (0,1 μm) até cerca de 8.000nm (8 μm) sendo que seu comprimento de onda característico (comprimento de onda de maior intensidade emissiva) é de 550 nm (0,55 μm) correspondente à cor verde.

As células fotovoltaicas de Si absorvem fótons com energia igual ou superior a 1,127 eV, correspondendo a comprimentos de onda de até 1,1 μm . Portanto, fótons com comprimentos de onda superiores a este valor não são capazes de gerar eletricidade, apenas aquecem as células. Assim, verifica-se que, apenas por este motivo, as células solares mais comuns não são capazes de absorver cerca de 30% da energia solar que incide sobre elas (OLIVEIRA, 1997).

3.3.1 Radiação solar no plano coletor

A radiação solar incidente em um plano horizontal na superfície da Terra varia com as estações do ano, devido principalmente à inclinação de seu eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do Sol. Varia também de acordo com a região, função, principalmente, das diferenças de latitude, condições meteorológicas e altitudes. Com condições atmosféricas ótimas, ou seja, com céu claro, sem nenhuma nuvem, a iluminação máxima observada ao meio-dia num local situado ao nível do mar se eleva a 1 kW/m² (FADIGAS, 1993).

A radiação proveniente do Sol, ao atravessar a atmosfera, é submetida à ação de seus componentes. Parte da radiação solar, em decorrência da interferência da atmosfera é absorvida e refletida (ação do ozônio, oxigênio, vapor d'água e outros) e parte é dispersa (através da ação de moléculas dos elementos químicos presentes, gotas de água, poeira em suspensão, etc).

Com isto a radiação global que atinge um plano localizado na superfície terrestre pode ser decomposta basicamente duas componentes principais e numa terceira, em geral, de menor expressividade: componente direta, componente difusa e a de albedo. A primeira é constituída pelo feixe que sai do Sol e atinge diretamente a superfície terrestre. A segunda é a radiação proveniente de todo o céu, com exceção do disco solar. Esta radiação, espalhada por todo o céu, é constituída pela radiação que é dispersada e absorvida pelos elementos da atmosfera. A terceira é constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo, denominada radiação de albedo. Esta componente em geral não é significativa nas aplicações de interesse deste trabalho.

Regiões de latitudes expressivas, onde há neve em abundância, os índices de refletividade variam entre 0,70 e 0,80, podendo chegar a 0,98, o que torna a radiação de albedo relevante (solos em geral apresentam uma refletividade entre 0,20 e 0,25, podendo chegar a 0,35 para o concreto descolorido (RUTHER & KLEISS, 1996).

3.3.2 Direção da Radiação Direta

A posição relativa entre um plano qualquer situado na superfície da Terra e o Sol é determinada em função de uma série de ângulos, cujas expressões para cálculo foram obtidas de LIU & JORDAN (1962). A figura 8 ilustra a direção dos ângulos solares mais comumente utilizadas.

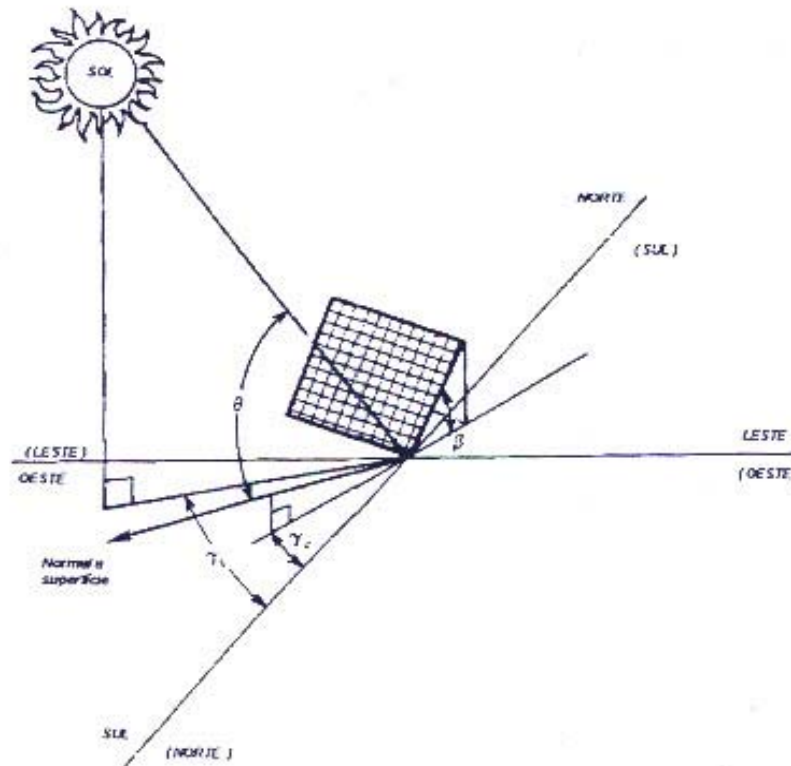


Figura 8: Ângulos solares

A latitude, ϕ , é a distância angular medida sobre a superfície da Terra a partir do equador até o ponto em questão. É considerada positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério sul.

A declinação, δ , é a posição angular do Sol ao meio dia, em relação ao plano do equador. Quando o sol está ao norte do equador, a declinação é positiva, caso contrário, negativa. Ela é dada pela equação (1).

$$\delta = 23,45 \sin \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (1)$$

Onde n é o dia do ano (de 1 a 365). O valor 23,45 corresponde à inclinação do Sol sobre seu eixo imaginário que aponta para a Estrela Polar ($23^{\circ}27'8''$).

A inclinação, β , de uma superfície é o ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal do local. $0 < \beta < 180^\circ$.

O ângulo azimutal, γ , é a distância angular entre a projeção da normal ao plano na horizontal e o meridiano local. O ângulo azimutal é igual a zero quando a superfície está voltada para o sul, negativa para leste e positiva para oeste.

O ângulo de incidência, θ , é o ângulo entre o feixe da radiação direta que incide no plano e a reta normal ao mesmo.

O ângulo zenital, θ_z é o ângulo entre o feixe de radiação e a vertical do local, θ_z coincide com θ quando o plano está na horizontal.

O ângulo horário, ω , é a distância angular entre o feixe solar e o meridiano local. Ele é considerado negativo no período da manhã (Sol antes do meridiano local) e positivo no período da tarde. Cada hora do dia corresponde a uma variação de 15° em ω .

A altura solar, h , é o ângulo entre a radiação direta e o plano horizontal. É numericamente igual a $90 - \theta_z$.

Para determinar o ângulo de incidência da radiação direta em uma superfície qualquer, θ , pode-se utilizar a expressão (2):

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \\ & \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \end{aligned} \quad (2)$$

Para casos de especial interesse estas expressões podem ser simplificadas:

a) Para uma superfície virada para o equador, para o qual $\gamma=0$,

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \cos\gamma \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta + \sin\delta \cdot \cos\beta \\ = & \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \end{aligned} \quad (3)$$

b) Para uma superfície vertical virada para o equador, para o qual $\gamma=0$ e $\beta=90$

$$\cos\theta = \cos\gamma \cdot \cos\alpha = -\sin\delta \cdot \cos\varphi + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\omega \quad (4)$$

c) Para uma superfície horizontal, para o qual $\beta=0$

$$\cos\theta = \sin\alpha = \sin\varphi.\sin\delta + \cos\varphi.\cos\delta.\cos\omega \quad (5)$$

Para calcular θ_z basta fazer a inclinação β do plano igual a zero, neste caso, $\theta = \theta_z$. Assim chegamos à seguinte expressão:

$$\cos \theta_z = \cos\delta.\cos\varphi.\cos\omega - \sin\delta.\sin\varphi \quad (6)$$

Em alguns casos, é importante conhecer o ângulo horário do por ou nascer do Sol, ω . Para tal utiliza-se a seguinte expressão:

$$\omega'_s = - \arccos.(-\operatorname{tg}\delta.\operatorname{tg}\varphi) \quad (7)$$

O ângulo horário de saída do Sol ou por do Sol sobre uma superfície com inclinação de β graus com a horizontal, $\omega_s \beta$, pode ser encontrado através da seguinte expressão:

$$\omega_s \beta = - \arccos.(- \operatorname{tg}\delta.\operatorname{tg}(\varphi-\beta)) \quad (8)$$

O número de horas, n , que o Sol ficará acima do horizonte da superfície analisada ou a quantidade de horas de Sol no dia (insolação) é dado por:

$$N = \frac{2}{15}.\arccos.(\omega_s) \quad (9)$$

3.3.3 Radiação extraterrestre

As variações na radiação total emitida pelo sol são inferiores a 1,7%. Pode-se dizer, com razoável precisão, que a radiação incidente no topo da atmosfera depende apenas da distância entre o Sol e a Terra, que pode ser aproximada por:

$$R=R_0\left[1-0,0167\cos\left(\frac{360.d_n}{365}\right)\right] \quad (10)$$

onde $R_0 = 1,495 \times 10^8$ km e d_n é o dia do ano compreendido entre 1 e 365.

Define-se como irradiância extraterrestre média diária, $G_{0,d}$, como sendo o fluxo de radiação incidente em uma superfície unitária, disposta perpendicularmente ao feixe, localizada no topo da atmosfera terrestre à distância de 1 u.a do Sol, em um determinado dia. Para estabelecer o seu valor, utiliza-se a constante solar, G_{sc} , e o dia do ano. Sabe-se ainda que a irradiância sobre uma superfície normal à direção dos raios solares varia inversamente com o quadrado da distância entre a superfície e o Sol. Para um dia qualquer do ano, d_n , a irradiância fora da atmosfera pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$G_{0,dn} = G_{sc} \left[1 + 0,0167 \cdot \cos \left(\frac{360 d_n}{365} \right) \right]^2 \cdot \cos \theta_z \quad (11)$$

onde $G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$

Ao desprezar os termos de segunda ordem encontramos:

$$G_{0,dn} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 d_n}{365} \right) \right] \cdot (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (12)$$

onde $G_{0,dn}$ é a irradiação no plano horizontal incidente no dia d_n , no topo da atmosfera, G_{sc} é a constante solar e θ_z o ângulo zenital.

3.3.4 Tratamento da radiação

O objetivo desta seção é estudar o comportamento da incidência da radiação solar na superfície terrestre e estabelecer as bases para serem determinados o valor médio da irradiação solar incidente sobre uma superfície inclinada para qualquer mês do ano.

Em primeiro lugar, calcula-se a irradiância extraterrestre horizontal diária, através da integração da equação (11).

A irradiância horizontal incidente no topo da atmosfera é integrada, multiplicando-se pelo cosseno do ângulo zenital, desde o nascer até o pôr do Sol.

$$H_0 = 2 \cdot \int_0^{\frac{24\omega_s}{\pi}} G_{0,ds} \cdot \cos \theta_z dt \quad (13)$$

dado t (horas) = $\left(\frac{\omega}{\pi}\right)$ (radianos). A partir da expressão para cálculo do cosseno de θ_z chega-se à expressão (14).

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 d_n}{365} \right) \right] x \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (14)$$

Ela determina a quantidade de energia incidente em uma superfície unitária horizontal situada no topo da atmosfera. Esta expressão fornece o resultado em MJ/m² caso G_{sc} seja dado em W/m². Se for necessário obter o resultado em kWh/m², basta dividir o resultado obtido por 3,6.

O índice de claridade atmosférica, K_t é definido como sendo a relação entre a irradiação incidente na superfície terrestre, $H(0)$ e a irradiação no topo da atmosfera, H_0 . Podemos assim, quantificar a interferência que a radiação solar sofre ao passar pela atmosfera. Matematicamente, K_t é definido pela seguinte expressão:

$$K_t = \frac{H(0)}{H_0} \quad (15)$$

Onde $H(0)$ é a irradiação diária média que incide no plano horizontal na superfície terrestre, obtida por instrumentos especiais como o heliógrafo

A irradiação difusa presente no céu local, pode ser obtida a partir do estabelecimento do fator de irradiação difusa ou proporção de difusa, k_d , mediante a expressão:

$$H_d(0) = K_d \cdot H(0) \quad (16)$$

Um modelo para determinação de K_d foi proposto por COLLARES-PEREIRA & RABI (1979), através do qual é possível se caracterizar cada mês com um valor específico, calculando-se o valor médio da grandeza para um determinado mês, ou utilizar, para o cálculo, o valor no dia médio do mês. As equações (17) representam as expressões obtidas para os casos em que ω_s seja fornecido em graus (17.a) ou quando ω_s é dado em radianos (17.b).

$$K_d = 0,775 + 0,00606 \cdot (\omega_s - 90^\circ) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_s - 90^\circ)] \cdot \cos[114,6(k_t - 0,9)] \quad (17.a)$$

$$K_d = 0,775 + 347 \cdot \left(\omega_s - \frac{\pi}{2} \right) \quad \omega_s - \frac{\pi}{2}$$

3.3.5 Radiação média incidente em superfície inclinada

O método para calcular a radiação diária média mensal foi desenvolvido por LUI e JORDAN (1962) e aperfeiçoado por KLEIN (1977).

A transmitância atmosférica (R_b) para um dado local é a relação da radiação solar diária média mensal interceptada por uma superfície inclinada num dado local com a radiação solar diária média mensal interceptada por uma superfície horizontal. Ela é dada pela equação (18)

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_s + (\omega'_s \cdot \pi / 180) \cdot \sin(\phi + \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_s + (\omega'_s \cdot \pi / 180) \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta} \quad (18)$$

onde ω'_s é dado pela seguinte expressão:

$$\omega'_s = \min \left[\frac{\cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta)}{\cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \cdot \tan \delta)} \right] \quad (19)$$

Existe uma parte da radiação incidente que é refletida pelo solo terrestre. Esta componente não é muito significativa para o caso dos sistemas fotovoltaicos autônomos. Ela é mais relevante quando o sistema é dotado de células bifaciais ou de células de silício amorfo, principalmente se estiverem orientadas verticalmente (RUTHER & KLEIS, 1996).

Para determinar a irradiação média incidente em um plano com inclinação qualquer, o modelo considerado utiliza a expressão (20), composta basicamente pela irradiação direta incidente na superfície terrestre.

$$\bar{H}(\beta) = \bar{H} \left(1 + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \quad (20)$$

Onde H_d pode ser obtido experimentalmente, através de um piranômetro dotado de anel sombreador, ou multiplicando-se a irradiação global sobre uma superfície horizontal por K_d , obtido através das equações aqui apresentadas e $\bar{H}$ é a radiação média mensal obtido dos centros de pesquisa meteorológicas.

3.3.6 Dados de Radiação

O dimensionamento do sistema fotovoltaico e os cálculos solares basearam-se em dados de radiação média mensal fornecidos pelo Cepagri – Unicamp (Centro de Pesquisas Agropecuárias) nos anos de 1995 a 2000 conforme a tabela 1. Estes dados não são usados pelo programa, apenas foram utilizados para se proceder a uma comparação com os dados calculados.

