



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/SOLAR/DIESEL
APLICADO À VILA DE SUCURIJU-AMAPÁ**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**HELDER CRISTINO LIMA ANDRADE
RECIFE, DEZEMBRO DE 2007**

A553m Andrade, Helder Cristino Lima

Metodologia de projeto de sistema híbrido eólico/solar/diesel aplicado à Vila de Sucuriju-Amapá/ Helder Cristino Lima Andrade. - Recife: O Autor, 2007. xii, 95 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistemas híbridos de energia. 3. Sistema híbrido eólico/solar/diesel. 4. Projeto do sistema híbrido da Vila de Sucuriju-Amapá. I. Título.

621 CDD (22.ed.)

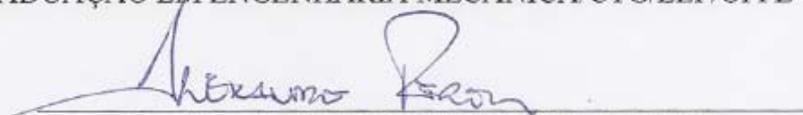
UFPE/BCTG/2008-115

**METODOLOGIA DE PROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/SOLAR/DIESEL
APLICADO À VILA DE SUCURIJU-AMAPÁ**

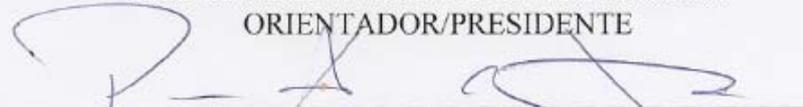
HELDER CRISTINO LIMA ANDRADE

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

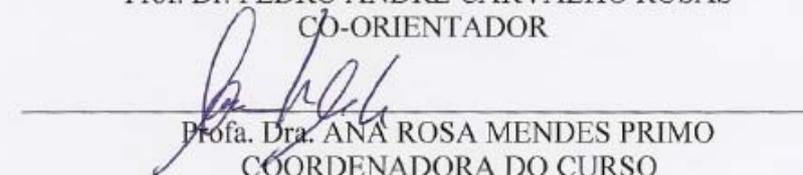
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA EÓLICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. ALEXANDRE DE LEMOS PEREIRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE



Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS
CO-ORIENTADOR



Prof.ª. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

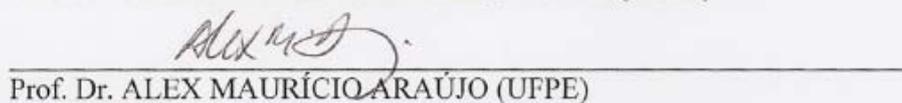
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ALEXANDRE DE LEMOS PEREIRA (UFPE)



Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)



Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)



Prof.ª. Dra. OLGA DE CASTRO VILELA (UFPE)

*Aos meus pais
Aos meus irmãos
À minha namorada*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo.

Agradeço ao meu pai Cristino e as minhas mães Hírdina e Judite pela educação e formação da pessoa que sou hoje.

Agradeço aos meus irmãos Endino (em memória), Cristino, Milton e Herman, mesmo longe sei que vocês sempre estiveram presentes.

Agradeço à minha namorada Janine pela paciência, perseverança e companheirismo nos momentos bons e difíceis, à minha cunhada Ronise pelo apoio.

Agradeço aos amigos e companheiros do Projeto Sucuriju que de uma forma ou de outra ajudaram para que esse trabalho fizesse corpo, são eles Daniela, Luiz, Sérgio e Claudomiro, aos colegas do mestrado Gilberto, Xistofenes, Gustavo, Helder, ao pessoal da eólica.

Agradeço ao Prof. Ivan, ao Prof. Alex, à Profª. Olga e à Profª. Ana Rosa que sempre apoiaram e incentivaram para esta batalha.

Agradeço à Eliane funcionária da Pós-Graduação.

Agradeço ao orientador Prof. Alexandre e ao co-orientador Prof. Pedro Rosas ambos pelo direcionamento e apoio.

Agradeço a Universidade Federal de Pernambuco e ao CNPq pelo apoio financeiro durante o Projeto Sucuriju e o mestrado.

RESUMO

A crescente preocupação mundial com a emissão dos gases efeito estufa, bem como a necessidade de uso de eletricidade nas regiões isoladas serve de incentivo para desenvolvimento e disseminação de tecnologias de geração de eletricidade descentralizada com fontes limpas e renováveis. Este trabalho enfoca metodologias e ferramentas para projeto de sistemas híbridos de energia e demonstra a aplicação com um projeto real.

A metodologia adotada envolve uma avaliação técnica-econômica de um sistema híbrido de geração de energia. A avaliação técnica inclui simulações em regime quase-estático realizadas hora-a-hora para verificar o funcionamento do sistema híbrido no período de um ano. As simulações são efetuadas utilizando o programa computacional *Hybrid2*, desenvolvido na Universidade de *Massachusetts at Amherst*. Uma caracterização precisa das fontes renováveis, do local em estudo, se faz necessário para determinar o comportamento diário, mensal e anual dos recursos. A demanda é estimada através de informações coletadas no local referentes à carga instalada, aos hábitos e costumes de uso de energia e à previsão de aumento da carga. Ainda, a metodologia apresenta a definição dos critérios para a configuração ideal dos componentes – turbina eólica, módulos fotovoltaicos, geradores diesel e bateria – para atender a demanda estimada para o sistema.

Também, neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de avaliação econômica acurada baseada no modelo econômico do *Hybrid2*, que inclui informações e formas de cálculo utilizadas no Brasil. A avaliação econômica contabiliza o custo de capital do sistema, os custos e despesas operacionais do sistema, além das receitas operacionais e os impostos acrescidos de juros e inflação.

Finalmente, é apresentada uma aplicação da metodologia e ferramenta de análise para o projeto de um sistema híbrido para a Vila de Sucuriju, uma comunidade de pescadores localizada às margens do rio Sucuriju no estado do Amapá.

Os resultados das simulações de várias configurações possíveis de sistemas híbridos foram classificados em função do consumo de óleo diesel, interrupções de fornecimento de energia, excesso de energia, número de horas de operação dos geradores diesel e a contribuição e vida útil do banco de baterias. Enquanto que a avaliação econômica das configurações foi baseada nos seguintes parâmetros: valor presente líquido, custo de geração de energia, período de retorno simples e taxa interna de retorno.

Palavras chaves: Sistemas híbridos; energia eólica; modelos; projeto Sucuriju; simulações.

ABSTRACT

The growing global concern with the issue of greenhouse effect gases, and the need for use of electricity in isolated regions serves as a spur to development and dissemination of technologies for decentralized generation of electricity with clean and renewable sources. This work focuses on methodologies and tools for design of hybrid energy systems and demonstrates the application with a real project.

The approach adopted involves a technical-economic evaluation of a hybrid system for the generation of energy. The technical evaluation includes simulations under quasi-static held hour-by-hour to verify the operation of the hybrid system in the period of one year. The simulations are conducted using the program computational Hybrid2, developed at the University of Massachusetts at Amherst. A precise characterization of renewables, the site under study, whether it is necessary to determine the behavior daily, monthly and annual resources. The demand is estimated from information collected at the site for the cargo installed, the habits and customs of use of energy and the anticipation of increased cargo. Still, the methodology presented the definition of the criteria for the ideal configuration of component-wind turbine, photovoltaic modules, diesel generators and battery-to meet the estimated demand for the system.

Also, this work was developed a tool for economic evaluation based on accurate economic model of Hybrid2, which includes information and forms of calculation used in Brazil. The economic evaluation counts the cost of capital in the system, the costs and operating expenses of the system, in addition to the operating revenues and taxes increased by interest and inflation.

Finally, it is submitted application of the methodology and analysis tool for the design of a hybrid system for the Town of Sucuriju, a community of fishermen located on the banks of the river Sucuriju in the state of Amapá.

The results of simulations of various possible configurations of hybrid systems were evaluated in terms of the consumption of diesel oil, interruptions of supply of energy, too much energy, number of hours of operation of the diesel generators and contribution and life of the bank of batteries. While the economic evaluation of settings was based on the following parameters: net present value, cost of generating energy, the return period simple and internal rate of return.

Keywords: Hybrid systems; wind energy; models; Sucuriju project; simulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura do sistema híbrido eólico/solar/diesel	19
Figura 2.2: Esquema da turbina eólica de pequeno porte	21
Figura 2.3: Curva de potência genérica de turbinas eólicas	23
Figura 2.4: Representação do efeito fotovoltaico.	23
Figura 2.5: Curva genérica de módulos fotovoltaicos	25
Figura 2.6: (a) efeito da variação da radiação solar (b) efeito da variação da temperatura	25
Figura 2.7: Curva típica de consumo específico de combustível [22].....	27
Figura 2.8: Efeito da temperatura na energia específica [23].....	30
Figura 2.9: Efeito da profundidade de descarga no ciclo de vida das baterias [23]	30
Figura 3.1: Diagrama da metodologia.....	34
Figura 3.2: Espectro da radiação solar	41
Figura 3.3: Diagrama de prioridade das cargas	44
Figura 4.1: Localização geográfica da vila de Sucuriçu	61
Figura 4.2: (a) e (b) vistas aéreas da Vila de Sucuriçu	62
Figura 4.3: Dados de velocidade de vento coletados com os espaços	63
Figura 4.4: Dados de velocidade de vento preenchidos	64
Figura 4.5: Médias mensais de velocidade de vento para as duas regiões.	64
Figura 4.6: Distribuição de frequência (Weibull) para as Correções e as Extrapolações à 50m ...	65
Figura 4.7: Velocidade de vento corrigida.....	66
Figura 4.8: Velocidade de vento diário médio horário para as estações.	67
Figura 4.9: Radiação solar coletada com espaços.....	67
Figura 4.10: Radiação solar com os espaços preenchidos	68
Figura 4.11: Distribuição do ano típico sem as incoerências.....	68
Figura 4.12: Comparação dos dados corrigidos com dados do Atlas Solarimétrico.....	69
Figura 4.13: Radiação solar diária média horária para as estações.....	69
Figura 4.14: Distribuição da Carga Total Instalada na vila de Sucuriçu.....	72
Figura 4.15: Distribuição diária da estimativa atual.....	73
Figura 4.16: Cenários para Estimativa da Demanda Atual.....	74

Figura 4.17: Distribuição diária da estimativa prevista com o aumento dos equipamentos	76
Figura 4.18: Cenários da estimativa com previsão de aumento	76
Figura 4.19: Curva de Potência da Turbina Eólica BWC Excel-R.....	78
Figura 4.20: Curva de corrente vs tensão na condição padrão do módulo I-110.....	80
Figura 4.21: Efeito da variação da intensidade luminosa do módulo I-110	80
Figura 4.22: Efeito da variação da temperatura do módulo I-110	80
Figura 4.23: Curva de consumo dos geradores diesel.....	81
Figura 4.24: Curva de capacidade da bateria S-460	81
Figura 4.25: Curva de ciclos vs profundidade de descarga da bateria S-460.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Classificação dos sistemas híbridos de geração de energia	12
Tabela 1.2: Principais sistemas híbridos de energia instalados no Brasil [8] e [9].....	14
Tabela 3.1: Demonstrativo de resultado do exercício [35].....	51
Tabela 4.1: Levantamento da carga instalada da vila de Sucuriçu (julho de 2005).....	70
Tabela 4.2: Consumo médio mensal e diário e mensal das categorias de carga	73
Tabela 4.3: Previsão de aquisição de equipamentos elétricos.....	75
Tabela 4.4: Análise financeira dos módulos fotovoltaicos	77
Tabela 4.5: Análise financeira das baterias.....	77
Tabela 4.6: Características e custos dos componentes.....	79
Tabela 4.7: Custos e parâmetros financeiros.....	82
Tabela 5.1: Potência instalada para a configuração básica I	85
Tabela 5.2: Potência instalada para a configuração básica II.....	85
Tabela 5.3: Potência instalada para a configuração básica III	85
Tabela 5.4: Resultados técnicos da configuração básica I.....	86
Tabela 5.5: Resultados técnicos da configuração básica II.....	86
Tabela 5.6: Resultados técnicos da configuração básica III.....	86
Tabela 5.7: Resultados da avaliação econômica da configuração I.....	87
Tabela 5.8: Resultados da avaliação econômica da configuração II.....	87
Tabela 5.9: Resultados da avaliação econômica da configuração III	88
Tabela 5.10: Resultados das análises para as configurações C8 e C11	89
Tabela 5.11: Resultados das análises paramétricas	90

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	8
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
1.1 Definição e Classificação de Sistemas Híbridos de Energia.....	12
1.2 Projetos e Configurações de Sistemas Híbridos de Energia.....	14
2 SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/SOLAR/DIESEL.....	18
2.3 Características e Estrutura do Sistema	18
2.4 Principais Características dos Componentes para Projeto dos Sistemas Híbridos de Energia.....	20
2.4.1 Turbina Eólica	20
2.4.2 Módulo Fotovoltaico	23
2.4.3 Gerador Diesel.....	25
2.4.4 Armazenamento.....	28
2.4.5 Conversores de Potência/Controladores de Carga.....	32
3 METODOLOGIA.....	34
3.5 Avaliação técnica.....	35
3.5.1 Definição das Séries Temporais dos Recursos Naturais	36
3.5.2 Definição da Série Temporal da Estimativa de Demanda.....	42
3.5.3 Definição da Configuração do Sistema de Potência.....	44
3.5.4 Definição das Estratégias e Parâmetros de Despacho para o Sistema.....	45
3.6 Avaliação Econômica.....	50
3.6.1 Custo do Capital	52
3.6.2 Receita Operacional do Sistema.....	54
3.6.3 Custos e Despesas Operacionais do Sistema.....	55
3.6.4 Parâmetros de Análise Econômica	58
4 PROJETO DO SISTEMA HÍBRIDO DA VILA DE SUCURIJU.....	61
4.1 Estimativa dos Recursos Energéticos.....	62
4.1.1 Recurso Eólico.....	63
4.1.2 Recurso Solar.....	67

4.2	Levantamento da Carga e Estimativa da Demanda	70
4.2.1	Estimativa Atual da Demanda	72
4.2.2	Previsão de Aumento da Demanda Estimada	75
4.3	Configuração do Sistema de Potência	76
4.4	Definição dos Parâmetros para a Avaliação Econômica	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
5.5	Resultados da Avaliação Técnica	85
5.6	Resultados da Avaliação Econômica	87
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

INTRODUÇÃO

Desde a crise mundial do petróleo na década de 70, vêm-se estudando o uso de novas alternativas para produção de eletricidade. Essas formas alternativas de geração de energia deveriam ter qualidade e custos equiparáveis e, com uma menor dependência do petróleo. Estes tornaram-se alvos de estudos em vários centros de pesquisas na área energética, espalhados pelo mundo.

Durante muito tempo, acreditou-se na interligação de todos os lugares do mundo através de rede elétrica. Na verdade, isto provavelmente nunca será possível devido ao alto custo da eletrificação de lugares com baixa demanda e de difícil acesso. Portanto, as necessidades energéticas de locais isolados (e. g. rede elétricas em ilhas e vilas) devem ser supridas por sistemas autônomos, descentralizados de geração de eletricidade.

No Brasil a busca por fontes de energia alternativas abre caminho para um novo mercado, que se encontra ainda, em seus primeiros passos [1]. O potencial de geração que aproveita a radiação solar (fotovoltaica), a velocidade do vento (eólica) e a biomassa têm no país um cenário ideal para desenvolver-se. Além disso, a crescente demanda do setor rural, as dificuldades do setor elétrico, as pressões políticas e sociais exigem busca de soluções. Para isso, é necessário o engajamento de setores públicos e privados (e. g. governo, entidades de ensino e pesquisa, produtores, etc) para o desenvolvimento dessas alternativas energéticas [2].

O governo brasileiro instituiu através do Decreto nº 4.873º, de 11 de novembro de 2003 o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica, Luz para Todos, conhecido como Programa Luz Para Todos. O Programa visa prover, até o ano de 2008, o acesso à energia elétrica à totalidade da população do meio rural, visto que, 80% da exclusão elétrica está no meio rural. A meta é atender cerca de 2,5 milhões de famílias brasileiras residentes na área rural, beneficiando cerca de 12 milhões de pessoas. O Programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e operacionalizado com a participação das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) [3].

Dentro desse contexto o MME, em parceria com o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) e o Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e, com o apoio do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), lançou o Edital nº 003/2003 com o objetivo

de desenvolver soluções tecnológicas criativas para eletrificação das comunidades isoladas da Amazônia Legal Brasileira, região que concentra maior número das comunidades sem energia elétrica [3]. Devido a grande dispersão das comunidades amazônicas e as difíceis condições de acesso, por conta do tipo de solo e do regime de chuvas, o fornecimento de energia elétrica não pode ser realizado mediante extensão de rede.

Desde meados dos anos 80, os geradores de energias renováveis, impulsionados pelo vento, sol (fotovoltaico), ou água (Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCH's) vêm se tornando uma alternativa de máquinas geradoras para produção de energia, em detrimento dos geradores diesel, normalmente utilizados em locais remotos. O uso de energia renovável, nestes locais, tem como principal meta reduzir a poluição ambiental causada pela queima, transporte e armazenamento de óleo diesel.

O governo Federal do Brasil se comprometeu a reduzir a emissão de poluentes atmosféricos com o uso diversificado das fontes renováveis após a ratificação do Protocolo de Kyoto. Segundo Yu [4], no início dos anos 90 o seqüestro de carbono foi lançado na Convenção do Clima da Organização das Nações Unidas (ONU), como um instrumento de flexibilização dos compromissos de redução das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) dos países com metas de redução. Sendo assim, uma das modalidades dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kyoto para mitigar o aquecimento global. Os projetos do MDL devem contribuir para o desenvolvimento sustentável do país hospedeiro. Estes devem passar pela aprovação dos respectivos governos nacionais, segundo suas necessidades e prioridades específicas, a depender de sua matriz energética, condições geomorfológicas e inserção político-econômico no cenário internacional.

A matriz energética brasileira tem forte participação das energias renováveis. O Banco de Informações de Geração da ANEEL mostra que a matriz elétrica do Brasil possui 1.668 empreendimentos em operação totalizando 108,35 GW de capacidade instalada, das quais: hidroelétrica 70,89%; gás 10,47%; petróleo 4,05%; biomassa 3,68%; nuclear 1,85%; carvão mineral 1,31%; eólica 0,22%, por fim (provenientes dos países como: Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai) importação 7,54% [5].

De acordo com o quarto relatório dos especialistas do Painel Intergovernamental para Mudança Climática (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) o dióxido de carbono é

o principal GEE antropogênico. Diz ainda no relatório, que a concentração mundial atmosférica de dióxido de carbono aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 280 ppm para 379 ppm em 2005. A principal fonte do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono desde o período pré - industrial resulta da utilização dos combustíveis fósseis e da utilização da terra que fornece outra mudança significativa, mas de menor contribuição. As emissões anuais de dióxido de carbono aumentaram em média 6,4 (6,0 a 6,8) GtC [6].

Ainda, de acordo com esta última avaliação científica, os especialistas alertam para as conseqüências do fenômeno, tais como: aumento da temperatura mundial entre 1,1 e 6,4°C em relação a 1980-1999 até 2100 (valores médios 1,8 e 4°C); derretimento acelerado da camada de gelo nos pólos; aumento dos níveis dos oceanos de 0,18 a 0,59 m; ondas de calor e fortes chuvas, nas latitudes mais elevadas, mas com diminuição nas regiões emersas subtropicais, ciclones tropicais, tufões e furacões mais intensos [6].

A utilização de energia renovável como parte ou principal contribuição de um sistema de geração de eletricidade, pode ser atrativa para a maioria dos locais isolados. Geralmente, os sistemas isolados eletrificados utilizam geração termelétrica com grupos geradores diesel.

Os Sistemas Híbridos de Energia (SHE), (em inglês *Hybrid Power Systems (HPS)*) alvo desta dissertação, podem representar uma solução em aplicações remotas e, também, proporcionar uma geração segura de eletricidade, combinando diversas fontes de energia (renováveis e convencionais).

O trabalho aqui proposto tem como objetivo geral desenvolver e aplicar uma metodologia de projeto de sistema híbrido eólico/solar/diesel para a vila de Sucuriju-Amapá.

E como objetivos específicos:

- Apresentar a tecnologia de sistemas híbridos;
- Analisar os recursos naturais disponíveis e a carga a ser atendida;
- Definir os componentes básicos do sistema;
- Simular a operação eletro – energética do sistema em regime quase permanente (utilizando-se do programa computacional *Hybrid2*);
- Simular a parte econômica – financeira utilizando a planilha desenvolvida;

- Analisar os resultados técnicos e econômicos para definição da configuração final do sistema e definir assim sua viabilidade.

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica que começa por definir e classificar sistemas híbridos de energia. Ainda, neste capítulo, encontram-se apresentados vários trabalhos desenvolvidos para projetar e configurar sistemas híbridos correlacionados a essa dissertação.

No Capítulo 2 são definidos as características, a estrutura e os modos de operação do sistema híbrido projetado. Também, são apresentados os componentes básicos e suas principais características, para projeto de sistemas híbridos de energia, especificamente eólico/solar/diesel.

O Capítulo 3 representa maior importância para este trabalho por apresentar a metodologia aplicada nesta dissertação. Nele são definidos os procedimentos utilizados para a avaliação técnica e econômica que vão desde a estimativa dos recursos energéticos e da demanda, a configuração básica do sistema, definição de estratégias e parâmetros de controle. Neste capítulo, também, é apresentado o modelo teórico utilizado para o desenvolvimento da ferramenta de avaliação econômica.

O Capítulo 4 tem como propósito aplicação da metodologia proposta. No capítulo encontram-se definidos os principais dados de entrada para a simulação técnica e econômica para a configuração do sistema híbrido eólico/solar/diesel aplicada à vila de Sucuriçu.

No Capítulo 5 encontram-se apresentados os resultados das simulações técnicas e econômicas definindo a configuração final para o sistema híbrido a ser instalada na vila de Sucuriçu. Também, são realizadas análises paramétricas de diferentes situações consideradas.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e as propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para um melhor entendimento da revisão bibliográfica, o Capítulo está dividido em: Definição e Classificação de Sistemas Híbridos de Energia e Projetos e Configurações de Sistemas Híbridos de Energia.

1.1 Definição e Classificação de Sistemas Híbridos de Energia

O termo SHE é usado para descrever qualquer sistema autônomo de geração de energia e uso de eletricidade com mais de um tipo de gerador. Geralmente, são constituídas por uma fonte de energia renovável – energia eólica, energia solar, energia das ondas, energia hidroelétrica (quando do tipo pequena central hidráulica) ou sistema de energia à biomassa, etc – geradores convencionais – geradores diesel, turbinas a gás, etc – e, acumuladores de energia –baterias, supercapacitores, flywheel (volantes de inércia), células combustível etc.

Em geral, sistemas híbridos eólico/solar/diesel combinam os seguintes equipamentos: turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos (PV), geradores diesel e baterias. Estes devem suprir cargas de escala desde algumas centenas de watts (casas) até a potência no nível de Megawatts (redes elétricas isoladas em ilhas ou vilas).

Estes sistemas propõem-se como uma solução tecnológica e econômica viável e disponível em virtude dos custos dos sistemas convencionais de geração e transmissão. As grandes distâncias de linhas para atender locais isolados, bem como, áreas de baixa densidade populacional tornam a extensão da rede praticamente inviável nos moldes dos programas de expansão da eletrificação tradicional.

Para Pereira [7], não existe uma classificação internacional padrão para estes sistemas. Todavia, podem ser classificadas em quatro tipos definidos pela aplicação específica, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 1.1: Classificação dos sistemas híbridos de geração de energia

SISTEMA	POTÊNCIA	DEMANDA	QUALIDADE
Home	0,5 – 20kW	4 – 8h	regular
Tele	2 – 50kW	24h	ótima
Vila	30 – 600kW	8 – 24h	boa
Ilha	> 600kW	24h	ótima

A coluna POTÊNCIA indica a capacidade instalada de cada sistema. Enquanto que a coluna DEMANDA indica a utilização da energia em termos de horas de uso por dia ou, pode também, ser entendida como uma medida da confiabilidade do sistema (isto é, 24h/dia significa fornecimento ininterrupto de energia). A coluna QUALIDADE define o nível de qualidade da energia elétrica fornecida em termos de controle de tensão e da frequência.

Para cada caso existem particularidades que diferenciam os sistemas e influenciam a forma de analisá-los. Os sistemas do tipo HOME são aplicações para atender pequenas necessidades em um curto espaço de tempo requerendo uma qualidade regular de energia (iluminação, televisão, pequenas cargas residências, sistemas rurais, etc). Entretanto, sistemas tipo TELE são empregados em aplicações com características comerciais específicas que necessitam de um alto grau de confiabilidade no suprimento e qualidade da energia (estações repetidoras de rádio e televisão, antenas de telefonia celular, bóias e faróis, pequenas fábricas e frigoríficos, postos de saúde, etc). Os sistemas híbridos do tipo VILA são empregados em aplicações de eletrificação rural em pequenas comunidades e usos produtivos que não necessitam de exigentes padrões de qualidade da energia fornecida pelo sistema (projetos de irrigação, fábricas de gelo e indústrias de mineração, etc). Finalmente, os sistemas do tipo ILHA são sistemas de geração elétrica com potência nominal, entre centenas de quilowatts até alguns Megawatts, utilizados para fornecer eletricidade em sistemas isolados (ilhas e na região amazônica, pequenas fábricas e processos industriais).

No Brasil encontram-se instalados mais de 400 sistemas isolados [8]. O objetivo principal destes sistemas instalados é utilizar as fontes renováveis como instrumento de inclusão social e desenvolvimento sustentável em áreas rurais isoladas. A Tabela 1.1 apresenta os principais sistemas híbridos de energia instalados no Brasil e suas características específicas.

