JULIO ROMEL MARTINEZ BOLAÑOS

**CONTROLADOR SUPERVISÓRIO INTELIGENTE PARA SISTEMAS
HÍBRIDOS EÓLICO-DIESEL-BATERIA DE PEQUENO PORTE**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**São Paulo
2007**

JULIO ROMEL MARTINEZ BOLAÑOS

**CONTROLADOR SUPERVISÓRIO INTELIGENTE PARA SISTEMAS
HÍBRIDOS EÓLICO-DIESEL-BATERIA DE PEQUENO PORTE**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Sistemas de Potência**

**Orientadora:
Profa. Dra. Eliane Aparecida Faria
Amaral Fadigas**

**São Paulo
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

Martinez Bolanos, Julio Romel

**Controlador supervisorío inteligente para sistemas híbridos
eólico-diesel-bateria de pequeno porte / J.R. Martinez Bolanos. --
São Paulo, 2007.**

120 p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Auto-
mação Elétricas.**

**1.Sistemas híbridos 2.Energia eólica 3.Inteligência artificial
4.Fuzzy I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Depar-
tamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.**

DEDICATÓRIA

- Em especial aos meus queridos pais, Pablo Martínez e Mariana Bolaños, pelo incentivo, compreensão, amor e carinho, de quem tenho muitas saudades.
- Aos meus irmãos Pablo Aníbal, Maria Elena e César António, assim como a Raquel Elizabeth e Blanca Narvaéz pelo apoio depositado em toda minha vida.
- Aos meus tios Vicente, Teresita, Laura e Rosa Amada, que sempre acreditaram em mim.
- À Maria Benedita pelo apoio constante nos momentos difíceis desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora doutora Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas, pela paciência, estímulo e sábia orientação ao longo destes dois anos, sem a qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Aos colegas do GEPEA-NER, Núcleo de Energias Renováveis do Departamento de Energia e Automação Elétricas da Universidade de São Paulo, que auxiliaram na realização deste trabalho, e em especial ao pesquisador PHD Alexandre de Lemos Pereira, cuja contribuição foi essencial para meu aprendizado nas diversas áreas que englobam o tema de Sistemas Híbridos de Energia.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro disponibilizado para a realização desta dissertação de Mestrado.

À todos os professores do Departamento de Energia e Automação Elétricas da USP que, de uma maneira ou outra, contribuíram para a realização e o sucesso deste trabalho.

A todos vocês, os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e simulação de um Controlador Supervisório Inteligente para sistemas híbridos de energia de pequeno porte. O controlador utiliza técnicas de inteligência artificial, baseadas em redes neurais artificiais e lógica neuro-fuzzy, para realizar previsões de velocidade de vento e demanda de curto prazo, permitindo a tomada de decisões otimizadas de despacho para o sistema híbrido de energia. Os principais objetivos do controlador são: o atendimento à carga, a maximização na utilização da fonte renovável eólica e a redução da participação do gerador diesel, assim como são tomados procedimentos adequados para preservar a vida útil da bateria. Um modelo computacional foi criado para calcular o balanço energético de qualquer sistema híbrido a partir de séries de dados medidos de demanda e velocidade de vento. A avaliação do desempenho do controlador foi realizada comparando-se os resultados obtidos com dois outros algoritmos comumente usados para controle de sistemas híbridos. Também foi feita uma análise econômica simplificada usando a figura de mérito do custo de ciclo de vida (CCV) para destacar as vantagens do novo controlador supervisório inteligente para sistemas híbridos.

Palavras chave: sistemas híbridos, controlador supervisório, estratégias de operação, energia eólica.

ABSTRACT

This work presents the development and simulation results of an Intelligent Supervisory Controller for hybrid power systems. The controller uses artificial intelligence techniques, based on artificial neural networks and neuro-fuzzy logic, to forecast both wind power and load, and to take optimal dispatch decisions for hybrid power systems. The main controller objectives are: supply the load, prioritize wind power and minimize diesel contribution while following appropriate procedures to preserve batteries life. A simulation tool has been created to compute the energy balance of any hybrid system using measured load and wind speed time series. The performance analysis was carried out by comparing the simulation results against two other common hybrid systems' control algorithms. Also, a simplified life cycle cost analysis (CCV) has been executed in order to point out the economic advantages of the new intelligent supervisory controller for hybrid power systems.

Keywords: hybrid power systems, supervisory controller, operation strategies, wind energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes de um sistema híbrido.	5
Figura 2.2 Turbina eólica de eixo horizontal tipo hélice e vertical tipo DARRIEUS	7
Figura 2.3 Principais componentes de uma turbina eólica	8
Figura 2.4 Pannel Solar	10
Figura 2.5 Gerador Diesel.	11
Figura 2.6 Tipos de cargas.....	13
Figura 2.7 Foto de um volante de inércia no vácuo.	16
Figura 2.8 Sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento	20
Figura 2.9 Configuração híbrida tipo serie.....	24
Figura 2.10 Configuração híbrida tipo paralelo.....	25
Figura 2.11 Configuração híbrida tipo paralelo com unidade conversora CA/CC/CA	26
Figura 3.1 Neurônio artificial com função de ativação	29
Figura 3.2 O modelo MLP.....	30
Figura 3.3 Comparação entre um sistema convencional e fuzzy	36
Figura 3.4 Operações entre conjuntos fuzzy: (a) conjuntos A e B, (b) união, (c) intersecção (d) complemento	37
Figura 3.5 Exemplos de funções de pertinência.	38
Figura 3.6 Diagrama de blocos de um controlador fuzzy.....	39
Figura 4.1 Funções do controlador supervisorío	46
Figura 4.2 Perfil do vento ao longo de sua trajetória pelas pás de uma turbina	48
Figura 4.3 Cilindro de vento fictício	48
Figura 4.4 Curva de potência típica de uma turbina eólica	50
Figura 4.5 Curva de consumo típica de combustível com ajuste linear	57
Figura 4.6 Profundidade de descarga vs. ciclos.....	60
Figura 4.7 Processo de recarga usando o método duplo nível de tensão.	62
Figura 4.8 Diagrama esquemático da bateria	64
Figura 4.9 Modelo KiBaM da bateria.....	65
Figura 4.10 Curva de vida útil de uma bateria	72
Figura 5.1 Comparação entre acoplamento CC e CA	82

Figura 5.2 Fluxograma da Estratégia de Controle	83
Figura 5.3 Módulo Neuro-Fuzzy	90
Figura 5.4 Previsão de carga.	93
Figura 5.5 Características dos ventos	94
Figura 5.6 Previsão de velocidade de vento – Sucurijú-Amapá.....	96
Figura 5.7 Previsão de velocidade de vento – Finley-USA.....	96
Figura 5.8 Configuração do sistema híbrido proposto.	97
Figura 5.9 Gráfico comparativo dos resultados simulados – Local 1.	102
Figura 5.10 Gráfico comparativo dos resultados simulados – Local 2.	103
Figura 5.11 Custos envolvidos em porcentagem do custo total. Local -1	107
Figura 5.12 Custos envolvidos em porcentagem do custo total. Local -2.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Tecnologias de armazenamento de energia.....	17
Tabela 2.2- Períodos de armazenamento típicos para cada tecnologia	17
Tabela 2.3 Sistemas híbridos no Brasil	19
Tabela 4.1 Cumprimentos de rugosidade para diferentes terrenos.....	53
Tabela 4.2 - Valores de Sobrecarga Típicos.....	56
Tabela 5.1 Parâmetros Fuzzy	89
Tabela 5.2 Característica da carga e parâmetros meteorológicos.....	91
Tabela 5.3 Parâmetros de avaliação-Previsão de carga.....	93
Tabela 5.4 Características dos ventos.....	94
Tabela 5.5 Parâmetros de avaliação-Previsão de vento.....	95
Tabela 5.6 Resultados da simulação – Local 1.....	100
Tabela 5.7 Resultados da simulação – Local 2.....	100
Tabela 5.8 Custos de Investimento-O&M - Substituição.....	105
Tabela 5.9 Análise econômica - Local 1	106
Tabela 5.10 Análise econômica - Local 2	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARIMA	Modelo Autoregressivo Integrado de Médias Móveis.
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
CCV	Custo do Ciclo de Vida.
CSB	Controlador Supervisório Básico.
CSI	Controlador Supervisório Inteligente.
DOD	Profundidade de descarga.
GLD	Gerenciamento pelo lado da demanda.
KiBaM	Kinetic Battery Model.
MLP	Modelo Perceptron Multi-Camadas.
O&M	Operação e manutenção
PCU	Unidade Condicionadora de Potência
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RNA	Rede Neural Artificial
SOC	Estado de carga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS ASSOCIADOS A UM SISTEMA HÍBRIDO....	4
2.1	Componentes básicos de um sistema híbrido de energia.	4
2.1.1	Turbina eólica.....	6
2.1.2	Painéis Fotovoltaicos.....	9
2.1.3	Gerador Diesel.....	11
2.1.4	Carga Elétrica.....	12
2.1.5	Armazenamento.....	14
2.1.6	Conversores.....	17
2.2	Tipos de sistemas híbridos de energia.....	18
2.2.1	Sistema Eólico-Fotovoltaico com armazenamento.....	19
2.2.2	Sistema Eólico-Diesel com/ou sem armazenamento.....	20
2.2.3	Sistema Fotovoltaico-Diesel com/ou sem armazenamento.....	21
2.2.4	Sistema Eólico-Fotovoltaico-Diesel com/ou sem armazenamento.....	22
2.3	Configurações de sistemas híbridos de energia eólico-diesel-bateria.....	22
3	TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	27
3.1	Conceitos básicos associados a Redes Neurais Artificiais.....	28
3.1.1	Características das Redes Neurais Artificiais.....	28
3.1.2	O neurônio básico.....	29
3.1.3	O modelo Perceptron de Multi-Camadas.....	29
3.1.4	Etapa de treinamento.....	31
3.1.5	Etapa de processamento.....	33
3.2	Conceitos básicos sobre lógica fuzzy.....	33
3.2.1	Implicação lógica e regras de inferência.....	34
3.2.2	Conjuntos Fuzzy.....	35
3.2.3	Operações entre conjuntos fuzzy.....	36
3.2.4	Funções de Pertinência.....	37
3.2.5	Blocos Funcionais.....	38
3.2.6	Tipos e características de controladores fuzzy.....	40
3.2.7	Vantagens e desvantagens dos sistemas fuzzy.....	42