Tabela 1. Radiação média mensal kWm^2/dia (Cepagri – 1995 a 2000)

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1995	5,89	5,57	5,23	4,12	3,56	4,56	4,67	5,05	4,87	5,34	5,43	5,98
1996	5,78	5,65	5,19	4,05	3,54	4,34	4,87	5,01	4,81	5,37	5,38	5,89
1997	5,85	5,76	5,12	4,09	3,47	4,33	4,67	5,04	4,83	5,41	5,43	5,99
1998	5,89	5,84	5,06	3,96	3,42	4,23	4,78	4,94	4,78	5,4	5,41	6,06
1999	5,84	5,67	5,05	4,02	3,44	4,32	4,74	5,01	4,82	5,43	5,39	5,97
2000	5,93	5,78	5,04	3,97	3,38	4,22	4,76	4,97	4,76	5,39	5,43	6,01

Fonte: Cepagri (2001)

3.4 Operação dos módulos fotovoltaicos

Dois métodos de operação dos módulos fotovoltaicos serão indicados pelo programa:

- a) painéis fixos, sem alteração no ângulo de inclinação e orientação
- b) ângulo de inclinação variável e orientação fixa de acordo com as estações do ano

A tabela 2 apresenta as posições recomendadas para maximizar a coleta de radiação solar pelos módulos fotovoltaicos para as duas operações consideradas.

Tabela 2: Ângulo e orientação dos módulos solares de acordo com os modos de operação.

<i>Modos de Operação</i>	<i>Ângulo dos Painéis</i>	<i>Orientação (graus)</i>
Ângulo e Orientação fixos	Latitude do local	0°
Orientação fixa e ângulo ajustado de acordo com as estações do ano	Primavera: latitude do local	0°
	Verão: latitude do local – 15	0°
	Outono: latitude do local	0°
	Inverno: latitude do local + 15	0°

Fonte: Boily (1998)

Para o primeiro modo, o ângulo e orientação são fixos. Sob estas condições, o ângulo é igual à latitude do local de instalação para maximizar a energia solar coletada pelos módulos fotovoltaicos. A orientação é colocar os módulos voltados para o Sul no hemisfério norte e voltados para o Norte no hemisfério sul.

Para o segundo modo, o ângulo é ajustado quatro vezes ao ano. Os ajustes do ângulo mantêm os módulos voltados para o Sol, maximizando a energia coletada evitando os altos custos dos mecanismos que localizam automaticamente o Sol.

3.5 Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos

Considerada a eficiência de cada dispositivo elétrico, a energia a ser gerada pelos painéis fotovoltaicos será estimada através da potência exigida e do período de operação de carga, conforme as equações (20) e (21).

$$CE_{dc} = \Sigma (P_{dc} * H_{dc}) \quad (21)$$

onde:

CE_{dc} = Consumo diário de energia dc (kWh)

P_{dc} = Potência das cargas dc utilizadas pelo usuário (kW)

H_{dc} = Total de horas no dia em que as cargas dc são utilizadas (h)

$$CE_{ac} = [\Sigma P_{ac} * H_{ac}] / \eta_{inv} \quad (22)$$

onde:

CE_{ac} = Consumo diário de energia ac (kWh)

P_{ac} = Potência das cargas ac utilizadas pelo usuário (kW)

H_{ac} = Total de horas no dia em que as cargas ac são utilizadas (h)

η_{inv} = Eficiência do inversor DC – AC (0,7 a 0,8)

O total de energia diária a ser requisitada do sistema fotovoltaico será:

$$CDT = FS * (CE_{dc} + CE_{ac}) \quad (23)$$

onde:

CDT = Energia diária de energia (kWh)

FS = Fator de segurança para perdas

Um coeficiente de 1,2 é normalmente utilizado para um projeto preliminar de sistemas fotovoltaicos (BOILY, 1998).

O tipo e o número de módulos e sua configuração são determinados através do estabelecimento da tensão nominal do sistema, da corrente de pico e da potência total.

O método mais difundido para dimensionamento é o do número de dias de armazenamento desejado ou número de dias nublados consecutivos (frequência máxima). Neste método, a potência instalada, a capacidade de armazenamento das baterias, o número de módulos em série e em paralelo são determinados, respectivamente, pelas expressões (24), (25) ou (26), (27) e (28).

a) Potência a ser instalada

$$PI = CDT / NH \quad (24)$$

onde:

PI = Potência a ser instalada pelos painéis fotovoltaicos (kW)

NH = Número de horas de máxima radiação solar (h) : tempo equivalente diário que o módulo estará drenando sua máxima corrente a uma irradiação de 1000 W/m²

b) Baterias

$$CAB = \frac{CDT * DA}{\frac{DB}{100} * \eta_{inv}} \quad (25)$$

onde:

CAB = Capacidade de armazenamento ou reserva das baterias (kWh)

DA = Número de dias sem radiação solar (dias de armazenamento)

DB = Amplitude de descarga das baterias (%)

ou em Ah, Cab é dado por:

$$CAB2 = \frac{CAB \times 1000}{V} \quad (26)$$

onde:

V = tensão nominal da bateria (Volts)

c) Módulos

Paralelo

$$NMP = \frac{IC}{IGP} \quad (27)$$

onde:

NMP = Número de módulos em paralelo

IC = Corrente máxima das cargas (A)

IGP = Corrente média gerada pelos painéis (A)

Série

$$NMS = \frac{VC}{VGP} \quad (28)$$

onde:

NMS = Número de módulos em série

VC = Tensão requerida pelas cargas (V)

VGP = Tensão fornecida pelos painéis (V)

O número total de painéis e a área ocupada pelos mesmos são dados, respectivamente, pelas expressões (29) e (30).

Número total de painéis

$$NTP = NMP * NMS \quad (29)$$

onde:

NTP = Número total de painéis a ser utilizado pelo sistema

Área ocupada pelos painéis

$$AO = AP * NTP \quad (30)$$

onde:

AO = Área total a ser ocupada pelos painéis (m²)

AP = Área ocupada por um painel (m²)

3.6 Dimensionamento do Grupo-Gerador com Sistemas de Armazenamento de Energia

Para aplicação a pequenas comunidades isoladas, alimentadas com tensão CA, a seguinte configuração de sistema foi analisada, conforme a Figura 9.

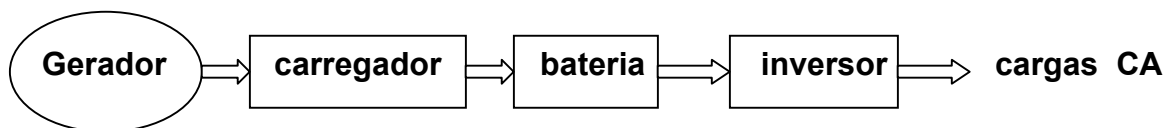


Figura 9. Configuração do sistema grupo-gerador

Para dimensionamento do grupo-gerador e sistema de armazenamento, os seguintes dados são necessários:

DE = demanda diária de energia (kWh)

D = dias de armazenamento

N = número de horas diárias de funcionamento do grupo-gerador

3.6.1 Dimensionamento das baterias

A capacidade das baterias é determinada pela seguinte expressão:

$$Wb = \frac{DE \times D}{AD \times \eta_i} \quad (31)$$

onde

Wb = capacidade das baterias (kWh)

DE = demanda diária de energia (kwh)

D = dias de armazenamento desejado (dias em que o grupo-gerador está fora de operação por defeito ou falta de combustível)

η_i = rendimento do inversor (decimal)

3.6.2 Dimensionamento do grupo-gerador e carregador de bateria

a – Escolha da potência do carregador de bateria

$$PC = \frac{DE}{\eta_i \times \eta_B \times N} \quad (32)$$

onde

PC = potência do carregador (kW)

η_B = rendimento da bateria (decimal)

N = numero de horas diárias de funcionamento do grupo-gerador

b – Escolha da potência do grupo-gerador

$$PR = \frac{PC}{\eta_c} \quad (33)$$

onde

PR = Potência do Grupo-Gerador

η_c = rendimento do carregador (decimal)

c – Cálculo do fator de capacidade

$$FC = \frac{PR \times N \times 365}{PR \times 8760} \quad (34)$$

onde

FC = fator d capacidade do grupo-gerador

365 = número de dias do ano

d – Cálculo da energia anual gerada

$$EGano = PR \times FC \times 8760 \times DI \quad (35)$$

onde

EGano = energia anual gerada (kWh)

DI = fator de disponibilidade do sistema (FECxDEC)

3.7 Análise econômica

Uma avaliação econômica dos sistemas de energia solar requerer uma análise dos seguintes custos durante a vida útil total do sistema: (1) investimentos iniciais no sistema, inclusive elaboração e execução dos projetos, além da compra e instalação dos componentes necessários; (2) custos provenientes da adaptação das construções existentes para receber o sistema de energia solar; (3) custos de manutenção; (4) custos de seguro e (5) custos de impostos (COSTA et al, 2000)

Alguns tipos de custos podem ser difíceis de quantificar, como os custos de mão de obra, custos de materiais utilizados na instalação, alteração das estruturas já existentes para comportar o novo sistema (se for o caso) e outros custos menores; desta forma é comum definir-se uma proporção relativa destes custos sobre os custos totais do investimento.

Levando-se em consideração que os benefícios gerados pela energia elétrica são idênticos se provenientes de fontes convencionais ou gerados por painéis fotovoltaicos, o objetivo desta análise econômica será o de identificar os custos de algumas alternativas usadas para atender as necessidades de energia da comunidade rural.

Esta análise implicará na mensuração de todos os custos envolvidos, correspondendo ao desembolso necessário às suas instalação e utilização, enquanto que a mensuração dos benefícios corresponderá ao valor esperado da produção da energia elétrica, segundo Fadigas (1993).

Destaca-se que esta análise econômica refere-se a uma demanda estável, sem acréscimos nos requisitos energéticos no decorrer do período, bem como não se leva em consideração os aumentos anuais dos custos de operação, de combustíveis e da tarifa de energia elétrica, tendo em vista que o objetivo básico deste projeto é o de dimensionamento para instalação de sistema fotovoltaico.

Uma das principais questões referentes à energia solar é como compará-la economicamente com outras fontes de energia, tanto alternativas quanto com a convencional (Rede Elétrica).

Historicamente, novos produtos que são colocados no mercado só conseguem se manter se forem economicamente mais vantajosos que os similares já existentes ou então apresentarem uma tecnologia superior as já conhecidas. No que se refere à energia solar, ela ainda não tem se mantido no mercado, apesar da existência de nichos de mercados, pois seu custo ainda é muito superior às tecnologias existentes, principalmente quando comparado com a energia convencional, ao menos que o sistema seja favorecido por incentivos governamentais.

3.7.1 Custo de investimento

Representa o capital necessário para se construir uma alternativa de geração. Considerando que os investimentos são concentrados no ano inicial de operação da alternativa, o investimento inicial é dado pela somatória dos investimentos individuais de cada componente do sistema que, para o sistema fotovoltaico são: painéis, reguladores de carga, bateria, inversor, suporte, fios, etc. Para a rede elétrica, o investimento inicial é calculado com base nos custos das linhas e componentes associados (transformador, postes, chaves de

proteção e outros) e para o grupo gerador são considerados: o próprio grupo-gerador, bateria e inversor.

O investimento inicial de cada componente das alternativas a serem analisadas é calculado pelas seguintes expressões:

1- Sistema fotovoltaico

a) Painéis

$$INV_P = C_{NP} * P_I \quad (37)$$

onde:

INV_P = Investimento inicial dos painéis fotovoltaicos (US\$)

C_{NP} = Custo unitário da potência instalada (inclui módulos, estrutura de sustentação, fixação e demais componentes auxiliares) (US\$/kW)

P_I = Potência instalada (kW)

b) Inversor

$$INV_I = C_{NI} * P_{TI} \quad (38)$$

onde:

INV_I = Investimento inicial do inversor (US\$)

C_{NI} = Custo unitário do inversor (US\$/kW)

P_{TI} = Potência do inversor (kW)

c) Bateria

$$INV_B = C_{NB} * C_{AB} \quad (39)$$

onde:

INV_B = Investimento inicial das baterias (US\$)

C_{NB} = Custo unitário das baterias (US\$/kWh)

C_{AB} = Capacidade de armazenamento da bateria (kWh)

2- Grupo Gerador

a) Grupo-Gerador

$$INVGG = CNG * PIGG \quad (40)$$

onde:

INVGG = Investimento inicial do grupo- gerador (US\$)

CNG = Custo unitário da potência instalada (inclui grupo-gerador, instalação e componentes auxiliares) (US\$/kW)

PIGG = Potência instalada (kW)

b) Bateria e Inversor

O investimento inicial da bateria e do inversor é calculado da mesma forma como indicado para o sistema fotovoltaico.

3- Rede elétrica

$$INVRE = CNKM * DST \quad (41)$$

onde:

INVRE = Investimento inicial da rede elétrica (US\$)

CNKM = Custo por km das linhas e equipamentos instalados (US\$/km)

DST = Comprimento da rede (km)

4- Custos de reposição

De uma forma geral, para os componentes que possuem vida útil inferior ao horizonte de comparação, faz-se necessário calcular o custo de reposição dos mesmos. O valor presente do investimento de cada componente do sistema analisado considerando sua reposição é calculado pela seguinte expressão:

$$VP_i = INV_i * \left(1 + \sum \frac{1}{(1+x)^{N_i * r}} \right), r = 0,1,2,3... (N_i * r) < H \quad (42)$$

onde:

VP_i = Valor presente do investimento da componente i do sistema analisado (US\$)

INV_i = Investimento inicial do componente i (US\$)

x = Taxa de desconto (decimal)

N_i = Vida útil da componente em questão (anos)

H = Horizonte de comparação (anos)

5- Valor atual

O valor atual dos custos totais de investimento da alternativa em questão é dado pela somatória do valor atual do investimento de cada componente do sistema acrescido dos custos indiretos.

$$VA_t = \sum VP_i + (TX * \sum VP_i) \quad (43)$$

onde:

VA_t = Valor atual do custo total de investimento da alternativa analisada (US\$)

TX = Taxa de custos indiretos (custos relativos à engenharia, administração e outros) (%)

6- Valor presente

O valor presente do custo total de investimento pode se analisado pela seguinte expressão:

$$VPCT = VA_t * FRC \quad (44)$$

onde:

VPCT = Valor presente do custo total de investimento (US\$)

FRC = Fator de recuperação do capital

$$FRC = \frac{x * (1 + x)^H}{(1 + x)^H} - 1 \quad (45)$$

3.7.2 Custo de operação e manutenção

Corresponde a despesas anuais efetuadas com a operação e manutenção da alternativa de geração durante a sua vida útil, levando-se em conta basicamente, gastos com mão de obra, material empregado e serviços contratados. Estes custos são determinados com base em taxas percentuais incidentes no investimento inicial.