Tabela 1.2: Principais sistemas híbridos de energia instalados no Brasil [8] e [9]

Dados	Fernando de Noronha	Campinas	Joanes	Praia Grande	Tamaruteua	Araras	São tomé
Eólico	1 x 225 kW	-	4 x 10 kW	1 x 7,5 kW	2 x 7,5 kW	-	1 x 7,5 kW
Fotovoltaico	-	80 x 64 Wp	19 x 55 Wp	-	32 x 120 Wp	320 x 64	40 x 80 Wp
Diesel	2 x 900 kVA	2 x 60 kVA	-	2 x 7,5 kVA	1 x 40 kVA	3 x 60 kVA	1 x 20 kVA
Bateria	-	120 x 200 Ah; 8 V	200 x 1000 Ah; 2 V	20 x 150 Ah 12 V	64 x 185 Ah 12 V	-	40 x 155 Ah 12 V
Inversor	-	1 x 50 kW	1 x 52,5 kW (rotativo)	2 x 4 kW (estático)	1 x 18 kW (estático)	32 x 650 W (estático)	1 x 16 kW (estático)
Localização	Pernambuco	Amazonas	Pará	Pará	Pará	Rondonia	Pará
Data de Instalação	2000	1996	1997	1998	1999	2001	2003
Situação	operando	operação parcial (somente diesel)	desativado	operação parcial (somente diesel)	operando (revitalizado e expandido)	operando	em desativação
Causa	-	falta de manutenção	falta de manutenção	falta de manutenção	-	-	extensão da rede
Observação	passível de expansão	passível de revitalização	-	passível de revitalização	-	problemas nos inversores	em desmobilização (término 2007)

1.2 Projetos e Configurações de Sistemas Híbridos de Energia

Nesta seção serão apresentados os trabalhos desenvolvidos no Brasil e no mundo para desenvolvimento e disseminação da tecnologia envolvida na concessão de projetos de SHE.

Costa [10] apresenta na sua dissertação uma metodologia aplicada para projetos de sistema híbrido eólico-solar-bateria em locais isolados como alternativa tecnológica e econômica à extensão da rede elétrica convencional e ao gerador diesel. O trabalho desenvolvido apresenta um programa computacional, denominado *Wind-Solar-Battery HPS Balance Analyser – HySyS*, baseado em linguagem científica Matlab[®] para simular em regime quase-estático o sistema híbrido. O HySyS constitui uma ferramenta computacional importante para configuração destes sistemas, estimativa do comportamento ao longo prazo e subsídio de informações a uma análise econômica acurada.

No que diz respeito às várias análises apresentadas pela bibliografia, o trabalho de Blasques *et al* [11] mostra que a solução híbrida pode ser competitiva frente ao diesel e à rede, particularmente quando esta dista mais de 10 km da comunidade. O trabalho visa disponibilizar informações e fornecer meios para viabilizar o uso de fontes renováveis no processo de universalização dos serviços de eletricidade. Neste sentido, realizou-se um estudo de sensibilidade do custo de energia elétrica fornecida a uma pequena comunidade, com características Amazônicas.

Ainda neste contexto de viabilização de implantação de sistemas híbridos de energia, Barbosa & Pinho [12] utilizam a lógica difusa (do inglês *fuzzy logic*) como ferramenta de auxílio para analisar um sistema com a capacidade de até 50 kW em localidades isoladas da região norte do Brasil. Os resultados qualitativos obtidos mostram que o emprego dessa lógica pode ser uma alternativa satisfatória na análise de viabilidade.

Já o trabalho de Kaldellis & Kavadias [13] propõe a configuração de um sistema híbrido eólico/diesel/bateria para atender a demanda energética dos consumidores remotos, sob as restrições de mínimo custo de ciclos de vida. Para este proposto foi desenvolvido um modelo integrado de custo benefício, que origina princípios capazes de estimar o comportamento financeiro de aplicações similares num programa computacional operacional ao longo prazo. Este algoritmo leva em consideração os custos de instalação, os custos de manutenção e operação fixa e variável, incluindo a variação do combustível e taxas de inflação do mercado.

Nelson *et al* [14] apresentam uma avaliação econômica de um sistema híbrido de geração de energia eólico/solar/células combustível para uma casa típica no Nordeste do Pacífico. O sistema é comparado com tradicionais sistemas híbridos de energia que utilizam baterias como sistema de armazenamento. Um programa computacional foi desenvolvido para dimensionar os componentes. Análises de custos de eletricidade, de custos totais do sistema e de extensão da rede são também calculadas para cada configuração.

O artigo de Barley *et al* [15] descreve uma análise de sistemas híbridos eólico/solar para atender residências não interligadas a rede em Inner Mongólia – China. O dimensionamento dos componentes baseia-se num subjetivo “*trade-off*” entre os custos do sistema e a percentagem de carga não atendida. Utilizou-se o software Hybrid2 em conjunto com um modelo simplificado de séries temporais. Os resultados mostram que a combinação de eólica e solar possui maior custo efetivo que qualquer um dos sistemas sozinhos. Concluiu-se também, que o aumento da quantidade relativa de painéis fotovoltaicos no projeto provoca um aceitável decréscimo da carga não-atendida quando ocorre a diminuição da velocidade de vento.

Elhadidy & Shaahid [16] mostram que, em vista do aumento do custo, da poluição e do medo de extinção do petróleo e carvão mineral os governos a volta do mundo estão incentivando a busca por fontes de energia renovável sustentável. Neste sentido, o trabalho propõe uma avaliação do sistema híbrido eólico/diesel para atender cargas requeridas de centenas de prédios típicos

(demanda elétrica anual de 3512 MWh) na Região Costeira do Leste da Arábia Saudita. A avaliação mostra que utilizando sete turbinas eólicas de 150 kW e um dia de armazenamento por baterias o sistema diesel teve de atender 21,6% da demanda. Entretanto, com três dias de bateria o sistema diesel teve de prover 17,5% da demanda e na ausência de armazenamento, cerca de 37% da demanda teve de ser provida pelo diesel. Também, variaram-se as turbinas eólicas para identificar o tamanho ótimo do equipamento.

Para o atendimento das necessidades das regiões isoladas, alguns trabalhos apresentam soluções utilizando recursos renováveis locais para suprir tais necessidades. O trabalho de Manolakos *et al* [17] desenvolve uma ferramenta para dimensionar um sistema híbrido que utiliza turbina eólica e módulos fotovoltaicos para atender um dessalinizador. O programa simula a produção dos componentes e a quantidade de água. Utilizou-se uma aplicação na vila de Mersini na ilha Donoussa, Grécia. A ilha não é eletrificada e não dispõe de água límpida. Os resultados mostram que este programa de simulação constitui uma ferramenta valiosa não só para combinação ótima das tecnologias, mas também ótimo gerenciador de energia do complexo sistema híbrido.

Neste mesmo contexto, Mohamed & Papadakis [18] mostram que o armazenamento de água para consumo constitui um problema para diversas regiões, tais como: desertos, áreas isoladas, países da região Mediterrânea e ilhas. O artigo propõe um dimensionamento de um sistema híbrido eólico-solar e um dessalinizador de osmose reversa, com recuperação de energia utilizando um modelo simplificado baseado na análise técnica-econômica. O estudo compara o custo da produção de água entre que utiliza somente painéis fotovoltaicos e um sistema híbrido eólico-solar. O mesmo conclui que o custo da produção de água é maior para o sistema que utiliza somente solar em relação ao sistema eólico solar em virtude do custo inicial dos módulos fotovoltaicos.

Katti & Khedkar [19] justificam o uso de fontes de energias renováveis como opção confiável para locais remotos. O trabalho apresenta um algoritmo numérico simples desenvolvido para determinar a capacidade de geração ótima e armazenamento necessário para um sistema utilizando eólico ou solar e, integrando eólico/solar para um local remoto na Índia que satisfaça a carga típica.

Os resultados apresentados por Nfah *et al* [20] mostram que existe uma possibilidade de aumentar a taxa de acesso à eletricidade. No trabalho utilizou-se um modelo para dimensionar um sistema híbrido para suprir energia em uma província distante ao norte de Camarões sem recursos

para extensão da rede ou da instalação de mais geração térmica ou mais geradores diesel independentes.

Grande parte destes trabalhos referenciados apresenta concepções metodológicas de projeto de SHE utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Porém, as particularidades de cada projeto, por vezes, tornam as metodologias específicas aos projetos concebidos. Esta dissertação, especificamente, propõe e desenvolve uma metodologia que enfoca, principalmente, as análises dos recursos energéticos (naturais) e as análises de viabilidade técnica e econômica para a concepção de projeto de um sistema híbrido eólico/solar/diesel.

2 SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO/SOLAR/DIESEL

Neste capítulo são definidas as características e a estrutura do sistema híbrido eólico/solar/diesel, bem como as principais características dos componentes para projeto do sistema.

2.3 Características e Estrutura do Sistema

Neste trabalho, são consideradas as principais características do sistema híbrido de energia. O sistema deve atender local isolado (meio rural e ilhas), onde a interligação com a rede de transmissão seja praticamente inviável. Além disso, deve minimizar o consumo do combustível dos geradores diesel, através de uso maior das fontes renováveis (sol e vento). Outra característica importante é diminuir a poluição do meio ambiente provocado pelo transporte, armazenamento e combustão do óleo diesel. Finalmente, o sistema deve manter a qualidade e a confiabilidade da energia requerida.

Estes sistemas são encontrados em diversas configurações possíveis e várias estratégias de controle. A Figura 2.1 mostra uma configuração onde todos os geradores e sistemas de armazenamento estão conectados no barramento de corrente alternada (CA), isto é, diretamente na mini rede. Toda a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas é injetada na rede elétrica de maneira intermitente e variável. O inversor bidirecional é componente responsável pela formação da rede e controle dos valores de tensão e de frequência, que o faz através do controle do fluxo de potência utilizando energia do sistema de armazenamento de energia. Geradores diesel podem ser incluídos como geradores reservas.

O sistema possui os seguintes modos de funcionamento e operação:

Modo 1: Fontes intermitentes suprem a demanda e o banco de baterias é carregado. Esta situação ocorre quando a produção de energia é maior do que a demanda e o sistema de armazenamento não está totalmente cheio. O inversor, formador de rede, controla o fluxo de potência ativa e reativa mantendo a mini rede estável e utiliza o excesso de carga para carregar o banco de baterias. O diesel está desligado.

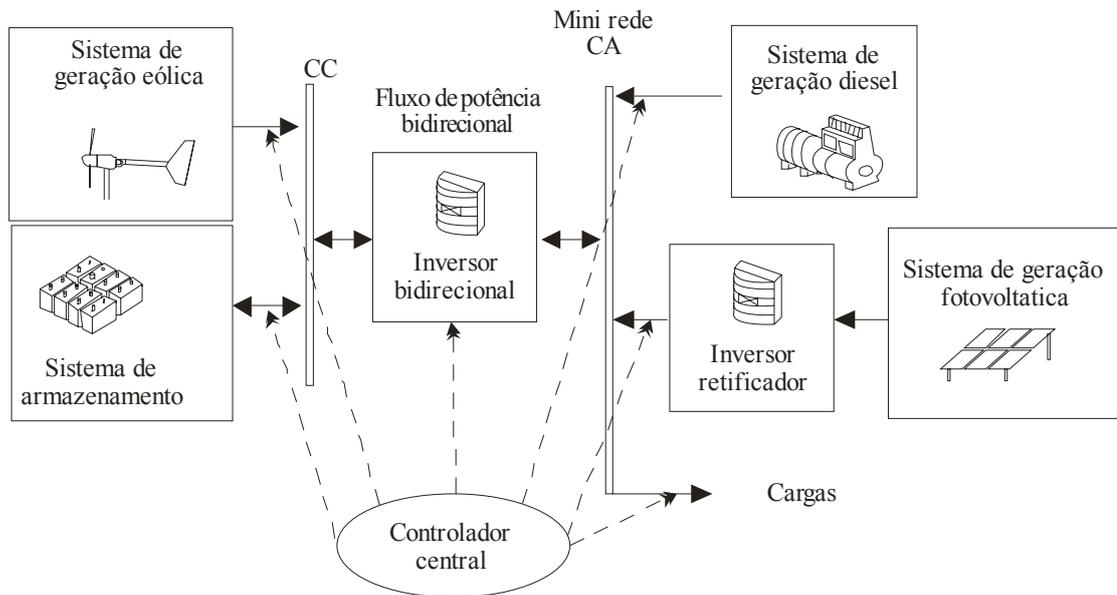


Figura 2.1: Estrutura do sistema híbrido eólico/solar/diesel

Modo 2: Fontes intermitentes suprem a demanda e o banco de baterias é mantido em flutuação. Esta situação ocorre quando a produção de energia é maior do que a demanda e o sistema de armazenamento está totalmente cheio. O excesso de energia é utilizado para manter as baterias em tensão de flutuação (100% da capacidade). Um ou mais geradores renováveis podem estar limitando suas produções de potência. O diesel está desligado.

Modo 3: Inversor e fontes intermitentes atendem a demanda e o banco de baterias é descarregado. Neste caso, a produção de energia pelas fontes intermitentes é menor do que a demanda e o déficit de energia é compensado pelo sistema de armazenamento. O diesel está desligado.

Modo 4: Inversor apenas atende a demanda e o banco de baterias é descarregado. Quando não houver produção de energia pelas fontes intermitentes o inversor utiliza a energia do sistema de armazenamento para atender as cargas. O diesel está desligado.

Modo 5: As cargas estão desligadas ou o gerador diesel atende a demanda. Esta situação ocorre quando a produção de energia das fontes intermitentes é menor do que a demanda e o sistema de armazenamento está vazio (atingiu sua capacidade mínima admissível). O inversor utiliza energia produzida pelas fontes renováveis e/ou pelo gerador diesel para carregar o banco de baterias.

Esta arquitetura pode ser usada com mini redes trifásicas ou monofásicas e a instalação elétrica é quase idêntica àquela utilizada em sistemas convencionais de geração de eletricidade. Há uma maior flexibilidade tanto na implantação do sistema quanto na sua operação, pois os componentes do sistema podem ser instalados praticamente em qualquer ponto da mini rede, e não há necessidade de utilização de um controlador central para mover o sistema entre os 5 modos de operação possíveis. As funções de formação de rede, suporte de rede, carga/descarga das baterias, liga/desliga de cargas controladas e geradores diesel podem ser realizados por inversores/controladores projetados especialmente para uso em sistemas híbridos de energia, com características de robustez, confiabilidade e eficiências compatíveis com esta aplicação. Também, existem equipamentos específicos para maximizar e injetar a potência produzida pelas fontes intermitentes em mini redes, que junto com os inversores/controladores especiais facilitam e simplificam a implantação desta arquitetura.

A seguir são apresentadas as principais características dos componentes para o projeto do sistema híbrido eólico/solar/diesel proposto nesta dissertação.

2.4 Principais Características dos Componentes para Projeto dos Sistemas Híbridos de Energia

As características mais relevantes de cada componente de sistemas híbridos eólico/solar/diesel para projeto devem atender a alguns requisitos como: alta eficiência, fácil instalação, condições e restrições de operação, baixa manutenção e fácil reposição de peças do sistema, alta confiabilidade e robustez.

2.4.1 Turbina Eólica

Sendo a turbina eólica o equipamento que converte a energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação (através do rotor) e em energia elétrica (através dos geradores elétricos acoplados ou não a multiplicadores de velocidade), elas podem ser classificadas segundo vários critérios. Um dos critérios é a orientação do seu eixo – rotores de eixo vertical e eixo horizontal. Todavia, grande parte das turbinas eólicas disponíveis no mercado internacional é do tipo de rotores de eixo horizontal.

O rotor é um dos componentes mais importantes das turbinas eólicas e a sua configuração influenciará diretamente no rendimento da turbina eólica. Ele é movido por forças aerodinâmicas

chamadas de forças de sustentação (*Lift* termo anglo-saxônico muito usado na literatura técnica), que atuam perpendicularmente ao escoamento do vento, e forças de arrasto (*Drag*) que atuam na direção de escoamento do vento.

Em sistemas híbridos de energia, para atender pequenas comunidades isoladas, em geral, são utilizadas turbinas eólicas de pequeno porte, esquematizada na Figura 2.2.

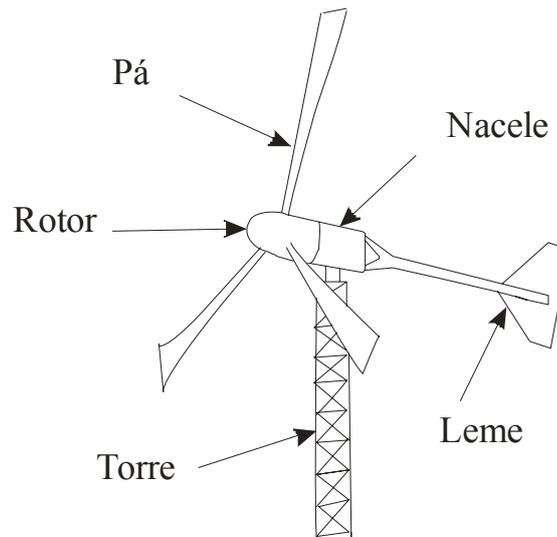


Figura 2.2: Esquema da turbina eólica de pequeno porte

Os principais componentes dessas turbinas eólicas de pequeno porte são: pás, leme de direcionamento, torre e gerador elétrico.

As pás podem ser rígidas e feitas de madeira, alumínio ou fibra de vidro. O material usado na confecção das pás, a princípio, não tem efeito na potência elétrica de saída, porém tem uma forte influência na robustez e instalação das turbinas eólicas em locais isolados.

Nas turbinas eólicas de pequeno porte geralmente são utilizados geradores síncronos constituídos de ímãs permanentes que produzem energia em velocidade variável e em frequência variável o que exige um sistema condicionador de potência para a maioria das aplicações. Algumas topologias utilizam na construção desses geradores a opção de colocar o rotor do gerador diretamente acoplado às pás, permanecendo o estator do gerador elétrico fixo internamente ao rotor aerodinâmico. Esta condição permite uma maior confiabilidade do sistema e uma vida útil maior ao sistema de geração podendo atingir eficiências de 75 á 95%.

Estas turbinas eólicas de pequeno porte, foco desta dissertação, possuem configuração do tipo *upwind*¹. O leme permite o contrabalanço da turbina através do seu peso e a orientação em relação à direção do vento. Este componente também permite um auto embandeiramento que consiste na retirada do rotor da incidência do vento a partir de uma determinada velocidade de vento. As forças atuantes no rotor aerodinâmico irão embandeirar a turbina quando o empuxo sobre o rotor produzir um momento suficiente para sobrepor o momento resistente do leme.

As turbinas eólicas de eixo horizontal precisam de torres de sustentação para distanciar do vento turbulento causado pelos obstáculos próximo ao solo e também para permitir melhores ventos no rotor aerodinâmico. Os elementos de sustentação podem ser do tipo estaiada ou auto-portante, sendo ainda treliçadas ou tubulares. Em geral, as torres devem ser de fácil transporte, baixo custo, devendo ser protegidas contra corrosão por galvanização. A altura das torres depende de fatores como: diâmetro das pás da turbina eólica e de obstáculos e condições do terreno.

Uma das principais características da turbina eólica para as análises técnicas é a curva de potência, que apresenta a potência elétrica produzida em relação a velocidade do vento incidente na turbina eólica. Na curva de potência as principais características dela são as velocidades de vento de “*cut in*” e “*cut out*”, que indicam, respectivamente, as velocidades mínimas e máximas (V_{min} e V_{max}) na qual a turbina eólica gera potência.

A velocidade de “*cut out*” é a velocidade que a partir dela ocorre a saída do rotor da direção do vento e conseqüente redução da produção de eletricidade (o embandeiramento da turbina). Outra característica é a velocidade nominal “*rated*” (V_n) que indica a velocidade do vento na qual a potência nominal (P_n) é gerada. A seguir a Figura 2.3 apresenta uma curva de potência genérica de turbinas eólicas com a indicação das principais características das turbinas eólicas.

A simplicidade mecânica das turbinas eólicas de pequeno porte propicia um reduzido custo de fabricação, boa confiabilidade e robustez. Isto contribui para uma vida útil em média de 25 anos, com manutenção em média, a partir do quinto ano de operação e fácil instalação do equipamento.

¹ *Upwind* turbinas eólicas nas quais o vento passa pelo rotor aerodinâmico e depois pelo gerador e torre

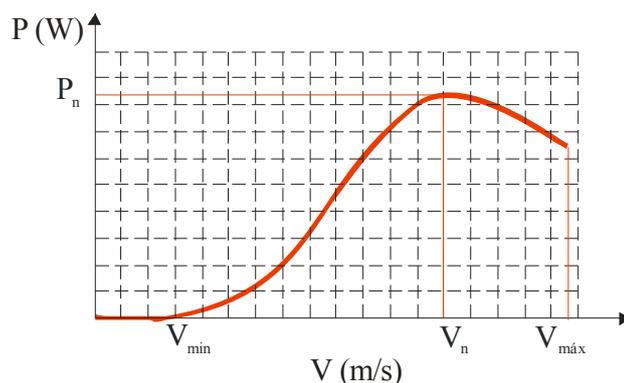


Figura 2.3: Curva de potência genérica de turbinas eólicas

2.4.2 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é um gerador de energia composto por um conjunto de células fotovoltaicas. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental na obtenção de energia através do processo de conversão da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico²) [21]. O efeito fotovoltaico consiste no bombardeamento de um elemento semicondutor com fótons que causam o aparecimento de lacunas e elétrons resultando em uma diferença de potencial nos extremos de uma célula, como mostra a Figura 2.4.

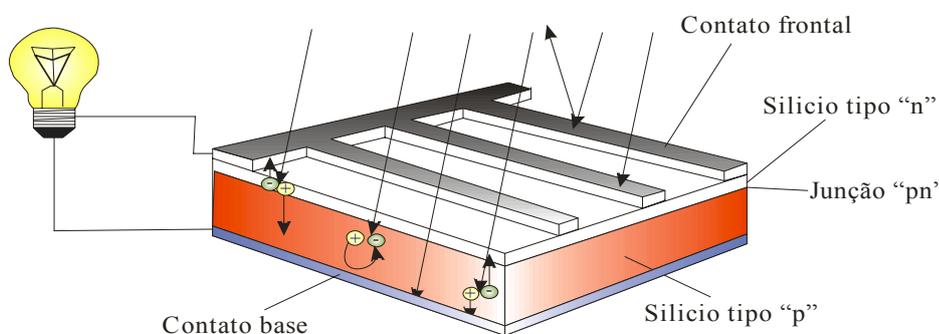


Figura 2.4: Representação do efeito fotovoltaico.

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, com o silício (Si) sendo dopado com outros elementos para melhorar a sua eficiência. A construção das células fotovoltaicas pode ser a partir de cristais monocristalinos que exigem um altíssimo grau de pureza (estrutura molecular). Estas células de silício monocristalino são um dos tipos mais utilizados por apresentar as maiores eficiências, em torno de 15% podendo chegar a 18%. Além disso, elas

² Relatado em 1839 por Edmond Becquerel.

possuem grande estabilidade na geração ao longo de sua vida útil, porém essas células são mais caras.

Outra forma de obtenção da célula fotovoltaica é a partir de cristais policristalinos, onde a pureza é inferior ao cristal monocristalino, por exigir um processo de preparação menos rigoroso. Apresenta bom desempenho ao longo de sua vida útil e, são relativamente mais baratas que as de cristais monocristalinos, mas a eficiência cai chegando a valores em torno de 12,5%.

Já as células de silício amorfo apresentam um custo bem inferior mostrando-se uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Entretanto, são células que mostram baixa confiabilidade por apresentar menor eficiência de conversão comparando com as outras. Elas são afetadas por um processo de degradação ocorrendo diminuição de sua eficiência ao longo da vida útil, mostrando-se assim instável.

Pela baixa tensão e corrente de saída de uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. As células fotovoltaicas são associadas em série (somando a tensão da célula) para atingir tensões padrões de 6, 12 e 24V_{cc} e em paralelo para aumentar a potência com a mesma tensão.

A Figura 2.5 mostra a curva característica genérica de módulos fotovoltaicos, que é definida na condição padrão (radiação de 1000W/m² e temperatura de 25°C na célula). Essa curva apresenta as principais características elétricas do módulo fotovoltaico que são: tensão de circuito aberto (V_{oc}); corrente de curto circuito (I_{sc}); potência pico, na condição padrão ($P_{p, max}$); tensão na condição de potência pico (V_{pm}); corrente na condição de potência pico (I_{pm}). Geralmente, a potência dos módulos é dada em termos de Watts Pico referindo-se à potência produzida na condição padrão.

As características elétricas de módulos fotovoltaicos sofrem influências pela variação da radiação solar e da temperatura das células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa (radiação solar) e, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia, baixando assim, os pontos de operação para potência máxima de geração, como mostra a Figura 2.6 (a) e (b), respectivamente.

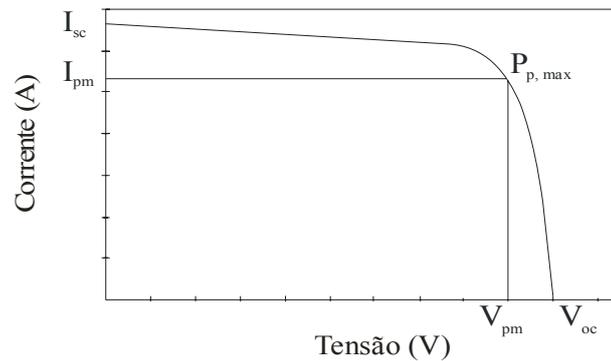


Figura 2.5: Curva genérica de módulos fotovoltaicos

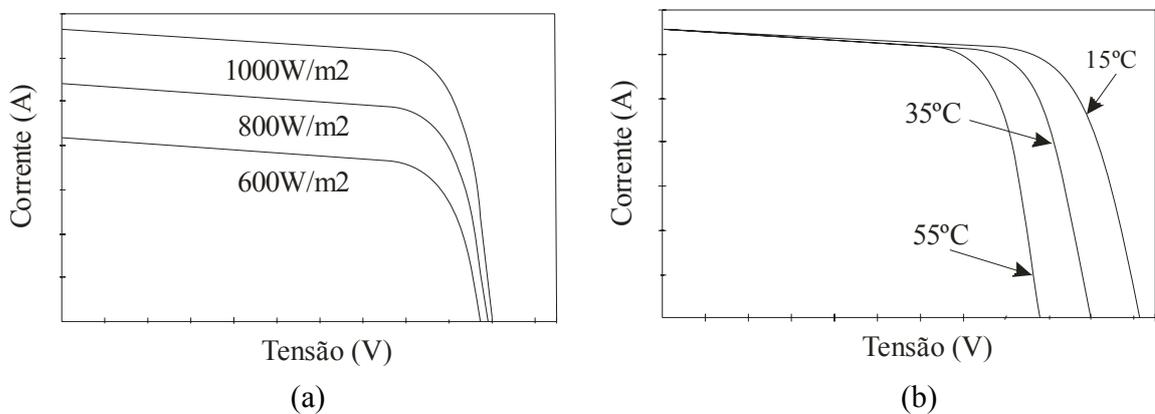


Figura 2.6: (a) efeito da variação da radiação solar (b) efeito da variação da temperatura

Os módulos fotovoltaicos requerem pouca manutenção, em geral uma limpeza dos módulos. Normalmente, os módulos fotovoltaicos são posicionados dessa forma: “olhando” o norte se estiver no hemisfério sul e “olhando” o sul, caso contrário. A inclinação vai depender da otimização pretendida, além de proporcionar uma limpeza fácil. A instalação é de baixa complexidade e a estrutura depende do peso dos módulos a serem instalados na área disponível.