4	MODELAGEM DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-DIESEL-BATERIA.....	44
4.1	Tipos de modelagem.....	44
4.1.1	Modelos logísticos.....	44
4.1.2	Modelos dinâmicos.....	45
4.2	Turbina eólica.....	47
4.2.1	Descrição do modelo.....	47
4.2.2	Parâmetros de simulação.....	51
4.3	Gerador Diesel AC.....	54
4.3.1	Descrição do modelo.....	54
4.3.2	Parâmetros de simulação.....	57
4.4	Bateria.....	59
4.4.1	Descrição do modelo.....	59
4.4.2	Parâmetros de simulação.....	73
4.5	Carga dissipadora.....	74
4.5.1	Descrição do modelo.....	74
4.5.2	Parâmetros de simulação.....	75
5	SIMULAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	76
5.1	Estratégias de Controle.....	77
5.2	Sistemas de controle.....	79
5.3	Desenvolvimento do algoritmo de controle do sistema supervisorio proposto.....	83
5.3.1	Módulo de Previsão.....	84
5.3.2	Módulo Neuro-fuzzy.....	85
5.3.3	Módulo Lógico.....	90
5.4	Estudo de Caso.....	91
5.4.1	Caracterização da carga.....	91
5.4.2	Caracterização dos ventos.....	94
5.4.3	Configuração do sistema.....	97
5.4.4	Dimensionamento do sistema.....	98
5.4.5	Apresentação e análise de resultados.....	100
6	Conclusões.....	109
7	Referências Bibliográficas.....	111
	ANEXO A - Fluxograma da Estratégia de Controle “Sem Supervisorio”.....	118
	ANEXO B – Fluxograma da Estratégia de Controle com “Supervisorio Básico”.....	119

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas híbridos de energia com grande contribuição de energia eólica, a quantidade de energia disponível pode variar bastante em função da incidência aleatória do vento na(s) turbina(s) eólica(s). Sistemas elétricos de pequeno porte geralmente apresentam variações relativamente grandes de demanda. Um controlador supervisor para sistemas híbridos de energia de pequeno porte, deve ter a capacidade de lidar com as variações acentuadas da demanda e a característica não-despachável da energia eólica, para obter um bom funcionamento do sistema. Para este tipo de problema, onde a previsão de carga não é muito precisa e a fonte principal de energia não é totalmente despachável, a utilização de um algoritmo de supervisão e controle com redes neurais (RNA) deve melhorar o desempenho do sistema híbrido de energia.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e simulação em MATLAB/SIMULINK de um controlador supervisor para sistemas híbridos eólico-diesel-bateria de pequeno porte utilizando a técnica de inteligência artificial conhecida como neuro-fuzzy, técnica que aproveita a capacidade de aprendizagem das redes neurais com a flexibilidade no manuseio de informações imprecisas da lógica fuzzy. O algoritmo do controlador permite maximizar a utilização da fonte renovável eólica em um sistema híbrido de energia, reduzindo ao máximo a participação do gerador diesel, e, ao mesmo tempo, otimizando o rendimento e prolongando a vida útil do banco de baterias.

Para desenvolver o algoritmo de controle e testá-lo através de simulações, os principais componentes do sistema híbrido (turbina eólica, gerador diesel, baterias e cargas) foram modelados com suas características de funcionamento e de despacho. Este trabalho utiliza o modelo KiBaM (Kinetic Battery Model) melhorado, capaz de estimar com precisão o estado de carga da bateria e conseqüentemente, a vida útil da mesma; o que é fundamental para reduzir uma das maiores incertezas na avaliação econômica deste tipo de projeto.

Alem disso, o modelo utiliza a técnica de inteligência artificial conhecida como neuro-fuzzy, para realizar previsões de carga de pequeno porte e velocidade do vento durante poucas horas à frente, com o intuito de aperfeiçoar o desempenho do controlador. Como contribuição técnica adicional ao trabalho está o desenvolvimento de um controlador com programação modular. Este controlador tem a capacidade de se adaptar a qualquer sistema híbrido (eólico-diesel-bateria) de pequeno porte, pois não é um controlador desenvolvido para um projeto específico. Isto é de grande importância, pois trabalhos publicados nesta área, desenvolvem sistemas híbridos específicos perdendo a capacidade de generalização para outros sistemas de diferentes potências.

A dissertação é composta pelos seguintes capítulos:

Capítulo1: Introdução

Capítulo 2: Características e conceitos associados a um sistema híbrido -são apresentados brevemente alguns dos mais conhecidos tipos de sistemas híbridos de energia e se dedica um estudo mais detalhado para um tipo de sistema comumente utilizado e objeto deste trabalho: eólico-diesel-bateria.

Capítulo 3: Técnicas de inteligência artificial – neste capítulo são apresentados os conceitos básicos sobre a utilização e modelagem das Redes Neurais Artificiais na previsão de Séries Temporais, assim como a utilização da teoria de conjuntos fuzzy no projeto de controladores avançados. Estes conceitos são importantes, pois a estratégia de controle do supervisor inteligente proposto, baseia-se na utilização destas ferramentas no auxílio à otimização e maximização da vida útil dos componentes do sistema híbrido.

Capítulo 4: Modelagem dos componentes de um sistema híbrido eólico-diesel-bateria - o objetivo geral deste capítulo consiste na modelagem e caracterização do comportamento dos componentes envolvidos no sistema híbrido de energia proposto: turbina eólica, gerador diesel, bateria e cargas dissipadoras.

Capítulo 5: Simulação e apresentação de resultados – neste capítulo é apresentado o desenvolvimento e a modelagem do sistema de controle supervisorio inteligente utilizando-se as ferramentas computacionais conhecidas como “adaptive neuro-fuzzy inference system”, que auxiliam na construção e treinamento de sistemas inteligentes.

Primeiramente é apresentado o estado da arte das estratégias de controle de sistemas híbridos. A seguir, os modelos dos componentes do sistema híbrido e o controle supervisorio inteligente são carregados no ambiente do MATLAB/SIMULINK e várias simulações com dados reais de demanda e velocidades de vento são realizadas para avaliar o desempenho do controlador supervisorio proposto. Finalmente os resultados são apresentados.

Capítulo 6: Conclusão – mostra as conclusões deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS ASSOCIADOS A UM SISTEMA HÍBRIDO.

Um sistema híbrido de energia é qualquer sistema elétrico composto por mais de uma fonte de geração. São sistemas projetados para fornecer energia elétrica à cargas e redes independentes dos grandes e centralizados sistemas interligados de geração [1].