Os custos anuais de operação, manutenção e seguros que ocorrem periodicamente são trazidos a um valor presente multiplicando a quantia do ano básico pelo fator de recuperação uniforme desde que a análise esteja em uma moeda estável e usa-se uma taxa de desconto real. Não é necessário nenhum valor anual de ajuste para os custos que durem um ano base, podendo ser interpretados como valores anuais uniformes (FADIGAS, 1993).

Para a autora, os custos com manutenção e seguros são tratados como custos anuais ocorrendo periodicamente, enquanto permanecerem com seus valores inalterados. Alternativamente, os custos de manutenção e seguro podem ser especificados como uma taxa constante (porcentagem) sobre o valor do investimento total do projeto; desta forma pode-se aplicar sobre estes valores anuais já pré-estabelecidos um fator de recuperação uniforme para convertê-los a um valor presente.

O custo anual de operação e manutenção é igualmente calculado para todas as alternativas analisadas neste trabalho pela seguinte expressão:

$$CAOM = TXOM * INVi \quad (46)$$

onde:

CAOM = Custo anual de operação e manutenção (US\$)

TXOM = Taxa percentual dos custos de operação e manutenção (%)

INVi = Investimento inicial do componente (US\$)

O valor atual dos custos de operação e manutenção é expresso por:

$$VAOM = CAOM * \frac{(1+x)^{H-1}}{x * (1+x)^H} \quad (47)$$

onde:

VAOM = Valor atual dos custos anuais de operação e manutenção (US\$)

3.7.3 Custo de combustível e transporte

Somente aplicada na análise do grupo-gerador, e é dado por:

$$CMCT = CEG * DDT * NDM + PCD * DPV * CCkm \quad (48)$$

onde:

CMCT = Custo mensal de combustível e transporte (US\$)

CEG = Custo do consumo de combustível por unidade de energia gerada (US\$/kWh)

DDT = Demanda diária de energia (kWh)

NDM = Número de dias no mês

PCD = Preço do combustível + depreciação do veículo transportador (US\$/Litro)

DPV = Distância percorrida pelo veículo transportador (km)

CCkm = Consumo de combustível por km rodado (litros/km)

O custo anual é calculado por:

$$CACT = CMCT * \frac{(1 + \frac{x}{12})^{12-1}}{\frac{x}{12} * (1 + \frac{x}{12})^{12}} \quad (49)$$

onde:

CACT = Custo anual de combustível e transporte (US\$)

O valor atual do custo de combustível e transporte pode ser encontrado pela expressão:

$$VACT = CACT * \frac{(1 + x)^{H-1}}{x * (1 + x)^H} \quad (50)$$

onde:

VACT = Valor atual do custo de combustível e transporte (US\$)

3.7.4 Custo de suprimento pelo sistema de geração

Aplicada à alternativa rede elétrica, este custo é quantificado através da utilização dos chamados Custos Marginais de Expansão de Energia e Ponta (CMLP). O custo marginal em um determinado ano, representa uma série infinita de desembolsos anuais que se deve efetuar, ao se acrescentar uma unidade de energia (ou ponta) ao mercado de energia elétrica.

O custo anual de suprimento pelo sistema de geração é calculado pela seguinte expressão:

$$CAGE = CME * DE * 365 + CMP * P \quad (51)$$

onde:

CAGE = Custo anual de suprimento pela rede (US\$)

CME = Custo marginal de energia (US\$/kWh)

DE * 365 = Necessidade anual de energia do sistema isolado (kWh)

CMP = Custo marginal de ponta (US\$/kW)

P = Necessidade de potência do sistema isolado (kW)

3.7.5 Custos atuais

O valor atual da série de custos anuais de suprimento pelo sistema de geração pode ser calculado por:

$$\text{CASSG} = \text{CAGE} * \frac{(1+x)^{H-1}}{x * (1+x)^H} \quad (52)$$

onde:

CASSG = Valor atual do custo de suprimento pelo sistema de geração (US\$)

O valor atual dos custos totais pode ser obtido por:

$$\text{VACT} = \text{VAt} + \text{VAOM} + \text{CACT} + \text{CASSG} \quad (53)$$

onde:

VACT = Valor atual dos custos totais de uma alternativa de suprimento de energia (US\$)

onde:

CACT – se aplica apenas a alternativa grupo-gerador

CASSG – se aplica apenas a alternativa rede elétrica

O equivalente anual dos custos totais envolvidos em uma alternativa é expresso por:

$$\text{CTAE} = \text{AVP} + \text{CAOM} + \text{CACT} + \text{CASE} \quad (54)$$

onde:

CTAE = Custo total anual equivalente (US\$)

onde:

CACT – se aplica a apenas a alternativa grupo-gerador

CASE – se aplica apenas a alternativa rede elétrica

3.7.6 Custo anual de geração

O custo anual de geração para o sistema fotovoltaico e grupo gerador é expresso pela razão entre o custo total anual equivalente e a energia anual gerada.

$$CAG = \frac{CTAE}{EG / \text{ano}} \quad (55)$$

onde:

CAG = Custo anual de geração (US\$/kWh)

CTAE = Custo total anual equivalente (US\$)

EG/ano = Energia anual gerada (kWh)

A energia anual gerada pelo sistema fotovoltaico e grupo-gerador pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$EG/\text{ano} = PI * \frac{FC}{100} * \frac{DI}{100} * 8760 \quad (56)$$

onde:

PI = Potência instalada (kW)

FC = Fator de capacidade (%)

DI = Fator de disponibilidade da alternativa de suprimento (%)

8760 = Número de horas anuais

Para a alternativa rede elétrica, a energia anual entregue à carga é dada pela equação (51)

$$EG/\text{ano} = CDT * 365 * DI \quad (57)$$

onde:

CDT = Consumo diário de energia (kWh)

3.7.7 Benefício Líquido

Expresso como a diferença entre o benefício total, ou seja, o quanto se economizaria em gastos com a tarifa energética e o custo total, ambos traduzidos em valores anuais equivalentes.

Para cada alternativa o Benefício Líquido é calculado pela equação:

$$BL = BE - CTAE \quad (58)$$

onde:

BL = Benefício Líquido (US\$)

BE = Benefício total proveniente da economia em energia elétrica (US\$)

$$BE = DDT * 365 * TFF \quad (59)$$

onde:

TFF = Tarifa de fornecimento de energia (US\$/kWh)

O a relação custo-benefício, CBF, indica o retorno em anos do investimento e é fornecido por:

$$CBF = CTAE / BE \quad (60)$$

onde:

CTAE = Custo total anual equivalente da alternativa analisada

3.8 Método de Dimensionamento

O método utilizado pelo programa está baseado no critério do pior mês de incidência de irradiação solar, ou seja, as dimensões do sistema de geração são determinadas de forma que a quantidade de energia coletada pelos painéis solares é a menor do período considerado. Isto significa que a quantidade de eletricidade gerada também será a menor possível para o mesmo período. Por analogia com o sistema hidroelétrico, esta quantidade de energia pode ser considerada a energia firme do sistema fotovoltaico, desde que exista suficiente série histórica de dados de radiação para validar tal conceito.

A capacidade de acumulação é, da mesma forma, calculada de modo a assegurar um certo número de dias de fornecimento de eletricidade sem geração pelos painéis. Com isto, espera-se que, pelo menos aproximadamente, o sistema seja capaz de abastecer a carga instalada mesmo nos períodos em que a incidência de irradiação seja baixa.

O ângulo de inclinação dos painéis assume valores como aquele modelo descrito por Boily et al (1998), em que os painéis são ajustados com o ângulo da latitude local, acrescidos de 15° nos meses de inverno e diminuídos pelo mesmo valor nos meses de verão e, nos meses de primavera e outono, sua inclinação é igual à latitude.

Os programas que realizam os cálculos e as interações foram escritos numa linguagem bastante simples e acessível, o Visual Basic versão 6.0 da Microsoft.

A partir das 12 médias mensais de irradiação diária dentro do ano, o programa gera 365 valores diários. Após determinar os valores horários de irradiação, permitindo assim criar séries anuais, estatisticamente representativas, de valores de irradiação diária para uma determinada região. Isto é útil quando não há registro de dados históricos.

Os dimensionamentos foram feitos através de simulações sucessivas do comportamento dos sistemas fotovoltaicos. Recorrendo às séries de valores diários de irradiação geradas, determina-se a energia disponível no sistema gerador.

O método utilizado consiste na realização de um balanço energético. Como entrada temos a eletricidade gerada. Na saída a eletricidade consumida pelo sistema. A diferença, se

positiva, é armazenada no subsistema de armazenamento. Se negativa, deve ser compensada, sendo retirada dos acumuladores.

Para calcular a energia fornecida por cada Wp instalado no gerador, utiliza-se o conceito de hora solar pico, definido como sendo o número de horas necessárias para que, supondo uma irradiância de 1.000W/m^2 , possa ser obtida uma quantidade de energia equivalente à realmente incidente ao longo de um determinado dia. Assim, para determinarmos a energia produzida ao longo de um dia, basta considerar a potência nominal dos módulos, multiplicada pelo número de horas solares pico da latitude em que a localidade a ser atendida está inserida. Quando isto não for possível, fixa-se este número em 6 horas de irradiação (SILVA et al, 2000)

Junto com este cálculo, são fornecidos, através de arquivos inseridos no programa, dados técnicos dos componentes utilizados, do sistema de armazenamento, dos inversores e dos controladores de carga, além daqueles necessários à elaboração da análise de viabilidade econômica.

A demanda das cargas é definida associando-se as cargas presentes nos arquivos, que são aquelas mais comumente utilizadas em propriedades rurais, com dados de sua utilização horária ao longo do dia. Ao, final tem-se valores de cargas diários e de pico, que serão a base para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

O sistema de bombeamento, não utiliza sistema de armazenamento de energia. Este procedimento visa diminuir os custos iniciais tendo em vista que, desta forma, tal atividade possa ser feita durante as horas de Sol, aproveitando o pleno funcionamento do sistema gerador.

A determinação dos modelos dos equipamentos a serem instalados se dá a partir de um arquivo contendo, além dos modelos mais comuns disponíveis no mercado, suas características técnicas e valores de custo recentes. Isto possibilita a escolha, pelo programa, dos componentes mais eficientes associados a um menor custo de investimento. Este arquivo de dados pode ser manipulado pelo usuário, inclusive alterando e atualizando suas características.

O arquivo contendo o sistema de armazenamento contempla as baterias mais comuns no mercado, eletroquímicas automotivas de chumbo ácido.

3.8.1 Variáveis utilizadas pelo programa

O modelo “NAD”, tomado como base para o dimensionamento, utiliza como dados de insolação o período menos favorável no ano, de forma que o projeto é feito de maneira a atender as cargas quando o sistema fotovoltaico está na situação mais crítica de índices de radiação.

Segundo Klein (1977), em sistemas fotovoltaicos usa-se a radiação média diária de cada mês para o dimensionamento dos painéis solares; esta radiação pode ser obtida selecionando-se para cada mês o dia no qual a insolação extraterrestre diária é aproximadamente o mesmo valor da média mensal. Estes dias constam na tabela 3.

Para as simulações de radiação o programa calcula valores referentes a latitude local, obtida pelo cálculo dos valores horários para o dia no qual a insolação extraterrestre diária é aproximadamente a mesma do valor médio mensal, no mês com o menor índice de radiação.

Tabela 3. Dia característico recomendado para cada mês.

<u>Mês</u>	<u>Dia do ano (n)</u>	<u>Dia</u>
Janeiro	17	17
Fevereiro	47	16
Março	75	16
Abril	105	15
Maio	135	15
Junho	162	11
Julho	198	17
Agosto	228	16
Setembro	258	15
Outubro	288	15
Novembro	318	14
dezembro	344	10

Fonte: Klein, 1977.

A tabela 4 mostra as variáveis calculadas pelo programa para o cálculo da irradiação solar em todas as latitudes (φ) presentes o Brasil (5°N a 34°S).

Tabela 4. Cálculo das principais variáveis envolvendo energia solar, baseado no 162º dia do ano (11 de junho), para todas as latitudes (ϕ) do Brasil.

ϕ (graus)	δ (graus)	β (graus)	ω_s (graus)	Rb	H _o (kWhm ⁻²)
5	23,1	23	92,12	1,15	9,8
4	23,1	23	91,70	1,16	9,7
3	23,1	23	91,27	1,17	9,6
2	23,1	23	90,84	1,18	9,5
1	23,1	23	90,42	1,18	9,4
0	23,1	23	90	1,19	9,3
-1	23,1	23	89,57	1,20	9,2
-2	23,1	23	89,15	1,21	9,1
-3	23,1	23	88,72	1,22	9,0
-4	23,1	23	88,29	1,23	8,9
-5	23,1	23	87,87	1,24	8,8
-6	23,1	23	87,44	1,25	8,6
-7	23,1	23	87,01	1,26	8,5
-8	23,1	23	86,57	1,27	8,4
-9	23,1	23	86,14	1,28	8,3
-10	23,1	23	85,70	1,29	8,1
-11	23,1	23	85,26	1,30	8,0
-12	23,1	23	84,82	1,32	7,9
-13	23,1	23	84,37	1,33	7,7
-14	23,1	23	83,92	1,34	7,6
-15	23,1	23	83,46	1,35	7,4
-16	23,1	23	83,00	1,37	7,3
-17	23,1	23	82,54	1,38	7,2
-18	23,1	23	82,07	1,40	7,0
-19	23,1	23	81,59	1,41	6,9
-20	23,1	23	81,11	1,43	6,7
-21	23,1	23	80,62	1,44	6,6
-22	23,1	23	80,12	1,46	6,4
-23	23,1	23	79,61	1,48	6,3
-24	23,1	23	79,10	1,50	6,1
-25	23,1	23	78,58	1,54	5,9
-26	23,1	23	78,05	1,54	5,8
-27	23,1	23	77,50	1,56	5,7
-28	23,1	23	76,95	1,58	5,5
-29	23,1	23	76,39	1,61	5,3
-30	23,1	23	75,81	1,63	5,2
-31	23,1	23	75,22	1,66	5,0
-32	23,1	23	74,61	1,69	4,9
-33	23,1	23	73,99	1,72	4,7
-34	23,1	23	73,36	1,75	4,5