2.4.3 Gerador Diesel

Grupo gerador diesel é constituído pelo conjunto de motores diesel e geradores elétricos (freqüentemente chamados de alternadores). Esse conjunto é convenientemente montado e dotado de componentes de controle e supervisão para o seu funcionamento autônomo na produção de energia elétrica a partir do consumo de combustível.

Os motores diesel são máquinas térmicas alternativas, de combustões internas, que convertem energia química (combustível fóssil) em energia mecânica ou força motriz de acionamento. Podem

ser classificados, segundo a sua aplicação, em quatro tipos: estacionários, industriais, veiculares e marítimos.

Os motores diesel, do tipo estacionário, são destinados à aplicação em sistemas híbridos de geração de energia no acionamento de máquinas estacionárias, tais como: geradores, bombas, máquinas que operam em rotação constante, etc. Para esta aplicação são estabelecidos três tipos de regimes de operação considerando fatores de carga, são eles:

- *Stand-by* – (termo derivado do Inglês) definido do tipo emergência, sendo estabelecido sobre a potência efetiva contínua limitada (maior potência efetiva garantida pelo fabricante e que será fornecida conforme sua aplicação, continuamente, durante um tempo limitado, ou intermitentemente, indicado pelo fabricante sem sofrer nenhum desgaste anormal e perda de desempenho, não permitindo sobrecarga);
- Prime Power – (termo derivado do Inglês) definido do tipo contínuo, sendo estabelecido sobre a potência efetiva contínua não limitada (maior potência efetiva garantida pelo fabricante, e que será fornecida sob regime de velocidade, conforme sua aplicação durante 24 horas diárias sem sofrer nenhum desgaste anormal e perda de desempenho, permitindo em regime de trabalho sobrecarga de 10 % da potência efetiva, em uma hora a cada 12 horas);
- Continuous – (termo derivado do Inglês) definido como sendo uma potência em que o motor deve operar durante 24 horas por dia com carga constante.

O consumo específico de combustível é um parâmetro muito importante e usado na comparação de motores diesel para mostrar o quão eficientemente transforma o combustível em trabalho. Pode-se calcular o consumo específico de combustível (b) (g/kWh ou g/HPH) tendo a massa, a potência média e o tempo, dada pela Equação 2.1 [22].

$$b = \frac{\text{Massa}}{(\text{Potência}) \times (\text{tempo})} \Leftrightarrow \frac{\rho \times v}{P \times t} \quad 2.1$$

onde:

ρ – massa específica do combustível (0,854 kg/m³ para o óleo diesel);

v – volume do combustível consumido (m³);

P – potência do motor (kW);

t – tempo (h).

A Figura 2.7 apresenta a curva típica de consumo específico de combustível, onde se pode ver que para cargas inferiores a 30% da capacidade nominal do motor, há um acréscimo acentuado do consumo. Para grupos de geradores deve-se considerar o consumo específico do combustível em relação aos kW gerados e dividir pelo rendimento do alternador.

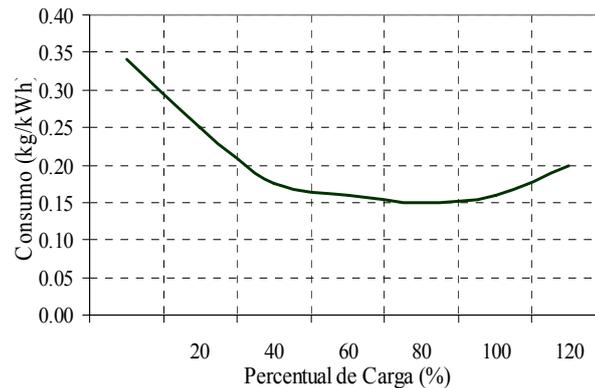


Figura 2.7: Curva típica de consumo específico de combustível [22]

Os geradores síncronos são máquinas destinadas para converter a energia mecânica em energia elétrica. O gerador é constituído por duas partes principais: uma parte fixa chamado de estator e outra parte móvel chamada de rotor de maneira similar aos geradores de turbinas eólicas. O gerador pode ser classificado segundo o número de fases: de monofásico (possui a bobina de enrolamento do induzido de forma que a tensão de saída é obtida em dois terminais) e de trifásico (possui três grupos de bobinas independentes, montadas defasadas 120° entre si, sendo ligadas de forma a obter três ou quatro pontos de ligação).

A potência do gerador é definida pela potência aparente (kVA) que é dada pela soma vetorial das potências ativas (kW) e reativas (kVAr), dada pela Equação 2.2. Enquanto que o fator de potência é definido como fator entre a potência ativa e a aparente conforme apresenta a Equação 2.3

$$(kVA)^2 = (kW)^2 + (kVAr)^2 \quad 2.2$$

$$\cos \varphi = \frac{kW}{kVA} \quad 2.3$$

O rendimento do gerador é definido pela relação da potência mecânica fornecida ao gerador e a potência produzida pelo gerador dada pela Equação 2.4. De modo geral, o rendimento se aproxima do valor máximo com a carga entre 80 e 100% da potência nominal.

$$\eta = \frac{kW_{(eletrica)}}{kW_{(mecanica)}} \quad 2.4$$

Outros fatores a serem considerados, dependendo da aplicação dos grupos geradores diesel no atendimento, aos variados tipos de cargas dos consumidores (residências e indústrias) são: os níveis de ruído; a capacidade de operar em paralelo com outro grupo ou com a rede local; a capacidade de partida e parada automática; supervisão e controle remoto. Os geradores Diesel são usados nos lugares sem conexão à rede de energia ou para fornecer energia de emergência se a rede falhar. Estes geradores são selecionados baseando-se na carga que pretende-se fornecer energia.

A instalação dos grupos geradores deve considerar o peso do grupo e as frequências envolvidas, para verificar a necessidade de reforço para o piso ou estrutura. Para evitar que vibrações indesejáveis sejam transmitidas às estruturas colocam-se amortecedores de borracha ou mola fornecidos pelo fabricante entre a base e o piso. Geralmente, os níveis de ruído de um gerador a sete metros são de 95dB [22]. A solução adotada para diminuição do ruído é o enclausuramento em um container com paredes revestidas de material atenuador, que possibilita a redução do nível de ruído até 75dB.

2.4.4 Armazenamento

Sistemas de armazenamento são sistemas utilizados para armazenar e fornecer energia devido à variabilidade da geração de alguns sistemas, nomeadamente, sistemas eólico e solar, garantindo fornecimento de energia ininterrupto. Dentre os sistemas de armazenamento o mais utilizado é a bateria. A seguir são apresentados conceitos básicos para uso de baterias e suas principais características.

2.4.1.1 Baterias

As baterias (células³) são comumente utilizadas em armazenamento de energia e, podem ser classificadas em primárias – não recarregáveis, e secundárias – recarregáveis [23]. De acordo com a

³ Célula vs Bateria: A célula é unidade eletroquímica básica provendo a energia elétrica pela conversão direta da energia química. A célula consiste num arranjo de eletrodos, separadores, eletrólise, container e terminais. A bateria

classificação, em sistemas híbridos de energia são utilizadas baterias do tipo secundário. Elas apresentam características importantes na descarga e carga, podendo ser quase reversíveis, capazes de atingir alta eficiência de conversão de energia e, com mínimas mudanças físicas, fatores que limitam o ciclo de vida das baterias (carga e descarga).

Os tipos e características de baterias secundárias mais utilizados em sistemas de armazenamento de energia são:

2.4.1.2 Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo ácido [24] são as mais populares, e apresentam baixo custo comparado com as outras baterias secundárias. Elas possuem bom desempenho, mas com ciclos de vida relativamente baixos compreendidos entre 50 – 500 ciclos, podendo em alguns modelos específicos atingir 2000 ciclos.

Essas baterias apresentam as melhores características em altas temperaturas, embora, isto causa a diminuição da vida útil e, boas características na carga devendo evitar excessivas sobrecargas. Possuem eficiência elétrica acima de 70% e existem modelos disponíveis livres de manutenção. Estas baterias devem ser instaladas, quando em grandes quantidades, em áreas com boa circulação de ar evitando o problema de acúmulo de hidrogênio, que pode causar explosões.

2.4.1.3 Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio [25] usam uma solução aquosa alcalina (KOH ou NaOH) como eletrólise – os materiais dos eletrodos são menos reativos à solução alcalina do que à solução ácida. Essas baterias possuem boas características como: pouca manutenção; grandes ciclos de vida com descargas profundas; rápida capacidade de recarga. Entretanto, devem-se ter preocupações ambientais com o uso do cádmio e, além de serem mais caras e mais pesadas não apresentam boas características comparadas com as baterias de chumbo ácido.

A escolha de qual bateria a usar dependerá grandemente da localização e os requerimentos do sistema. Um sistema em uma localidade com um suprimento local sem muitos gastos (cidade), as baterias com fracas qualidades (automotivas) podem ser viáveis economicamente em relação às baterias com melhores qualidades, mesmo com reposições frequentes. Por outro lado, num sistema

consiste no arranjo dessas células em paralelo e/ou em série com níveis de tensão e de corrente de operação requerida, incluindo quaisquer monitores, controles ou outros componentes auxiliares.

remoto com grandes custos de transporte será melhor o uso de baterias, mesmo com custo elevado, mas que não precisam ser repostas frequentemente.

As características físicas das baterias sofrem influências, que modificam diretamente a vida útil, devido a temperatura e a profundidade de descarga, como mostra, respectivamente, a Figura 2.9 e a Figura 2.8. O aumento da profundidade de descarga provoca uma diminuição do número de ciclos, conseqüentemente, a vida das baterias, enquanto que a temperatura do lugar afeta grandemente a vida da bateria e, a aparente capacidade das mesmas de várias formas dependendo do tipo e da construção.

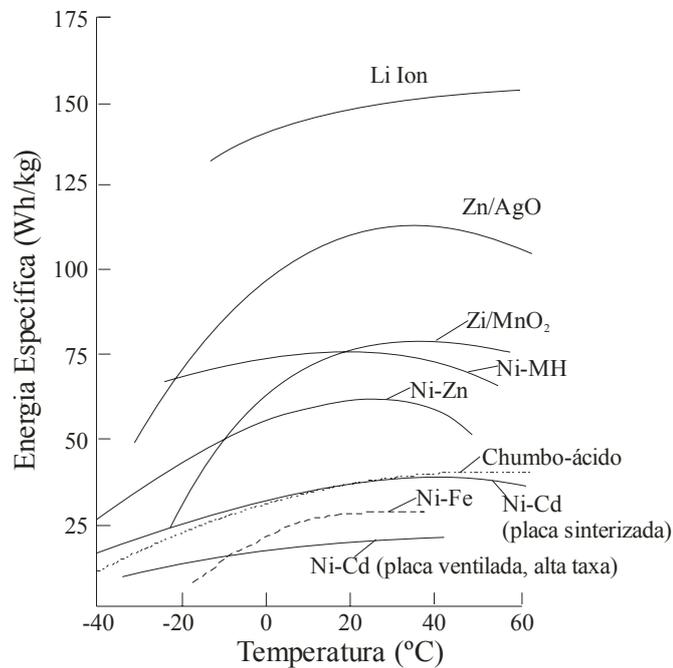


Figura 2.8: Efeito da temperatura na energia específica [23]

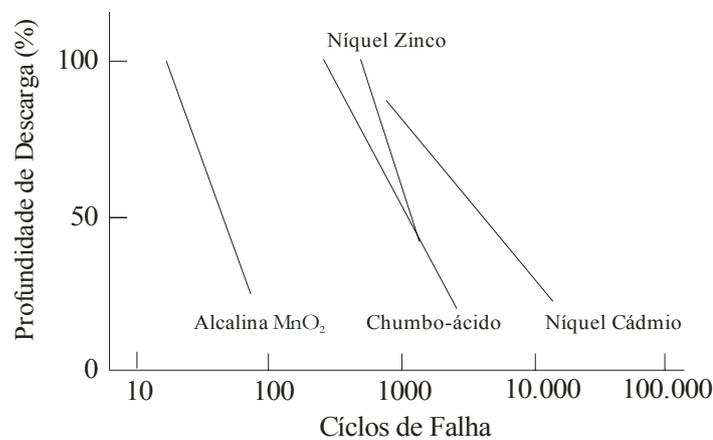


Figura 2.9: Efeito da profundidade de descarga no ciclo de vida das baterias [23]

Para melhorar o ciclo de vida das baterias são apresentados abaixo alguns conceitos para o uso de baterias em sistemas híbridos.

O tamanho do banco de baterias é um critério de projeto do sistema híbrido de energia, relativo à carga do sistema e as funções que ela desempenha no mesmo. Os pequenos bancos de baterias são designados, principalmente para atender flutuações de carga por períodos de minutos à uma hora, evitando se necessário à operação de geradores diesel. Também, são utilizados operando juntamente com diesel quando ocorre uma diminuição na energia renovável ou aumento da demanda. Os grandes bancos de baterias são utilizados em sistemas que dependem completamente de energia renovável. Outra configuração é quando manter desligados os geradores é um parâmetro importante – economizando combustível. Nesta operação, as baterias são requeridas para atender qualquer carga, por longos períodos – desde várias horas até mesmo dias.

Geralmente, as baterias são usadas para prover a diferença entre energia requerida e aquela gerada pelas fontes renováveis (carga líquida). Portanto deve-se estimar o nível de carga a ser atendido pelo banco de baterias. Neste caso os geradores diesel podem ser completamente desligados, economizando combustível. Tais sistemas devem ter uma capacidade de bateria para atender a carga por várias horas, até mesmo dias. Todavia, o diesel quando em operação deve funcionar tanto para atender a carga não carregando as baterias, ou para carregar as baterias a até um nível de carga estabelecido.

Vários tipos de baterias disponíveis no mercado apresentam características diferentes de construções físicas, de desempenho e de vida útil. A exemplo, as baterias automotivas padrão são designadas para longas vidas com descargas superficiais até 10% de profundidade de descarga. Enquanto que, as baterias de ciclos profundos podem ser descarregadas repetidamente até níveis muito baixo de carga, aproximadamente, 70% de profundidade de descarga com ciclos de vida projetados de centenas de ciclos á milhares de ciclos.

As baterias com ciclos repetidos de carga e descarga superficial mudarão as características. O principal resultado destes ciclos são a sulfatação das placas provocado pelo processo químico quando as baterias não são carregadas até plena carga em uma base periódica. Outro resultado é a tensão flutuante que ocorre quando baterias, em partes diferentes do banco, são carregados e descarregados a diferentes taxas, certamente, causando um espalhamento de tensão entre as baterias e subsequente redução da eficiência e vida útil das células.

O método mais freqüente de evitar ambos os problemas é executar uma equalização de carga periodicamente. Um ciclo de equalização é completado pelo carregamento das baterias até o estado mais alto de tensão e carga, 65 á 85% na qual acompanhado de “gaseificação” nas baterias inundadas. Um periódico “*boost charge*”⁴ segura também, que as baterias não ficam em baixo estado de carga por longos períodos. O intervalo dependerá do ciclo de uso do banco de bateria em questão, mas uma ou duas vezes todos os meses é recomendado. Um “*boost charge*” padrão é carregar a bateria até 100% do estado de carga plena.

2.4.5 Conversores de Potência/Controladores de Carga

Conversores de potência são requeridos quando sistemas de armazenamento ou outros componentes CC são usados em conjunto com redes CA ou cargas CA. Existem dois tipos de funções de conversores de potência de particular significância para sistemas híbridos de energia: retificação e inversão. Às vezes, estas funções são incorporadas em um único dispositivo ou montagem, como é o caso dos inversores bi-direcional, outras vezes eles não são.

Inversores são dispositivos eletrônicos que convertem corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), suprem cargas CA de uma fonte CC ou de um banco de baterias. Eles são relativamente complexos e caros, apresentados em um dos dois tipos: comutação pela linha – requer a presença de uma linha externa CA para controlar a freqüência da rede e, por exemplo, se todos os geradores forem desligados ele não controla a freqüência; auto comutados – controla a freqüência da rede sozinha e, não opera com outro dispositivo que também controla a rede. Nestes casos são conhecidos como “*switched mode*”. Existem inversores que podem operar tanto independente como em paralelo com outros geradores, estes são mais versáteis, mas atualmente, são também os mais caros no mercado.

Os conversores de potência podem gerar onda quadrada, semi-senoidal e senoidal. A onda quadrada é a forma a mais simples de corrente alternada. Os inversores de onda quadrada são muito pesados, não podem alimentar motores porque o torque inicial é muito alto, além de gerar ruídos, aquecimentos e funcionamentos defeituosos e apresentarem rendimentos baixos da ordem de 50%. A onda semi-senoidal tem uma forma intermediária entre a onda quadrada e a onda senoidal pura. Atualmente, os conversores de onda semi-senoidal são os mais populares por serem baratos, leves, de fácil manuseio, e atender a maioria das necessidades domésticas e profissionais de pequeno

⁴ *Boost charge*: termo anglo saxônico que significa uma rápida carga que permite as baterias serem carregadas até aproximadamente o nível de 85 á 90% em um curto espaço de tempo e de forma eficiente.

porte. Por fim, a senoidal é uma onda contínua de uma frequência só, ou seja, sem distorção harmônica. É com conversores de onda senoidal que aparelhos eletro-eletrônicos possuem desempenho máximo. Estes são altamente sofisticados e, como consequência, são mais caros que os de onda semi-senoidal e não geram ruídos ou distorções.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta dissertação consiste na avaliação técnica e econômica de um sistema híbrido eólico/solar/diesel e, a Figura 3.1 mostra o diagrama da metodologia proposta.

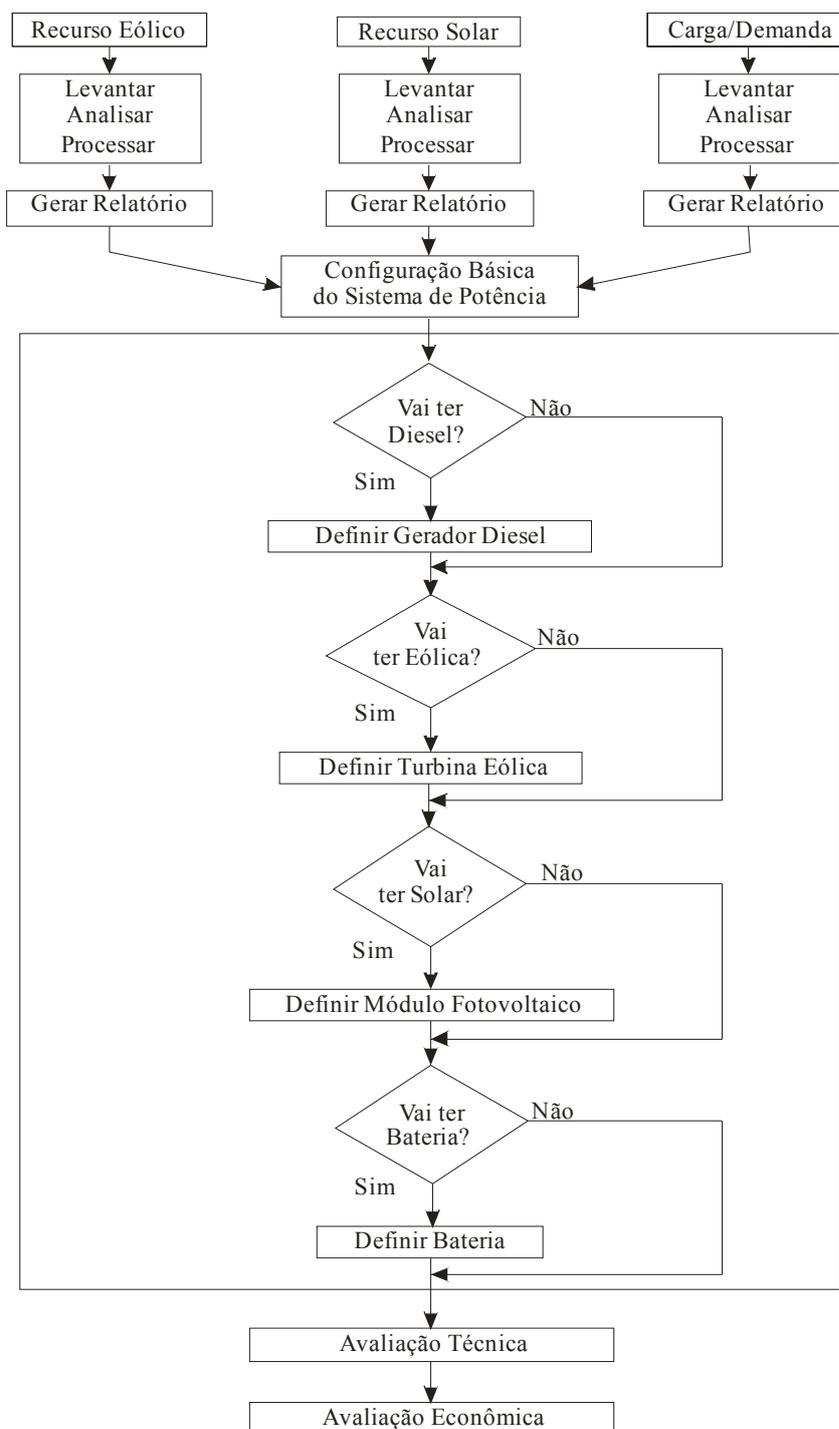


Figura 3.1: Diagrama da metodologia

3.5 Avaliação técnica

Para a avaliação técnica utilizou-se o programa computacional Hybrid2, desenvolvido na Universidade de Massachusetts at Amherst, baseada em modelos logísticos (não dinâmicos) usados para estimar o desempenho de longo prazo, dimensionamento dos componentes e para subsidiar a avaliação econômica.

Geralmente, os modelos logísticos podem ser divididos em 3 categorias ou métodos, como:

- método de séries temporais (regime quase-estático) – este tipo de modelo requer séries temporais de longo prazo, tais como: velocidade do vento, radiação solar e carga (demanda);
- método probabilístico – modelos deste tipo utilizam como entrada dados de longo prazo de carga e recurso natural (i.e. mensais e sazonais) e, é baseado no uso de técnicas de métodos estatísticos;
- método de séries temporais e probabilísticos – modelos desta categoria são baseados numa combinação de séries temporais e de aproximação estatística. As séries temporais da demanda e dos recursos naturais utilizadas são tipicamente de períodos que vão de dez minutos à uma hora e flutuações em curto espaço nestes intervalos são tratadas por meio de técnicas estatísticas.

Entretanto, o Hybrid2 usa o modelo logístico que combina séries temporais e o método probabilístico [33]. As abordagens de séries temporais são úteis para previsões de longo prazo, mas, para contabilizar de forma correta despacho do gerador diesel em um sistema múltiplos geradores diesel, é também crucial levar em conta flutuações de curto prazo da velocidade do vento e da carga. Para incluir o efeito de flutuações de curto prazo, uma abordagem probabilística é aplicada dentro de cada passo simulado.

Para as simulações realizadas hora-a-hora utilizou-se séries temporais dos recursos naturais e demanda do sistema verificando o desempenho energético durante um período de um ano.

Os critérios de avaliação técnica, ou seja, do desempenho energético das diferentes configurações e, que vão condicionar a configuração ideal para o sistema são:

- Economia de energia em relação ao sistema usando somente geradores diesel ou outra configuração;
- Interrupções no fornecimento de energia – períodos em que a carga principal não é atendida;
- Excesso de energia – não aproveitamento de forma eficiente da energia gerada;
- Números de hora de operação dos geradores diesel, bem como, liga e desliga do gerador, fatores importantes para diminuição dos custos da manutenção;
- Contribuição e vida útil do banco de baterias.

A seguir serão apresentadas as definições e análises realizadas para obtenção das séries temporais dos recursos naturais e da estimativa de demanda, da configuração do sistema de potência e das principais estratégias e parâmetros de despacho para o sistema.

3.5.1 Definição das Séries Temporais dos Recursos Naturais

Geralmente, são necessários 30 anos de dados para determinar valores de longo-prazo do tempo ou clima. Para se chegar a uma média anual segura da velocidade do vento e radiação solar em um certo local são necessárias coletas de pelo menos cinco anos de dados. Quanto mais dados são coletados, mais confiável torna-se a estimativa dos recursos.

Os recursos naturais são caracterizados por uma série de parâmetros, incluindo fatores geográficos do local em questão que afetam os recursos renováveis, informações sobre a coleta de dados como período e altura de medição, bem como a variabilidade destes recursos.

Esta caracterização é importante porque permite avaliar a contribuição das fontes renováveis, condicionar a configuração básica do sistema e viabilizar instalações destes sistemas objetivando o máximo de aproveitamento ao longo dos anos. A variação diária de velocidade do vento e da radiação solar (ao longo das 24h) permite calcular o período do dia de maior contribuição dessas fontes renováveis e, ainda, otimizar a distribuição das cargas ao longo do dia. Enquanto que a variação mensal desses recursos permite calcular os meses de maior geração no ano, objetivando o maior aproveitamento. Os valores médios anuais permitem uma análise em escala maior do tempo.

Nas seções seguintes são apresentados os mecanismos de geração do vento e da radiação solar. Também, são apresentadas técnicas utilizadas para obtenção das séries temporais e as utilizadas neste trabalho.

3.5.1.1 Recurso Eólico

O recurso eólico é caracterizado pelas velocidades dos ventos. Ventos são os movimentos do ar sobre a Terra devido primeiramente ao aquecimento desigual de sua superfície pelo Sol. No mecanismo de geração dos ventos estão os fatores geográficos e climáticos. Os ventos são classificados em duas classes: geral ou planetário e local[27].