Geralmente, um sistema híbrido conta com a utilização de um grupo gerador diesel para garantir a regularidade e estabilidade no fornecimento de energia elétrica. Com o intuito de reduzir ao máximo o consumo de óleo diesel e preservar o meio ambiente, estes sistemas freqüentemente utilizam um ou vários tipos de fontes renováveis. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso [2].

Neste capítulo, são apresentados brevemente alguns dos mais conhecidos tipos de sistemas híbridos de energia e se dedica um estudo mais detalhado para um tipo de sistema comumente utilizado: eólico-diesel-bateria.

2.1 Componentes básicos de um sistema híbrido de energia.

Como se mencionou anteriormente os sistemas híbridos de energia são aqueles que, desconectados da rede elétrica convencional, são compostos por várias fontes de geração tanto convencionais como renováveis [3]. A potência destes sistemas pode atingir valores na ordem de vários megawatts (para atender sistemas relativamente grandes, isolados da rede elétrica), até aplicações individuais pontuais, como prédios ou lares, na ordem de uns poucos kilowatts [1].

Em geral, os sistemas híbridos podem conter: geradores convencionais de *corrente alternada* (CA), geradores convencionais de *corrente contínua* (CC), um sistema de distribuição CA ou CC, cargas, fontes renováveis (turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, etc), sistemas de armazenamento de energia, inversores estáticos ou

rotativos, cargas dissipadoras e algum tipo de controlador supervisorio que maximize a eficiência na entrega da energia para o usuário [2].

Os grandes sistemas, normalmente acima de 100 kW, tipicamente consistem de um barramento CA, onde são conectados os geradores diesel, as fontes renováveis, cargas e ocasionalmente algum tipo de armazenamento de energia. Sistemas de médio porte, com potências na faixa de 10 kW a 100 kW, utilizam combinações de componentes CA - CC, e o uso de armazenamento de energia é mais comum. Os componentes CC podem incluir geradores diesel, fontes renováveis e armazenamento. Sistemas com potências inferiores a 5 kW (considerados de pequeno porte) têm sido utilizados por longo tempo em áreas remotas, especialmente como fontes de energia em estações repetidoras de telecomunicações e outras aplicações de baixa potência. São basicamente sistemas CC [1].

A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático com os vários componentes que podem ser ligados dentro de um sistema híbrido.

Figura 2.1 Componentes de um sistema híbrido.
(Adaptado de [1])

A seguir se faz uma breve descrição de cada um deles. Maiores detalhes sobre os componentes dos *sistemas eólico-diesel-bateria* serão apresentados em capítulos posteriores.

2.1.1 Turbina eólica

Uma turbina eólica ou aerogerador é um equipamento cuja função é converter energia eólica em energia elétrica. Este tipo de gerador tem se popularizado rapidamente devido ao fato da energia eólica ser renovável.

As turbinas eólicas podem ser classificadas em turbinas de eixo vertical ou horizontal. Turbinas eólicas do eixo vertical não são muito usadas na geração de energia elétrica, pois o aproveitamento do vento é menor. As mais comuns são três: SAVONIUS, DARRIEUS E MOLINETE [4].

Turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais difundidas e utilizadas no mundo todo na geração de energia elétrica, tanto em sistemas isolados, híbridos ou conectados à rede, devido a sua relativa alta velocidade de rotação assim como a seu menor custo construtivo [4]; conseqüentemente no restante do texto, se utilizará simplesmente o termo Turbina Eólica para referir-se às turbinas eólicas de eixo horizontal. As turbinas eólicas, para conversão direta em eletricidade, mais comuns são as do tipo hélice de 2 ou 3 pás. As turbinas eólicas de uma pá são mais ruidosas por causa das velocidades tangenciais altas e requerem um contrapeso para o balanceamento de massa mas não conseguem eliminar a vibração excessiva devido ao desbalanceamento aerodinâmico. As de duas pás necessitam de um mecanismo especial no cubo do rotor para aliviar esforços criados pelo gradiente vertical de velocidade de vento e tem velocidades rotacionais relativamente altas. As de três pás, no entanto, são mais silenciosas devido às velocidades mais baixas e apresentam construção do cubo do rotor simplificada pois os esforços mecânicos são menores. Para bombeamento de água utiliza-se os cataventos multipás que desenvolvem alto torque e baixa rotação [4]. A Figura 2.2 apresenta uma turbina eólica de pequeno porte tipo hélice de três pás e um modelo Darrieus de eixo vertical.

As partes básicas que compõem uma turbina eólica de pequeno porte são: pás, cubo, sistema de transmissão mecânica, gerador elétrico, sistema de orientação e torre. A Figura 2.3 apresenta o desenho esquemático de uma turbina eólica de pequeno porte.

Figura 2.2 Turbina eólica de eixo horizontal tipo hélice e vertical tipo DARRIEUS

(Fonte: <http://www.windturbine.net/products.htm>;

<http://content.answers.com/main/content/wp/en/thumb/5/5f/180px-Darrieus-windmill.jpg>)

Pás: As pás são os componentes responsáveis pela captura da energia cinética do vento. Embora algumas turbinas eólicas modernas tenham pás de rotor feitas de madeira composta, grande parte dessas peças é fabricada em fibra de vidro, material leve e resistente, geralmente composto de resinas de poliéster e fibras de vidro.

Cubo: É o elemento responsável pelo acoplamento, rígido ou flexível, das pás ao eixo principal da turbina eólica. Pode ter mecanismos de ajuste do ângulo de passo e de proteção contra sobrevelocidade.

Sistema de transmissão mecânica: A maioria das turbinas eólicas de pequeno porte modernas, com geradores síncronos, utiliza transmissão direta do rotor/cubo ao gerador através de um simples eixo. Mas turbinas eólicas que empregam geradores assíncronos necessitam alguma forma de multiplicação de velocidade, ex. caixas multiplicadoras com engrenagens, para aproximar a rotação do gerador da frequência típica da rede elétrica [5].

Gerador elétrico: É o componente que tem a função de converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica. Essa conversão pode ser feita utilizando geradores de corrente contínua, geradores síncronos, ou geradores de indução.

Sistema de orientação: É o sistema responsável pelo ajuste contínuo do alinhamento da turbina eólica com a direção do vento. Sua função é manter o rotor perpendicular ao vento incidente. Em turbinas eólicas pequenas é geralmente um controle passivo realizado por um leme ou pelo próprio rotor, no caso de turbinas eólicas orientadas a favor do vento (downwind).

Torre: A torre é o componente projetado para suportar a turbina e demais componentes responsáveis pelo funcionamento do sistema.

Figura 2.3 Principais componentes de uma turbina eólica
(Fonte: http://www.windturbine.net/features_large.htm adaptado)

Toda turbina possui sua “curva de potência característica” que define primeiramente o quanto de energia será produzida em determinadas condições de vento. Particularmente cada turbina pode operar numa faixa de velocidade específica, mas a conversão será mais eficiente a uma certa relação de velocidades, que depende do número de pás e das características físicas das mesmas [6].

Em sistemas híbridos é mais comum o uso de turbinas eólicas com potências entre 10 e 500 kW, com diferentes tipos de geradores a elas acoplados dependendo da aplicação. O gerador CC até a década de 80 foi extensivamente utilizado, devido à extrema facilidade de controlar a sua velocidade. Atualmente continua a ser utilizado, porém, limitado a turbinas de baixa capacidade, particularmente onde a energia elétrica pode ser localmente utilizada na forma CC. O gerador CC convencional, é auto-excitado através do uso de enrolamentos shunt ou série que

fornece tensão CC para produzir o campo magnético. Atualmente, tem se projetado gerador CC utilizando ímãs permanentes para eliminar a dependência no fornecimento de corrente ao enrolamento de campo e desta forma o uso de comutador. Porém, o seu uso é limitado a máquinas de pequeno porte, abaixo de 100 kW [5].

O gerador síncrono é o mais utilizado na geração de energia elétrica. Funciona com velocidade constante associada à frequência constante. Assim sendo, não é o mais adequado para trabalhar com operação em velocidade variável, típica de plantas eólicas, em função do comportamento dos ventos. Requer corrente CC para excitação de campo e conseqüentemente escovas de carbono e anéis deslizantes no rotor. Porém, esta exigência pode ser eliminada usando rotor de relutância, porém limitado a aplicações de baixa potência. Quando conectado à rede de energia da concessionária, apresenta a vantagem de não requerer suprimento de potência reativa da mesma [5].