Fonte: Elaboração própria

4. RESULTADOS

4.1 Manual de Utilização do Programa

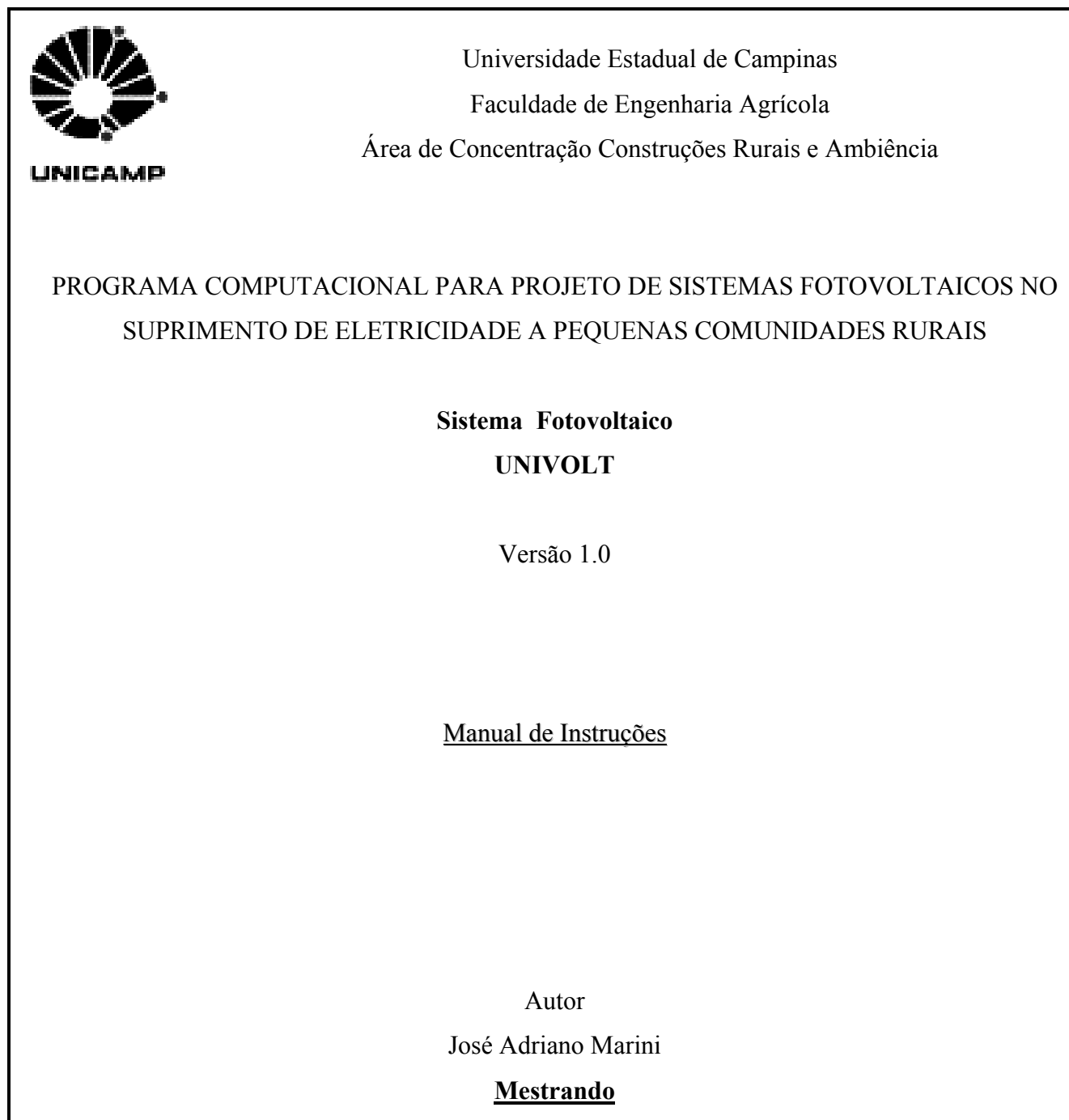


Figura 10: Capa do Manual de Instruções de uso do programa desenvolvido

Para sua utilização é necessário um equipamento que possua as seguintes configurações: Windows 95 ou superior, processador mínimo de 100 MHz e memória RAM de 16 MB. Não há restrições quanto às características do monitor e demais equipamentos.

Este programa tem por objetivo sistematizar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para suprimento de eletricidade a comunidades rurais e demais localidades que necessitem ou desejem instalar um sistema gerador de eletricidade autônomo usando como fonte energética a luz solar. Com o intuito de se aproveitar a máxima luminosidade solar, o programa sugere um rastreamento sazonal do Sol, em que os ângulos dos painéis são ajustados de acordo com as estações climáticas.

Para o correto dimensionamento dos painéis e demais componentes é necessário se conhecer a correta latitude local além de dados sobre as fontes consumidoras de eletricidade e sobre os valores dos componentes que serão utilizados, no caso de se desejar uma correta análise da viabilidade econômica do investimento.

Não há limite de potência para o dimensionamento, no entanto se recomenda o uso até cargas de no máximo 5 kWh, além da utilização de outras fontes de aquecimento de água que não a elétrica gerada pelos painéis, o que proporcionará uma sensível diminuição nos custos de investimento.

Para se começar o dimensionamento, após se iniciar o programa, deve-se clicar com o mouse na tecla **“Início”**, o que permitirá o acesso seqüencial as páginas onde deverão ser inseridos os dados necessários ao sistema. Cada página seqüente possui uma tecla denominada **“Avançar”** que deverá ser clicada para a continuação do programa, além de outra denominada **“Tela Inicial”** que permite a volta à página de menu inicial. Note que esta tecla **“Avançar”** só se mostrará disponível após os campos necessários ao dimensionamento serem preenchidos. Em algumas páginas há teclas denominadas **“Importar Dados”** que inserem automaticamente valores nos campos em branco. Estes valores podem ser alterados sem qualquer prejuízo para o sistema, no entanto deve-se atentar que o dimensionamento se dará baseado nos dados que estão aparecendo na tela.

A tela de abertura do programa é ilustrada pela Figura 11.



Figura 11: Tela de abertura do programa

A. Menu Principal

Por esta página é possível acessar todas as outras páginas do programa, sair do sistema ou iniciar o dimensionamento do projeto fotovoltaico (figura 12).

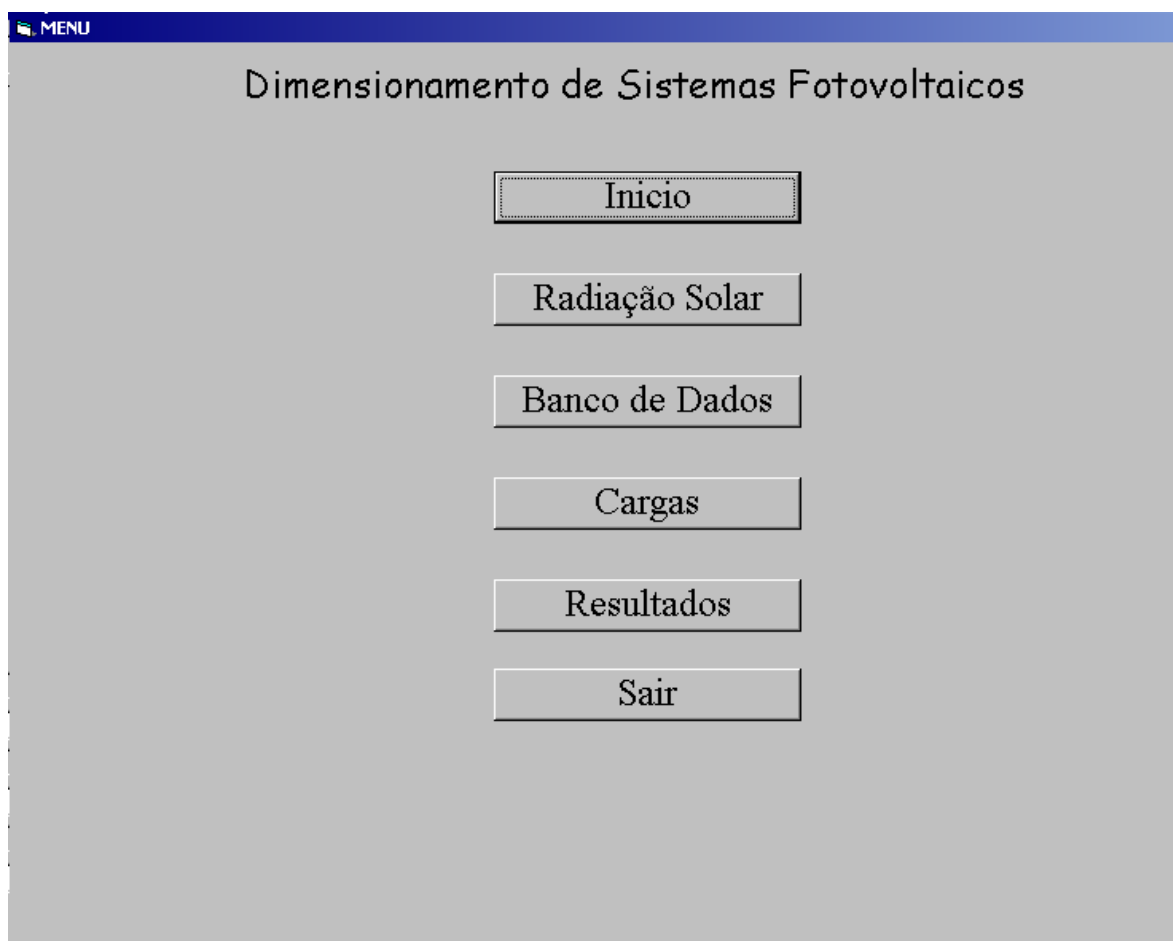


Figura 12: Tela do menu principal

B. Entrada de dados principal

A figura 13 mostra a tela de entrada dos dados técnicos e geográficos.

Parte de entrada dos dados técnicos referentes aos valores e dados técnicos

Parte referente aos dados da localização geográfica e clima

Econômica e solar

Dados Técnicos e Econômicos		Posição Geográfica	
Baterias		Localidade	
Rendimento das Baterias	%		
No. de Dias Autônomos da Bateria		Latitude	Graus
Máxima Descarga das Baterias	%	Longitude	Graus
Inversores		Estação Climática	Primavera
Rendimento dos Inversores	%	Hemisfério	Sul
Rede Elétrica		Radiação (dia 162)	kW/m ²
Dist. da Propriedade	Km	Insolação Diária	H
Custo por Km	R\$	Uso do sistema inversor	SIM
Tarifa Elétrica Rural	R\$/kWh		
Taxa de O & M	%		
Grupo Gerador			
Custo do Combustível	R\$		
Consumo/kWh			
Consumo do Veículo			
Distância Percorrida	Km		
Taxa de O & M	%		
Horas de Operação por dia			
Vida útil do Equipamento (anos)			
Painéis Solares			
Baterias			
Controlador de Carga			
Inversores			
Gerador			
Rede Elétrica			
Cotação do Dólar			
Depreciação (% ao ano)			
Custos Indiretos (%)			
Tensão Nominal das Cargas	Volts V		
Tensão Nominal das Baterias	Volts V		
Tarifa Fornecimento de Potência			
Tarifa Fornecimento de Energia			

Importar Dados Avançar Imprimir Tela Inicial

Figura 13: Tela de entrada de dados

Tecla Importar Dados: Insere nos campos em branco dados residentes no programa com índices padrões.

Tecla Avançar: Prossegue no dimensionamento após todos os campos de dados solicitados já estarem preenchidos.

Tecla Tela Inicial: Volta ao menu de entrada, possibilitando acesso às outras telas do programa. Note que se um dos campos for deixado em branco o programa não fornecerá os resultados desejados.

Tecla Imprimir: Imprime os dados que aparecem na tela.

Espaços a serem preenchidos

a) Dados Técnicos

Vida útil dos equipamentos

- Refere-se a vida útil total, em anos, do equipamento discriminado

Baterias

- Rendimento das baterias: indica um valor no qual não é afetada nem a funcionabilidade nem a segurança do sistema de armazenamento (geralmente este valor fica em torno de 80%). É inserido de forma decimal.
- Máxima descarga das baterias: é o valor limite no qual o banco de baterias pode ser descarregado sem prejuízo de seus componentes (geralmente este valor fica em torno de 20%). É inserido de forma decimal.
- Dias autônomos: são os dias em que o sistema de armazenamento deverá suprir as cargas elétricas da propriedade sem serem carregadas pelos painéis (dias sem radiação solar).

Inversores

- Rendimento: é quanto se pode esperar de eficiência do inversor com uma margem de segurança para bom funcionamento do componente.

Rede Elétrica

- Distância da propriedade: refere-se à distância em km das instalações da rede elétrica convencional até a propriedade
- Custo por km de linha: é o valor de expansão por km da rede elétrica convencional.
- Tarifa elétrica rural: diz respeito ao valor cobrado pela concessionária por kW consumido.
- Taxa de Operação e Manutenção: refere-se aos custos indiretos provenientes da rede elétrica, como manutenção da mesma e outros gastos que possam advir, é inserido de forma decimal.

Grupo Gerador

Embora o programa não forneça um dimensionamento para os geradores Diesel, este item é importante para que se possa apresentar no final uma comparação econômica junto com o sistema fotovoltaico frente aos gastos com a rede elétrica convencional.

- Custo de combustível: deve indicar o valor do litro de óleo Diesel presente no mercado.
- Consumo/km : indica quantos litros (ou frações de litros) são consumidos para a produção de kWh (este valor pode ser facilmente conseguido em revendedores destes equipamentos).
- Consumo do veículo: representa a quantidade de km percorridos por litro de combustível consumido pelo veículo que transportaria o óleo Diesel do posto de abastecimento até a propriedade.
- Taxa de operação e manutenção: refere-se aos custos indiretos provenientes da geração elétrica, como manutenção dos equipamentos e outros gastos que possam advir, é inserido de forma decimal.
- Horas de atividade por dia: são as horas em que o gerador Diesel ficaria ligado produzindo energia elétrica.

Fator de Segurança

- deve indicar um valor percentual acima das cargas utilizadas prevenindo qualquer sobrecarga no sistema

Depreciação

- segundo critérios econômicos, indica o quanto os equipamentos tem seu valor depreciado (diminuído) anualmente, geralmente fica próximo a 10% (0,1).

Custos Indiretos

- referem-se a custos não contabilizados nos equipamentos, como fiação interna, parafusos, suportes, etc.

Tensão das cargas

- indica a tensão (V) em que as cargas serão ligadas

Tensão das baterias

- é a tensão (V) em que operará o banco de baterias.

b) Dados Geográficos

- Localidade: refere-se ao município em que a propriedade está inserida.
- Latitude: um dos principais dados para o dimensionamento, deve indicar de forma precisa a localização da propriedade referente à linha do Equador.
- Longitude: deve indicar a localização da propriedade referente à linha de Greenwich ou paralelo 0°.
- Hemisfério: também muito importante para o dimensionamento, deve referir-se em qual dos hemisférios do planeta deverá ser instalado o sistema gerador (norte ou sul).
- Estação climática: a definição da estação implicará na definição do grau de inclinação dos painéis visando otimizar sua captação da radiação solar.
- Radiação e Insolação diária: são os dados calculados pelo programa, não necessitando de qualquer alteração. A radiação é calculada para o 1^o 62° do ano, no qual o índice de claridade no Hemisfério Sul é mínimo.

C. Banco de Dados dos Equipamentos de Geração

Esta página, ilustrada pela figura 14, abrange todos os dados técnicos dos equipamentos que podem ser utilizados bem como daqueles necessários à análise de viabilidade econômica.