Os ventos gerais são aqueles que se movem na atmosfera superior. O eixo de rotação da Terra tem uma inclinação aproximada de $23^{\circ} 30'$ em relação ao plano de sua órbita ao redor do Sol. Isto faz com que o aquecimento desigual obedeça a uma sazonalidade. A intensidade anual média de radiação solar será maior na região equatorial que nas regiões polares. Entretanto, estes ventos de forma global sofrem interferências. O principal mecanismo de interferência global se dá pela rotação da Terra, força de Coriolis que é responsável pela alteração dos ventos na escala global fazendo com que os ventos não alcancem velocidades tão altas.

Enquanto que os ventos locais são mais próximos da superfície da Terra. Eles se baseiam no fato que a Terra e o Mar possuem absorção de calor diferente, ou seja, brisas marinhas. A topografia e a rugosidade do solo também têm grande influência na distribuição de frequência de ocorrência de velocidade do vento em um local. Além disso, obstáculos são responsáveis pela criação de sombras que, assim como a rugosidade e a topografia, alteram o perfil exponencial da curva de velocidade do vento.

A energia disponível do vento (energia cinética) expressa em joule (J), para uma turbina eólica associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante (m/s), pode ser calculada através da Equação 3.1:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad 3.1$$

onde:

m – massa do ar (kg);

V – velocidade do vento (m/s).

Geralmente, o vento é classificado pela potência disponível expressa em watts (W) e, esta é calculada dividindo a energia cinética do vento pelo tempo, como indica a Equação 3.2.

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad 3.2$$

onde:

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A V \quad 3.3$$

ρ – massa específica do ar⁵ (kg/m³);

A – área de varredura (m²).

Substituindo a Equação 3.3 na Equação 3.2, encontra-se a potência disponível que está relacionada ao cubo da velocidade do vento como mostra a Equação 3.4.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad 3.4$$

Os dados disponíveis de velocidade de vento, normalmente, são medidos ou coletados em estações meteorológicas em períodos que variam de 2 a 10 minutos. No Brasil a escassez ou ausência de dados confiáveis para se fazer um levantamento de uma região coloca-se como principal entrave para utilização de sistemas híbridos de energia em locais isolados. Muitos dos dados disponíveis não foram obtidos com o rigor exigido para serem utilizados em análises de projetos.

A técnica de medição envolve várias etapas no processo que vão desde a seleção e calibração do anemômetro, seleção do local e da altura de medição, montagem da torre de medição, período de medição até análise dos dados e previsões de longo prazo. O processo de calibração do anemômetro consiste em obter uma curva de calibração que relacione diretamente o valor da tensão induzida com a velocidade do vento que passa pelo anemômetro. Pode-se encontrar nas estações anemométricas, sistema de aquisição (*Dataloggers*) e processamento de dados que usam rotinas de cálculo de parâmetros para análises posteriores. Todavia, os custos elevados destes equipamentos, normalmente, inviabilizam a implantação destes sistemas de aquisição de dados.

⁵ O valor da massa específica do ar em condições padrão (nível do mar, 0°C) adotado pela Organização de Aeronáutica Civil Internacional é 1,2929 kg/m³

Além da medição no local utilizando anemômetros e uso de sistemas de aquisição e processamento, existem modos de estimar a velocidade de vento de um local (micro-escala) presente na bibliografia pesquisada, apresentados a seguir.

Técnica de MCP (Medir-Correlacionar-Prever) que consiste em medir o vento de um local, considerado alvo, em um período daí, correlacionar com o vento medido em um local próximo no mesmo período, denominado concomitante. Por fim, prever o vento no local alvo em um outro período, a partir da relação obtida do vento anteriormente no local próximo, neste mesmo período, durante o qual o vento não foi medido no local alvo [28].

Outro modo de estimar a velocidade do vento é através do uso do WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*). Este consiste em estimar o regime dos ventos de um local a partir de dados existentes para um sítio de referência, normalmente registros meteorológicos disponíveis numa larga escala temporal, Atlas Eólico. Os dados de referência são filtrados para remover a influência da rugosidade, dos obstáculos e da topografia do terreno e, assim, obter o escoamento livre característico da área. Posteriormente, são adicionados os efeitos locais do terreno e a correção para a altura do cubo das pás do rotor da turbina, para chegar a uma projeção do regime de ventos no local desejado. Outro fator relevante neste modelo é que o local de referência e o local de estudo devem ser suficientemente próximos de modo a experimentar regimes de ventos análogos [29].

No entanto, nesta dissertação a série temporal de velocidade de vento utilizada, foi calculada a partir de medições feitas durante um período de três anos em uma região que apresenta características de orografia semelhantes ao local em análise, visto que o local não dispõe de dados medidos. No entanto, esses dados apresentaram pequenos períodos sem medição da velocidade de vento, todavia, utilizou-se técnicas no sentido de eliminar essas falhas, que serão apresentados no Capítulo 4.

3.5.1.2 Recurso Solar

O sol é considerado a principal fonte de energia na Terra com uma temperatura superficial de aproximadamente 5600°K. Ele fornece energia na forma de radiação que atinge o topo da atmosfera (extraterrestre) variando anualmente cerca de 3,5% devido a pequenas variações da distância Sol-Terra.

A intensidade da radiação solar extraterrestre durante o ano pode ser expressa com precisão mediante a Equação 3.5.

$$I_h = I_n \left[\text{sen}(L) \text{sen}(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \right] \quad 3.5$$

onde I_n é dada pela Equação 3.6:

$$I_n = I_0 \left[1 + 0,0333 \cos\left(\frac{360}{365} n\right) \right] \quad 3.6$$

onde:

I_0 – Constante Solar (1367 W/m^2)⁶;

n – Número de dias a partir do dia 1 de janeiro;

L – Latitude local;

δ – Declinação solar ($-23,45^\circ$ a $23,45^\circ$);

h – Ângulo horário⁷.

Entretanto, a radiação solar extraterrestre ao penetrar na atmosfera sofre espalhamento e absorção principalmente por moléculas de O_3 , O_2 , H_2O e CO_2 . O grau de atenuação depende da massa de ar penetrada, ou seja, o comprimento da trajetória até chegar à superfície terrestre.

A Figura 3.2 mostra a variação da radiação espectral extraterrestre e a nível do mar dependendo da massa de ar penetrada. A fração da radiação que atinge o solo é constituída por uma componente direta (feixe direto) e por uma componente difusa (parte espalhada). A parte espalhada pelo solo é particularmente chamada de Albedo.

No Brasil, analogamente ao descrito sobre a velocidade de vento, medida de radiação solar são bastante escassas em nível espacial e temporal. Para mitigar essa situação são utilizados métodos que permitem predizer (estimar) a irradiação solar mediante o uso de observações meteorológicas e métodos de geração de séries temporais sintéticas de radiação solar.

⁶ Segundo dados da *World Meteorological Organization* – WMO.

⁷ Cada hora solar corresponde a 15° e por convenção após o meio dia solar o ângulo é positivo

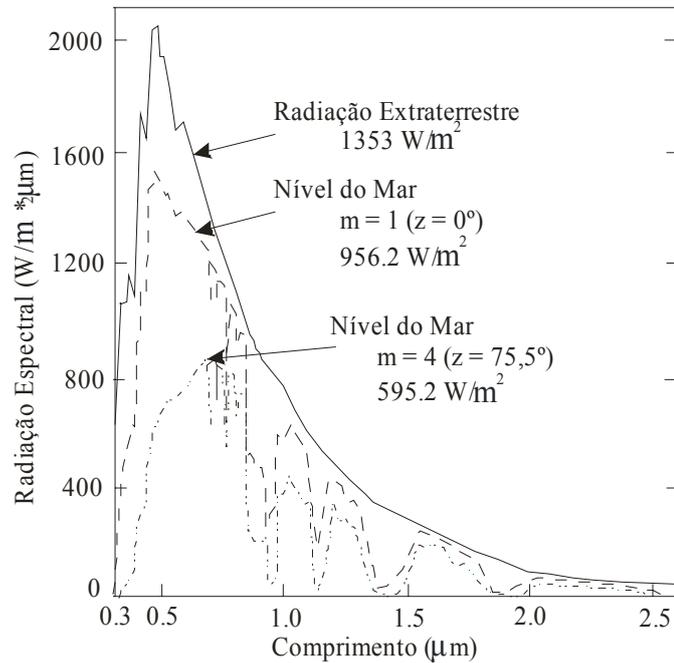


Figura 3.2: Espectro da radiação solar

A seguir é mostrado um dos métodos de estimação da radiação solar mediante uso de observações meteorológicas, mais precisamente, a estimativa da radiação solar diária difusa, a partir da radiação solar diária global, modelo proposto por Collares-Pereira & Rabl [30], como mostra a Equação 3.7.

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0,775 + 0,347 \frac{(h_s - 90^\circ)\pi}{180^\circ} - \left[0,505 + 0,261 \frac{(h_s - 90^\circ)\pi}{180^\circ} \right] \cos \left[\frac{360^\circ(\overline{K}_T - 0,9)}{\pi} \right] \quad 3.7$$

onde:

\overline{H}_d - radiação solar diária difusa, média mensal;

\overline{H} - radiação solar diária global, média mensal;

$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{H_0}$ - índice de claridade diário, médio mensal;

\overline{H}_0 - radiação solar diária extraterrestre;

h_s - hora do por do sol.

Dados de medidas de radiação solar no Brasil podem ser encontrados no CD ROM Atlas Solarimétrico do Brasil. Uma descrição desse banco de dados pode ser visto com detalhes no [31]

3.5.2 Definição da Série Temporal da Estimativa de Demanda

Considera-se demanda a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado e, é expressa em quilowatts hora (kWh).

Geralmente, a carga instalada é levantada através de pesquisas socioeconômicas in loco, com o objetivo de saber esse potencial, bem como, as características e os costumes da comunidade. Medir a demanda é um processo difícil e demorado, sendo necessário obter equipamentos específicos e, em muitos casos não é possível efetuar tais medições de forma criteriosa.

Portanto, com base na carga levantada deve-se construir uma distribuição típica correlacionando, se for possível, com medições realizadas em locais próximos à região em estudo e que apresentam características semelhantes.

Assim como para os recursos naturais, a caracterização da demanda representa extrema importância nesta análise de projetos de sistemas híbridos de energia para o cálculo da configuração do sistema. A demanda, geralmente, apresenta uma variação diária com picos e vales de consumo dependente dos costumes e hábitos das comunidades e, deve-se ter o cuidado ao dimensionar os componentes do sistema para atender a demanda em tais períodos.

Para a metodologia aplicada, considera-se a carga total instalada proveniente das residências, dos estabelecimentos comerciais, processos produtivos, prédios públicos e comunitários e iluminação pública.

As cargas residenciais são constituídas por equipamentos domésticos (eletrodomésticos) como: televisão, aparelho de DVD, vídeo K7, rádio, geladeira, lâmpadas, ferro elétrico etc. Esta categoria possui uma distribuição genérica diária que apresenta picos em média das 17 às 21 horas.

As cargas comerciais contêm equipamentos, tais como: televisão, freezer, geladeira etc. A categoria de carga comercial apresenta uma distribuição diária dependendo do horário de expediente do estabelecimento comercial.

As cargas de processos produtivos são provenientes de processos de produção para a comunidade, tais como: produção de água (dessalinizador), produção de gelo (frigorífico) e pequenos processos industriais (confecções têxteis). Essas cargas, em geral, apresentam uma

distribuição concentrada no período diário (fora do horário de pico) e tratam-se de cargas de grandes potências.

As cargas provenientes dos prédios públicos e comunitários (igrejas, centros comunitários, escolas postos de saúde etc) podem ser desde: freezers, ventiladores, caixas de som, computadores, etc, que apresentam uma distribuição variada.

Iluminação Pública são cargas provenientes das lâmpadas para a iluminação das ruas durante o período, em média, das 17 às 5 horas da manhã. Em alguns casos, onde utilizam geradores diesel para fornecimento de energia, algumas lâmpadas podem ser desligadas no período de 22 às 5 horas da manhã para economizar combustível.

Muitos sistemas de energia, grandes ou pequenos, empregam uma forma de gerenciamento das cargas. Este gerenciamento pode ser ainda de maior importância em sistemas que usam fontes renováveis de energia. Em geral, podem-se considerar dois tipos de cargas gerenciadas para o sistema que são do tipo primário (não gerenciáveis) e secundário (gerenciáveis).

A carga do tipo primário (carga primária) é definida como sendo a carga elétrica principal a ser atendida no momento da solicitação desta carga. Qualquer falha de atendimento desta carga corresponde à demanda não atendida. Exemplo deste tipo de carga são as cargas principais do sistema como: residenciais, comerciais, prédios públicos e comunitários etc.

No contexto do Hybrid2, cargas gerenciáveis são referidas como adiáveis ou opcionais. Cargas adiáveis são aquelas que devem ser atendidas, em algum momento, mas para o qual a hora exata é flexível, ou seja, pode ser adiada até que excesso de energia seja disponível. O excesso de energia é a energia disponível depois de atender a carga primária e carregar as baterias que pode ser das fontes renováveis ou forçando o diesel a operar no nível mínimo. Um exemplo de uma carga adiável é bombear água para um tanque de armazenamento de água que deve ser cheio, pelo menos uma vez por dia.

A carga opcional é uma aplicação útil para o excesso de energia. Aqui o excesso de energia é a energia disponível depois de suprir a carga primária, carregar as baterias e atender carga adiável. Neste caso o excesso de energia será utilizado para atender tal carga. Um exemplo de carga opcional em locais isolados é o uso de um dessalinizador de água no período de seca (sem armazenamento de água), onde os recursos renováveis têm maior contribuição.

A Figura 3.3 mostra um diagrama que define a prioridade de atendimento das cargas. Depois de atender a carga opcional se existir excesso de energia o sistema “*dump load*”⁸ deve queimar carga sobrando.

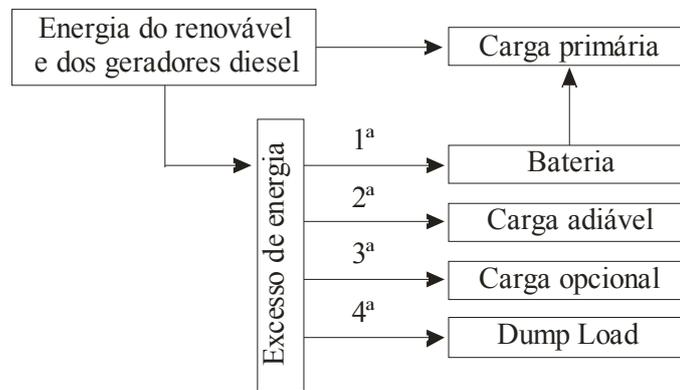


Figura 3.3: Diagrama de prioridade das cargas

A série temporal da estimativa de demanda utilizada nesta dissertação foi baseada na metodologia posposta por Dos Santos & Kleinkauf [32]. Esta metodologia consiste em modelar seqüências diárias sintéticas da demanda horária de energia em vilas e pequenas cidades. Este modelo baseia-se num processo estocástico que utiliza valores diários de consumo de energia e fatores de carga (razão entre a média e o pico de carga). Assumindo a estrutura de consumo de vilas como caracterizada por curvas de carga com picos de carga à noite, o fator de carga é tido como um fator de forma para estas curvas.

3.5.3 Definição da Configuração do Sistema de Potência

Para a escolha dos componentes do sistema foram utilizados os seguintes critérios, na ordem de importância: a) robustez e confiabilidade comprovadas para garantir o funcionamento nas condições locais sem a necessidade de assistência constante; b) baixa manutenção e fácil reposição de peças; c) prioridade para equipamentos fabricados no Brasil; d) eficiência alta; e) custo baixo.

Na análise de custos dos componentes, considerou-se uma análise de mercado, verificando as possíveis opções disponíveis e, uma análise das características dos equipamentos em regime de operação para se adequar ao sistema proposto.

⁸ *Dump load* é uma resistência que queima o excesso de energia depois de atender todas as cargas do sistema, mantendo os níveis de tensão e frequência.

A definição do gerador diesel foi baseada na ordem de possíveis configurações e na potência máxima requerida. De forma geral, a escolha dos geradores diesel depende da estratégia específica levando em consideração a qualidade de energia requerida para o sistema híbrido.

Para definir qual modelo da turbina eólica e do módulo fotovoltaico a utilizar no sistema, considerou-se inicialmente, o potencial dos recursos naturais do local e a carga total prevista a ser atendida pela energia renovável. O aumento do número destes componentes no sistema deve aumentar a contribuição do renovável provocando uma diminuição da operação dos geradores diesel, economizando óleo diesel. No entanto, além de aumentar a complexidade do sistema, isso pode acarretar num aumento considerável do custo do capital do sistema, análise que será definida mais adiante.

Geralmente, o uso de bateria no sistema baseia-se no armazenamento de energia gerada em excesso pelas fontes renováveis. A geração eólica e solar depende da disponibilidade temporal dos recursos renováveis (vento e sol), existindo assim, períodos em que estes recursos não estão disponíveis (i.e. à noite, quando não há sol, e períodos de baixo vento). Esta energia armazenada poderá ser utilizada quando ocorre uma diminuição da geração renovável ou aumento da demanda. A definição da bateria depende de fatores como a tensão, a capacidade, a profundidade de carga e o custo.

Além das etapas de inserção das séries temporais dos recursos naturais e da estimativa de demanda e, da configuração do sistema de potência, outra etapa importante na avaliação técnica é a estratégia de despacho. A seguir são definidos as estratégias e os parâmetros para o sistema híbrido proposto

3.5.4 Definição das Estratégias e Parâmetros de Despacho para o Sistema

A confiabilidade de um sistema híbrido de energia só pode ser garantida através de um sistema que supervisiona, controla e monitora os parâmetros do sistema híbrido. As ações são coordenadas e executadas para manter as condições normais de operação e otimizar o desempenho dos componentes. Isto pode ser expresso por uma série de critérios de eficiência, tais como: economia de combustível, custo de operação, quantidade de ocorrências de interrupções de fornecimento e número de paradas para manutenção e vida útil das baterias.

Nesta análise, considera-se dois tipos de componentes despacháveis: baterias e geradores diesel. Em princípio os geradores renováveis (turbina eólica e painel fotovoltaico), quando é necessário, podem ser despacháveis (desligados). Entretanto, sabendo que o custo de capital dos geradores renováveis é relativamente alto comparado com geradores convencionais, assume-se nesta metodologia, que estes componentes não são despacháveis e que devem gerar energia enquanto são mantidas as condições mínimas de operação.

A discussão do despacho ou controle do sistema é assegurada em três principais áreas descritas a seguir:

3.5.1.1 Definição de estratégias de despacho e parâmetros para o banco de baterias

Esta definição determina quanto de capacidade da bateria deve ser utilizado na carga e na descarga e o critério para iniciar a carga da bateria até atingir a carga plena (*boost charge*). Ela inclui parâmetros que são: o mínimo estado de carga (MEDC), o método de uso da bateria, o intervalo de tempo entre o carregamento da bateria a carga plena e o estado dessa carga final.

A estratégia de descarga do banco de bateria determine como as baterias podem ser usadas para suprir pequenas flutuações de carga (parte ou toda carga) durante o intervalo de tempo. O primeiro método (atender parte da carga) é mais aplicável aos sistemas híbridos de grande porte que utilizam sistemas de armazenamento relativamente pequenos. O último método (atender toda carga) é mais comum em sistemas menores com uma quantidade de armazenadores relativamente grande.

Enquanto que o critério para iniciar a equalização (*boost charge*) é geralmente aplicado para carregar a bateria até o nível de carga plena. Este processo ajuda a bateria a ter uma vida longa. Isto só acontece se tiver um gerador diesel no sistema híbrido, provocando o aumento do consumo de combustível. Sendo assim, pode-se optar por: i) não ter a equalização das baterias; ii) esperar que o próximo gerador diesel seja ligado ou iii) forçar o gerador diesel a ligar naquele tempo especificado.

Parâmetros

a) Mínimo estado de carga – normalmente, o ciclo de vida de muitas baterias, chumbo ácido em particular, é maximizado quando o estado de carga da bateria não é permitido baixar até um

determinado nível de carga. Este parâmetro assegura que o estado de carga sempre esteja acima de uma percentagem específica da capacidade total, que varia de bateria para bateria.

b) Intervalo entre as equalizações – este parâmetro indica o intervalo de tempo entre as equalizações do banco de baterias. Uma vez que o intervalo for excedido um requerido *boost charge* é solicitado no sistema de controle.

c) Estado de carga no final da equalização – geralmente, as baterias são carregadas até o nível mais alto de estado de carga pelo gerador diesel que opera na potência máxima. Este parâmetro estabelece que nível de carga atingir quando deve ser aplicado um *boost charge*.

3.5.1.2 Definição de estratégias de despacho e parâmetros para o gerador diesel

Analogamente ao banco de baterias, existem parâmetros aplicados aos geradores diesel para controlar as ações destes equipamentos, tais como:

a) Tempo mínimo de operação do gerador diesel – o gerador diesel uma vez ligado deve permanecer operando por um tempo mínimo específico. Certamente o gerador diesel permanecerá ligado por um período maior se a demanda ou a carga da bateria, assim, requerer.

b) Critério para desligar o gerador diesel – em geral, todos os geradores diesel são desligados se existir potência disponível dos renováveis ou dos armazenadores para suprir a carga. Em alguns sistemas pelo menos um gerador diesel precisa estar sempre ligado para assegurar a estabilidade do sistema.

c) Forçar o gerador diesel desligar – em algumas comunidades, é desejável manter o gerador diesel desligado em certos períodos do dia. Isto pode ser à noite, por exemplo, quando o ruído dos motores está perturbando, ou mesmo quando os geradores diesel não são supervisionados durante um certo período.

d) Estabelecer a carga líquida para forçar o gerador diesel a ligar – em sistema onde é permitido desligar os geradores diesel o critério para iniciar a operação do gerador diesel é aquela máxima carga líquida esperada durante o intervalo de tempo tal que o gerador precisa ser ligado para atender tal carga.

f) Ordem de despacho para múltiplos geradores diesel – este parâmetro permite especificar a combinação ideal de geradores diesel ou incorporar um sistema para encontrar a combinação ótima dos geradores diesel com o menor consumo de combustível.

3.5.1.3 Definição de estratégias de despacho e parâmetros para o banco de baterias/geradores diesel

O despacho ou controle da bateria/diesel se dá com a interação do banco de bateria e dos geradores diesel em atender a carga líquida. Este considera o nível de operação do diesel como um critério para ligar e desligar os geradores diesel quando descarregando as baterias. Uma revisão de cada um destes aspectos (estratégias) de despacho da bateria/diesel é apresentada abaixo:

a) Nível de operação do gerador diesel – este controle afeta a potência na qual o gerador diesel opera. Em alguns sistemas sem bateria existe relativamente pouca escolha do nível de potência. Em geral o gerador diesel opera no nível necessário para suprir a carga líquida. Exceto se a carga líquida for menor que o nível mínimo de potência permitido. Neste caso, o último determinará o nível da potência. Os sistemas que contem bateria possuem mais opções, em particular, a carga pode ser suprido parcialmente pelo gerador diesel e pelo banco de bateria.

b) Critério para ligar o gerador diesel – neste caso, existem dois possíveis critérios para ligar os geradores diesel. O primeiro para atender a carga líquida, que ocorre se o banco de bateria é incapaz de suprir a carga. O segundo para atender a carga ou carregar o banco de bateria se este estiver descarregado abaixo de um nível de carga pré-estabelecido.

c) Critério para desligar o gerador diesel – existem cinco razões para desligar o gerador diesel: i) se a bateria e o renovável juntos atendem a carga; ii) se o renovável só atende a carga; iii) se o renovável supre a carga ou se o banco de bateria está com carga total; iv) se as baterias estão carregados até o nível de carga específico e v) se somente algum dos geradores diesel são necessários (isto se aplica somente aos casos de múltiplos geradores diesel).

Para a configuração do sistema híbrido eólico/solar/diesel são várias as estratégias possíveis de despacho. A seguir são definidas as principais estratégias utilizadas nesta metodologia.

Estratégia 1

- Usar o mínimo da bateria para atender pequenas flutuações de carga e o gerador diesel na potência máxima;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para carregar o banco de baterias;
- Desligar o gerador diesel se o banco de baterias for carregado;

Estratégia 2

- Usar o máximo da bateria para atender a carga e o gerador diesel seguindo flutuações de carga;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para a carga média;
- Desligar o gerador diesel se o renovável e banco de baterias atender a carga;

Estratégia 3

- Usar o mínimo da bateria para atender pequenas flutuações de carga e operação do gerador diesel na potência máxima;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para carregar o banco de baterias quando atingido um nível mínimo de carga das baterias;
- Desligar o gerador diesel se as fontes renováveis e o banco de baterias atenderem a demanda;

Estratégia 4

- Usar o máximo da bateria e seguir as flutuações de carga;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para carregar o banco de baterias quando atingido um nível mínimo de carga das baterias;
- Desligar o gerador diesel se o nível de carga do banco de baterias atingir o parâmetro estipulado: nível de carga máximo;

Estratégia 5

- Usar o máximo da bateria e seguir flutuações de carga;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para atender a carga média;
- Desligar o gerador diesel se o banco de baterias atingir o parâmetro estipulado pelo nível de carga máximo;

Estratégia 6

- Usar o máximo da bateria e seguir flutuações de carga;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para atender a carga média;
- Desligar o gerador diesel se o renovável e o banco de baterias atender a carga;

Estratégia 7

- Usar o máximo da bateria e seguir flutuações de carga;
- Esperar o gerador diesel ligar para efetuar *boost charge*
- Ligar o gerador diesel para atender a carga média;
- Desligar o gerador diesel se o renovável atende a bateria;

Os parâmetros utilizados foram mínimo estado de carga do banco de baterias; intervalo entre os *boost charge*; estado de carga no final do *boost charge* e tempo mínimo de operação do gerador diesel. Eles podem variar independente da estratégia e cada parâmetro deve influenciar no comportamento do sistema de várias formas, como foi visto anteriormente nesta seção.

3.6 Avaliação Econômica

O gerenciamento de projetos pode ser definido como o planejamento, a direção e o controle de recursos (i.e. pessoas, equipamentos e materiais) para atender as restrições técnicas, de custos e de tempo do projeto. Esta etapa do trabalho propõe a avaliação econômico-financeiro para projetos de sistemas híbridos utilizando a ferramenta de cálculo desenvolvida na planilha do Excel denominado *Simulador Econômico de Sistemas Híbridos de Energia (SESHE)*.