A máquina de indução, particularmente o motor de indução, é o mais utilizado mundialmente devido a sua construção robusta, facilidade de manutenção e baixo custo. Tem a vantagem com relação aos demais tipos de geradores de não necessitar de excitação CC de campo, pois o seu funcionamento é baseado em indução eletromagnética. Necessita ser excitado com corrente CA. O gerador pode ser auto-excitado ou receber excitação externa. Pelas suas inúmeras vantagens, o gerador de indução encontra hoje aplicações tanto em turbinas eólicas de grande como pequeno porte [5].

As turbinas eólicas modernas são seguras e confiáveis, fruto de uma tecnologia comprovada. Os produtos existentes no mercado tem excelente qualidade, vida útil de mais de 20 anos, e preços competitivos.

2.1.2 Painéis Fotovoltaicos

Os Painéis Fotovoltaicos são dispositivos utilizados para converter a energia da luz do Sol diretamente em energia elétrica através do chamado “Efeito Fotovoltaico”. O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de

uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão [7].

Os painéis solares fotovoltaicos são formados por um arranjo série-paralelo destas células fotovoltaicas. A Figura 2.4 mostra o aspecto físico de um painel solar.

Figura 2.4 Painel Solar

(Fonte <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/SolarpanelBp.JPG>)

O arranjo série-paralelo, é feito para se alcançar uma certa tensão e potência de saída. Pelo fato de apresentar espessura muito reduzida, é necessário proteger as células contra esforços mecânicos e fatores ambientais. O lado frontal à radiação solar incidente é coberto, normalmente, por vidro temperado, ou plástico, ambos transparentes, ou ainda, resina de silicone, os quais são bastante resistentes, promovendo rigidez mecânica. A região posterior à radiação solar incidente é coberta por camadas de matérias tais como: folha de alumínio e plástico Tedlar. Estas camadas fornecem proteção para a parte de trás dos módulos. Finalmente uma estrutura metálica auto-portante permite uma montagem rápida dos módulos. Utiliza-se geralmente, estrutura de alumínio anodizado, sendo que os buracos de fixação são previstos pelos fabricantes [8].

Silício cristalino e arsenito de gálio são os materiais mais freqüentemente utilizados na produção de células fotovoltaicas. Os cristais de arsenito de gálio são produzidos especialmente para usos fotovoltaicos, mas os cristais de silício tornam-se uma opção mais econômica, até porque são também produzidos com vista à sua utilização na indústria da microeletrônica. O silício policristalino tem uma porcentagem de conversão menor, mas comporta custos reduzidos [7].

O custo das células solares é, ainda hoje, um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos de outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais [8].

Painéis fotovoltaicos são inerentemente geradores CC, conseqüentemente eles operam geralmente junto à fonte de armazenamento numa barra CC separada. Contudo, estes podem ser acoplados com inversores e, por conseguinte, se converter em geradores CA [1].

2.1.3 Gerador Diesel

Um gerador diesel é normalmente um motor diesel diretamente acoplado a um gerador síncrono. A frequência da energia CA gerada é mantida pelo regulador de velocidade do motor. O regulador funciona ajustando o fluxo de combustível que é fornecido à máquina primária, para manter essencialmente a velocidade do motor e do gerador constantes. A frequência da rede está diretamente relacionada à velocidade do gerador e, é mantida, conseqüentemente no nível desejado [1]. A Figura 2.5 mostra um gerador diesel típico.

Figura 2.5 Gerador Diesel.

(Fonte: <http://www.diveo.net.br/Portals/Website/images/infrastructure/datacenter/image004.jpg>)

O gerador diesel fornece à rede dois tipos de potência: ativa e reativa. A potência ativa é a potência que é realmente consumida, como por exemplo, por um

aquecedor. A potência reativa é utilizada para gerar os campos magnéticos necessários para o funcionamento dos motores elétricos; esta não é consumida realmente, mas as correntes associadas à ela aumentam as perdas do sistema. A potência ativa gerada é controlada pela potência mecânica aplicada ao eixo do gerador enquanto que a potência reativa é controlada pelo regulador de tensão do gerador [1].

Um gerador diesel pode ser usado para atender diretamente cargas CC. Em termos práticos, um gerador diesel CC poderia ser um gerador diesel CA com um retificador inserido na saída de corrente do gerador.

Existem várias restrições impostas à operação de um gerador diesel tais como: a potência mínima gerada, o tempo mínimo de funcionamento do motor diesel e o número de ligações e paradas. Estas restrições têm a ver com problemas críticos de manutenção da máquina primária, que sem dúvida alguma, afetam à economia operacional do sistema híbrido como um todo. Conseqüentemente as restrições na operação dos geradores diesel devem ser levadas em conta na estratégia de despacho a ser implementada no controlador inteligente [9].

2.1.4 Carga Elétrica

Uma carga elétrica é um dispositivo que converte energia elétrica em outro tipo de energia diretamente aproveitável pelo homem. As cargas CA podem classificar-se primariamente em dois tipos: resistivas e indutivas. As cargas resistivas podem incluir, por exemplo, lâmpadas incandescentes, aquecedores, chuveiros, etc. Aparelhos como motores elétricos são tanto cargas resistivas como indutivas. Como se mencionou anteriormente, eles são a causa principal da necessidade de gerar potência reativa. As cargas CC podem ser unicamente resistivas. Contudo, as cargas CC podem ter alguma componente indutiva, mas esta só causa transitórios de tensão e corrente durante as mudanças na operação do sistema [1].

A Figura 2.6 apresenta algumas das cargas resistivas e indutivas mais comumente utilizadas.

Figura 2.6 Tipos de cargas.

Muitos sistemas híbridos de pequeno, médio ou grande porte, utilizam algum tipo de gerenciamento de demanda (GLD). Entende-se por GLD, um conjunto de técnicas que visam melhorias na eficiência operacional do uso da energia elétrica, a partir do controle da quantidade e do período de energia utilizada. Este conjunto de atividades modifica a curva de carga, reduzindo a demanda nos períodos críticos do sistema. Normalmente o controle do GLD está baseado no desligamento das cargas não essenciais para o usuário durante os períodos de máxima demanda [10]. Sob este contexto, as cargas elétricas podem ser classificadas em: cargas primárias, cargas adiáveis e cargas opcionais.

Cargas primárias: são aquelas que devem ser atendidas no instante em que o usuário necessitar.

Cargas adiáveis: são aquelas que devem ser atendidas em algum momento, dentro de um intervalo de tempo, mas existe alguma flexibilidade a respeito de quando elas devem ser supridas. A vantagem da sua utilização é que elas permitem aproveitar melhor parte da energia gerada pelas fontes renováveis, que de outra forma, deveria ser dissipada. Isto acontece quando a potência requerida pelas cargas primárias é menor que a energia gerada pelas fontes renováveis. Sendo assim, dado que o atendimento das cargas adiáveis pode ser postergado, é possível ligar estas cargas quando existir um excesso de energia renovável. Caso não exista suficiente energia renovável durante todo o intervalo de tempo previsto, eventualmente as cargas adiáveis são consideradas cargas primárias e podem ser atendidas pelo gerador diesel. As cargas adiáveis são também conhecidas ou categorizadas como cargas secundárias [1].

Cargas adiáveis são, por exemplo, máquinas de fazer gelo, aquecedores de água ou bombas de água para enchimento de cisternas. Cargas que devem ser regularmente ligadas, porém, sem um período definido.

Cargas opcionais: em termos práticos são similares as cargas adiáveis, com a diferença de que seu atendimento não é obrigatório. Uma carga opcional típica é normalmente suprida por outro tipo de energia (como combustíveis fósseis, por exemplo), mas também pode usar o excesso de eletricidade do sistema híbrido quando existir a disponibilidade. Entende-se por excesso de energia aquele que não é utilizado nem pelas cargas primárias, nem pelas cargas adiáveis nem pelo sistema de armazenamento [1].

Uma carga opcional é útil, pois, utilizando o excesso de energia elétrica gerado, evita que o mesmo seja dissipado e, reduz o consumo de outra fonte de energia. Uma carga opcional, por exemplo, pode ser um aquecedor de água que trabalhe tanto com eletricidade como com gás.

Cargas Dissipadoras: são dispositivos que absorvem qualquer excesso de energia gerado que não pode ser utilizado pelas cargas primárias, secundárias, opcionais ou pelo sistema de armazenamento. Um componente pouco utilizado em sistemas isolados convencionais, mas que pode ser muito requerido em sistemas híbridos. Sua função principal é proteger a rede de um excesso de energia gerada durante os períodos de grande contribuição das fontes renováveis e relativa baixa carga. Se a energia não fosse dissipada, problemas de estabilidade na rede poderiam se apresentar [1].