Todos os dados aqui requeridos podem ser obtidos de catálogos dos respectivos produtos bem como de informações com revendedores.

Para tornar o dimensionamento mais fácil, há um arquivo de dados padrão residente no programa que pode ser requisitado para preencher todos os campos, o qual é obtido pressionando-se a tecla **“Importar Dados”**. Note que os valores dizem respeito aos praticados no mês de Dezembro de 2001 na cidade de Campinas-SP e podem estar desatualizados.

Arquivo de Dados									
Módulos									
Modelo									
Potência (Wp)									
Tensão (V)									
Corrente (A)									
Preço (R\$)									
Baterias									
Modelo									
Corrente (A)									
Tensão (V)									
Preço (R\$)									
Inversores					Controladores de Carga				
Modelo					Modelo				
Potência (W)					Corrente (A)				
Preço (R\$)					Preço (R\$)				
Geradores									
<u>Modelo</u>									
Potência (W)									
Consumo (L/W)									
Preço (R\$)									
[Importar Dados] [Avançar] [Salvar] [Tela Inicial]									

Figura 14: Tela de dados dos componentes

Caso haja a necessidade de correção de valores ou inserção de outros modelos de qualquer dos equipamentos, o mesmo pode ser feito digitando-se os respectivos dados nos campos acima, mesmo que já estejam preenchidos, pois o programa considera para análise os valores que estejam preenchidos, pois o programa considera para análise os valores que estejam aparecendo na tela, desta forma é imprescindível que **todos** os campos estejam preenchidos.

Tecla importar dados: insere nos campos os valores residentes no programa

Tecla avançar: permite o prosseguimento no dimensionamento, abrindo a página seguinte

Tecla tela inicial: volta à página do menu inicial

D. Banco de Dados das Cargas que serão utilizadas

Esta página é a que vai influenciar diretamente no tamanho do sistema final pois vai fornecer os dados da potência de todas as cargas que possam estar presentes na propriedade.

Cada parte ou banco de dados refere-se as páginas seqüentes onde será solicitado o tempo de utilização das mesmas.

As potências dos aparelhos podem ser obtidos diretamente no manual do fabricante do mesmo, mas para facilitar há no programa um arquivo de dados residentes onde estão presentes todos os valores das cargas requisitadas, porém com valores médios das marcas encontradas no mercado, mostrados pela figura 15.

Bando de Dados2

Arquivo de Dados de Cargas							
Arquivo de Cargas 1		Arquivo de Cargas 2		Arquivo de Cargas 3		Arquivo de Cargas 4	
Potência (W)		Potência (W)		Potência (W)		Potência (W)	
Televisor 1		Lampadas 1		Computador		Carga 1	
Televisor 2		Lampadas 2		Ar Condicionado		Carga 2	
Refrigerador		B d'água Superfície		Microondas		Carga 3	
Freezer		B d'água Submersa		Batedeira		Carga 4	
Aparelho Som		Cerca elétrica		Liquidificador		Carga 5	
Ventilador Mesa				Rádio		Carga 6	
Ventilador Teto				Video Cassete		Carga 7	
				Ferro Elétrico			

Figura 15: Tela de dados das cargas

Arquivo de cargas 1

Nessa parte deve-se selecionar, se houver, o tamanho do(s) televisor(es) e o tipo de refrigerador e freezer.

Arquivo de cargas 2

Neste banco estão as potências das lâmpadas, dos tipos de bombas d'água e do comprimento da cerca elétrica (caso existam no local).

Nas lâmpadas, o **F** indica lâmpadas fluorescentes, o **I** indica incandescente e o **E** refere-se a lâmpadas eletrônicas (compactas). Cada letra é seguida da respectiva potência da lâmpada, devendo ser escolhido o modelo em uso. Há dois campos para a escolha da lâmpada, se houver mais lâmpadas com outras potências, recomenda-se selecionar nestes itens as lâmpadas de maior potência.

No item de bombas d'água, há a presença de bombas de superfície e submersas, devendo-se selecionar a(s) que estiver(em) presente(s) na propriedade, pelo seu valor de recalque.

Na parte das cercas elétricas, estão disponíveis para seleção os tamanhos mais comuns de cercas, devendo ser selecionado aquele que mais se aproxima do utilizado.

Arquivo de cargas 3

Nesta parte estão presentes outros equipamentos que possam estar presentes na propriedade e que devem ter os campos de potência corretamente preenchidos.

Arquivo de cargas 4

Caso haja a necessidade de inserção de valores de outras cargas que não estejam discriminadas nos outros bancos de cargas, esta parte fica disponível para que estas cargas possam ser anexadas ao projeto.

Após as devidas seleções, deve-se acionar a tecla **“Importar Dados”** para que os campos de potências possam ser preenchidos com aqueles presentes no banco de dados. Se houver necessidade de inclusão de valores diferentes daqueles apresentados, basta digita-los sobre o campo desejado, mesmo que este já esteja preenchido.

Mesmo que sejam preenchidos automaticamente campos de equipamentos que não estejam presentes na propriedade, os mesmos não serão levados em consideração para efeito de cálculo desde que, nas páginas posteriores, não seja indicado seus horários de utilização.

E. Horário de utilização das cargas

Nas quatro páginas a seguir, ilustradas pelas figuras 16, 17, 18 e 19, deve-se indicar, pelo preenchimento dos quadradinhos, os horários no dia em que as cargas são mais comumente utilizadas e, no quadrado maior a esquerda, a quantidade de cada item presente na propriedade. Cada página corresponde a um Arquivo de Dados de Cargas, preenchido anteriormente.

Feito isto deve-se acionar a tecla “**Cálculo**”, que preencherá automaticamente os campos de cargas horárias e cargas de pico, além de tornar disponível a tecla “**Avançar**”, o que proporcionará o acesso as páginas seguintes e, ao final da quarta página de cargas horárias chega-se a tela “**Dimensionamento**” e “**Análise Econômica**”, onde serão apresentados os resultados finais do dimensionamento e da parte econômica.

Caso alguma carga descrita não esteja presente no local ou não será utilizada, basta apenas deixar seus respectivos campos horários sem preenchimento, o que fará que não entrem nos resultados finais.

Páginas dos horários de utilização das cargas

a) Primeira página de horário

CargasSede1

Principais equipamentos da propriedade

		Horas de uso no dia																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Televisor 1	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Televisor 2	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ap. de Som	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Geladeira	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Freezer	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ventilador Mesa	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ventilador Teto	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Horário de Pico 1

Carga de Pico 1

Carga Total 1

Cargas Horárias

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Figura 16: Tela 1 das demandas horárias das cargas

b) Segunda página de horário

CargasSede2

Principais equipamentos da propriedade

		Horas de uso no dia																								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Video Cassete	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Computador	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Microondas	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Batedeira e Liquidificador	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ferro Elétrico	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Radio	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ar Condicionado	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Horário de Pico 1

Carga de Pico 1

Carga Total 1

Cargas Horárias

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Figura 17: Tela 2 das demandas horárias das cargas

c) Terceira página de horário

CARGASrural

Principais equipamentos da propriedade

		Horas de uso no dia																								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lampadas	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lampadas2	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Bomba d'água de superfície	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Bomba d'água submersa	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cerca Elétrica	Quantidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Horário de Pico 1

Carga de Pico 1

Carga Total 1

Cargas Horárias

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Figura 18: Tela 3 das demandas horárias das cargas

d) quarta página de horário

CargasExtras

Principais equipamentos da propriedade

Horas de uso no dia

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

Carga 1

Quantidade

Carga 2

Quantidade

Carga 3

Quantidade

Carga 4

Quantidade

Carga 5

Quantidade

Carga 6

Quantidade

Carga 7

Quantidade

Horário de pico

Carga de Pico

Carga Total 3

Cargas Horárias

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

Cálculo

Avançar

Limpar

Tela Anterior

Tela Inicial

Figura 19: Tela 4 das demandas horárias das cargas

F. Resultados Finais

Nas últimas duas páginas do programa são apresentados a) o dimensionamento do sistema (Figura 20) e b) a análise econômica dos equipamentos envolvidos (Figura 21).

A) Dimensionamento

Para se obter o dimensionamento basta clicar sobre a tecla **“Dimensionamento”**, então os campos serão preenchidos com os dados calculados pelo programa e disponíveis para a execução do projeto. Somente após os dados técnicos estiverem sido preenchidos é que a tecla **“Avançar”** ficará disponível para que se observe a análise econômica, presente na próxima tela.

The screenshot displays the 'Dimensionamento técnico' (Technical Sizing) window of a software application. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Contains the title 'Dimensionamento técnico' and three main tabs: 'ENERGIA', 'RESULTADOS TÉCNICOS' (which is currently selected), and 'ARQUITETURA DO SISTEMA'.
- Left Panel (ENERGIA):** Features a unit selector set to 'kW/h'. Below it are input fields for:
 - En. Gerada por Painel (W/h)
 - Demanda Máxima (kW)
 - Demanda total atendida (kW)
 - Energia fornecida pela Bateria (W/h)
 - Demanda Energética Diária Atendida Corrigida (kW/h)
 - Horas de Pico
- Right Panel (ARQUITETURA DO SISTEMA):** Contains sections for:
 - Orientação Fixa Sazonal:** Includes a 'Painéis' (Panels) section with fields for Potência (W), Quantidade, Modelo, and Corrente (A).
 - Baterias:** Includes fields for Quantidade, Capacidade (A), and Modelo.
 - Controlador de Carga:** Includes fields for Modelo, Corrente (A), and Quantidade.
 - Inversores:** Includes fields for Modelo, Quantidade, and Potencia (W).
- Bottom Section:** Divided into two columns:
 - Localidade:** Fields for a text input, Latitude, Longitude, and Estação Climática.
 - Características Técnicas:** Fields for Área Ocupada pelos Painéis, No. de Módulos em Série, Grau de Inclinação dos Painéis, No. de Módulos em Paralelo, Orientação dos Painéis, and No. Total de Módulos.
- Bottom Buttons:** A row of five buttons: 'Dimensionamento', 'Avançar', 'Tela Anterior', 'Limpar', and 'Tela Inicial'.

Figura 20: Tela dos resultados do dimensionamento

Campos preenchidos

a) Dados Econômicos

- Energia gerada por painel: apresenta a energia, já corrigida pelos índices de perda de cargas e rendimentos, produzida por cada painel. É apenas uma amostra da quantidade de energia e não corresponde a energia nominal do painel.
- Demanda máxima: é a maior potência verificada pela análise das cargas.
- Demanda total atendida: diz respeito a somatória das cargas utilizadas, que é o quanto será utilizado para os cálculos.
- Demanda energética diária: corrigida: são a somatória das cargas acrescida dos fatores de correção e rendimento dos equipamentos participantes do projeto.
- Potência do Gerador: indica qual a potência selecionada do banco de dados será utilizada na análise de viabilidade econômica.
- Horas de Pico: Mostra em quais horários as cargas atingem o máximo de consumo.

b) Dados Geográficos

- Localidade: mostra o município em que a propriedade se encontra.
- Latitude e Longitude: indica a localização espacial da propriedade, indispensáveis para um correto dimensionamento.
- Estação climática: mostra para qual estação climática o projeto foi dimensionado.

c) Arquitetura do Sistema

Esta parte vai fornecer as instruções necessárias para a execução do projeto.

Todos os modelos de equipamentos foram retirados da página “**Arquivo de Dados**”

- Painéis

Aqui são indicados o modelo do painel a ser utilizado, a quantidade necessária, a corrente e a potência dos mesmos.

- Baterias

Nesta parte são apresentados o modelo de bateria necessário, sua capacidade de armazenamento bem como a quantidade requerida.

- Inversores

São apresentados o modelo mais propício a este dimensionamento, bem como a quantidade e sua respectiva potência.

- Controlador de Carga

São apresentados o modelo, a corrente e a quantidade mais indicada para este dimensionamento.

d) Características técnicas

Os campos a seguir vão orientar como devem ser direcionados os painéis fotovoltaicos para que, de acordo com os dados fornecidos, possam obter a melhor captação de radiação solar.

- Orientação: vai mostrar para qual direção cardinal os painéis devem estar voltados.
- Grau de inclinação: indica quantos graus o painel deve estar inclinado, tomando como referência de 0° o eixo horizontal.
- Número de módulos em paralelo: indica quantos módulos devem ser ligados em paralelo para fornecer a potência requerida pelas cargas do usuário.
- Número de módulos em série: este campo vai indicar quantos módulos devem ser ligados em série para que a tensão das cargas seja atendida corretamente. Note que apenas será ligado em série os módulos caso não se faça uso do equipamento inversor, pois a função deste além de transformar a corrente CC em CA também é transformar a tensão 12 V em 120 V.
- Área ocupada pelos painéis: vai mostrar a área, em m², necessária para a instalação dos módulos fotovoltaicos.

B) Análise Econômica

Esta parte apresenta os resultados da análise econômica realizada pelo programa.

Figura 21: Tela de resultados da análise econômica

Funções das Teclas

- Tela inicial: permite retornar à página de menu inicial
- Imprimir: permite imprimir todos os dados apresentados pelo projeto
- Salvar: salva os dados apresentados, no dispositivo desejado pelo usuário
- Conversão: como os resultados são apresentados em valores de Reais, esta tecla permite a conversão para o Dólar americano, bastando para isto inserir em uma pequena tela que é aberta, a cotação atual da moeda.
- Resultados: apresenta os resultados finais do projeto, disponibilizando-os para impressão e execução.

Sistema Fotovoltaico

- Custo dos painéis fotovoltaicos: mostra o custo do investimento inicial na aquisição dos módulos fotovoltaicos.
- Valor do Wp: este item indica o valor unitário gasto na produção de cada Watt pelo sistema.
- Custo total: são todos os custos relacionados ao sistema fotovoltaico, incluindo todos os equipamentos necessários bem como as devidas atualizações monetárias.

Grupo Gerador

- Custo do grupo gerador: corresponde ao valor total que seria investido na aquisição inicial de geradores diesel para atender a mesma demanda suprida pelos painéis.
- Valor do W/h: indica quanto se gastaria na produção de cada Watt por este sistema.
- Custo total: são todos os custos relacionados ao sistema grupo gerador, incluindo todos os equipamentos necessários bem como as devidas atualizações monetárias.

Rede Elétrica Convencional

- Investimento inicial na rede elétrica: este campo mostra os gastos totais caso fosse preciso trazer a energia da rede elétrica do ramal mais próximo até a propriedade. Se a rede elétrica já estiver presente, este campo vai mostrar o valor 0 (zero).
- Custo anual da tarifa de energia convencional: este campo mostra o quanto se gastaria anualmente com pagamentos feitos a companhia distribuidora pelo uso da energia convencional pelos equipamentos em uso na propriedade.

Benefício Líquido

Esta parte vai mostrar o quanto se economizaria com a implantação do sistema fotovoltaico o do grupo gerador frente aos gastos que se teria com a utilização da energia da rede elétrica convencional. Valores negativos indicam um gasto acima do que se pagaria com esta tarifa.