O modelo básico utilizado é baseado no módulo econômico do Hybrid2 [33]. O *SESHE* é composto pela parte de subsídio de informações, pelas análises produzidas ano-a-ano e pela apresentação dos resultados dos sistemas configurados.

A ferramenta desenvolvida inclui informações e técnicas de cálculo recorrentes no Brasil (i.e. os impostos e deduções, a Conta Conjunta de Combustível – CCC e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL). A Tabela 3.1 mostra o Demonstrativo de Resultado do Exercício – DRE – utilizado, que é resultante da confrontação das receitas de vendas, custos e despesas e dos impostos verificadas no período em análise para diferentes configurações de sistemas híbridos.

Tabela 3.1: Demonstrativo de resultado do exercício [35]

Conta	Descrição
Receita operacional bruta	Venda de produtos, mercadorias ou serviços.
(-) Deduções	Correspondem a subtrações da receita bruta: devoluções de produtos; abatimentos e impostos sobre venda.
(=) Receita operacional líquida	Corresponde a receita bruta, subtraída das deduções.
(-) Custos	Incluem todos os bens e serviços consumidos com a produção de bens e serviços comercializados.
(=) Lucro bruto	Lucro ou prejuízo operacional bruto.
(-) Despesas	Gastos com as atividades não relativas a produção; com supervisão, gestão e controle; com a comercialização, comissões; com juros.
(=) Lucro operacional	No Brasil deve ser obtido após despesas ditas operacionais e que envolvam as despesas administrativas, comerciais e financeiras.
(-) Imposto de Renda (IR) e Contribuição Social (CS)	Valor provisionado, reconhecido, mas ainda não quitado, a título de IR e CS.
(=) Lucro líquido	Resultado após o IR e CS

A teoria básica proposta neste trabalho, inicialmente, contabiliza o Custo do Capital do sistema (*CCap*). Os custos do capital ou o investimento representam custos ativados em função de sua vida útil ou de benefícios atribuíveis a futuros períodos [36]. Também, contabiliza a receita e os gastos do sistema (valores compostos de anuidades), além de calcular os parâmetros de avaliação de projetos, tais como, o custo de geração de energia (*CGE*), o valor presente líquido (*VPL*) para os custos do sistema, o período de retorno simples (*PRS*) e a taxa interna de retorno do investimento (*TIR*).

3.6.1 Custo do Capital

Para cálculo do Capital Instalado para o sistema híbrido, inicialmente, o modelo calcula o Custo Total do Sistema (C_S). O custo total do sistema que é constituído pelos seguintes custos: custos dos equipamentos (C_E), custos de instalação (C_I), custos com transporte (C_{Trans}), custos com importação (C_{Imp}), custos da rede de distribuição (C_{RD}) e por fim, custos de balanço do sistema (C_{BS}). Para sistemas híbridos de geração de energia, em especial, sistema híbrido eólico/solar/diesel, o Custo do Sistema é dado pela Equação 3.8:

$$C_S = C_E + C_I(1 + f_{ci}) + C_{Trans} + C_{Imp} + C_{RD} + C_{BS} \quad 3.8$$

onde f_{ci} é uma fração dos custos indiretos de instalação do sistema.

No entanto, o custo relacionado aos equipamentos do sistema híbrido (C_E) é calculado pela Equação 3.9:

$$C_E = C_{TE} + C_{PV} + C_{PVR} + C_{MPPT} + C_D + \Delta_{Bat} C_{Bat} + C_{CP} + C_{Opc} + C_{Adv} + C_{Dump} \quad 3.9$$

onde:

C_{TE} – custo total das turbinas eólica (\$);

C_{PV} – custo total dos painéis fotovoltaicos (\$);

C_{PVR} – custo do dispositivo de rastreamento solar (*tracker*) dos painéis fotovoltaicos (\$);

C_{MPPT} – custo do mppt (do seguidor do ponto de máxima potência – em inglês *Maximum Power Point Tracker*) (\$);

C_D – custo total dos geradores diesel (\$);

Δ_{Bat} – fator de escala para baterias;

C_{Bat} – custo total das baterias (\$);

C_{CP} – custo total dos conversores de potência (\$);

C_{Opc} – custo total do equipamento da carga opcional (\$);

C_{Adv} – custo total do equipamento da adiável (\$);

C_{Dump} – custo total do “*dump load*” (\$).

Para calcular o custo total das turbinas eólicas os equipamentos são separados de acordo com os barramentos a serem conectados CA ou CC (corrente alternada ou corrente contínua), ver Equação 3.10:

$$C_{TE} = \Delta_{TE,CA} (C_{TE,CA} + C_{T,CA}) + \Delta_{TE,CC} (C_{TE,CC} + C_{T,CC}) \quad 3.10$$

onde:

$C_{TE,CA}$ – custo das turbinas eólicas do barramento CA (\$);

$C_{T,CA}$ – custo das torres do barramento CA (\$);

$\Delta_{TE,CA}$ – fator de escala para turbinas eólicas do barramento CA;

$C_{TE,CC}$ – custo das turbinas eólicas do barramento CC (\$);

$C_{T,CC}$ – custo das torres do barramento CC (\$);

$\Delta_{TE,CC}$ – fator de escala para turbinas eólicas do barramento CC.

O custo de instalação do sistema híbrido é dado pela soma dos custos de instalação dos componentes apresentados na Equação 3.11.

$$C_I = \Delta_{TE,CA} C_{I,TE,CA} + \Delta_{TE,CC} C_{I,TE,CC} + C_{I,PV} + C_{I,D} + \Delta_{Bat} C_{I,Bat} + C_{I,CP} + C_{I,Dump} \quad 3.11$$

onde:

$C_{I,TE,CA}$ – custo de instalação das turbinas eólicas do barramento CA (\$);

$C_{I,TE,CC}$ – custo de instalação das turbinas eólicas do barramento CC (\$);

$C_{I,PV}$ – custo de instalação dos painéis fotovoltaicos (\$);

$C_{I,D}$ – custo de instalação dos geradores diesel (\$);

$C_{I,Bat}$ – custo de instalação do banco de bateria (\$);

$C_{I,CP}$ – custo de instalação dos conversores de potência (\$);

$C_{I,Dump}$ – custo de instalação do “dump load” (\$).

Os fatores de escala Δ_{Bat} , $\Delta_{TE,CC}$ e $\Delta_{TE,CA}$ são utilizados nas Equações 3.8, 3.9 e 3.10 para linearizar os custos associados, respectivamente, ao banco de baterias e as turbinas eólicas nos dois barramentos.

Geralmente, empreendedores que não possuem o montante do custo total do sistema recorre, muitas vezes, às instituições bancárias para financiamento de toda ou parte do investimento. Os

bancos por sua vez precisam de uma confirmação de que o projeto será viável e que terá retorno dentro das condições impostas. Sendo assim, o custo do pagamento do inicial (C_{pi}) por parte do empreendedor é uma fração do custo total do sistema (f_{pi}), dado pela Equação 3.12.

$$C_{pi} = f_{pi} C_S \quad 3.12$$

Portanto, o custo do capital (C_{cap}) é dado pela Equação 3.13:

$$C_{Cap}(n) = |C_{pi}|_{n=1} + |D_{Fin}|_{1+tc \leq n \leq tc+te} \quad 3.13$$

onde:

tc – tempo de carência (ano);

te – tempo de empréstimo (ano);

n – ano;

D_{Fin} – despesas financeiras ou empréstimo do sistema (\$).

A formula de cálculo das despesas financeiras será apresentada mais à frente. A Equação 3.13 contabiliza para o primeiro ano o pagamento inicial e o empréstimo anual considerando o tempo de carência oferecida por muitas instituições financeiras. O sistema financeiro deve considerar um período N em anos, para verificar a viabilidade do projeto.

3.6.2 Receita Operacional do Sistema

A receita operacional do sistema esta dividida na receita operacional bruta e líquida. A receita bruta de um sistema híbrido está diretamente ligada à prestação de serviços, ou seja, venda de energia. Ela é calculada determinando a energia anual que atende cada tipo de carga; primária, adiável ou opcional. O preço da energia para cada carga varia, sendo assim, a receita bruta é dada pela Equação 3.14. Ela é inflacionada a cada ano usando a taxa de inflação do combustível (t_f).

$$R_{bruta}(n) = 8760 \left[(\bar{P}_{prim} - \bar{P}_{exc}) p_{prim} + \bar{P}_{adv} p_{adv} + \bar{P}_{opc} p_{opc} \right] (1 + t_f)^n \quad 3.14$$

onde:

\bar{P}_{prim} – potência média da carga primária (kW);

\overline{P}_{adv} – potência média da carga adiável (kW);

\overline{P}_{opc} – potência média da carga opcional (kW);

p_{prim} – preço da energia para carga primária (\$/kWh);

p_{adv} – preço da energia para carga adiável (\$/kWh);

p_{opc} – preço da energia para carga opcional (\$/kWh);

No *SESHE* ocorre a dedução dos impostos existentes, no Brasil, recorrentes à serviços (geração de energia elétrica) deduzidos na receita bruta operacional, tais como: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social – COFINS, Programa de Integração Social – PIS e Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS. Estes tributos têm efeito sobre a formação de custos e preços. Os preços de venda da energia do sistema devem ser suficientemente capazes de remunerar os custos plenos, gerar margem razoável de lucro e cobrir todos os impostos incidentes. Os custos de geração de energia serão apresentados mais adiante.

3.6.3 Custos e Despesas Operacionais do Sistema

De uma forma geral, os custos são consumidos pelos produtos ou serviços durante o seu processo de elaboração. Enquanto que as despesas estão associadas ao período – não repercutem, diretamente, na elaboração dos produtos ou serviços prestados.

No entanto, os custos operacionais do sistema são divididos em três grupos: custos do combustível, custo de manutenção e operação e custo de reposição dos equipamentos.

3.6.1.1 O custo do combustível (C_F)

Este custo é determinado usando o consumo médio horário do óleo diesel (\overline{F}) que é, entre outros, dado de saída da simulação do balanço energético do sistema. O consumo médio é multiplicado pelo número de horas do ano e pelo custo unitário do combustível (c_f). O custo do combustível é inflacionado usando a taxa de inflação do combustível (t_f), ver Equação 3.15.

$$C_F(n) = (8760 \overline{F} c_f) (1 + t_f)^n \quad 3.15$$

3.6.1.2 O custo de operação e manutenção ($C_{O\&M}$)

Este custo é calculado através da soma dos custos individuais de O&M para cada equipamento e o custo de O&M do sistema geral ($C_{O\&M,S}$). Estes custos de O&M para o banco de baterias e do sistema geral são estipulados para o primeiro ano do projeto e sofrem aumento de acordo com a inflação geral (i). Os custos de O&M das turbinas eólicas e dos geradores diesel são baseados na produção total de energia das turbinas eólicas e nas horas de operação dos geradores diesel, respectivamente, como mostra a Equação 3.16.

$$C_{O\&M}(n) = \left[8760 \left(\overline{P_{TE}} c_{O\&M,TE} \right) + h_D c_{O\&M,D} + \Delta_{Bat} C_{Bat} f_{Bat} + C_{O\&M,S} \right] (1+i)^n \quad 3.16$$

onde:

$\overline{P_{TE}}$ – potência média gerada pela turbina eólica (kW);

$c_{O\&M,TE}$ – custo de operação e manutenção das turbinas eólicas (\$/kWh);

h_D – horas de operação dos geradores diesel (h);

$c_{O\&M,D}$ – custo de operação e manutenção dos geradores diesel (\$/kWh);

f_{Bat} – fração do custo de capital das baterias (%);

C_{Bat} – custo total do banco de baterias (\$).

3.6.1.3 O custo de reposição dos equipamentos ($C_{R,X}$)

Este reflete o valor necessário para a vistoria ou reposição completa dos equipamentos em um sistema híbrido de energia nos intervalos de vida útil dos mesmos, durante o período de análise financeira. Portanto, o custo total de reposição (C_R) em um dado ano, n , é dado pela soma dos custos de reposição de cada equipamento que precisa ser reposta no mesmo ano, ver Equação 3.17.

$$C_R(n) = \sum_{z=1}^{N_{TE}} C_{R,TE}(n) + \sum_{z=1}^{N_D} C_{R,D}(n) + C_{R,PV}(n) + C_{R,Bat}(n) + C_{R,CP}(n) + C_{R,Dump}(n) \quad 3.17$$

onde:

N_{TE} – número de turbinas eólicas;

N_D – número de geradores diesel.

O custo de reposição para cada componente é zero para o ano em que o componente não é substituído. A fórmula para o cálculo deste custo para cada componente é descrita na Equação 3.18. Este custo é inflacionado ano-a-ano pela inflação geral (i).

$$C_{R,X}(n) = (1+i)^n C_{R,X} \Big|_{m.t_{R,X}=n} \quad 3.18$$

onde $m = \text{int} \left[\frac{n}{t_{R,X}} \right]$ e $t_{R,X}$ é o tempo de vida útil ou tempo entre a reposição, em anos, para cada equipamento especificado pelo fabricante, exceto os geradores diesel. Os geradores são substituídos depois de um específico número de horas em operação, que também é fornecido pelo fabricante. Para cada gerador diesel o tempo entre as reposições é em função da fração do tempo de operação para cada gerador, $\frac{t_{Dz}}{t_{Sim}}$ e o tempo de vida útil fornecido pelo fabricante, (t_V). Então o número de horas entre as reposições de cada gerador diesel é dada pela Equação 3.19:

$$t_{R,Dz} = \frac{t_V}{8760} \frac{t_{Sim}}{t_{Dz}} \quad 3.19$$

3.6.1.4 Despesas Administrativas (D_{Adm})

Os encargos administrativos estão relacionados com supervisão, gestão e controle do sistema híbrido de geração de energia. Este custo é estipulado para o primeiro ano do projeto e deve ocorrer um aumento ao longo dos anos de acordo com a inflação geral (i), como mostra a Equação 3.20.

$$D_{Adm}(n) = D_{Adm}(1+i)^n \quad 3.20$$

3.6.1.5 Despesas Financeiras (D_{Fin})

As despesas financeiras são encargos, normalmente, com juros. O empréstimo anual considerado despesa financeira do sistema, é determinado utilizando as formulas financeiras padrão incluindo taxas de juros (j) e tempo de empréstimo (te). A forma de cálculo depende da taxa de juros, portanto, a despesa com os juros é calculada usando as Equações 3.21 e 3.22.

$$D_{Fin} = C_S(1-f_{pi}) \left[\frac{j(1+j)^{te}}{(1+j)^{te}-1} \right] \text{ para } j > 0 \quad 3.21$$

$$D_{Fin} = \frac{C_S(1-f_{pi})}{te} \text{ para } j = 0 \quad 3.22$$

3.6.1.6 Depreciação (D)

A depreciação é um método para alocar o custo do capital de um equipamento ao longo de um período de tempo. O valor de qualquer bem de capital – prédios, maquinários, etc – decresce, conforme vai passando a vida útil. Nessa dissertação utiliza-se o método da linha reta, em que o valor de um recurso é reduzido em quantias uniformes anuais durante sua vida útil estimada. A fórmula geral de depreciação em linha reta é dada pela Equação 3.23.

$$D(n) = \left[\frac{C_S - VR}{T_D} \right]_{1 \leq n \leq T_D} \quad 3.23$$

onde:

C_S – custo do capital do sistema (\$);

T_D – tempo de depreciação dos equipamentos (ano);

VR – valor residual (\$), ver Equação 3.24;

$$VR = f_R C_E \quad 3.24$$

f_R – fração do custo dos equipamentos (%);

C_E – custo total dos equipamentos (\$);

3.6.4 Parâmetros de Análise Econômica

3.6.1.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Este parâmetro é utilizado para comparar economicamente vários sistemas híbridos influenciando nas decisões de investimento. O Valor Presente (VP) é utilizado para determinar o valor corrente de uma soma ou a decorrência de gastos ou receitas no futuro [36], como apresenta a Equação 3.25.

$$VP(n) = \frac{P}{(1+d)^n} \quad 3.25$$

onde:

P – valor principal no final do ano n ; \$

n – duração do período correspondente; anos

d – taxa de desconto; %.

Como as decisões que afetam o futuro são feitas no presente, faz mais sentido converter os valores futuros em valores atuais. Neste método, as decisões são baseadas na quantia pela qual o valor presente excede o investimento. Para isso, calcula-se o VPL usando a Equação 3.26:

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{P}{(1+d)^n} \quad 3.26$$

Neste modelo, o valor presente do projeto é determinado pela soma dos lucros menos o capital inicial investido.

3.6.1.2 Custo de geração de energia

Este custo considera todos os custos e despesas operacionais decorrentes no sistema. Primeiramente, utiliza VPL e calcula-se o valor fixo anual (V_A) para cada custo utilizando a Equação 3.27.

$$V_A(n) = VPL \frac{d(1+d)^N}{(1+d)^N - 1} \quad 3.27$$

Então o custo de geração de energia é calculada pela Equação 3.28.

$$CGE_A = \frac{C_{F,A} + C_{O\&M,A} + C_{R,A} + C_{pi} + D_{Adm,A} + D_{Fin,A} - VR_A}{8760(\bar{P}_{prim} + \bar{P}_{div} + \bar{P}_{opc})} \quad 3.28$$

onde:

$C_{F,A}$ – Custo total do combustível anualizado, \$/ano;

$C_{O\&M,A}$ – Custo total de O&M anualizado, \$/ano;

$C_{R,A}$ – Custo total de reposição anualizado, \$/ano;

C_{pi} – Capital inicial

$D_{Adm,A}$ – Despesa total administrativo anualizado, \$/ano;

$D_{Fin,A}$ – Despesa total financeiro anualizado, \$/ano;

VR_A – Valor residual anualizado, \$/ano;

3.6.1.3 Período de Retorno Simples (*PRS*)

Este parâmetro representa o período necessário para que se recupere o investimento inicial. A idéia é que quando mais rápido o capital investido pode ser recuperado, mais rápido pode-se reinvestir em novos projetos produtivos rentáveis. Contudo este método do período de recuperação do investimento vem decaindo no uso exclusivo em análise de investimento. Todavia, utilizando-o em conjunto com outros métodos fornece a indicação do tempo comprometido com os fundos. O Payback é calculado pela Equação 3.29.

$$PSR = \frac{C_s}{L_L} \quad 3.29$$

onde:

C_s – custo do capital instalado (\$);

L_L – lucro líquido do sistema (\$).

3.6.1.4 Taxa Interna de Retorno (*TIR*)

A Taxa Interna de Retorno pode ser definida como a taxa (r) que iguala o valor presente de um fluxo de caixa com os custos de um investimento. Ela deve ser calculada facilmente, com auxílio de um computador, por avaliação interativa ou interpolação. A Equação 3.30 determina a taxa de retorno:

$$C_s = \sum_{n=1}^N \frac{L_L(n)}{(1+r)^n} \quad 3.30$$

Quando os investimentos propostos possuem a mesma expectativa de vida, uma comparação entre eles utilizando os métodos supracitados dará uma descrição razoável de seus valores relativos.

4 PROJETO DO SISTEMA HÍBRIDO DA VILA DE SUCURIJU

Em 2005, enquadrado no edital do MME que propõe soluções tecnológicas criativas para eletrificação da região Amazônica, iniciou-se um projeto que visa eletrificar e fornecer água potável à vila de Sucuriju-Amapá. O projeto é coordenado pelas Universidades Federais de Pernambuco, Pará e Campina Grande e conta com o apoio do CNPq. Este projeto tem como principal objetivo implantar um sistema híbrido eólico/solar/diesel que aproveita os recursos renováveis existentes na localidade para geração de energia elétrica [37].

A Figura 4.1 apresenta a vila de Sucuriju localizada às margens do rio Sucuriju no litoral nordeste do Estado do Amapá, município do Amapá (Latitude 1° 40' 39"N; Longitude 49° 56' 1"O). Na Figura 4.2. é apresentada uma foto aérea de vila que se encontra distante da cidade mais próxima 14 horas de viagem em barco de pequeno porte. Atualmente, a população com cerca de 530 pessoas [38], na maioria pescadores, ocupa uma área de 0,45 km², aproximadamente, e necessita de eletricidade para viabilizar o tratamento e distribuição de água potável dentro do processo produtivo existente na vila.

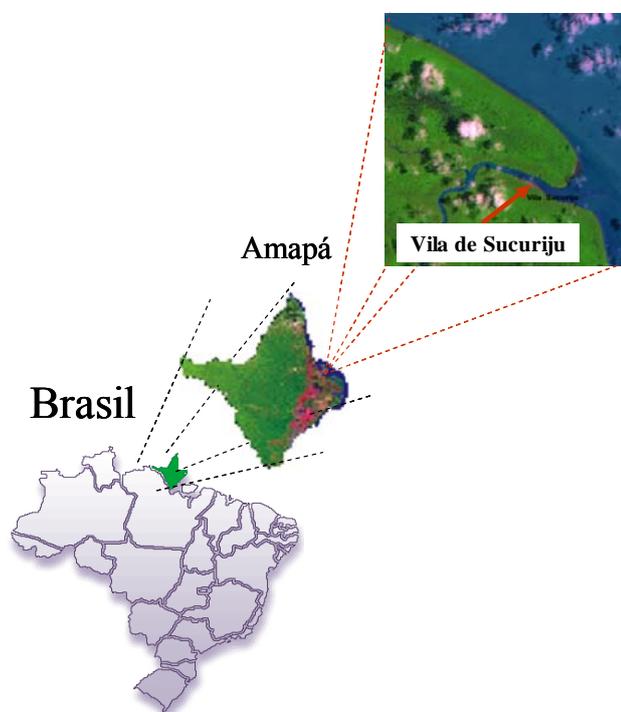


Figura 4.1: Localização geográfica da vila de Sucuriju



(a)



(b)

Figura 4.2: (a) e (b) vistas aéreas da Vila de Sucuriju

A seguir são apresentadas às estimativas dos recursos energéticos e da carga/demanda para a Vila de Sucuriju, utilizadas nas simulações do sistema. Também, são apresentas as análises para a definição dos componentes.

4.1 Estimativa dos Recursos Energéticos

Os recursos utilizados para a vila de Sucuriju foram estimados através de extrapolações feitas na vila de Tamaruteua localizada no município de Marapanim – Estado do Pará (Latitude $0^{\circ} 34' 57''S$, Longitude $47^{\circ} 45' 28''O$). Estes dados foram coletados durante o período de 1998, 1999 e 2000, à 30 m de altura e com intervalos de integração de 10 minutos [39]. Também, foram

realizadas correlações desses dados coletados na vila de Tamaruteua com dados⁹ de locais mais próximos que apresentam características de orografia e topografia semelhantes à vila de Sucuriju.

Com esses dados coletados com integração de 10 min foram calculadas as médias horárias para cada ano, já que para esta análise serem necessários valores nesta grandeza. Portanto, obteve-se 3 anos de dados com 8760 valores cada e, calculou-se a média desses três anos para cada hora construindo, assim, as séries temporais típicas de velocidade de vento e radiação solar.

4.1.1 Recurso Eólico

A Figura 4.3 mostra a série temporal de 8760 pontos de velocidade de vento (ano típico) resultante da média dos três anos. Todavia, esta distribuição apresenta períodos sem coleta de dados, mais precisamente, seis dias no mês de fevereiro e cinco dias no mês de outubro.

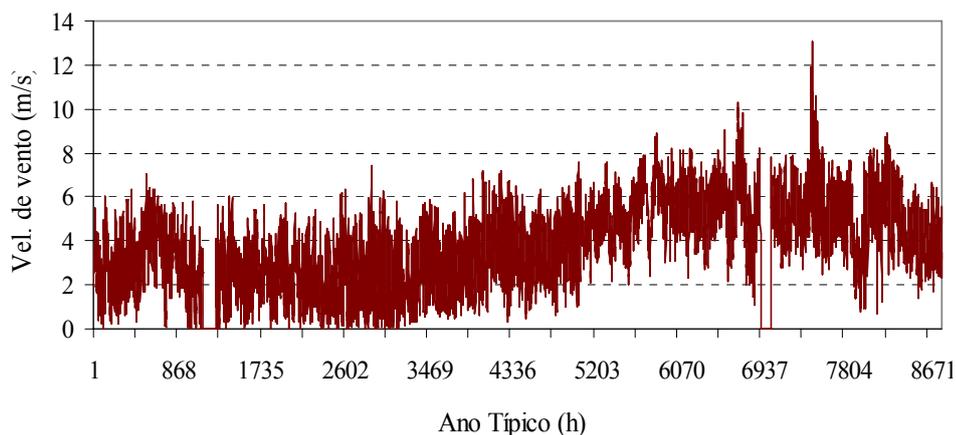


Figura 4.3: Dados de velocidade de vento coletados com os espaços

Para preencher esses espaços utilizou-se a técnica de preenchimento com valores de períodos que representam a variabilidade desses períodos sem dados. A Figura 4.4 mostra a distribuição completa (preenchida) de velocidade de vento coletados na vila de Tamaruteua.

Tratando-se de um local relativamente distante, houve a necessidade de verificar a sazonalidade e intensidade de turbulência dos valores coletados em Tamaruteua. Então, fez-se uma análise comparativa entre os dados de velocidade de vento preenchidos com dados de realizadas a 50 m de altura localizada no litoral do Estado do Amapá (Latitude 00° 22'N, Longitude 50° 50'O) denominada de Extrapolações à 50m.

⁹ Dados provenientes de Atlas e relatórios confidenciais em uma escala temporal maior (mensal e anual).