2.1.5 Armazenamento

Os sistemas de armazenamento têm a função de converter energia transitória, como eletricidade, em formas estáveis e armazenáveis. São também capazes de fazerem a conversão inversa para garantir a oferta nos momentos de baixa ou nenhuma produção de energia pelas fontes componentes do sistema híbrido [11].

O uso de armazenamento é muito comum em sistemas híbridos de pequeno e médio porte, sendo menos freqüente em sistemas de grande porte. Geralmente em sistemas CA de grande porte, o armazenamento é utilizado para diminuir os transitórios de corrente que aparecem com as variações súbitas de carga durante a operação do sistema. Pelo contrário, em sistemas de pequeno e médio porte, o sistema de armazenamento é concebido para promover a economia de combustível, pois permite dispensar a utilização dos geradores diesel, completando a oferta em momentos de produção de energia renovável insuficiente [1].

O sistema de armazenamento usual, baseado em baterias eletroquímicas, é a parte crítica dos sistemas eólicos e fotovoltaicos. Além de elevar muito o custo, é o componente de maior incidência de manutenção periódica e corretiva. São amplamente utilizadas em sistemas de pequeno e médio porte, tornando-se onerosas em sistemas maiores. Na busca de tornarem competitivos os sistemas eólicos e solares autônomos de maior porte, além de pesquisas de melhoramento das baterias eletroquímicas, existem algumas propostas de novos sistemas de armazenamento que garantam baixo custo e degradação energética. Entre elas destacam-se [4] [11]:

- **Sistemas de armazenamento baseados no hidrogênio:** a obtenção é feita por eletrólise e a recuperação por células combustível. O rendimento global é alto. O armazenamento do hidrogênio garante boa densidade energética e baixíssima degradação, podendo compensar variações sazonais com custo aceitável. Mas, o armazenamento de hidrogênio é o ponto crítico por questões de segurança, apesar dos muitos avanços.
- **Sistemas de armazenamento baseados em ar-comprimado:** apesar de terem densidade energética de armazenamento menor que os de hidrogênio, se mostram mais simples e seguros.
- **Sistemas de bombeamento hidráulico:** durante os períodos de excesso de energia renovável, água é armazenada em tanques elevados com a utilização de bombas, assim a energia elétrica estará armazenada em forma de energia potencial gravitacional. A energia potencial armazenada na água é transformada em energia mecânica, ao passar por uma turbina hidráulica conectada a um gerador elétrico.

- **Sistemas de armazenamento por “volantes de inércia”:** um volante de inércia é basicamente uma roda pesada acoplada ao eixo de um gerador elétrico que gira em altas velocidades, armazenando energia cinética, que pode ser utilizada na geração de energia elétrica. Durante o tempo em que se tem energia renovável em excesso, esta é utilizada para fazer o volante girar em alta velocidade; quando a energia elétrica cessa, o movimento é revertido para a geração própria de energia. Um volante é um meio mais eficiente de armazenamento de energia do que as baterias tradicionais. Girando no vácuo, a velocidades entre 20.000 – 100.000 RPM, ele perde apenas entre 5 e 10 por cento da energia que recebe, conseguindo reverter todo o restante para uso. Uma bateria de última geração perde cerca de 20% de sua energia em seus processos químicos internos. Contudo, seu uso está limitado a curtos tempos de armazenamento (na faixa de minutos até uma hora) [12] [13]. A Figura 2.7 apresenta um volante de inércia no vácuo.

Figura 2.7 Foto de um volante de inércia no vácuo.

(Fonte: <http://live.pege.org/2006-hannover/flywheel-storage.htm>)

A Tabela 2.1 mostra uma comparação entre as principais características associadas aos sistemas de armazenamento mais comumente utilizados em sistemas híbridos e a Tabela 2.2 apresenta o intervalo de tempo, em que cada tecnologia pode operar.

Tabela 2.1- Tecnologias de armazenamento de energia [12]

Tecnologia	Rendimento (%)	Densidade Energética (Wh/kg)	Custo		Vida útil (anos)
			(Euro/kW)*	(Euro/kWh)*	
Baterias	60-80	35-60	550-3700	115-570	5-15
Ar comprimido	50-70	100-120	4600-5700	12-60	30
Volante de inércia	80-95	40-350	850-3700	460-810	30
Armazenamento Hidráulico	65-70	----	4600-5700	6-18	50

* Valores de 2004

Tabela 2.2- Períodos de armazenamento típicos para cada tecnologia [12]

Período de armazenamento	Tecnologia	Status
Muito curto prazo (< 1 minuto)	Bateria NiCad	Comercial
	Bateria Pb-ácido	Comercial
	Volante de inércia	Quase Comercial
Curto prazo (5-60 minutos)	Bateria NiCad	Comercial
	Bateria Pb-ácido	Comercial
	Volante de inércia	Experimental
Médio prazo (2-12 horas)	Bateria NiCad	Comercial
	Hidrogênio	Experimental
Longo prazo (1-3 dias)	Bateria NiCad	Comercial
	Bombeamento de água	Experimental
	Hidrogênio	Experimental

2.1.6 Conversores

Para que o sistema de armazenamento e demais componentes CC possam ser ligados à cargas e redes CA, é indispensável utilizar um conversor que faça o acoplamento necessário. Existem basicamente dois tipos de conversores comumente utilizados em sistemas híbridos: retificadores e inversores. Alguns equipamentos incorporam as duas funções [1].

O inversor é o responsável pela conversão de corrente contínua em corrente alternada e é também conhecido genericamente como conversor CC - CA. Este também é mencionado na literatura como PCU – *Power Conditioning Unit* (Unidade Condicionadora de Potência). O inversor nesta tarefa deve dissipar o mínimo de potência, evitando as perdas e deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos. Muitas vezes utilizam-se filtros para minimizar o conteúdo de harmônicos [8].

Existem basicamente dois tipos de inversores: inversores estáticos (estado sólido) e eletromecânicos (rotativos). Apenas o primeiro é chamado habitualmente de inversor.

Os inversores estáticos usam um mecanismo de chaveamento para alterar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa. Transistores de potência ou retificadores controlados de silício (SCRs) são tipicamente usados como chaves semicondutoras. Existe um rápido desenvolvimento nesta área, contudo os inversores estáticos são ainda relativamente caros e complexos [8]. Existem dois tipos de inversores estáticos: os comutados pela rede (comutação natural) e os auto-comutados (comutação forçada). No primeiro, o processo de inversão é controlado pela tensão da rede elétrica; no auto-comutado, o controle é realizado pelo próprio inversor.

O mais antigo tipo de conversor é o eletromecânico. Consiste de uma máquina síncrona CA diretamente acoplada à uma máquina CC. As duas máquinas podem atuar como motor ou gerador. Quando uma máquina é motor a outra é gerador e vice-versa. São menos eficientes do que os inversores eletrônicos para a mesma potência de saída e as partes móveis necessitam de manutenção periódica, contudo o sistema é mais simples e robusto, fornecendo uma forma de onda praticamente sem componentes harmônicos [1].

2.2 Tipos de sistemas híbridos de energia

Dependendo das fontes de geração que são utilizadas dentro de um sistema, podem se ter vários tipos de sistemas híbridos, cada um deles de complexidade variável dependendo da aplicação em questão e das restrições específicas de cada projeto. A escolha de um tipo específico dependerá de fatores como: disponibilidade de fontes alternativas de energia, investimento inicial, custo de manutenção, dificuldade de obtenção do combustível, poluição do ar e sonora, área ocupada pelo sistema, curva de carga, etc.

No Brasil existe um pequeno número de sistemas em funcionamento (ver Tabela 2.3) apesar da grande quantidade de locais isolados sem energia elétrica e do

grande potencial eólico e solar do país. Uma lista dos principais sistemas híbridos instalados no mundo pode ser encontrada em [14]. Não existe, entretanto, no Brasil ou no mundo, um registro de acompanhamento do funcionamento das instalações. Tais dados constituiriam a mais importante retro-alimentação para o aperfeiçoamento dos métodos e procedimentos de dimensionamento dos sistemas.