Custo Benefício

Finalmente, estes campos mostram em quantos anos os investimentos em sistemas de geração autônoma teriam retorno ao investidor.

C) Conversão para Dólar

A função desta tela, ilustrada pela figura 22, é apresentar uma conversão monetária dos valores obtidos para o Dólar, bastando para isto preencher o espaço em branco com a cotação atual da moeda e clicar em “OK”.

The screenshot displays the 'RESULTADOS ECONOMICOS' window, specifically the 'Custos do Sistema de Produção Energético' section. A modal dialog box titled 'Form1' is open, prompting for the 'Cotação Atual do Dólar' (Current Dollar Exchange Rate) in 'R\$' (Brazilian Reals). The dialog has an 'OK' button. The background interface is divided into several sections:

- Sistema Fotovoltaico:** Includes input fields for 'Custo de investimento dos Painéis Fotovoltaicos', 'Preço do Wp', 'Energia Gerada por Ano (MWh)', 'Custo Total', and 'Custo Anual de Geração'.
- Grupo Gerador:** Includes input fields for 'Custo de investimento do Grupo Gerador', 'Preço de geração por W', 'Energia Gerada por Ano (MWh)', 'Custo Total', and 'Custo Anual de Geração'.
- Rede Elétrica Convencional:** Includes input fields for 'Distância da Rede Elétrica' (with a 'Km' unit), 'Custo de Expansão da Rede Elétrica', and 'Investimento Inicial na Rede Elétrica'.
- Benefício Líquido:** Includes input fields for 'Rede Convencional', 'Sistema Fotovoltaico', and 'Grupo Gerador'.
- Relação Custo/Benefício:** Includes input fields for 'Rede Convencional', 'Sistema Fotovoltaico', and 'Grupo Gerador'.

At the bottom of the interface, there is a navigation bar with buttons: 'Tela Anterior', 'Resultados', 'Conversão' (highlighted), 'Salvar', 'Imprimir', 'Sair', and 'Tela Inicial'.

Figura 22: Tela de conversão monetária para Dólar.

4.2 Algoritmo Básico

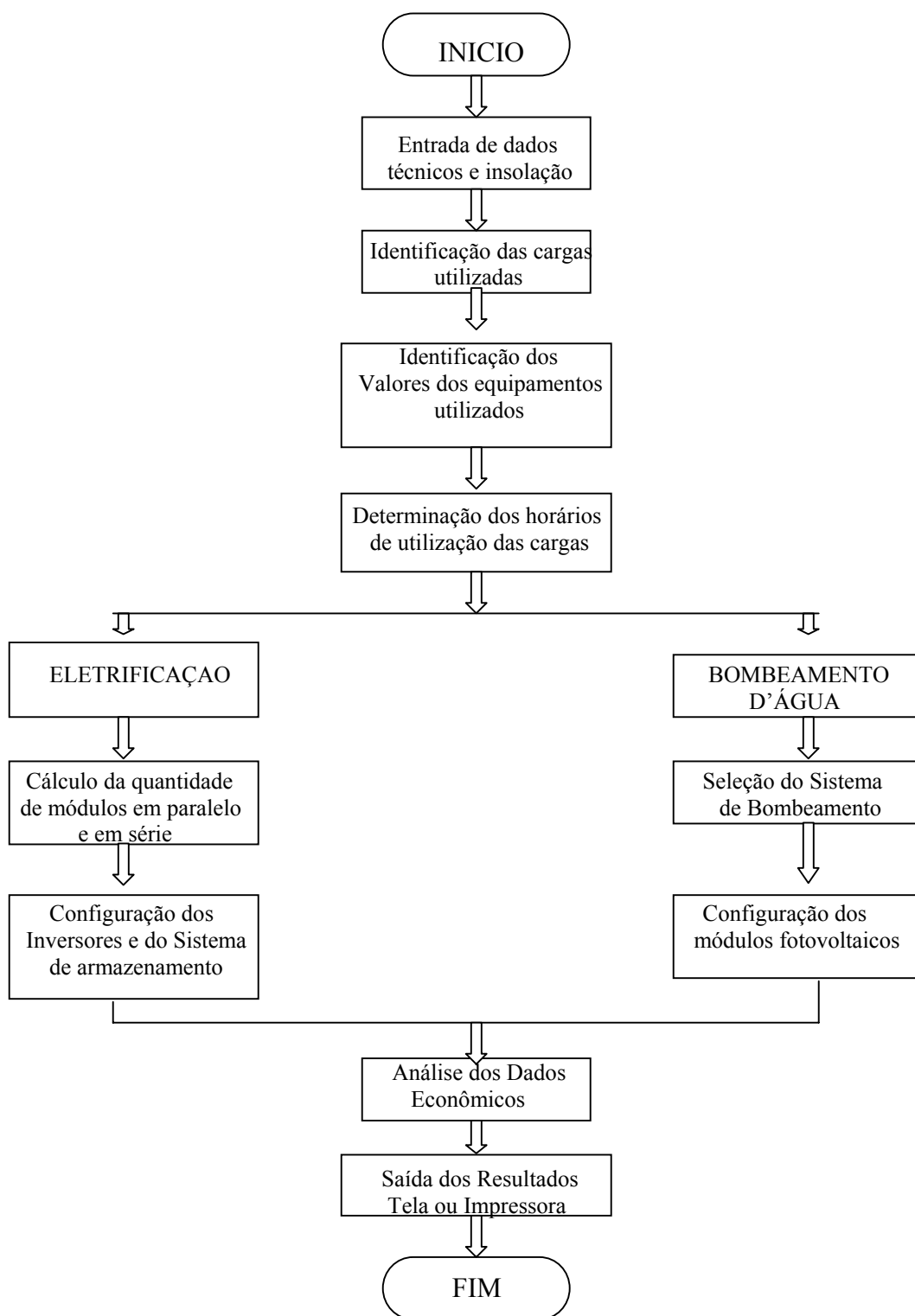


Figura 23. Fluxograma do modelo computacional

4.3 Simulações do Programa

As tabelas mostram os parâmetros utilizados para os dimensionamentos, adotando-se cargas de pico de 500W, 1kW e 5kW, esta ultima a mais comumente presentes em pequenas propriedades rurais. A distância da rede elétrica foi determinada por 0km (a linha energizada passa na porta da propriedade) e uma distância aproximada de 100km.

a) Parâmetros técnicos

Tabela 5. Parâmetros técnicos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico

Parâmetros	Valor
Horizonte econômico de comparação	20 anos
Vida útil do Sistema Fotovoltaico	20 anos
Vida útil do Sistema de Armazenamento	2 anos
Vida útil do Inversor	10 anos
Eficiência do Sistema de Armazenamento	80%
Disponibilidade do Sistema	100%
Carga Inicial das Baterias	80%
Descarga Máxima das Baterias	20%
Numero de dias sem Sol	5 dias
Horas de atividade do gerador diesel por dia	18 horas

b) Dados usados para análise Econômica

Tabela 6. Dados econômicos para realização da análise econômica

Parâmetros	Valor
Tarifa de Eletrificação Rural (R\$/kW)	0,12054
Custos de expansão da Rede Elétrica convencional (R\$/km)	15750,00
Taxa de Operação e Manutenção	10%
Custo do combustível para o gerador (R\$/L)	0,90
Consumo do veículo transportador de combustível (km/L)	5
Quilômetros percorridos pelo veículo (simulação)	100
Taxas de descontos	10%
Taxas percentuais de custos indiretos	1%
Valor do dólar para conversão	2,50

Devido ao fato que os valores arquivados com os equipamentos componentes do sistema fotovoltaico estão em moeda nacional, os valores usados para os dimensionamentos e análises também estão nesta unidade financeira.

Os valores referentes a tarifas energéticas foram fornecidos pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) com valores praticados desde abril/2001 (CPFL, 2001).

4.3.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Esta parte dos resultados tem a finalidade de apresentar algumas aplicações do programa elaborado para dimensionar sistemas fotovoltaicos e compará-las, posteriormente, com fontes convencionais para suprimento de pequenas comunidades isoladas.

Para as simulações descritas abaixo não estão indicados painéis ligados em série pois com o uso do sistema inversor, que além de transformar as cargas CC oriunda dos painéis em CA o mesmo transforma as tensões de 12V em 120V, que são as tensões mais comumente utilizadas pela maioria dos equipamentos.

a) Para demanda máxima de 500 W.

Tabela 7. Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico com suprimento diário de 500W.

Parâmetros	Valor
Localidade	Campinas
Latitude	22°54'S
Longitude	47°05'L
Estação Climática	Primavera
Orientação dos Painéis	Norte
Inclinação dos Painéis	22°
Modelo dos Painéis	SP75
Potência dos Painéis	75W
Corrente dos Painéis	4,4A
Número de Painéis em Paralelo	4
Número de Painéis em Série	1
Número total de Painéis	4
Capacidade do sistema de armazenamento	150A
Número de baterias	3
Modelo dos controladores de carga	SR20
Corrente dos controladores de carga	20A
Quantidade de controladores de carga	1
Modelo dos inversores	PortAWattz
Potência dos inversores	500W
Quantidade de inversores	1
Área ocupada pelos painéis	2,56m ²
Energia fornecida por cada painel	211,2kWh
Carga de maior pico	500W

b) Para demanda máxima de 1 kW

Tabela 8. Resultados obtidos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico com suprimento diário de 1 kW.

Parâmetros	Valor
Localidade	Campinas
Latitude	22°54'S
Longitude	47°05'L
Estação Climática	Primavera
Orientação dos Painéis	Norte
Inclinação dos Painéis	22°
Modelo dos Painéis	SR50
Potência dos Painéis	50W
Corrente dos Painéis	2,95A
Número de Painéis em Paralelo	17
Número de Painéis em Série	1
Número total de Painéis	17
Capacidade do sistema de armazenamento	150Ah
Número de baterias	9
Modelo dos controladores de carga	SR30
Corrente dos controladores de carga	30A
Quantidade de controladores de carga	2
Modelo dos inversores	PortAWattz
Potência dos inversores	1000W
Quantidade de inversores	1
Área ocupada pelos painéis	4,70m ²
Energia fornecida por cada painel	177kWh
Carga de maior pico	1000W

c) Para cargas de pico de 5kW

Tabela 9. Resultados obtidos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico com suprimento diário de 5 kW.

Parâmetros	Valor
Localidade	Campinas
Latitude	22°54'S
Longitude	47°05'L
Estação Climática	Primavera
Orientação dos Painéis	Norte
Inclinação dos Painéis	22°
Modelo dos Painéis	Sp65
Potência dos Painéis	65W
Corrente dos Painéis	3,95 A
Número de Painéis em Paralelo	36
Número de Painéis em Série	1
Número total de Painéis	36
Capacidade do sistema de armazenamento	150Ah
Número de baterias	26
Modelo dos controladores de carga	SR30
Corrente dos controladores de carga	30A
Quantidade de controladores de carga	6
Modelo dos inversores	PortAWattz
Potência dos inversores	5000W
Quantidade de inversores	1
Área ocupada pelos painéis	23,4m ²
Energia fornecida por cada painel	237kWh
Carga de maior pico	5000W

Os dimensionamentos efetuados pelo programa asseguram 100% de atendimento as cargas, mesmo nos períodos em que não há incidência de radiação solar (dias nublados), o que é garantido pela potência gerada por meio dos painéis e pela capacidade das baterias.

4.3.2 Análise Econômica

A análise econômica da rede elétrica é feita através da utilização de linhas MRT (monofásica com retorno por terra), alternativa que já vem sendo muito utilizada na eletrificação rural. Abatendo-se os custos dos transformadores e padrões de medição, estima-se, de acordo com dados fornecidos pela CESP (Companhia Energética de São Paulo, valores de abril 2001) que o custo da rede para atendimento da carga seja de R\$16 mil/km, com a utilização de postes de madeira e condutores de aço. Para a análise adotou-se o método de cargas puntuais, ou seja, localizadas ao final da rede.

Como o consumo da maioria das comunidades isoladas é muito baixo para interligação com a rede elétrica, fez-se uma análise de sensibilidade para determinar a partir de qual distância o custo de geração do sistema fotovoltaico é inferior ao custo da rede elétrica.

Os valores do W_p para análise foram os mais comuns encontrados no mercado internacional e brasileiro, respectivamente: US\$ 2,00; US\$ 5,00; US\$ 9,00 e US\$ 20,00.

Ressalta-se que os parâmetros utilizados para dimensionar e custear cada fonte de geração podem apresentar uma considerável taxa de variação, o que não invalida os resultados já que, caso ocorram, influem em todas as fontes uniformemente.

Dos resultados obtidos, o custo de geração foi o escolhido para comparação da viabilidade entre as diferentes fontes.

Dada as características das comunidades rurais, onde o consumo energético não ultrapassa os 30kWh/mês, as alternativas mais indicadas para o atendimento a estas demandas são, além dos sistemas fotovoltaicos a rede convencional e o grupo gerador, que fazem parte de nossa análise econômica.