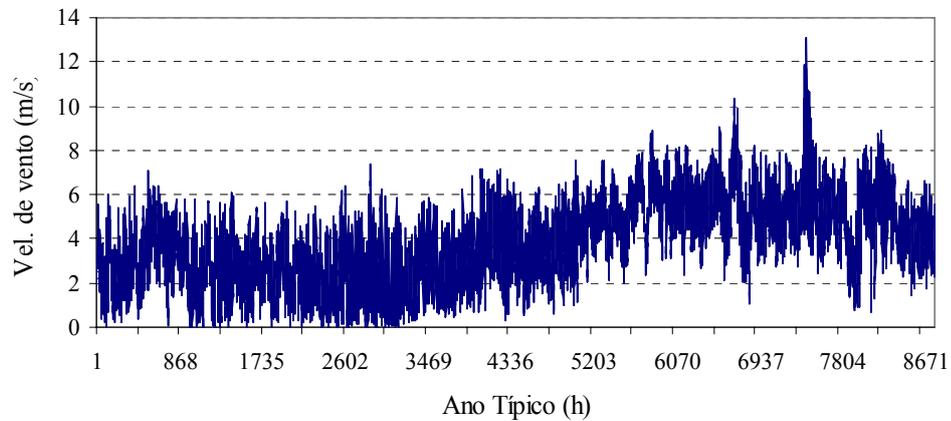


Figura 4.4: Dados de velocidade de vento preenchidos

Neste local próximo que apresenta, características de orografia e de topografia semelhantes à vila de Sucuriju foram coletados e processados, no período de março de 2001 a fevereiro de 2002, 468.937 amostras de 1 minuto da velocidade do vento; o equivalente a 91,13% dos dados possíveis de serem coletados no período, com velocidade média anual de 4,27 m/s.

A Figura 4.5 mostra a comparação realizada entre as médias mensais de velocidade de vento dessas duas regiões.

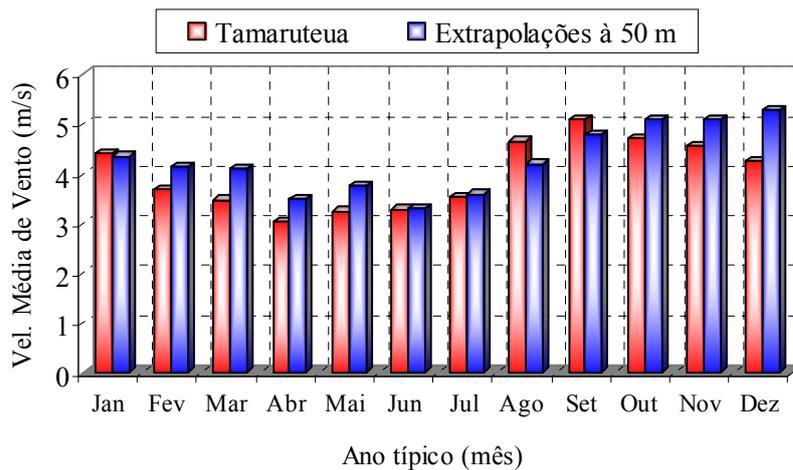


Figura 4.5: Médias mensais de velocidade de vento para as duas regiões.

Observe-se que, nos meses de fevereiro a maio, as velocidades médias mensais de Tamaruteua são relativamente menores (chegando a 1,6 m/s de diferença). Enquanto que, nos meses de agosto e setembro, ocorre o inverso com a maior diferença entre os valores médios nesse

período de 1 m/s. Já nos meses de janeiro, junho e julho denominados de meses de transição, há uma aproximação das médias mensais de ambas as localidades.

Para corrigir a sazonalidade e intensidade de turbulência (distribuição de frequência) dos dados de Tamaruteua utilizaram-se os seguintes procedimentos:

- Correção 1 – utilizando 2 (dois) fatores para as duas estações consideradas na região: chuvosa (janeiro à maio) e seca (junho à dezembro) 1,4 e 0,9, respectivamente;
- Correção 2 – com 12 (doze) fatores mensais, fazendo com que as médias mensais de Tamaruteua se igualem as médias mensais das Extrapolações à 50 m;
- Correção 3 – usando os fatores mensais adicionando variabilidade nos dados de vento com 1, 5, 10 e 20% ruído branco.

A distribuição de frequência da Correção 3 com 1% de variabilidade (ruído Branco) apresenta uma variação de velocidade de vento praticamente nula em relação à Correção 2. As Correções com 5% e 10% variabilidade apresentam uma maior variação na velocidade de vento, mas a tendência é se aproximar da Correção 3 com 20% de ruído branco.

A Figura 4.6 mostra a distribuição de frequência para as Correções 1, 2 e 3 (20% de ruído branco), onde não se verifica grande variação entre as distribuições de frequência das correções aplicadas e os dados das Extrapolações à 50 m.

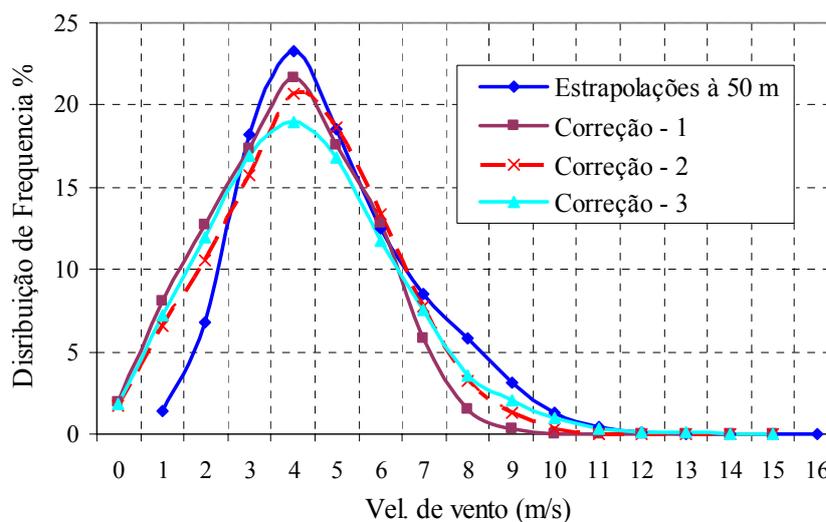


Figura 4.6: Distribuição de frequência (Weibull) para as Correções e as Extrapolações à 50m

A comparação feita entre os parâmetros de Weibull fator de forma e de escala, respectivamente, k e c , mostra que o que mais se aproximava dos dados de Extrapolações à 50m (k - 2,32 e c - 4,88m/s) é a Correção 2, com k - 2,30 e c - 4,80m/s. Enquanto que, para a Correção 1, o k e c são, respectivamente, 2,29 e 4,24m/s e, para a Correção 3 (com 20% de ruído branco) são k - 2,08 e c - 4,81m/s.

A contribuição do recurso eólico para geração de energia indica um valor médio anual da velocidade de 4,27m/s. A Figura 4.7 mostra a distribuição que apresenta uma variação sazonal não muito acentuada e uma velocidade de vento média anual consideravelmente baixa e, com períodos do ano (período das chuvas) com valores médios horários muito próximos de zero (baixo vento). A série temporal anual de velocidade de vento apresenta um valor máximo horário de 13,2 m/s e valores mínimos em períodos praticamente sem vento.

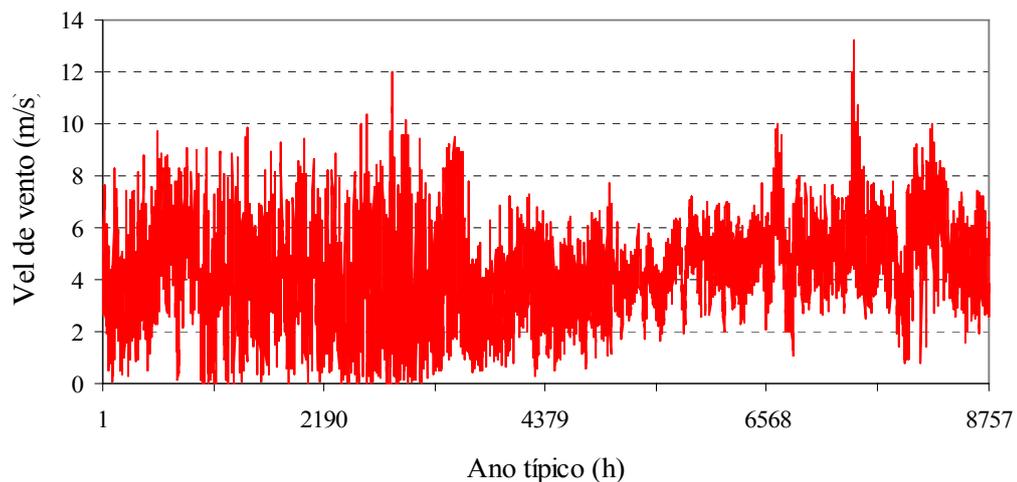


Figura 4.7: Velocidade de vento corrigida

A Figura 4.8 mostra a variação do dia para estas duas estações a *Estação Chuvosa* (janeiro á maio) e *Estação Seca* (junho á dezembro) com picos ambos às 14 horas, com valores médios de aproximadamente 6 m/s, respectivamente e, uma concentração do recurso eólico durante o período diurno.

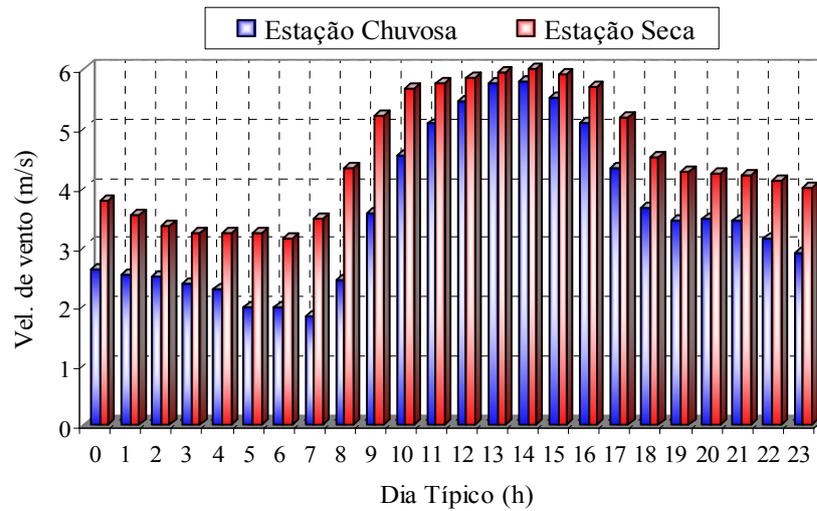


Figura 4.8: Velocidade de vento diário médio horário para as estações.

4.1.2 Recurso Solar

Igualmente ao recurso eólico, os dados de radiação solar foram obtidos através da coleta feita na vila de Tamaruteua.

A Figura 4.9 mostra a distribuição da radiação solar obtida pela média dos anos de 1998, 1999 e 2000, porém, analogamente a série temporal de velocidade de ventos, a série temporal da radiação solar possui períodos sem dados medidos e com alguns dados incoerentes (no mês de fevereiro existem seis dias, no mês de setembro sete dias e no mês de outubro cinco dias). Esses espaços foram preenchidos utilizando o mesmo critério para os dados de velocidade de vento e obteve-se uma nova distribuição, representada na Figura 4.10.

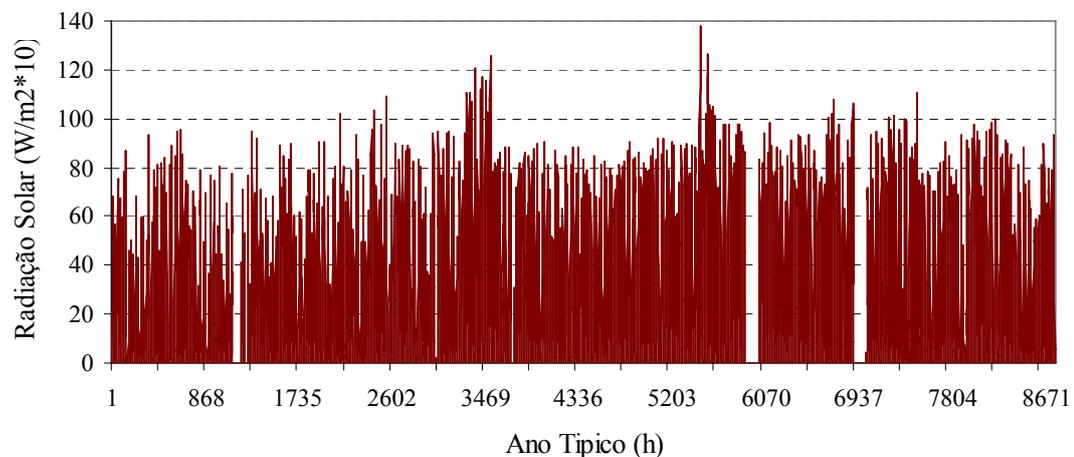


Figura 4.9: Radiação solar coletada com espaços

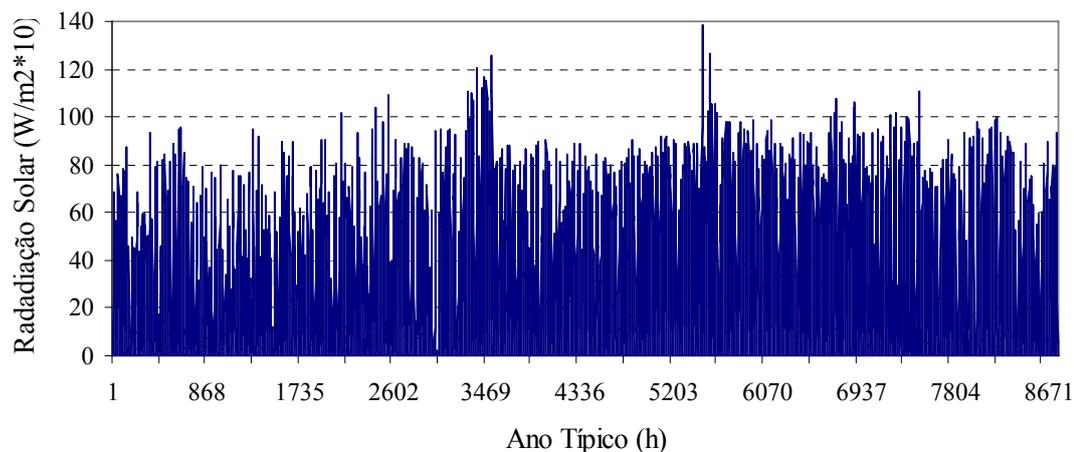


Figura 4.10: Radiação solar com os espaços preenchidos

Através do cálculo da radiação extraterrestre e, pela comparação desses valores com os dados de Tamaruteua preenchidos, verificou-se que em alguns períodos apresentavam valores acima e muito próximos da radiação extraterrestre e também, apresentava em alguns períodos a duração do dia solar maior do que o calculado.

As incoerências foram eliminadas utilizando um fator que reduzisse o maior pico de radiação solar, enquanto que, os dados além da duração do dia foram excluídos, como mostra a Figura 4.11.

Portanto, a análise da série temporal de radiação solar apresenta o valor máximo médio horário de 1.036 W/m^2 .

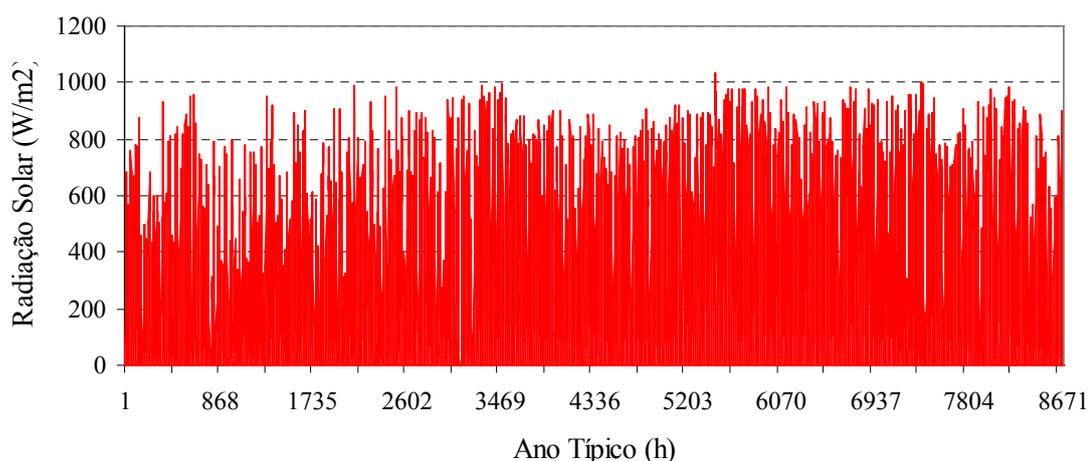


Figura 4.11: Distribuição do ano típico sem as incoerências

Outro estudo comparativo foi realizado entre as médias mensais dos dados de Tamaruteua corrigidos e valores de médias mensais, apresentados no Atlas Solarimétrico do Brasil nas regiões

de Macapá-Amapá e Belém-Pará. O objetivo dessa comparação, apresentada na Figura 4.12, foi verificar se os dados de radiação solar de tamaruteua estivessem próximos das médias mensais da região após as correções.

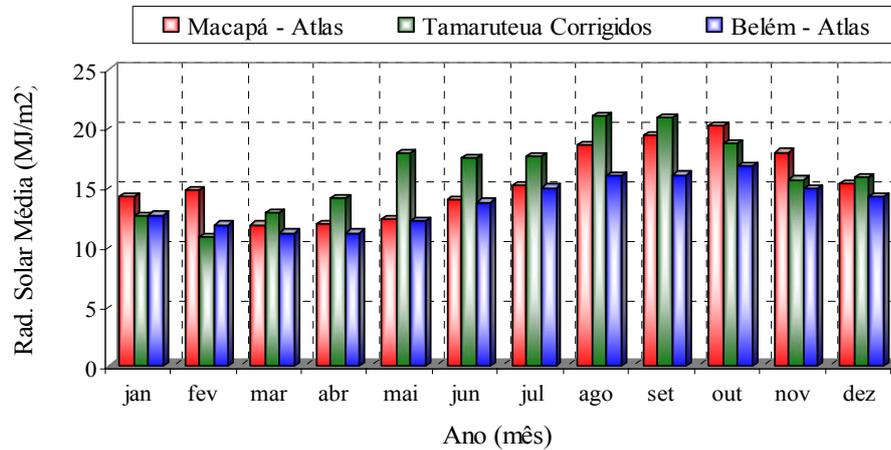


Figura 4.12: Comparação dos dados corrigidos com dados do Atlas Solarimétrico

Entretanto, considerou-se que os dados de Tamaruteua corrigidos apresentam uma sazonalidade para a região com médias mensais, relativamente similares.

Na Figura 4.13 encontra-se representada a radiação solar diária média horária também para as duas estações. No período de chuva verifica o valor máximo de $624,68 \text{ W/m}^2$, enquanto, no período seco apresenta valor máximo $770,39 \text{ W/m}^2$, ambos às 12 horas.

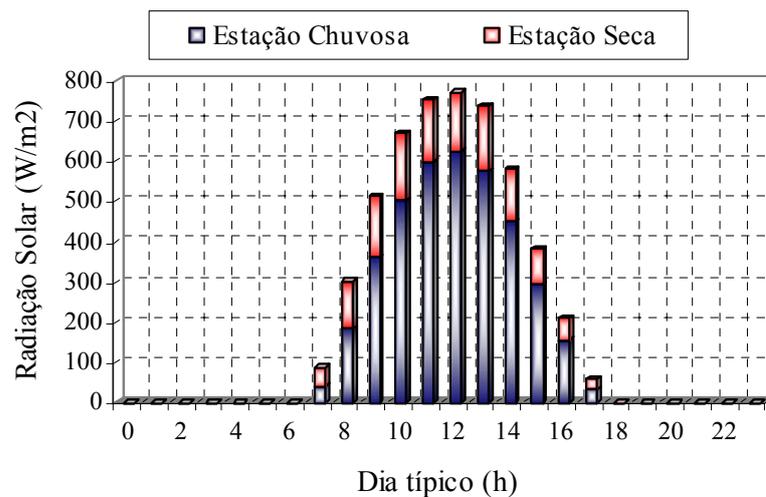


Figura 4.13: Radiação solar diária média horária para as estações

A análise da contribuição solar indica uma radiação média anual de $16,3 \text{ MJ/m}^2$, onde se verifica menor contribuição no mês de fevereiro com $10,8 \text{ MJ/m}^2$ e, maior contribuição nos meses de agosto e setembro com $21,2$ e $20,9 \text{ MJ/m}^2$, respectivamente.

O objetivo das análises dos recursos energéticos foi gerar séries temporais confiáveis de 8760 pontos horários que podem ser utilizadas nas simulações. Com isso, verificou-se que a disponibilidade maior dos recursos se dá nos meses de Estação Seca e, segundo o dia típico de ambos os recursos, no período das 8 às 18 horas. Isso implica que haverá uma maior disponibilidade do potencial renovável durante o período diurno, necessitando assim, de acumuladores de energia para o resto do período.

4.2 Levantamento da Carga e Estimativa da Demanda

Em 2005, foi realizada na vila uma pesquisa socioeconômica [40], onde levantou-se a carga total instalada nas residências, comércios e prédios públicos (i.e. igrejas, posto de saúde, escola e colônia dos pescadores) como mostra a Tabela 4.1. As investigações feitas apontaram dados sobre os hábitos relacionados ao consumo de energia e, sobre quais aparelhos podem vir a ser incluído na rotina diária com o fornecimento ininterrupto de eletricidade na vila de Sucuriçu.

Tabela 4.1: Levantamento da carga instalada da vila de Sucuriçu (julho de 2005)

Equipamentos	Quantidade (unid.)	Potência (W)
Iluminação		
Lâmpadas Incandescentes de 60 W	199	60
Lâmpadas Incandescentes de 100 W	73	100
Lâmpadas Fluorescentes de 20 W	11	20
Lâmpadas Fluorescentes de 40 W	17	40
Lâmpadas PL de 9 W	3	9
Lâmpadas PL de 15 W	19	15
Lâmpadas PL de 20 W	11	20
Luminária para postes de 125 W	2	125
Eletrodomésticos		
Televisor de 14"	12	40
Televisor de 20"	26	60
Televisor de 20" 70 W	1	70
Antena parabólica	29	20
Vídeo cassete	2	20
Aparelho DVD	2	20
Aparelho de som de 150 W	5	150
Aparelho de som 200 W	1	200
Aparelho de som 280 W	1	280

Aparelho de som 120 W	1	120
Aparelho de som 90 W	1	90
Aparelho de som 50 W	1	50
Rádio gravador 10 W	2	10
Rádio gravador 12 W	6	12
Rádio gravador 20 W	2	20
Caixa amplificadora de som de 40 W	2	40
Caixa amplificadora de som de 120 W	2	120
Aparelho amplificador 40 W	1	40
Aparelho amplificador 75 W	1	75
Aparelho mixagem	2	20
Liquidificador	4	300
Liquidificador 350 W	1	350
Maquina de costura	1	155
Maquina de costura 90 W	3	90
Máquina de lavar 400 W	15	400
Máquina de lavar 240 W	10	240
Máquina de lavar	8	280
Batedeira de açaí de 1/4 CV	1	184
Climatização		
Ventilador de mesa	4	55
Ventilador de mesa 80 W	1	80
Ferros Elétricos		
Ferro elétrico	18	1,000
Ferro elétrico 1100 W	2	1,100
Ferro elétrico 1200 W	5	1,200
Refrigerador & Freezer		
Freezer	4	400
Freezer 120 W	1	120
Freezer 122 W	1	122
Freezer 125 W	1	125
Freezer 126 W	4	126
Freezer 130 W	11	130
Freezer 142 W	2	142
Freezer 143 W	1	143
Freezer 179 W	1	179
Freezer 271 W	2	271
Bebedouro	1	125
Frigobar	1	80
Refrigerador	2	100
Motores		
Bomba d'água de 1,5 CV	1	1,104

O projeto construiu novas instalações elétricas nas casas, reduzindo perdas nas instalações e, prevê ainda, substituição das lâmpadas apresentadas na Tabela 4.1 por lâmpadas de baixo consumo e máxima eficiência. Portanto, para a geração do dia típico para a vila de Sucuriju serão utilizadas 500 lâmpadas PL de 20W.

4.2.1 Estimativa Atual da Demanda

Através da pesquisa realizada estimou-se que a carga total atual instalada da vila é de aproximadamente 60 kW. A Figura 4.14 apresenta uma distribuição por categorias da carga total existente, que apresenta os ferros elétricos com a maior parcela (43,2%), em seguida os eletrodomésticos com 28,8%, e o total de lâmpadas PL de 20W correspondem a 16,5%. Observa-se que, em Sucuriçu são os ferros elétricos que podem causar grandes picos de demanda e grandes consumos de energia.

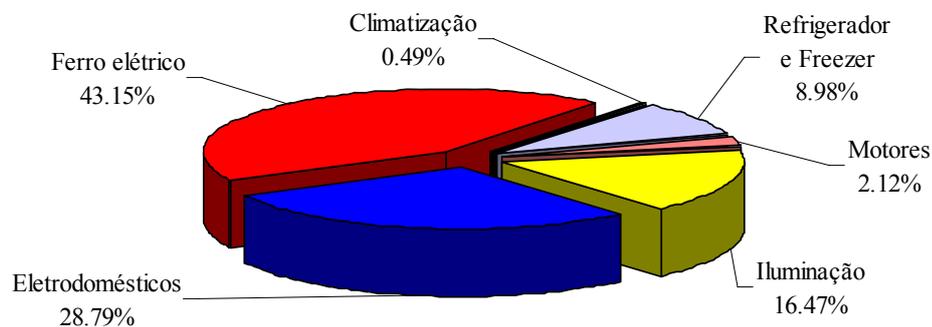


Figura 4.14: Distribuição da Carga Total Instalada na vila de Sucuriçu

A energia diária da Vila foi estimada em 236kWh com valores máximos em torno de 18kW e mínimos de 3kW (média horária). A Figura 4.15 mostra a estimativa que representa a situação esperada para Sucuriçu nos primeiros meses, considerando o consumo residencial (aparelhos eletrodomésticos e equipamentos), iluminação pública, funcionamento de prédios públicos (escola, posto de saúde, igreja, sede da associação) e perdas.

Esta estimativa é baseada no consumo médio diário e mensal das categorias de carga consideradas. As potências médias das categorias apresentadas na Tabela 4.2 correspondem às médias das potências dos equipamentos elétricos instalados na vila de Sucuriçu. Os dias de uso por mês e o tempo médio de uso dia para cada grupo foi estipulado de acordo com as características da população local.