Tabela 2.3 Sistemas híbridos no Brasil

LOCAL	DATA INSTALAÇÃO	APLICAÇÃO	CAPACIDADE INSTALADA			
			Eólica	Solar	Bateria	Diesel
Recife, Pernambuco	Agosto 1995	Pesquisa	1,5 kW	360 Wp	180 Ah	----
Ilha Fernando de Noronha	Maio 1997	Telecomunicações	6 kW	4,2 kWp	806,4 Ah	----
Ilha de Marajó, Pará	Julho 1997	Eletrificação Rural	4x6 kW	10,2 kWp	1000 Ah	----
Marapanim, Pará	Julho 1999	Eletrificação Rural	2x10 kW	1,9 kWp	----	30 kVA
Ilha de Marajó, Pará	Julho 1999	Telecomunicações	1x10/1x15 kW	----	----	2x7,5 kW
Ilha Fernando de Noronha	Junho 2000	Eletrificação de Vila	225 kW	5 kWp	----	3x910 kW

Fonte: <http://www.eolica.com.br/projetos.html>, Dezembro 2006

Os tipos mais utilizados de sistemas híbridos são [15]:

- Sistema Eólico-Fotovoltaico com armazenamento.
- Sistema Eólico-Diesel com/ou sem armazenamento.
- Sistema Fotovoltaico-Diesel com/ou sem armazenamento.
- Sistema Eólico-Fotovoltaico-Diesel com/ou sem armazenamento.

2.2.1 Sistema Eólico-Fotovoltaico com armazenamento

Este sistema é composto por duas fontes primárias distintas: eólica e solar, conseqüentemente os principais componentes deste sistema são a turbina eólica e os painéis fotovoltaicos. Devido ao fato que as duas fontes de energia são de caráter intermitente e uma fonte não necessariamente complementa a eventual insuficiência da outra, a utilização de um sistema de armazenamento torna-se quase obrigatória. O mecanismo mais comum de armazenamento consiste de baterias recarregáveis, mais é possível utilizar outros sistemas como os mencionados na seção 2.1.5. A Figura 2.8 apresenta o diagrama esquemático de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento.

Figura 2.8 Sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento
(Adaptado de [3])

Quando um banco de baterias é utilizado, é comum incorporar uma unidade de controle dentro do sistema, assim podem-se evitar sobrecargas e descargas profundas que afetam a vida útil do banco. É também possível que algumas ou todas as cargas a serem atendidas pelo sistema sejam CA. Se este for o caso, um PCU é adicionado para converter a energia gerada pelas fontes CC e armazenamento, para CA [16]. Para potências abaixo dos 10 kW, geralmente utilizam-se turbinas eólicas CC.

Este tipo de sistema híbrido torna-se viável em sistemas de pequeno porte. Em 1996 testaram-se 11 diferentes tipos de sistemas híbridos para alimentar sistemas de telecomunicações típicas do Brasil, sendo que a mais econômica resultou ser uma das que combinava apenas as componentes eólica e fotovoltaica (com banco de baterias) [15].

2.2.2 Sistema Eólico-Diesel com/ou sem armazenamento

São os sistemas híbridos de energia mais utilizados atualmente no mundo. Os principais componentes destes sistemas são a turbina eólica e o gerador diesel. Outros componentes como sistemas de armazenamento de energia, dispositivos para dissipação de energia e cargas controladas podem ser incluídos, a fim de obter o aumento da eficiência e confiabilidade do sistema. São considerados os sistemas híbridos comerciais mais antigos. Um dos primeiros sistemas híbridos instalados no mundo é do tipo eólico-diesel implementado no Novo México, EUA, em 1977 [15].

No Brasil, o primeiro e maior sistema híbrido diesel-eólico foi implantado em julho de 1992 pelo Grupo de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco, na ilha de Fernando de Noronha, com uma turbina eólica de 75kW. Em 2000, este sistema foi remodelado e passou a funcionar com uma nova turbina eólica de 225kW e geradores diesel de 910kW [2].

Os sistemas híbridos eólico-diesel não precisam necessariamente do sistema de armazenamento, pois a maioria das aplicações são de corrente alternada e quase a totalidade das turbinas eólicas fornecem este tipo de corrente. Porém, para evitar as flutuações na potência fornecida pela turbina eólica (devido às flutuações da velocidade do vento) o gerador diesel necessita trabalhar continuamente, dificultando sua manutenção e tornando o sistema de controle mais complexo [9] [17].

Armazenando-se a energia em banco de baterias ou qualquer outro tipo de tecnologia, o sistema é capaz de absorver o excedente de energia quando a disponibilidade eólica é elevada e complementar ou suprir a energia produzida pelo aerogerador quando a disponibilidade eólica não é suficiente. O resultado é um controle adequado da tensão e da frequência elétrica e uma redução considerável do combustível consumido e da frequência dos ciclos liga-desliga, inclusive para tempos de armazenamento pequenos. O armazenamento permite ao motor diesel trabalhar nas faixas de sua curva característica onde é mais eficiente [18] [19].

Felizmente, a maturidade da tecnologia renovável e a expansão dos sistemas com o aproveitamento da energia eólica, favorecem a diminuição dos preços (e custos) dos componentes e novos (e econômicos) controles poderão permitir a eliminação ou uma maior redução do tamanho do banco de baterias. Em qualquer caso, a economia de combustível e a redução no custo de instalação, são prioritárias [20].

2.2.3 Sistema Fotovoltaico-Diesel com/ou sem armazenamento

Composto por duas fontes primárias: fotovoltaica e diesel, em princípio podem ser considerados iguais aos sistemas eólico-diesel, com a diferença de que a turbina eólica é substituída pelos painéis fotovoltaicos. Contudo, ainda sua utilização é

menos comum, devido aos altos custos dos painéis fotovoltaicos se comparados com as turbinas eólicas. Geralmente são utilizados em zonas onde a velocidade do vento não é adequada para um aproveitamento eficiente das turbinas eólicas [15].

Como no caso do sistema Eólico-Fotovoltaico, a utilização de um inversor é praticamente indispensável, já que geralmente as cargas a serem atendidas são CA. Sistemas de armazenamento de energia, unidade de controle, dispositivos para dissipação de energia e cargas controladas freqüentemente são incluídos, pois aumentam a eficiência e confiabilidade do sistema, assim como também minimizam a participação do motor diesel, facilitando a implementação do sistema de controle.

2.2.4 Sistema Eólico-Fotovoltaico-Diesel com/ou sem armazenamento

São compostos por três fontes primárias, sendo seus principais componentes: a turbina eólica, os painéis fotovoltaicos e o gerador diesel. A presença do gerador diesel, que é despachável, elimina a necessidade de sistema de armazenamento, entretanto, o uso de armazenamento pode contribuir para redução do tempo de operação do diesel e otimização do dimensionamento do sistema híbrido.

Este tipo de sistema é normalmente utilizado em projetos de sistemas de médio e grande porte.

2.3 Configurações de sistemas híbridos de energia eólico-diesel-bateria

Como mencionado em páginas anteriores, muitos sistemas híbridos, *eólico-diesel-bateria* comerciais, têm sido instalados no mundo todo, a maioria dos quais foram financiados como projetos piloto. As pesquisas nesta área ainda são intensas, e novos protótipos são testados e seus desempenhos analisados. Contudo, não existe um consenso ou uma configuração ideal para semelhantes sistemas [14].

Devido a grande quantidade de componentes que podem compor um sistema híbrido, existe um leque de possibilidades de configurações, maior que a dos sistemas eólicos ou fotovoltaicos singelos, fato que dificulta a classificação dos

mesmos. Não obstante, muitos autores identificam três configurações básicas na qual se poderiam enquadrar todos eles [20] [21].

A configuração da Figura 2.9 é a mais simples das destinadas ao fornecimento de energia a cargas do tipo alternada. Conta com dois barramentos, um CA e outro CC, aos quais estão conectados os equipamentos correspondentes. Quando esta configuração é apenas para o funcionamento de cargas do tipo alternada, alguns autores a chamam de tipo série, visto que a energia é transportada até as cargas CA em “seqüência”. A turbina eólica e o gerador diesel são usados para carregar o banco de baterias. Como o gerador diesel CC é ligado em “série”, este não pode atender a carga diretamente. É tarefa do inversor, converter a energia fornecida pelas fontes CC (banco de baterias, turbina eólica ou gerador diesel) para CA, controlando a tensão e a frequência da rede (formador de rede). Nesta configuração o inversor deve ter capacidade para suportar a demanda máxima do sistema enquanto a capacidade do gerador diesel deve ser suficiente para atender a demanda máxima e carregar a bateria simultaneamente. A energia que é entregue ao banco de baterias pode ser controlada através do regulador de tensão do gerador diesel CC ou por um controlador de carga localizado na turbina eólica [20] [21].