Tabela 10. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com o valor do Wp a US\$ 2,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	14970	5988
Valor presente dos custos totais	16900,32	6760,13
Custo anual equivalente	1984,13	793,65
Custo anual de geração (valor/MWh)	543,59	217,44
Índice custo/benefício	4,50	3,82
Benefício Líquido	-62876,19	-25008,34
Energia anual gerada (MWh)	3,65	3,65

Tabela 11. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com o valor do Wp a US\$ 5,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	29970	11988
Valor presente dos custos totais	33834,51	13533,8
Custo anual equivalente	3972,25	1588,89
Custo anual de geração (valor/MWh)	1088,28	435,31
Índice custo/benefício	9,0283	7,6545
Benefício Líquido	-3532,253	-1381,314
Energia anual gerada (MWh)	3,65	3,65

Tabela 12. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com o valor do Wp a US\$ 9,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	61220	24488
Valor presente dos custos totais	69114,07	27645,63
Custo anual equivalente	8114,20	3245,64
Custo anual de geração (valor/MWh)	2223,05	889,21
Índice custo/benefício	18,44	15,64
Benefício Líquido	-7674,13	-3038,06
Energia anual gerada (MWh)	3,65	3,65

Tabela 13. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com o valor do Wp a US\$ 20,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	109370	43748
Valor presente dos custos totais	123472,8	49389,13
Custo anual equivalente	14495,9	5798,36
Custo anual de geração (valor/MWh)	3971,48	1588,59
Índice custo/benefício	32,9474	27,9337
Benefício Líquido	-14055,93	-5590,784
Energia anual gerada (MWh)	3,65	3,65

Tabela 14. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com o valor do Wp a US\$2,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	49970	19988
Valor presente dos custos totais	56413,43	22565,37
Custo anual equivalente	6623,02	2649,21
Custo anual de geração (valor/MWh)	403,23	161,29
Índice custo/benefício	3,345	2,836
Benefício Líquido	-4643	-1715,124
Energia anual gerada (MWh)	16,425	16,425

Tabela 15. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com o valor do Wp a US\$ 5,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	133620	53448
Valor presente dos custos totais	150849,8	60339,9
Custo anual equivalente	17709,99	7083,99
Custo anual de geração (valor/MWh)	1078,23	431,29
Índice custo/benefício	8,945	7,5838
Benefício Líquido	-15730,13	-6149,9
Energia anual gerada (MWh)	16,425	16,425

Tabela 16. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com o valor do Wp a U\$ 9,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	61220	24488
Valor presente dos custos totais	69114,07	27645,63
Custo anual equivalente	8114,10	3245,64
Custo anual de geração (valor/MWh)	494,01	197,60
Índice custo/benefício	4,09	3,47
Benefício Líquido	-6134,23	-2311,55
Energia anual gerada (MWh)	16,425	16,425

Tabela 17. Resultados obtidos da análise econômica do sistema fotovoltaico para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com o valor do Wp a U\$20,00

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	23.54	23.54
Custo inicial de instalação	489332	195732,8
Valor presente dos custos totais	552429,4	220971,7
Custo anual equivalente	64856,06	25942,43
Custo anual de geração (valor/MWh)	3948,62	1579,45
Índice custo/benefício	32,757	27,78
Benefício Líquido	-62876,19	-25008,34
Energia anual gerada (MWh)	16,425	16,425

Tabela 18. Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,80

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	18.50	18.50
Valor presente dos custos totais	94491,47	37796,59
Custo anual equivalente	11098,92	4439,57
Custo anual de geração (valor/MWh)	4469,52	1787,81
Índice custo/benefício	23,81	23,81
Benefício Líquido	-10581,35	-4232,54
Energia anual gerada (MWh)	3,65	3,65

Tabela 19. Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 10 kWh, 1 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,90

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	18.50	18.50
Valor presente dos custos totais	94491,47	37796,59
Custo anual equivalente	11098,92	4439,57
Custo anual de geração (valor/MWh)	2369,67	1055,83
Índice custo/benefício	23,81	23,81
Benefício Líquido	-10581,35	-4232,54
Energia anual gerada (MWh)	3,65	3,65

Tabela 20. Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,80

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	18.50	18.50
Valor presente dos custos totais	94491,47	135429,94
Custo anual equivalente	11098,92	15907,56
Custo anual de geração (valor/MWh)	4469,52	778,37
Índice custo/benefício	23,81	17,05
Benefício Líquido	-10581,35	-14900,44
Energia anual gerada (MWh)	16,425	16,425

Tabela 21. Resultados obtidos da análise econômica do grupo gerador para suprimento de um consumo diário de 45 kWh, 5 kW pico, com fator de disponibilidade de 0,90

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dólar
Fator de Capacidade (%)	18.50	18.50
Valor presente dos custos totais	338574,85	135429,94
Custo anual equivalente	39768,90	15907,56
Custo anual de geração (valor/MWh)	1729,45	691,78
Índice custo/benefício	17,05	17,05
Benefício Líquido	-37251,10	-14900,44
Energia anual gerada (MWh)	16,425	16,425

Tabela 22. Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de um consumo diário de 10 kWh com 1kW de pico, para carga próxima a rede

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dolar
Valor presente dos custos totais	1893,25	757,3
Energia anual fornecida (MWh)	3,65	3,65
Custo anual equivalente	222,38	88,952
Custo anual de geração (valor/MWh)	62,05	24,82
Índice custo/benefício	0,50	0,50
Benefício líquido	217,59	87,036

Tabela 23. Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento do de um consumo diário 10 kWh com 1kW de pico, distante 10 km da rede

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dolar
Valor presente dos custos totais	188552,2	75420,88
Energia anual fornecida (MWh)	3,65	3,65
Custo anual equivalente	22154,25	8861,7
Custo anual de geração (valor/MWh)	6192,375	2476,95
Índice custo/benefício	50,35	50,35
Benefício líquido	-21714,28	-8685,712

Tabela 24. Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de demanda diária de 10 kWh com 1kW de pico, distante 20 km da rede

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dolar
Valor presente dos custos totais	375211,1	159984,44
Energia anual fornecida (MWh)	3,65	3,65
Custo anual equivalente	44086,13	17634,452
Custo anual de geração (valor/MWh)	12481,075	4992,43
Índice custo/benefício	100,2024	100,2024
Benefício líquido	-43646,16	-17458,4

Tabela 25. Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de demanda diária de 45 kWh com 5kW de pico, próxima a rede

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dolar
Valor presente dos custos totais	8519,647	3483,87
Energia anual fornecida (MWh)	16,425	16,425
Custo anual equivalente	1000,71	400,284
Custo anual de geração (valor/MWh)	66,71	26,684
Índice custo/benefício	0,505	0,505
Benefício líquido	979,16	491,6

Tabela 26. Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de demanda diária de 45 kWh com 5kW de pico, distante 10 km da rede

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dolar
Valor presente dos custos totais	195178,6	78071,44
Energia anual fornecida (MWh)	16,425	16,425
Custo anual equivalente	22932,59	9173,036
Custo anual de geração (valor/MWh)	1528,84	611,536
Índice custo/benefício	11,583	11,583
Benefício líquido	-20952,72	-8381,088

Tabela 27. Resultados obtidos da análise econômica da rede elétrica para suprimento de demanda diária de 45 kWh com 5kW de pico, distante 20 km da rede

Parâmetros	Valor	Valor
Unidade monetária	Real	Dolar
Valor presente dos custos totais	381837,5	152735
Energia anual fornecida (MWh)	16,425	16,425
Custo anual equivalente	44864,46	17945,784
Custo anual de geração (valor/MWh)	2990,96	1196,384
Índice custo/benefício	22,66	22,66
Benefício líquido	-42884,59	-17153.836

4.3.3 Gráficos

Com os dados das tabelas resultantes da análise econômica, foram confeccionaram-se os gráficos das figuras 24 e 25.

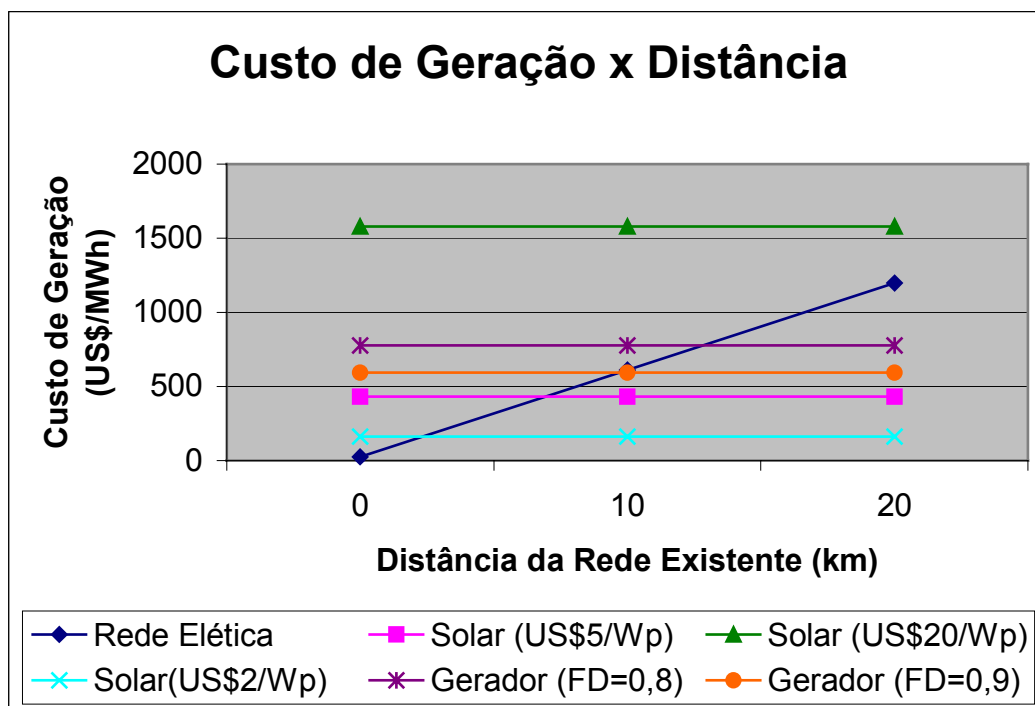


Figura 24. Dados do custo de geração elétrica para carga de 10kWh e 1 kW de pico

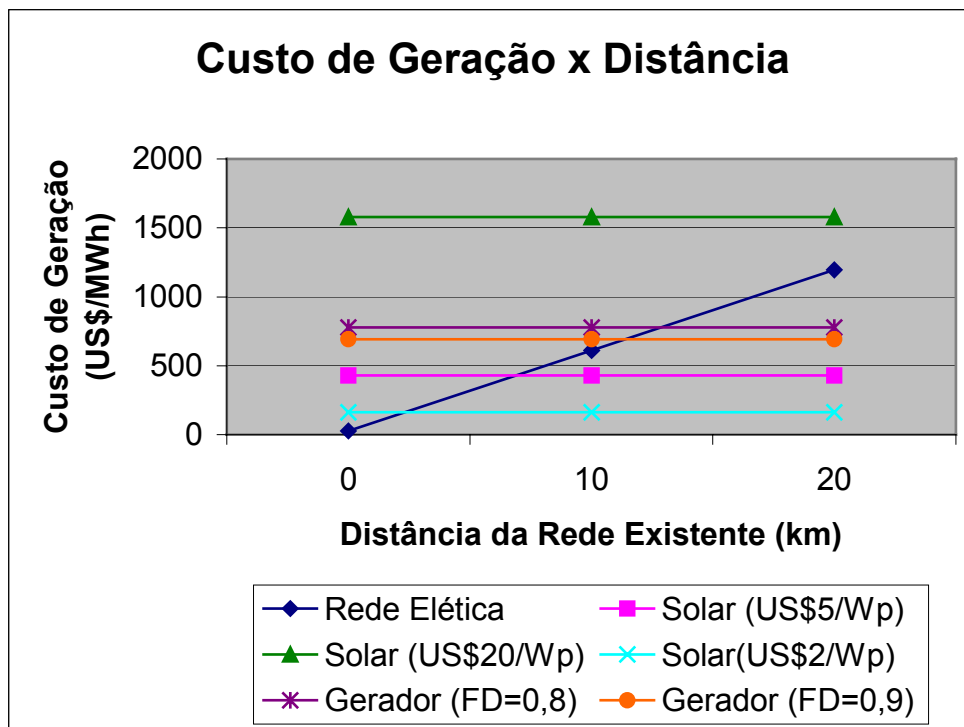


Figura 25. Dados do custo de geração elétrica para carga de 45kWh e 5 kW de pico

4.4 Comentários e análise dos resultados

Pela definição, o Benefício Líquido é expresso como a diferença entre o Benefício total e o custo total da alternativa analisada; assim, valores negativos representam um custo de investimento total, traduzidos em valores anuais equivalentes, superior ao benefício decorrente da economia com despesas em tarifas de consumo de energia.

Através dos resultados indicados nos gráficos e tabelas podemos fazer uma análise comparativa entre as diversas alternativas propostas para atendimento das cargas especificadas.

Verificamos pelos resultados apresentados que a Rede Elétrica possui o menor custo de geração para uma mesma demanda de cargas, com valores de 24,82 US\$/MWh para um consumo de 10kWh e 1kW de pico e 26,68 US\$/MWh para consumo de 45 kWh com 5kW de pico. Para consumidores situados próximos a rede.

A medida que o consumidor se distancia da rede, os valores de geração tendem a aumentar, vindo a favorecer então outras fontes de geração de energia. Além disto esta

alternativa para baixos níveis de demanda (1kW), é ainda mais cara. Aumentando-se a demanda, a rede passa a ser mais competitiva a distâncias cada vez maiores.

O grupo gerador se torna uma opção interessante para cargas que distam mais de 10 km da rede, conforme pode-se observar pela Figura 25. No entanto, seu custo de operação aumenta consideravelmente com o aumento de cargas devido ao consumo de combustível e a manutenção, além do consumo pelo veículo transportador, que depende diretamente da distância da localidade ao posto de abastecimento mais próximo. Aliado a estes custos está o de reposição do próprio grupo gerador, cuja vida útil está em torno de 10 anos.

Os gráficos e tabelas abordam dois fatores de disponibilidade ($DI=0,8$ e $DI=0,9$) que são os mais prováveis, segundo FADIGAS (1993), para pequenos grupos geradores.

Para a alternativa fotovoltaica, nos casos dimensionados com os dados de insolação referentes a cidade de Campinas-SP, pode-se notar que ainda é uma opção de investimento alta, com valores de geração superiores àqueles apresentados pelo grupo gerador. Em comparação com a rede elétrica, esta fonte se torna atrativa a medida que a propriedade se distancia da rede de fornecimento, tornando-se viável economicamente em distâncias acima de 10 km para valores de W_p abaixo de 5,00 US\$. Para os atuais valores de 8,00 US\$/ W_p o sistema fotovoltaico ainda possui custos de investimentos muito altos frente ao grupo gerador, porém viável em propriedades com bons índices de radiação solar e muito distantes da rede convencional, conforme a figura 25.

Esta fonte começa a tornar-se interessante do ponto de vista econômico com valores inferiores a 2,00 US\$/ W_p , o que pode-se observar nas Figuras 24 e 25 e nas Tabelas 11 e 15.

Para cenários de 5 a 20 US\$/ W_p não há qualquer possibilidade de concorrência com as alternativas de geração hoje em uso para aplicação em larga escala, a não ser através de subsídios governamentais. Para pequenas aplicações tais como iluminação, bombeamento d'água, estocagem de vacinas e outras pequenas cargas, a alternativa fotovoltaica já se mostra interessante.

Isto porém, não tira o mérito dos atuais projetos, cujo caráter é preponderantemente científico, ou seja, visam primordialmente à demonstração e tentam dominar esta nova tecnologia que, pelas previsões atuais, fatalmente virá a ser utilizada nas próximas décadas.

A rede elétrica é uma alternativa que tem um custo de instalação elevado, mas, dependendo da distância que separa estas comunidades da rede elétrica mais próxima e dado o

perfil de consumo de tais comunidades, que define o tipo de linha a ser utilizada, pode se tornar uma opção atrativa.

Optou-se por desconsiderar na análise a evolução da carga com o tempo, embora sabe-se que a chegada da eletricidade vai contribuir para o desenvolvimento da comunidade e conseqüentemente aumento de cargas. Porém, as alternativas de suprimento propostas permitem atender acréscimos de carga: a rede elétrica normalmente é projetada com capacidade superior à demanda solicitada e a alternativa solar é modular, ou seja, a medida que a carga aumenta pode-se acrescentar novos módulos ao sistema, aumentando sua capacidade de geração.

4.5 Validação

Dimensionamentos

Os dimensionamentos descritos a seguir foram obtidos de trabalhos técnicos utilizando sistemas fotovoltaicos cujos parâmetros técnicos de entrada são semelhantes aos utilizados pelas simulações descritas acima.