Tabela 4.2: Consumo médio mensal e diário e mensal das categorias de carga

Categoria	Qde (unid)	Potência Média (W)	Dias de uso por mês (dia)	Tempo médio de uso dia (h)	Consumo médio diário (kWh)	Consumo médio mensal (kWh)	
Refrigerador & Freezer	40	160	30	10	64000	1920000	28.34%
Iluminação	500	20	30	5	50000	1500000	22.14%
Eletrodomésticos	145	110	30	5	79750	2392500	35.31%
Ferro Elétrico	25	1100	30	1	27500	825000	12.18%
Climatização	5	70	30	10	3500	105000	1.55%
Motores	1	1,100	30	1	1100	33000	0.49%
Total					225850	6775500	100%

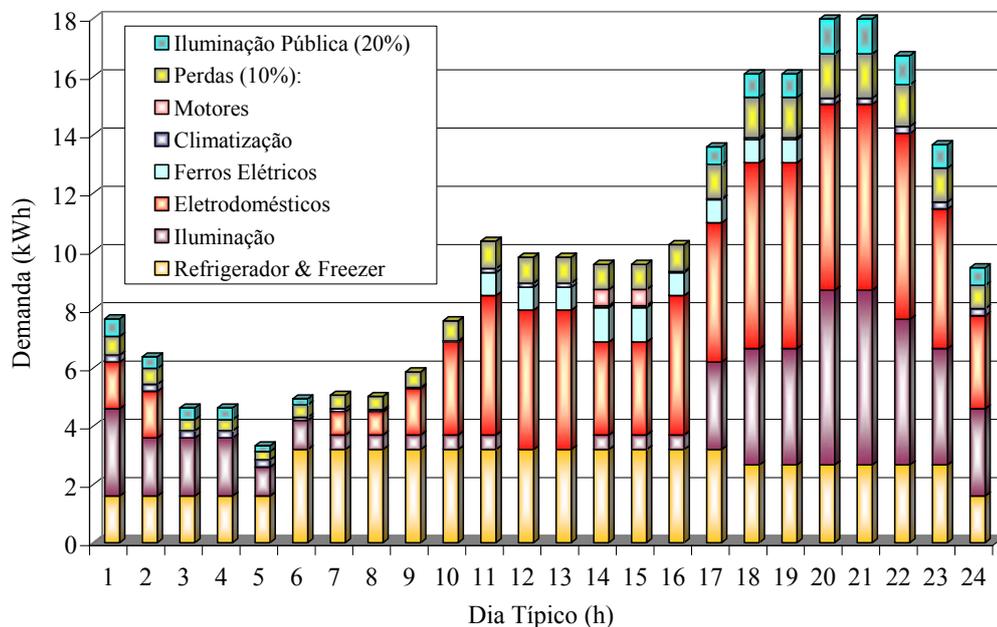


Figura 4.15: Distribuição diária da estimativa atual

Outra necessidade da vila é o fornecimento de água potável, pois a comunidade depende exclusivamente da coleta de água de chuvas, já que a água do Rio Sucuriçu é imprópria para consumo humano. O tratamento da água do rio deve ser feito por um dessalinizador que utiliza a técnica de osmose reversa (OR). Este sistema representa uma tecnologia de purificação da água de baixo consumo energético.

Estima-se que um dessalinizador com capacidade de produção de $2\text{m}^3/\text{h}$ de água dessalinizada com consumo médio de $3\text{kWh}/\text{m}^3$, possa atender a demanda de água básica na vila funcionando apenas 6h diários. Portanto, o consumo diário total é de 36kWh que equivale à

produção diária de 12 m³ de água potável fornecendo uma quantidade diária de 20 l/pessoa (em uma população de 600 pessoas).

Entretanto, tratando-se de uma carga a ser usada no período de seca, considerou-se o dessalinizador como carga opcional operando no máximo 6 horas diárias, visto que, pela análise dos recursos energéticos é o período de maior contribuição do renovável e de maior necessidade de água potável. Na *Estação Chuvosa* o dessalinizador deve ser ligado em pequenos períodos, onde também deve haver excesso do renovável.

Por se tratar de uma população acostumada a ter energia 4h diárias foram considerados três cenários visando melhor representar a estimativa. A série sintética da estimativa atual de demanda foi construída baseada no desvio padrão médio calculado entre esses três cenários apresentados na Figura 4.16.

A mudança ocorrida da estimativa diária do *Cenário I* para o *Cenário II* é o aumento do tempo médio de uso dia para 6h das categorias iluminação e eletrodomésticos. Também, ocorreram aumentos nos tempos médios de uso dia para as categorias motores e ferros elétricos de 1 para 2h. Enquanto que, a diferença entre o *Cenário I* e *Cenário III* se dá na modificação do tempo médio de uso dia das categorias eletrodomésticos para 8h, ferros elétricos para 3h e motores para 4h.

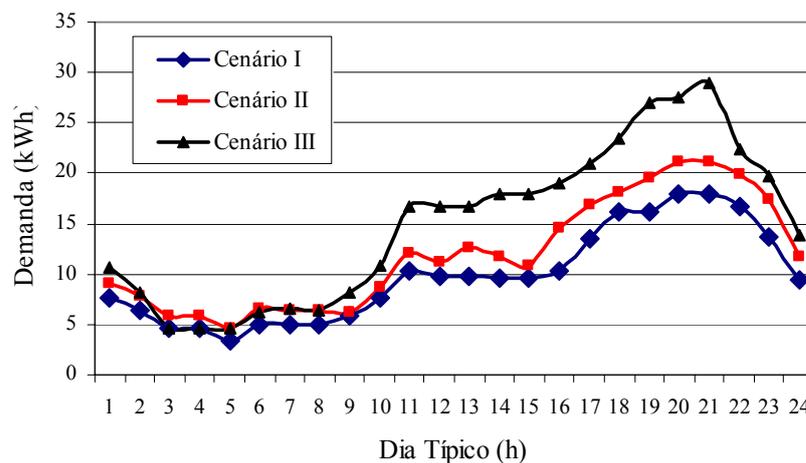


Figura 4.16: Cenários para Estimativa da Demanda Atual

Considerou-se fatores de escala mensal que representasse a variação sazonal na vila para a geração da distribuição diária média horária. Este modelo segue a metodologia apresentada por Dos

Santos [32]. A energia estimada total anual da série sintética de demanda é de, aproximadamente, 86,2MWh com valor médio horário de máximo de 24,93 kWh e mínimo de 3kWh.

4.2.2 Previsão de Aumento da Demanda Estimada

Também, baseada na pesquisa socioeconômica realizada na vila de Sucuriçu por pesquisadores do projeto em julho de 2005 obteve-se uma previsão da aquisição de novos equipamentos elétricos pela população nos próximos dois anos. Esse estudo apresentado na Tabela 4.3 mostra a quantidade de cada tipo de equipamento que as pessoas pretendem adquirir.

Tabela 4.3: Previsão de aquisição de equipamentos elétricos

Equipamentos Elétricos	Qde (unid)
Televisor	56
Rádio	42
Aparelho de som	44
Liquidificador	38
Vídeo K7	17
Aparelho de DVD	25
Antena Parabólica	45
Ferro Elétrico	40
Refrigerador	41
Freezer	46
Ventilador	42
Condicionador de ar	1
Lâmpada PL	1
Total	438

Atendendo a essa previsão de aquisição de novos equipamentos utilizou-se a mesma distribuição utilizada na estimativa da demanda, com o aumento apresentado nas quantidades de cada equipamento. Portanto, a estimativa do consumo de energia diário previsto, Figura 4.17, representa um consumo diário de aproximadamente 580kWh e com valores diários médios horários de 38kW e de 9kW, máximo e mínimo, respectivamente.

Para cálculo dos cenários apresentados na Figura 4.18, procedeu-se usando o mesmo critério utilizado para a estimativa atual da demanda e, acrescentando os equipamentos elétricos previstos para serem adquiridos pela população local. Assim, a série de estimativa da demanda prevista com o aumentos dos equipamentos eletrodomésticos é de, aproximadamente, 199,8MWh com valor médio horário de máximo de 45,6kWh e mínimo de 7kWh.

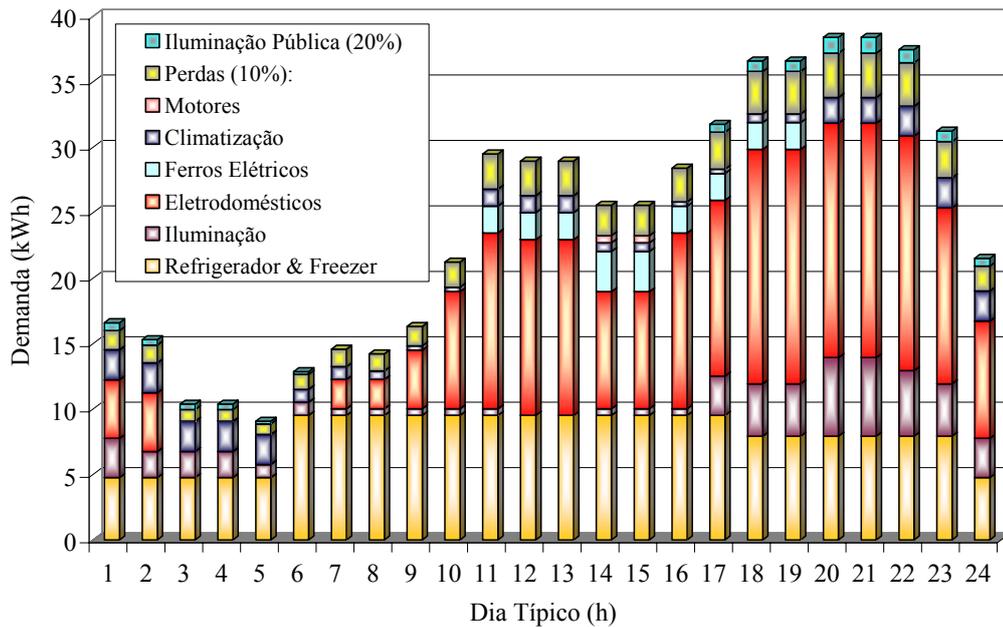


Figura 4.17: Distribuição diária da estimativa prevista com o aumento dos equipamentos

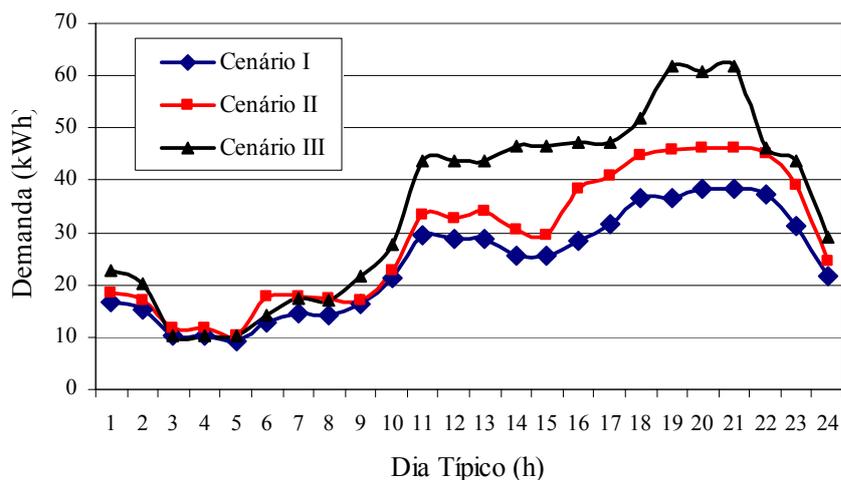


Figura 4.18: Cenários da estimativa com previsão de aumento

4.3 Configuração do Sistema de Potência

Na pesquisa feita para os componentes módulos fotovoltaicos e baterias encontrou-se vários tipos e com características diferentes. Para o embasamento da melhor opção com as características do sistema híbrido da vila de Sucuriçu, considerou-se as seguintes análises:

Para o módulo calculou-se o custo de geração, reais por quilowatts pico (R\$/kWp), de modelos e fabricantes diferentes disponíveis no mercado. Este custo foi baseado no custo de capital (unitário) e na análise das características do módulo nas condições de operação (800W/m² @

47°C). A escolha recaiu no modelo que apresentou menor custo de geração como mostra a Tabela 4.4. Portanto, o modelo escolhido foi da Isofoton I-110 que apresentou o custo de R\$ 18,18/Wp.

A escolha da bateria recaiu no modelo que apresenta menor custo de geração (R\$/Ah) e de custo durante a vida útil de quatro anos. Na Tabela 4.5 é apresentada esta análise, que considera o tamanho do banco de bateria que fornece aproximadamente a mesma capacidade, o número de ciclos a uma profundidade de descarga de 50% e a análise da vida útil de dois ciclos diários. Também, consideraram-se os custos de frete e despacho por se tratar de modelos comercializados no Brasil e modelos importados. Portanto, escolheu-se o modelo da Surrette S-460 que apresentou o custo de R\$ 38,63/Ah e, além de comparada com as baterias da Delphi, Moura e Exide (S12/230A), apresentar ciclos profundos.

Tabela 4.4: Análise financeira dos módulos fotovoltaicos

		Siemens Ultra 80-P	Isofoton I-100	Isofoton I-110	Kyocera FV CC KC120-1	Siemens SQ 80
Tipo de construção		monocristalino	monocristalino	monocristalino	policristalino	monocristalino
Potência (800 W/m², 47C)	<i>Wp</i>	59	80	88	88,5	58
Custo de capital	<i>R\$</i>	1.099,00	1.490,00	1.600,00	1.675,90	1.457,00
Custo / Wp	<i>R\$ / Wp</i>	18,63	18,63	18,18	18,94	25,12

Tabela 4.5: Análise financeira das baterias

		DELPHI DF 3000	MOURA 12 MC 220	EXIDE S12/230A	SURRETTE S-460	EXIDE		
						6-90A09	6-90A11	3-100A23
Tipo		automotiva	solar	solar	ciclo profundo	ciclo profundo	ciclo profundo	ciclo profundo
Tensão	<i>V</i>	12	12	12	6	12	12	6
Capacidade	<i>Ah @100h</i>	185	244	230	460	480	600	1400
Peso	<i>kg</i>	46	56,2	70	53	180	216	306
# módulos em série	<i>unid</i>	10	10	10	20	10	10	20
# arranjos (paralelo)	<i>unid</i>	8	6	6	3	3	3	1
Quantidade	<i>unid</i>	80	60	60	60	30	30	20
Peso Total	<i>kg</i>	3680	3372	4200	3180	5400	6480	6120
Área Total	<i>m²</i>	8,69	9,0	8,52	3,38	4,33	5,08	3,46
Capacidade Total	<i>Ah</i>	1480	1464	1380	1380	1440	1800	1400
# de ciclos *	<i>--</i>	500	650	1750	1690	2500	2500	2500
Vida útil	<i>Anos</i>	0,7	0,9	2,4	2,3	3,4	3,4	3,4
Valor Unitário	<i>R\$</i>	734,00	1.157,00	641,06	574,00	2.600,00	3.064,00	2.973,60
Valor do conjunto	<i>R\$</i>	58.720,00	69.420,00	38.463,74	34.440,00	78.000,00	91.920,00	59.472,00
Frete & Despacho	<i>R\$</i>	1.230,00	5.736,00	22.600,00	18.875,00	22.600,00	22.600,00	22.600,00
Custo Total	<i>R\$</i>	59.950,00	75.156,00	61.063,74	53.315,00	100.600,00	114.520,00	82.072,00
Custo / Ah	<i>R\$/Ah</i>	40,51	51,34	44,25	38,63	69,86	63,62	58,62
Custo em 4 anos	<i>R\$</i>	350.108,00	337.623,88	101.889,22	92.118,22	117.500,80	133.759,36	95.860,10

Seguindo a metodologia proposta neste trabalho para a definição do sistema de potência, escolheu-se os seguintes componentes:

- Turbina eólica Bergey EXCEL
- Módulo fotovoltaico Isofotón I-110, 110Wp,
- Bateria Surrette S-460, 460Ah, 6V
- Inversor SMA Sunny Island 4500, 4,5kW, 120VAC@60Hz
- Gerador diesel Heimer GEHM-40, 36kVA/29kW@60Hz
- Gerador diesel Heimer GEHM-53, 23kVA/18kW@60Hz

A seguir são apresentados na Tabela 4.6 as características e os custos dos componentes definidos para a configuração do sistema híbrido de energia para a vila de Sucuriju. Outras características importantes como: a curva de potência da turbina eólica, as curvas de corrente vs tensão do módulo fotovoltaico e de efeitos das variações da intensidade luminosa e da temperatura nos módulos, as curvas de consumo dos geradores diesel, as curvas de capacidade e de ciclos de falha da bateria, são apresentados nas Figuras a seguir.

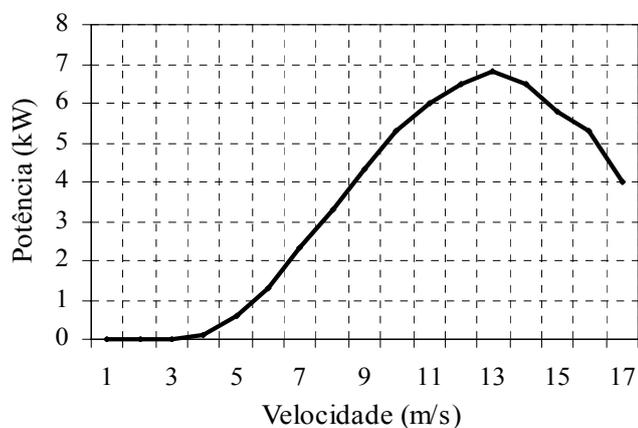


Figura 4.19: Curva de Potência da Turbina Eólica BWC Excel-R

Tabela 4.6: Características e custos dos componentes

Turbina Eólica		
Fabricante/Modelo	Bergey/BWC Excel-R	
Potência Nominal	7,5 kW	
Tensão	48 VCC	
Vida útil	25 anos	
Custos		
Custo de Capital (R\$)	37.810,00	
Custo da Torre (R\$)	34.520,00	
Custo de Instalação (%)	5% (capital + torre)	
Custo de Manutenção (R\$/kWh)	0,06	
Custo de Reposição (R\$/5 anos)	27.800,00	
Módulo Fotovoltaico		
Fabricante/Modelo	Isofotón/I-110	
Potência Nominal (1000 W/m ² @ 25'	0,11 kWp	
Corrente de Curto Circuito	6,76 A	
Tensão de Curto Circuito	21,6 V	
Corrente de Curto Aberto	6,32 A	
Tensão de Curto Aberto	17,4 V	
Vida útil	25 anos	
Custos		
Custo de Capital (R\$)	1.600,00	
Custo de Instalação (%)	10% Capital	
Custo de Manutenção (R\$/kWh)	-	
Custo de Reposição (R\$/5 anos)	1.760,00	
Geradores Diesel		
Fabricante/Modelo	Heimer/GEHM-40	Heimer/GEHC-53
Potência Nominal	29 kW @ 60Hz	38 kW @ 60Hz
Custos		
Custo de Capital (R\$)	41.113,00	43.768,00
Custo de Instalação (%)	10% do capital	10% do capital
Custo de Manutenção (R\$/kWh)	0.08	0.08
Custo de Reposição (R\$)	44.346,00	47.267,00
Bateria		
Fabricante/Modelo	Surrette/S-460	
Capacidade	460 Ah @ 100 h	
Tensão	6 V	
Custos		
Custo de Capital (R\$)	574,00	
Custo de Instalação (%)	10% do capital	
Custo de Manutenção (%/ano)	5% do capital	
Custo de Reposição (R\$/2 anos)	630,00	
Inversores de Potência		
Fabricante/Modelo	SMA/Sunny Island-5048	SMA/Sunny Boy-5049
Eficiência máxima	95%	95,6%
Custos		
Custo de Capital (R\$)	8.110,00	4.895,00
Custo de Instalação (%)	10% do capital	10% do capital
Custo de Manutenção (R\$/5anos)	3.036,00	1.867,00
Custo de Reposição (R\$/20anos)	8.921,00	5.385,00

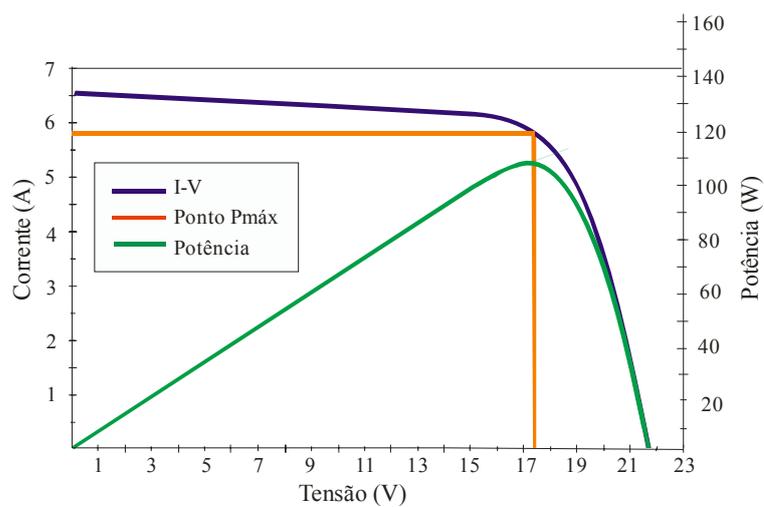


Figura 4.20: Curva de corrente vs tensão na condição padrão do módulo I-110

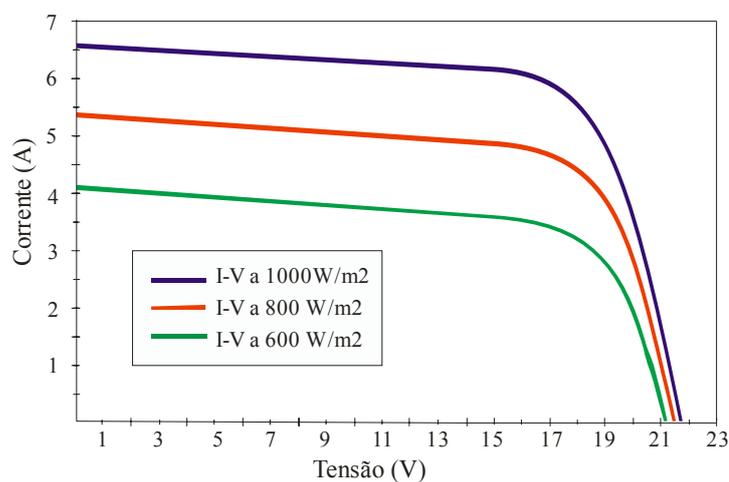


Figura 4.21: Efeito da variação da intensidade luminosa do módulo I-110

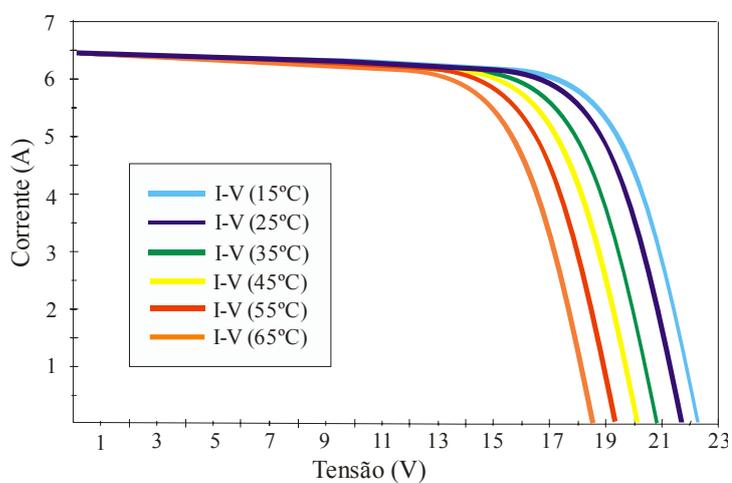


Figura 4.22: Efeito da variação da temperatura do módulo I-110

As curvas de consumo dos seguintes geradores diesel da Heimer, modelos GEHM-40, GEHC-53 e foram calculadas utilizando a fórmula característica para obter o consumo, dada pela Equação 4.1:

$$F = 0,08415P_n + 0,246P_{op} \quad 4.1$$

onde:

F – Consumo do combustível;

P_n – Potência nominal;

P_{op} – Potência de operação.

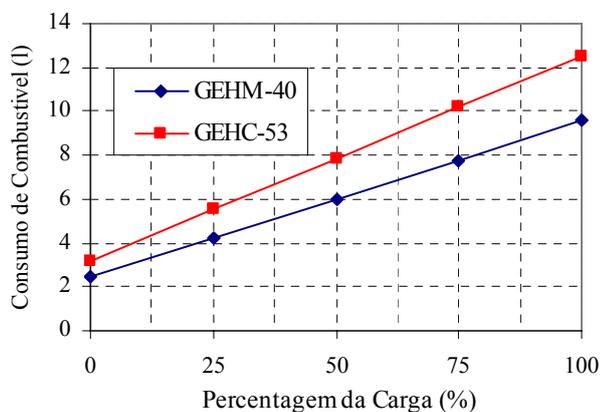


Figura 4.23: Curva de consumo dos geradores diesel

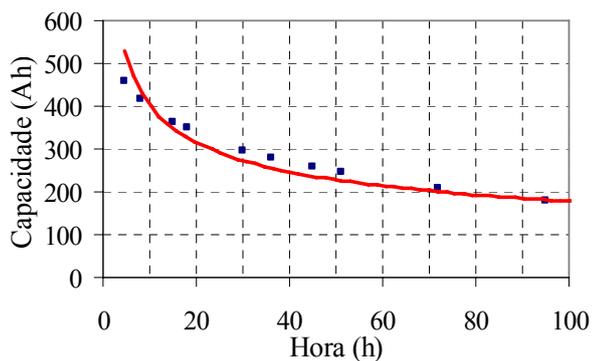


Figura 4.24: Curva de capacidade da bateria S-460

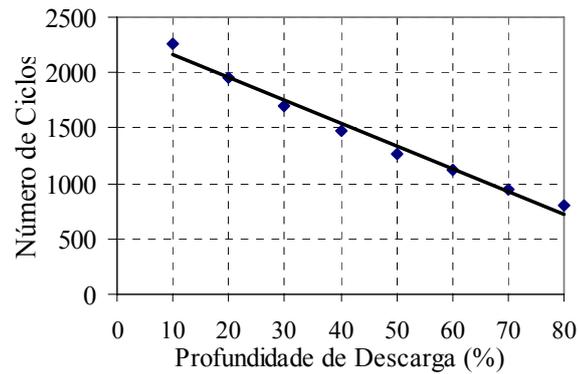


Figura 4.25: Curva de ciclos vs profundidade de descarga da bateria S-460

4.4 Definição dos Parâmetros para a Avaliação Econômica

Os parâmetros financeiros e os custos de combustível e de geração de energia utilizados para estimar a avaliação econômica são apresentados na Tabela 4.7. Considerou-se que o projeto foi financiado pelo Governo Federal, portanto, a fração do custo de pagamento inicial é zero.