Esta configuração tem a vantagem de ser relativamente simples, pois não existem equipamentos trabalhando em sincronismo paralelo, e pelo fato de ser utilizada há mais tempo, existem componentes confiáveis disponíveis comercialmente para sua implementação, porém apresenta as seguintes desvantagens [22]:

- Uma baixa eficiência global devido à configuração série do sistema; uma determinada quantidade de energia é perdida na conversão de energia (CC-CA) no inversor.
- É necessário utilizar inversores de grande capacidade, pois a potência dos mesmos deve ser ligeiramente maior do que a demanda máxima do sistema.
- Menor confiabilidade, pois toda a energia é suprida pelo inversor. Numa eventual perda do mesmo, a carga CA deixa de ser totalmente alimentada.

Figura 2.9 Configuração híbrida tipo série.

A configuração da Figura 2.10 apresenta dois barramentos a exemplo da configuração da Figura 2.9, porém, sua complexidade é maior, pois há dois equipamentos trabalhando em paralelo sobre o barramento de corrente alternada. Esta configuração, chamada de tipo paralelo, tem uma melhor eficiência se comparada com a série [20].

Nesta configuração, as fontes CA e CC podem operar de forma independente ou em sincronismo (paralelo). Isto dá como resultado uma alta eficiência global do sistema, pois permite ligar as fontes de energia de várias formas possíveis para atender uma determinada demanda do sistema. Por exemplo, quando a demanda for baixa, tanto as fontes CA como as fontes CC (através do inversor) podem suprir a carga CA de forma independente. Contudo, durante o período de demanda máxima, as duas fontes (CA e CC) podem operar em sincronismo, conseqüentemente a potência do inversor e dos geradores diesel CA e CC se vêem reduzidas. A configuração mostra também um retificador que permitirá que a energia não aproveitada pelas cargas em CA seja direcionada para o barramento e os elementos de CC [20] [21].

Como desvantagem, o sistema necessita de um supervisor encarregado de escolher o melhor modo de operação para uma determinada condição de carga. Isto torna o sistema de controle relativamente complexo e de difícil implementação devido à operação em paralelo dos sistemas. Não obstante, esta configuração apresenta varias vantagens, incluindo [21]:

- A demanda do sistema pode ser suprida de uma forma mais ótima.
- A eficiência no uso do combustível pode ser maximizada devido a uma potência de operação média mais elevada.
- O tempo e custo de manutenção do motor diesel podem também ser minimizados, devido a redução do número de ciclos de ligações e paradas do motor.
- A potência nominal do: inversor, geradores diesel, bateria e turbinas eólicas podem ser reduzida em relação à demanda máxima do sistema.
- A confiabilidade do sistema é maior, devido ao paralelismo dos componentes, no atendimento às cargas.

Figura 2.10 Configuração híbrida tipo paralelo

A configuração representada na Figura 2.11 apresenta como vantagem, em relação à da Figura 2.10, a inclusão de uma unidade conversora CA/CC/CA entre a turbina eólica CA e o barramento CA. A turbina eólica pode utilizar um gerador de indução ou síncrono, e um sistema de armazenamento extra pode ser incluído no barramento CC da unidade conversora. Como resultado, a turbina eólica pode operar com velocidade variável, otimizando a captura da energia proveniente dos ventos. Como desvantagem, esta configuração apresenta a inclusão do custo de mais uma unidade conversora, não entanto a eficiência global do sistema é maior se comparada com a configuração paralela [14].

Figura 2.11 Configuração híbrida tipo paralelo com unidade conversora CA/CC/CA

Um estudo feito sobre a avaliação de Estratégias de Operação e configurações de sistemas híbridos, mostra que estudos mais detalhados (simulações) são necessários para se determinar qual das três configurações é mais vantajosa, e essa questão dependerá de diversos fatores particulares de cada caso como são: o potencial eólico do local, a curva de carga, o dimensionamento do sistema e principalmente, da estratégia de controle adotada. Após testar três configurações, com duas estratégias de despachos para dois diferentes estudos de caso (12 simulações em total); o estudo conclui que não existe uma melhor configuração genérica para sistemas híbridos, e sim configurações que se adaptam melhor a determinadas condições de oferta e demanda [22].

3 TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A utilização em larga escala de sistemas híbridos de energia ainda depende de avanços na área tecnológica, no que se refere a projeto e operação destes sistemas. As principais limitações da atual tecnologia de sistemas híbridos de energia estão relacionadas com o controle do sistema. Sistemas híbridos de médio e grande porte geralmente incluem o uso de sofisticados métodos de controle. Funções específicas, como o controle de velocidade do motor diesel ou do regulador de tensão do gerador síncrono, são realizadas por controladores locais especializados, geralmente integrados ao componente a se controlar. Todavia é necessário coordenar e supervisionar o funcionamento do sistema híbrido como um todo, garantindo-lhe um bom desempenho independentemente das variações estocásticas das fontes de energia renováveis e/ou da demanda. O controlador encarregado desta supervisão central é conhecido como *controlador supervisorio*, e é o ponto chave para o sucesso de sistemas híbridos de energia [23].

Hoje em dia os controladores são classificados em convencionais (clássicos) e avançados. Controladores como os proporcional-integral-derivativo (PID) são do tipo convencional e ainda bastante comuns e largamente utilizados na indústria, porém, seu uso está restrito ao controle dinâmico do sistema [24], pelo qual, seu estudo foge ao escopo deste trabalho.

Por outra parte, os controladores avançados são ideais para sua utilização em sistemas de supervisão, pois combinam elementos multidisciplinares, tais como os da engenharia de controle, processamento de sinais, estatística, teoria de decisão, inteligência computacional, entre outras; os quais os tornam controladores adaptativos, não-lineares, preditivos e *inteligentes*; com a capacidade de emular o comportamento humano no controle supervisorio de processos [25].

Neste capítulo se faz um estudo detalhado das técnicas de inteligência artificial conhecidas como *redes neurais e lógica fuzzy*, ferramentas para experimentação nesses problemas complexos, que têm se mostrado, e se firmado, como enfoques bem fundamentados e desenvolvidos.

3.1 Conceitos básicos associados a Redes Neurais Artificiais

Uma RNA é uma estrutura de processamento de informação distribuída e paralela. Ela é formada por unidades de processamento, comumente chamadas de neurônios, interconectados por arcos unidirecionais, também chamados de ligações ou sinapses. Os neurônios possuem memória local e podem realizar operações de processamento de informação localizada. Cada neurônio possui uma única saída (axônio), a qual pode se ramificar em muitas ligações colaterais (cada ramificação possuindo o mesmo sinal de saída do neurônio). Todo o processamento que se realiza em cada unidade é completamente local, isto é, depende apenas dos valores correntes dos sinais de entrada que chegam dos neurônios através das conexões. Estes valores atuam sobre os valores armazenados na memória local do neurônio [26].

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) funcionam conceitualmente de forma similar ao cérebro humano, tentando reconhecer regularidades e padrões de dados. São capazes de aprender com a experiência e partir para a generalização baseadas no seu conhecimento prévio. Embora biologicamente inspiradas, as RNAs encontraram aplicações em muitas áreas diferentes. Para este trabalho a área de especial interesse é a realização de prognósticos de valores futuros de Séries Temporais.

Existem atualmente diversos estudos sobre a avaliação do desempenho de redes neurais na previsão de serie temporais [27] que comprovam, através da comparação de resultados obtidos, que as redes neurais podem realizar previsões mais precisas que o método estatístico mais tradicional de previsão de Séries Temporais, o modelo Autoregressivo Integrado de Médias Móveis (ARIMA).

3.1.1 Características das Redes Neurais Artificiais

Uma RNA deve idealmente ser capaz de executar três tarefas principais, que são: aprendizado, generalização e abstração. Aprendizado é a capacidade da RNA modificar seu próprio comportamento em resposta ao ambiente com o qual ela interage. Generalização pode ser vista como a capacidade de responder corretamente, usando a experiência passada, para uma entrada que a rede nunca

viu antes. Abstração é a capacidade de extrair informações relevantes de um ambiente que pode estar afetado por variações particulares tais como ruído externo.

3.1.2 O neurônio básico

A função básica do neurônio biológico é de somar suas entradas e de produzir um sinal na sua saída se a soma for maior do que um determinado valor, chamado de valor limiar. No neurônio artificial, também chamado de Perceptron, o processo é muito semelhante. Na Figura 3.1, temos uma ilustração de um neurônio com função de ativação.