Para efeito de comparação foram apresentados dimensionamentos de 500 Wh/dia, 1000 Wh/dia e 5000 Wh/dia os quais podem facilmente serem comparados com os resultados obtidos por Camargo (2000) que utilizou cargas de 510 Wh/dia e com Boylli (1998) que utilizou potências de 900 Wh.

a) Dados do trabalho de CAMARGO, (2000).

Tabela 28. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos feito por Camargo (2000)

Dimensionamento	Valor
Potência instalada (Wh/dia)	510
Localidade	Campinas (23° S)
Irradiação média no mês de menor insolação (kWh/ m²dia)	3,42
Correção da irradiação por Rb (kWh/m²dia)	4,62
Energia diária fornecida por módulo (Wh)	167
Número de módulos totais em paralelo	4
Dias sem insolação	5
Número de baterias	3
Orientação dos painéis	Norte
Inclinação dos painéis	25°

O modelo dos painéis determinado usado neste dimensionamento foi o SM 75 do fabricante Siemens, conectados em paralelo, foram usadas baterias do tipo chumbo-ácida selada de 12V/100Ah também conectadas em paralelo. Não foram abordados neste trabalho dados referentes a parte econômica.

b) Dados do trabalho de BOYLLI (1998)

Tabela 29. Dimensionamento feito por Boilly (1998).

Parâmetros técnicos	Valor
Localidade	Burkina-Faso
Latitude	12.0° N
Cargas DC (V)	12
Potencia requerida (W/h)	900
Módulos em série	1
Módulos em paralelo	15
Número total de módulos	15
Potência instalada (W)	705
Inclinação dos painéis	12 °
Orientação	Sul
Capacidade das baterias	98 Ah
Dias de reserva	3
Número de baterias em série	1
Número de baterias em paralelo	13
Capacidade total das baterias	1278 ah
Inversor CC – CA	-

O módulo usado neste dimensionamento foi o SM55 da Siemens e o modelo de baterias foi a chumbo-ácido Delco 2000. Não estão presentes cargas AC, desta forma não há a necessidade de se acoplar ao sistema um inversor.

Análise Econômica

As análises a seguir foram obtidas de Fadigas(1993) cujos parâmetros de estudos são semelhantes aos utilizados para a confecção das tabelas anteriores.

a) Sistemas fotovoltaicos

Tabela 30. Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica dos sistemas fotovoltaicos para suprimento de demanda diária de 8,984 kWh com 1 kW de pico.

Parâmetro	Valor	
Preço do Wpico	5	20
Fator de Capacidade (%)	24,53	24,53
Custo inicial de instalação (US\$)	11400,00	39450,00
Energia anual gerada (MWh)	4,029	4,029
Valor presente dos custos totais (US\$)	13220,00	41620,00
Custo anual equivalente (US\$)	1592,00	5022,00
Custo anual de geração (US\$/MWh)	395,00	1251,00
Índice custo/benefício	8,534	26,93
Benefício líquido (US\$)	-1405	-4836

Tabela 31. Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica dos sistemas fotovoltaicos para suprimento de demanda diária de 44,92 kWh com 5 kW de pico.

Parâmetro	Valor	
Preço do Wpico	5	20
Fator de Capacidade (%)	24,53	24,53
Custo inicial de instalação (US\$)	53040,00	193200,00
Energia anual gerada (MWh)	19,43	19,43
Valor presente dos custos totais (US\$)	59450,00	196400,00
Custo anual equivalente (US\$)	7163,00	23710,00
Custo anual de geração (US\$/MWh)	368,00	1221,00
Índice custo/benefício	7,682	25,43
Benefício líquido (US\$)	-6231,00	-22780,00

b) Rede Elétrica

Tabela 32. Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica da rede elétrica para suprimimento de demanda diária de 8,984 kWh com 1 kW de pico.

Parâmetros	Valor	Valor	Valor
Distância (km)	0	10	20
Valor presente dos custos totais (US\$)	696,77	69060,32	137423,9
Energia anual fornecida (MWh)	3,23	3,23	3,23
Custo anual equivalente ((US\$)	81,84	8111,80	16141,76
Custo anual de geração (US\$/MWh)	25,31	2508,87	4992,43
Índice custo/benefício	0,445	44,11	87,78
Benefício líquido (US\$)	102,04	-7927,9	-15957,9

Tabela 33. Resultados obtidos por Fadigas (1993) de análise econômica da rede elétrica para suprimimento de demanda diária de 44,92 kWh com 5 kW de pico.

Parâmetros	Valor	Valor	Valor
Distância (km)	0	10	20
Valor presente dos custos totais (US\$)	3483,87	71847,41	140211,00
Energia anual fornecida (MWh)	16,17	16,17	16,17
Custo anual equivalente ((US\$)	409,21	8439,17	14649,13
Custo anual de geração (US\$/MWh)	25,31	522,02	1018,73
Índice custo/benefício	0,445	9,18	17,91
Benefício líquido (US\$)	510,22	-7519,73	-15549,7

5. CONCLUSÕES

São inúmeros os benefícios sociais que a energia solar fotovoltaica traz a comunidades isoladas, destacando-se:

- Com a iluminação pode-se ter aulas no período noturno;
- Melhores oportunidades de educação, com o acesso a televisão e rádio;
- Melhoria nas condições de saúde, principalmente conservando-se vacinas e medicamentos;
- A utilização de sistemas de radiocomunicação, aproximando assim o campo da cidade

A posição geográfica do Brasil confere-lhe altos índices de radiação luminosa, oferecendo um cenário atrativo sob o ponto de vista técnico para a implantação de sistemas fotovoltaicos no atendimento às necessidades da maioria das comunidades isoladas que possuem níveis de carga semelhantes às analisadas neste trabalho e que estão localizadas a grandes distâncias da rede elétrica, o que significa investimento elevado se atendidas com esta.

Elaborado na linguagem Visual Basic, o programa final possui uma interface bastante amigável e simples, de fácil utilização por pessoas que não possuam amplo conhecimento técnico sobre a tecnologia fotovoltaica, tornando-o acessível a todos aqueles que necessitem de um dimensionamento rápido e eficiente de sistemas fotovoltaicos, além de possuir também um Manual de Utilização com instruções detalhadas de utilização e explicações sobre os resultados obtidos. O único cuidado que o usuário deve ter é inserir corretamente sua localização geográfica, que servirá de base para o cálculo da irradiação solar disponível para os painéis.

O programa computacional elaborado apresenta resultados confiáveis para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, fornecendo também uma análise econômica desta fonte, do gerador diesel e da rede elétrica.

No que diz respeito aos resultados técnicos, obtém-se informações sobre as condições previstas de irradiação solar e número máximo de horas de Sol da localidade desejada, quantidade de energia requerida pelo usuário e fornecida pelo sistema; número, marca e modelo dos módulos fotovoltaicos; arranjo dos módulos (série, paralelo, inclinação e orientação); características do sistema de armazenamento, controladores de carga e inversores; e, em relação aos econômicos, tem-se um estudo econômico comparativo com respeito a

outras formas de alimentação de corrente elétrica além do preço estimado do sistema projetado com relação aos custos de mercado.

O sistema solar fotovoltaico, com os atuais preços praticados no mercado nacional, tem sua aplicação bastante limitada. Já é competitivo para aplicações como iluminação, bombeamento d'água, estocagem de vacinas, e outras aplicações que não requerem muita potência, como se verifica através dos resultados obtidos para os níveis de demanda analisadas, porém a partir de determinada distância.

No entanto, os custos praticados no exterior são bem inferiores aos do Brasil o que permite utilizar a energia solar fotovoltaica para suprir níveis superiores de demanda e torna-lo competitivo com o grupo-gerador e, principalmente, com a rede elétrica para distâncias menores.

O acelerado estágio de desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica e conseqüente redução nos custos fornecem boas perspectivas para um futuro não muito distante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZO, E., RUTHER, R., MARTINS, D.C. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de um Sistema Isolado Híbrido Diesel/Fotovoltaico. In: COBEM 99 – XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia, Anais do Cobem 99 – XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. 1999.

BOILY, R., SAWADOGO, A., ROSSI, L.A. Desenho de sistemas fotovoltaicos para comunidades rurais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998. Poços de Caldas – MG, Anais Poços de Caldas, 1998.

CAMARGO, J. C. Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari, 108p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

CENSOLAR – Centro de Estudos de la Energia Solar. La energía solar. In Manual técnico para dimensionamento de fontes energéticas de origem solar. Madrid, Espanha, 2000.

CESP - Projetos na Área de Energia Solar . In: Workshop da Escola de Energia Fotovoltaica. 1992, Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro, CEPEL, 1992.

CPFL – Tarifas de Energia Praticadas no Estado de São Paulo. E-mail recebido em 04 de outubro de 2001.

COLLARES-PEREIRA, M. & RABI, A. The Average Distribution of Solar Radiation Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values, Solar Energy, Cleveland ,v..22, n.6, p. 155-164, jun, 1979.

COPETTI, J.B., LORENZO, E., CHENLO, F. A general battery model for PV system simulation, Progress in Photovoltaics, n.1, v.4, p. 283-292,jan, 1993.

CORONADO, C.. Metodología de evaluación económica para proyectos de eletrificación rural. In: Conferencia Latino-Americana de Eletrificación Rural, 14, Punta del Este, 1993. Anais Punta del Este, Uruguai, V.2, p. 18-1993.

COSTA, H. S., COSTA, R.A.L. & ECK, M. Análise econômica comparativa da eletrificação rural comercial e fotovoltaica In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3, 2000, Campinas. Anais ... Campinas, CD-Rom, 2000.

COSTA, H.S. & ECK, M. Modelo sustentável de difusão da tecnologia fotovoltaica para uso residencial In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3, 2000, Campinas. Anais ... Campinas, CD-Rom, 2000.

DERRICK A. Photovoltaics: A Market Overview, Nova York, McGraw Hill, 1993

ENERGY, RESOURCE & TECHNOLOGY, State University of Hawaii. The Sun: a megawatt powerplant right over there. < <http://energy.hawaii.htm>>, Acessado em 04 de abril de 2001

EUROPEAN COMMISSION OF THE COMMUNITIES, Multi-Megawatt Upscaling of Silicon and Thin Film Solar Cell and Module Manufacturing, In: Photovoltaic Solar Energy Conference, 14th, Brussels 1999.

FADIGAS, E. A. F.A. Dimensionamento de fontes fotovoltaicas e eólicas com base no índice de perda de suprimento e sua aplicação para o atendimento a localidades isoladas. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FORO PERMANENTE DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS, IV Encontro para o Desenvolvimento das Energias Renováveis no Brasil, Recife, outubro, 1998. CD-Rom

GOMES, R. D. M. Eletrificação rural: um levantamento da legislação, 52p. Monografia – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001

GROUMPOS, P.P. & PAPAGEORGIOU, G. An Optimal Sizing Method For Stand-Alone Photovoltaic Power Systems, In: Solar Energy, Cleveland, Vol. 38, n. 5, 1986.

HELIODINÂMICA, Tecnologia solar Brasil, Catálogo Técnico

<<http://www.heliodinamica.com.br>> acessado em 23 de outubro de 2000

HIRSCHEFELD, H., Engenharia Econômica e Análise de Custos. 6^a. ed, São Paulo: Ed. Atlas, 1996.

KLEIN, S.A., Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, Solar Energy, Cleveland, v.19, pp 325, 1977

LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Desenvolvimento de Software para o dimensionamento de fontes alternativas geradoras de eletricidade. <http://www.labsolar.ufsc.br> Acesso em março de 2001.

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa SolarCad. <ftp://ftp.mecanica.ufrgs.br/solar/> Acesso em junho de 2001.

LIRA, F.J.M. Simulação numérica de uma central fotovoltaica interligada com a rede elétrica. 236p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1991.

LIU, B.H.Y., JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, Cleveland ,v.4,n.3,pp 1-18, 1962

LORENZO, E. Electricidad solar: Ingenieria de los sistemas fotovoltaicos, Salamanca Espanha: Artes Gráficas Gala, 1994.

OFRY, E.; BRAUNSTEIN, H. The loss of power supply probability as a technique for designing stand alone solar electric photovoltaic systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems. v. PAS -102, n. 5, May 1983.

OLIVEIRA, S.H.F. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo, 240p, Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, S.H.F., ZILLES R. Pequenos geradores fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de eletricidade. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 3, 1998, São Paulo, Anais ...

PALZ, W. Energia solar e fontes alternativas. São Paulo: Hemus - Livraria, 1981.

POSORSKI, R. “Photovoltaic Water Pumps, an Attractive Tool for Rural Drinking Water Supply” , Solar Energy, v. 58, pp. 155-163, 1996

RAMANI, K.V.. “Rural Electrification and Rural Development”. In: Rural Electrification Guidebook for Asia and Pacific. Bangkok, Tailândia: Edited by G. Saunier, 1992.

ROBERTS, S. SOLAR ELECTRICITY, Nova York, Estados Unidos: Prentice, 1990.

ROSSI, L.A. Modelo avançado para planejamento de sistemas energéticos integrados usando recursos renováveis. Tese de Doutorado, p. 180. Escola Politécnica – USP. São Paulo, 1995.

RUEGG, Rosalie ; SAV, G. Thomas. The Microeconomics of Solar Energy. Washington, DC: National Bureau of Standards, 1980.

RUTHER, R. KLEISS, G. Advantages of thin film solar modules in façade, sound barrier and roof-mounted pv systems, Eurosun’96, Freiburg, Alemanha, set, 1996.

SAHA, H. Design of a photovoltaic electric power system for an indian village. Solar Energy, Cleveland, vol 27(2), pp.103-107. 1981.

SANTOS, R. R. “Examining the use os Solar Electric Pumping Systems for Small scale Electricity Generation”, CIGR IV - Energy and Agriculture, Paper 36, pp 25-28, Stutgard, Germany, 1995.

SANTOS, R. R.; Mercedes, S. S. P.; Sauer, I. L. A reestruturação do setor elétrico brasileiro e a universalização do acesso ao serviço de energia elétrica. Revista Brasileira de Energia, Vol. 7, nº 2, 2º sem./1999.

SILVA, C. D., Avaliação do potencial eólico e solar para acionamento de pequenos sistemas de bombeamento na Fazenda Lageado. 90 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Faculdade de Ciências Agronômicas-UNESP, Botucatu, 2000.

SILVA, Marcos José; SILVEIRA, José Luiz; GOUVEIA, Paulo E. Energia Solar Fotovoltaica para Geração Descentralizada de Eletricidade no Brasil: A Necessidade de Subsídio por parte do Governo. In: Congresso Latino Americano de Generacion y Transporte de Energia Electrica, 4, 2000, Vina Del Mar, CH, p7 Anais... 2000.

WANG, W. Visual Basic 6 For Dummies, Petrópolis: Ed. Campus, 2000.