Nesta avaliação econômica não foram utilizados os custos associados à importação visto que o projeto teve incentivos fiscais de importação, porém foram utilizados os custos de transporte dos equipamentos importados até o porto mais próximo da cidade de Macapá-Amapá.

Os tributos referentes à geração de energia, no caso: ICMS, PIS e COFINS são os vigentes nas concessionárias de energia. A avaliação econômica do projeto foi realizada durante um período de 20 anos, considerando a depreciação dos equipamentos nesse mesmo período.

Tabela 4.7: Custos e parâmetros financeiros

Custos		
Custo do combustível	<i>\$/l</i>	2.5
Custo de energia	<i>\$/kWh</i>	2.0
Financeiro		
Fração do pagamento inicial	%	0.0
Taxa de inflação geral	%	3.9
Taxa de desconto	%	10.0
Taxa de inflação do combustível	%	5.0
Periodo financeiro	<i>anos</i>	20.0
Tempo de depreciação dos equipamentos	<i>anos</i>	20.0
Tributos e Impostos		
ICMS	%	25.0
COFINS	%	5.4
PIS	%	1.2
IMPOSTO DE RENDA	%	4.0

Os valores das taxas de inflação do combustível, de desconto e de inflação geral foram estipulados e representam valores aproximados aos praticados no mercado financeiro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a escolha da configuração ideal do sistema híbrido projetado foram utilizadas três configurações básicas descritas a seguir:

Configuração básica I

- Eólica: 4 turbinas eólicas modelo BW Excel-R de 7,5 kW;
- Solar: 180 módulos fotovoltaicos modelo Isofoton 110 Wp e 140 do modelo BP 75 Wp (existentes na vila);
- Diesel: geradores diesel modelo Heimer 2 x 29kW - 29kW e 38kW;
- Baterias: 40, 60 e 80 do modelo Surrette S460 de 460Ah e 6V.

Configuração básica II

- Eólica: 5 turbinas eólicas modelo BW Excel-R de 7,5 kW;
- Solar: 90 módulos fotovoltaicos modelo Isofoton 110 Wp e 140 do modelo BP 75 Wp (existentes na vila);
- Diesel: geradores diesel modelo Heimer 2 x 29kW - 29kW e 38kW;
- Baterias: 40, 60 e 80 do modelo Surrette S460 de 460Ah e 6V.

Configuração básica III

- Eólica: 6 turbinas eólicas modelo BW Excel-R de 7,5 kW;
- Solar: 140 módulos fotovoltaicos do modelo BP 75 Wp (existentes na vila);
- Diesel: geradores diesel modelo Heimer 2 de 29kW - 29kW e 38kW;
- Baterias: 40, 60 e 80 do modelo Surrette S460 de 460Ah e 6V.

Dentro das configurações básicas manteve-se a contribuição da eólica e do solar constantes utilizando duas configurações dos geradores diesel e para cada um variam-se os arranjos dos bancos de baterias com capacidades diferentes. Destas três configurações básicas, portanto, definem-se dezoito configurações para o sistema. As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as potências (capacidades) instaladas para cada forma de geração.

Tabela 5.1: Potência instalada para a configuração básica I

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Eólica (kW)	30	30	30	30	30	30
Solar (kW)	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9
Diesel (kW)	58	58	58	67	67	67
Bateria (kWh)	110,4	165,6	220,8	110,4	165,6	220,8

Tabela 5.2: Potência instalada para a configuração básica II

	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Eólica (kW)	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
Solar (kW)	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9
Diesel (kW)	58	58	58	67	67	67
Bateria (kWh)	110,4	165,6	220,8	110,4	165,6	220,8

Tabela 5.3: Potência instalada para a configuração básica III

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Eólica (kW)	45	45	45	45	45	45
Solar (kW)	10	10	10	10	10	10
Diesel (kW)	58	58	58	67	67	67
Bateria (kWh)	110,4	165,6	220,8	110,4	165,6	220,8

Para realizar as simulações foram utilizados a Estratégia 5 definida na metodologia e os seguintes parâmetros:

- Nível mínimo de estado de carga do banco de baterias 50%;
- Tempo mínimo de operação do gerador diesel 4h;
- Efetuar *boost charge* até a carga total do banco de baterias (100%) a cada semana.

5.5 Resultados da Avaliação Técnica

Os resultados técnicos obtidos mostram que todas as configurações simuladas podem ser utilizadas por atenderem a demanda. Porém, existem parâmetros definidos na metodologia que devem ser considerados para a escolha da configuração ideal.

Os valores em percentagem da contribuição dos componentes apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, estão em relação à demanda total anual (energia total anual) atendida pelo sistema que é de 86,2MWh.

Tabela 5.4: Resultados técnicos da configuração básica I

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>Contribuição energética</i>						
Eólica (%)	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
Solar (%)	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5
Diesel (%)	60,7	56,3	53,3	60,8	56,2	53,6
Bateria (%)	31,7	40,3	45,1	31,7	40,3	45,0
<i>Parâmetros de avaliação técnica</i>						
Consumo Diesel (L)	21135,5	18583,0	17026,9	20805,5	18279,6	17017,7
Excesso de Energia (%)	9,5	7,1	5,8	9,5	7,1	5,9
Perda de Energia (%)	19,6	21,1	21,5	19,6	21,0	21,5
Vida útil da bateria (anos)	1,5	1,8	2,2	1,5	1,8	2,1

Tabela 5.5: Resultados técnicos da configuração básica II

	C7	C8	C9	C10	C11	C12
<i>Contribuição energética</i>						
Eólica (%)	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5
Solar (%)	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9
Diesel (%)	60,6	58,0	55,4	60,5	58,1	55,5
Bateria (%)	31,9	39,4	43,2	31,9	39,4	43,3
<i>Parâmetros de avaliação técnica</i>						
Consumo Diesel (L)	21052,7	19102,2	17673,4	20732,4	19011,6	17629,4
Excesso de Energia (%)	7,7	6,1	5,0	7,7	6,2	5,0
Perda de Energia (%)	18,4	19,9	20,3	18,4	19,9	20,3
Vida útil da bateria (anos)	1,5	1,8	2,2	1,5	1,8	2,2

Tabela 5.6: Resultados técnicos da configuração básica III

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
<i>Contribuição energética</i>						
Eólica (%)	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2
Solar (%)	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
Diesel (%)	63,8	61,4	60,4	63,8	61,5	60,7
Bateria (%)	32,1	38,9	42,2	32,2	38,9	42,2
<i>Parâmetros de avaliação técnica</i>						
Consumo Diesel (L)	22097,2	20112,7	19206,1	21782,5	19960,2	19199,2
Excesso de Energia (%)	6,8	5,4	4,7	6,8	5,4	4,9
Perda de Energia (%)	19,0	20,4	20,9	19,0	20,3	21,0
Vida útil da bateria (anos)	1,4	1,8	2,1	1,4	1,8	2,1

Esses resultados mostram que no geral, com o aumento da contribuição eólica, e conseqüente diminuição da contribuição solar, houve um ligeiro aumento do consumo de combustível, porém ocorreu uma melhoria da eficiência do uso de energia (diminuição do excesso de energia). Também, verificou-se que aumentando o banco de baterias aumentaram as perdas no sistema, devido á resistência interna da bateria, embora houve um aumento não considerável da vida útil das baterias. Todavia, deve-se salientar que o modelo para cálculo da vida útil da bateria do Hybrid2

seja muito conservador e, acredita-se que na prática a vida útil do banco de baterias seja superior ao estipulado nesta análise. Entretanto, foram utilizados estes dados na avaliação econômica o que corresponde a uma análise pessimista da vida útil das baterias.

Outro dado importante é que utilizando a configuração com dois geradores diesel com potências diferentes houve uma ligeira diminuição do consumo de óleo diesel, embora não seja considerável esta diminuição.

Alguns dados como: a geração do renovável (eólico e solar); a geração do diesel, bem como, o consumo e o número de horas de operação dos geradores diesel; as cargas atendidas (primária e opcional) do sistema e a vida útil do banco de baterias foram utilizadas no subsidio de informações para obtenção dos resultados da avaliação econômica que se seguem.

5.6 Resultados da Avaliação Econômica

Os resultados dos custos representativos do sistema como: custo do combustível, custo de operação e manutenção e custo de reposição de peças, bem como, os parâmetros de avaliação econômica das configurações simuladas estão apresentados nas seguintes Tabelas:

Tabela 5.7: Resultados da avaliação econômica da configuração I

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>Custos anualizado do sistema (1000 x R\$)</i>						
Combustível	78.93	69.40	63.59	77.70	68.27	63.55
O&M	18.28	18.99	19.73	18.22	18.97	19.72
Reposição	49.14	37.08	44.66	47.06	36.93	44.52
<i>Parâmetros de avaliação econômica</i>						
Custo de Energia (R\$/kWh)	1.63	1.46	1.52	1.60	1.45	1.51
TIR (%)	7.16	12.44	12.24	7.34	12.56	12.25
Periodo de Retorno (anos)	23.06	17.13	19.63	21.32	16.84	19.54
VPL dos custos (1000 x R\$)	1,342.36	1,164.36	1,185.36	1,313.54	1,153.11	1,183.71

Tabela 5.8: Resultados da avaliação econômica da configuração II

	C7	C8	C9	C10	C11	C12
<i>Custos anualizado do sistema (1000 x R\$)</i>						
Combustível	78.62	71.34	66.00	77.43	71.00	65.84
O&M	18.96	19.68	20.42	18.94	19.67	20.41
Reposição	45.72	33.66	41.24	43.64	33.51	41.24
<i>Parâmetros de avaliação econômica</i>						
Custo de Energia (R\$/kWh)	1.64	1.47	1.53	1.60	1.47	1.53
TIR (%)	7.35	13.13	12.95	7.52	13.17	12.96
Periodo de Retorno (anos)	21.05	15.74	18.05	19.52	15.62	17.97
VPL dos custos (1000 x R\$)	1,318.48	1,159.70	1,184.77	1,290.30	1,155.28	1,183.20

Tabela 5.9: Resultados da avaliação econômica da configuração III

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
<i>Custos anualizado do sistema (1000 x R\$)</i>						
Combustível	82.52	75.11	71.73	81.35	74.54	71.70
O&M	19.66	20.38	21.13	19.64	20.36	21.11
Reposição	51.26	39.37	46.92	51.26	39.20	46.92
<i>Parâmetros de avaliação econômica</i>						
Custo de Energia (R\$/kWh)	1.77	1.60	1.67	1.75	1.59	1.67
TIR (%)	6.87	13.62	13.31	7.07	13.70	13.31
Período de Retorno (anos)	27.47	18.16	22.06	26.46	17.81	21.94
VPL dos custos (1000 x R\$)	1,406.88	1,248.41	1,290.00	1,396.59	1,241.93	1,289.60

O aumento do consumo de combustível na análise técnica na configuração básica III e com o aumento do banco de baterias provocou um aumento no custo do combustível. Também, verifica-se que os custos de operação e manutenção aumentam com o aumento do banco de baterias, dos geradores diesel e das turbinas eólicas. Isso ocorre, por se tratarem de componentes que possuem custos operacionais e, que praticamente não há manutenção do módulo fotovoltaico. Já os custos de reposição não variaram linearmente nas configurações visto que depende dos custos dos equipamentos configurados. Por isso, que os custos de reposição anualizado da configuração básica II são menores que os custos nas outras configurações.

O custo de geração de energia nas configurações se encontra entre R\$ 1,45/kWh e R\$ 1,77/kWh. O custo do sistema dado pelo VPL apresenta os menores valores na configuração básica II nas configurações com uma capacidade do banco de baterias maior e, que usa dois geradores de potências diferentes.

Entretanto, as configurações C8 e C11 apresentam no geral os melhores parâmetros econômicos sendo o custo de geração, em ambos, de R\$ 1,47/kWh e com retornos do investimento em, aproximadamente, 15 anos e, com uma taxa interna de retorno, aproximadamente, de 13% ao ano. Isso mostra que ambos os sistemas configurados, C8 e C11, podem ser utilizados na vila de Sucuriçu. É de salientar que, se o TIR for maior que a taxa de desconto então, significa que o projeto é viável.

Todavia, para definir a configuração ideal final foram realizadas novas avaliações técnico-econômicas para as duas configurações C8 e C11 verificando o comportamento dos parâmetros econômicos para as seguintes análises:

- Análise 1 (A1): simular as configurações com a estimativa de aumento de demanda prevista;
- Análise 2 (A2): simular as configurações com estimativa de demanda atual e 20% de aumento da velocidade do vento;
- Análise 3 (A3): simular as configurações com a estimativa de aumento de demanda prevista e 20% de aumento de velocidade do vento;

Os resultados são apresentados na Tabela 5.10 a seguir:

Tabela 5.10: Resultados das análises para as configurações C8 e C11

	C8			C11		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
<i>Custos anualizados do sistema (1000 x R\$)</i>						
Combustível	218.49	49.97	184.45	222.85	50.03	189.56
O&M	20.25	22.05	22.58	20.20	22.04	22.55
Reposição	42.18	33.09	42.02	42.38	33.23	39.80
<i>Parâmetros de avaliação econômica</i>						
Custo de Energia (R\$/kWh)	1.45	1.20	1.28	1.47	1.19	1.28
TIR (%)	25.56	17.97	31.55	25.00	12.33	16.21
Período de Retorno (anos)	7.13	10.20	5.46	7.34	14.57	10.31
VPL dos custos (1000 x R\$)	2,489.86	992.96	2,218.50	2,528.14	985.71	2,225.05

Os resultados acima mostram que a configuração C8 apresenta, no geral, as melhores condições financeiras, para as diferentes análises realizadas. Esta comparação apresenta dados significativos, quando aumentou-se a demanda do sistema, gerando maior renda para o sistema e, caso a velocidade do vento na vila for 20% superior ao estimado. Com isso, o sistema definido foi a configuração C8 que apresenta a seguinte configuração para o sistema:

- 5 turbinas eólicas modelo BW Excel-R de 7,5 kW;
- 90 módulos fotovoltaicos modelo Isofoton 110Wp e 140 do modelo BP 75Wp (existentes na vila);
- 2 geradores diesel modelo Heimer de 29kW;
- 60 baterias do modelo Surrette S460 de 460Ah e 6V.

No entanto, outras análises paramétricas foram realizadas utilizando a configuração C8 para as seguintes situações:

- S1: 100% de subsídio do óleo diesel por parte da Prefeitura do Amapá;

- S2: 50% de subsidio do óleo diesel por parte da Prefeitura do Amapá;
- S3: se houver erro na estimativa da vida útil do banco de baterias e, sendo a estimativa da vida útil de 4 anos;
- S4: 50% de financiamento pelo Governo 50% do empreendedor;
- S5: 100% de financiamento do empreendedor;
- S6: 50% do financiamento pelo empreendedor e 50% por uma instituição bancária com juros de 4% ao ano;
- S7: sem os impostos (ICMS, PIS, COFINS e IR);

Os resultados das avaliações econômicas da configuração final definida utilizando as situações acima, estão apresentados na Tabela 5.11. Os valores indicados são apresentados em percentagem e, estão em função dos valores obtidos para a configuração inicial C8, enquanto que, os valores do TIR estão em relação ao percentual do retorno do investimento para a situação. Daí que, os valores entre parênteses representam percentagens acima do resultado alcançado para a configuração final (C8).

Tabela 5.11: Resultados das análises paramétricas

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Custo de Energia (%)	49	18	(3)	(54)	(96)	(84)	(25)
TIR (%)	25	18	12	0	0	0	16
Periodo de Retorno (%)	57	37	9	(27)	(40)	(209)	36
VPL dos custos (%)	52	23	4	(44)	(82)	(62)	(16)

Este resultado mostra que o subsidio do combustível por parte da Prefeitura de 100 e 50% deve diminuir o custo de geração de energia, cerca de 49 e 18% do custo já previsto para o quilowatt hora, respectivamente, ou seja, R\$ 0,72/kWh. Enquanto que as outras situações deverão aumentar o custo da geração de energia do sistema. Nota-se que é importante esta análise do custo da geração de energia para a sustentabilidade do sistema. Posto isso, conclui-se que os custos com o combustível representam cerca de 49% do custo de geração de energia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude da diversificação da matriz energética Brasileira e da universalização do uso de eletricidade, principalmente, nas regiões ribeirinhas Amazônicas o trabalho aqui proposto, fruto de um árduo empenho, tende a desmistificar esse novo paradigma.

O uso de sistemas híbridos para atender regiões de difícil acesso e de baixa demanda requer uma análise cuidadosa e detalhada dos vários parâmetros envolventes no dimensionamento destes sistemas. Geralmente, essas regiões são atendidas de forma deficiente por pequenos grupos de geradores diesel provocando uma total dependência do combustível fóssil.

Outro fator importante a se considerar, nesta análise para implantação dos sistemas híbridos, é a atual situação em que se encontra o custo do petróleo, atingindo o valor máximo da sua história que é de US\$ 100 por barril. Também, a crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas do globo incentiva o desenvolvimento e a disseminação de técnicas competitivas de geração de energia para reduzir os impactos causados pelo uso do combustível fóssil.

Portanto, conclui-se que com as avaliações técnicas e econômicas realizadas para a configuração do sistema híbrido eólico/solar/diesel a ser implantado na vila de Sucuriju-AP, culminou numa importante metodologia de projeto, relativamente simples, para viabilizar a implantação destes sistemas. Este sistema projetado teve como premissa o uso maior dos recursos naturais existentes no local e, conseqüente diminuição da dependência do óleo diesel.

Nesta dissertação, as dificuldades encontradas foram imenso, devidas principalmente, às incertezas para obtenção de dados confiáveis que representassem as características do local. Todavia, como resultado desse desenvolvimento, obteve-se uma importante ferramenta de avaliação econômica que se baseia nas informações obtidas da avaliação técnica do desempenho em períodos de longo prazo em regime quase estático e, numa análise detalhada e acurada do custo de capital, dos custos de operação, dos impostos e do tempo de vida financeiro estimado.

Visando o desenvolvimento de trabalhos futuros baseados no que foi realizado, são apresentadas a seguir algumas sugestões consideradas importantes e necessárias:

- Estudar formas para diminuir os custos de instalação de sistemas de aquisição de dados do local, condição importante para a caracterização dos recursos;

- Desenvolver um modelo de cálculo da vida útil das baterias para as condições do sistema;
- Desenvolver um sistema de controle baseado na estratégia e nos parâmetros utilizados, para controlar o sistema real;
- Efetuar análises dos dados coletados com o monitoramento do sistema e estimar os erros inerentes a esse processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (ANNEE), página eletrônica <http://www.aneel.gov.br> acessado em 31 maio de 2007.
- [2]. REIS L. B., MORALES L. L, 1994, *Geração Descentralizada da Energia Elétrica: Considerações para o Planejamento Energético Sustentável na Área Rural*; In: II Congresso de Planejamento Energético; Campinas-SP; Brasil; pp. 311-318.
- [3]. BRASIL, Ministério de Minas e Energias (MME), página eletrônica <http://www.mme.gov.br> acessado em 28 de julho de 2007.
- [4]. YU C. M, *Seqüestro florestal de carbono no Brasil – Dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas*. São Paulo, Editora Annablume 2004, 278p.
- [5]. BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (ANNEE). Banco de Informações da geração, pagina eletrônica <http://www.aneel.gov.br> acessado 1 de novembro de 2007.
- [6]. IPCC, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, fevereiro de 2007, 18 p.
- [7]. PEREIRA, A. L., *Sistemas Híbridos de Energia – Tecnologia e Projetos em Sistemas Isolados no Mundo*, CBEE, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003, p.10.
- [8]. CENTRO Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), página eletrônica <http://www.eolica.com.br> acessado no dia 18 de outubro de 2007.
- [9]. BARBOSA, C. F. O. *Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica*. Belém, 2006. (Mestrado – Universidade Federal do Pará/UFPA)
- [10]. COSTA, A. C. A. *Metodologia de Análise e Projeto de Sistemas Híbridos Eólico-Solar-Bateria para a Geração de Energia Elétrica*. Recife, 2001. 100 p (Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco/UFPE)
- [11]. BLASQUES, L. C. M., TUPIASSÚ, A. F. & PINHO, J. T. *Análise econômica de tecnologias para a eletrificação de uma pequena comunidade isolada da Amazônia*. In: SNPTEE-V, 18, Curitiba, outubro 2005, 8p.
- [12]. BARBOSA, C. F. O. & PINHO, J. T. *Análise da viabilidade de implantação de sistemas híbridos de energia de pequeno porte em localidades isoladas da região norte através da abordagem difusa*. VII SBA/ II IEEE LARS. São Luís, setembro de 2005. 7p.
- [13]. KALDELLIS, J.K. & KAVADIAS, K.A. *Otimum sizing of stand-alone wind-diesel system on the basis of life cycle cost analysis*. Conferência Mundial de Energia Eólica, Grécia, 2005.

- [14]. NELSON, D. B., NEHRIR, M. H. & WANG, C. *Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems*. Electrical & Computer Engineering Department, Montana State University, Bozeman, MT 59717, USA2005; 16 p.
- [15]. BARLEY, C. D., LEW, D. J. & FLOWERS L. T. *Sizing wind/photovoltaic hybrids for households in Inner Mongolia*. National Renewable Energy Laboratory – NREL, USA, pp. 211-219.
- [16]. ELHADIDY, M. A. & SHAAHID, S. M. *Descentralized/stand-alone hybrid wind-diesel power systems to meet residential loads of hot coastal regions*. ELSEVIER-Energy Conversion and Management, 46, pp 2501-2513, novembro de 2004.
- [17]. MANOLAKOS, D., PAPADAKIS, G., PAPANTONIS, D. & KYRITSIS, S. *A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas. Case study: the Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece.* Pergamon, Energy, 26. pp 679-704, julho de 1998.
- [18]. MOHAMED, E. S. & PAPADAKIS, G. *Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics*. ELSEVIER - Desalination 164, pp 87-97, maio de 2003
- [19]. KATTI, P. K. & KHEDKAR, M. K. *Alternative energy facilities based on site matching and generation unit sizing for remote area power supply*. ELSEVIER – Renewable Energy, pp 2-17, janeiro de 2006.
- [20]. NFAH, E. M., NGUNDAM, J. M. & TCHINDA, R. *Modelling of solar/diesel/battery hybrid power systems for far-north Cameroon*. ELSEVIER – Renewable Energy, 32, pp 832-844, março de 2006.
- [21]. CRESESB, Tutorial: Energia Solar e Energia Eólica, cópia de página eletrônica <http://www.cresesb.cepel.br> acessado em 31 de julho de 2006.
- [22]. PEREIRA, J. C., *MOTORES E GERADORES – Princípios de funcionamento instalação, operação e manutenção de grupo geradores diesel*, cópia de página eletrônica <http://www.joseclaudio.eng.br> acessado em 15 de junho de 2007.
- [23]. LINDEN, D., *Chapter 1: Principles of Operation*. Handbook of Batteries. Digital Engineering Library, 2004, 18 p.
- [24]. SALKIND A. J., CANNONE A. G. & TRUMBURE F. A. *Chapter 23: Lead-Acid Batteries*. Handbook of Batteries. Digital Engineering Library, 2004, 88 p.
- [25]. CARCONE J. A. *Chapter 28: Portable Sealed Nickel Cadmium Batteries*. Handbook of Batteries. Digital Engineering Library, 2004, 36 p.
- [26]. LINDEN, D. & REDDY T. B. *Chapter 22: Secondary Batteries - Introduction*. Handbook of Batteries. Digital Engineering Library, 2004, 16 p.
- [27]. ROHATGI, J. S. & VAUGHN N, *Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power*, Alternative Energy Institute, West Texas A & M University, Canyon, Texas 1994.

- [28]. GUIMARÃES, R. A. *Análise de Estimativas de Velocidade de Vento utilizando Técnicas de MCP*. 2006. (Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco/UFPE)
- [29]. CASTRO, R. M. G. *Energia Renovável e Geração Descentralizada: Introdução à Energia Eólica*. Lisboa, 3ª Edição, março de 2007, 86 p.
- [30]. RABEL, A. “Active Collectors and their applications: Chapter 3”, New York, Oxford 1985. 503 p.
- [31]. TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil. Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco/UFPE, Recife, 2000.
- [32]. DOS SANTOS, J. C. V. & KLEINKAUF, W. *A methodology for modelling synthetic daily sequences of hourly power demand for villages and small towns, based on stochastic processes*. Pergamon – Solar Energy vol 66, pp.459-467, maio de 1999.
- [33]. MANWELL, J. F., ROGERS, A., HAYMAN, G. & AVELAR, C. T. *Hybrid2- A Hybrid System Simulation Model - Theory Manual*. Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts, 235p., Massachusetts, 1998.
- [34]. MCGOWAN, J. G., MANWELL, J. F. & AVELAR C. *Hybrid wind/pv/diesel hybrid systems modeling and South American applications* National Renewable Energy Laboratory – NREL, USA, p11.
- [35]. BRUNI, A. L. *A Administração de Custos, Preços e Lucros. Capítulo 6: Tributos, Custos e Preços*. São Paulo. Editora ATLAS, 2006 pp 209-224.
- [36]. DAVIS, M. M., AQUILANO N. J. & CHASE, R. B. *Fundamentos da Administração da Produção. Capítulo 3 - Análise Financeira em Administração da Produção* Porto Alegre. Editora Bookman, 3ª Edição, 2001, pp 94-114,.
- [37]. PEREIRA, A. L., PINHO J. T. & FRANÇA, K. *Avaliação Técnica e Projeto de Fornecimento de Eletricidade e Água Potável na vila de Sucuriju*. Abril 2003
- [38]. PEREIRA, A. L. & ANDRADE, H. C. L. *Projeto Sucuriju: sistema híbrido eólico/solar/diesel/bateria para a região Amazônica*. In: ANAIS - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 4. Recife, agosto de 2006, p.179.
- [39]. BLASQUES, L., *Estudo da Potencialidade de Energia Eólica no Litoral do Estado do Pará*. Belém, 2000. (Mestrado - Universidade Federal do Pará/UFPA), p 130.
- [40]. MENDONÇA, D. B. A. & MARIZ, D. L., *Análise Socioeconômica da Vila de Sucuriju*. Recife, 2005. (Relatório - Universidade Federal de Pernambuco/UFPE), p 38.