Figura 3.1 Neurônio artificial com função de ativação [28]

O neurônio recebe na sua entrada, os valores de saída de outros neurônios ($x_1, x_2, \dots, x_n$) multiplicados por um valor chamado de peso ($w_1, w_2 \dots w_n$). Estes valores são adicionados (NET). Depois da adição, o sinal é processado através da função limiar **F**, a qual produz um sinal de saída ao atingir o valor de limiar predeterminado. O neurônio fornece na sua saída um sinal (OUT) com valor que depende da função atrelada ao limiar. As quatro funções de ativação mais utilizadas são: linear, rampa, salto e sigmóide [28].

3.1.3 O modelo Perceptron de Multi-Camadas

Existem muitos modelos de redes neurais, e uma quantidade razoável de publicações que se dedicam a classificá-los. Dentre estes modelos o modelo perceptron multi-camadas (MLP) com aprendizado baseado no algoritmo de retropropagação é o mais utilizado em áreas como reconhecimento de padrões, processamento de fala e na previsão de séries temporais [27].

A Figura 3.2 apresenta uma representação do modelo MLP. Unidades básicas (neurônios) são dispostas em camadas. Qualquer neurônio em uma dada camada se conecta com todos os neurônios existentes na camada anterior e posterior da camada em questão. A cada conexão está associado um peso, cujo valor é variável durante o treinamento e permite codificar o conhecimento que o MLP tem sobre um determinado problema.

A função da camada 0 (camada de entrada) é simplesmente passar as entradas do MLP a cada neurônio na camada 1 através da matriz de pesos $W1$. Esta matriz contém tantas linhas quantas sejam as entradas do MLP, e tantas colunas quanto sejam os neurônios da camada 1. Desta forma, nenhuma operação é realizada na camada 0. Cada neurônio na camada 1 calcula a soma ponderada das entradas (utilizando os pesos da matriz $W1$) e aplica uma função não linear a essa soma. O resultado é então passado a todos os neurônios da camada 2, desta vez através da matriz de pesos $W2$. A camada 2 (e todas as demais subseqüentes) efetua as mesmas operações que a camada 1 [28].

Figura 3.2 O modelo MLP

Cada neurônio computa sua nova ativação através de uma regra de propagação. Em geral é definida como sendo uma função soma da entrada líquida dos pesos (NET) dos neurônios u_j que estão diretamente conectados ao neurônio u_k conforme a fórmula 3.1 e 3.2.

$$OUT_k = F\left(\sum_{j=1}^n w_{jk} \times u_j - \theta_k\right) \quad (3.1)$$

$$F(x) = (1 + e^{-x})^{-1} \quad (3.2)$$

onde:

- k cada um dos neurônios da camada i ;
- n número de entradas que alimentam o neurônio k ;
- u_j valor da entrada j do neurônio k ;
- w_{jk} peso que interliga a entrada j com o neurônio k ;
- θ_k limiar do neurônio k ;
- OUT_k saída do neurônio k ;
- $F(x)$ função de ativação do tipo sigmóide.

Os MLP são redes neurais com alto desempenho. Por exemplo, uma RNA com duas camadas, sendo a primeira do tipo sigmóide e a segunda do tipo linear, pode ser treinada para aproximar qualquer função (com um número finito de descontinuidades) com bastante precisão [29].

O MLP pode operar em dois modos distintos: treinamento e processamento.

3.1.4 Etapa de treinamento

Durante o treinamento, vetores de entrada são apresentados à rede e os correspondentes vetores de saída são calculados. Existem basicamente dois tipos de treinamento: supervisionado e não supervisionado. O treinamento supervisionado se aplica adequadamente em problemas de interpolação, onde se exige que a rede produza um vetor de saída para uma entrada que ela nunca viu antes; que é o caso da realização de prognósticos de valores futuros de Séries Temporais. Por outra parte, o treinamento não supervisionado não é capaz de executar tarefas de interpolação, pois a RNA nunca vê um exemplo das saídas desejadas, e portanto não conhece o relacionamento entre as variáveis de entrada e de saída. O aspecto mais importante destas redes é a habilidade em extrair características relevantes do

ambiente de entrada. Estas podem ser efetivamente utilizadas em problemas de classificação [28].

Um bom exemplo de treinamento supervisionado é o algoritmo de Retropropagação. Este utiliza o vetor de entrada e produz sua própria saída, comparando-a com a saída alvo (real). Se não houver diferença, não há mudanças; caso contrário, os pesos w_{jk} da rede serão modificados com o objetivo de modificar esta diferença. A regra de modificação dos pesos para um determinado padrão $\mathbf{p}$ é dada pela seguinte fórmula:

$$\Delta_p w_{i,j} = \eta \cdot \delta_{p,j} \cdot \theta_{p,i} \quad (3.3)$$

Onde o padrão $\mathbf{p}$ corresponde ao conjunto de entradas da rede. Por exemplo, no caso de séries temporais, $\mathbf{p}$ corresponderá aos valores que influenciarão na realização do prognóstico do próximo valor da série. O termo η representa uma constante de proporcionalidade (também conhecida como taxa de aprendizado). O termo $\delta_{p,j}$ representa a diferença entre a saída alvo e a saída da rede - erro local da unidade j para o padrão $\mathbf{p}$. É esse o termo que será retropropagado para as camadas anteriores e será calculado utilizando-se o algoritmo do gradiente descendente. E finalmente o termo $\theta_{p,i}$ é a saída produzida pela rede para o padrão $\mathbf{p}$ na conexão i .

Com o algoritmo de retropropagação o tempo total gasto na etapa de treinamento pode alcançar valores elevados, e também não há garantia de que um treinamento satisfatório possa ser sempre alcançado. Frequentemente o algoritmo fica preso em mínimos locais da função erro, sem poder avançar em direção ao mínimo global desejado. Por esta razão, algumas variantes do algoritmo básico de retropropagação foram desenvolvidas com a finalidade de melhorar seu desempenho. Neste trabalho se utilizou o algoritmo Levenberg-Marquardt que basicamente é uma modificação do *método de Newton*. Este algoritmo utiliza a matriz Hessiana (segundas derivadas) em lugar do método do gradiente o que minimiza os tempos de computação despendidos [29].

3.1.5 Etapa de processamento

Uma vez que o MLP foi treinado, o conhecimento sobre o problema representado pelo conjunto de treinamento está contido em seus pesos e a rede pode ser usada no modo de processamento. Neste modo, somente são apresentados vetores de entrada e o MLP calcula os correspondentes vetores de saída. Nenhum ajuste no valor dos pesos é realizado no modo de processamento. Quando um vetor de entrada não faz parte do conjunto de treinamento, a rede produz a sua própria resposta para a entrada (generalização), evidenciando uma das principais características do MLP: a capacidade de resolver um problema sem utilizar as ferramentas analíticas que foram utilizadas para construir o conjunto de treinamento. Esta característica é particularmente útil em situações onde a relação funcional entre as entradas e as saídas não é perfeitamente conhecida, como é o caso no problema de previsão de carga e velocidade do vento [28].

3.2 Conceitos básicos sobre lógica fuzzy

A lógica fuzzy é uma variação da lógica booleana convencional que foi desenvolvida para expressar o conceito da verdade parcial. A forma matemática de expressar os valores entre os limites: "completamente verdadeiro" e "completamente falso", foi introduzida pelo Dr. Lotfi Zadeh da Universidade da Califórnia /Berkeley nos anos 1960 [30].

Embora as estratégias de controle inteligente possam ser implementadas por outros meios, as implementações por lógica fuzzy freqüentemente se tornam muito mais eficientes, devido aos seguintes pontos [25]:

- Estratégias de controle fuzzy nascem da experiência e de experimentos, em vez de modelos matemáticos. Portanto, uma implementação lingüística é muito mais rápida de se implementar.
- Estratégias de controle fuzzy envolvem um número muito grande de entradas, a maioria das quais relevantes apenas para condições especiais. Dessa forma, algumas condições raras ou excepcionais (tais como alarmes) podem ser incorporadas com pouquíssimo "overhead" computacional.

- Estratégias de lógica fuzzy implementadas em produtos comerciais, voltadas para o mercado de massa, devem ser de custo baixo. Comparadas com soluções convencionais de controle, a lógica, *fuzzy* é freqüentemente mais eficiente, ao se comparar a codificação e o tempo computacional de execução.

A *Lógica Fuzzy* permite incorporar a forma humana de pensar em um sistema de controle. Um controlador fuzzy típico pode ser projetado para comportar-se conforme o raciocínio *dedutivo*, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem.

A lógica fuzzy tem dois diferentes significados. Num sentido estreito, a lógica fuzzy pode ser vista como uma extensão das lógicas bi valores e multi valores. A lógica tradicional, booleana, apresenta apenas os valores “0” ou “1”. Não há “meio termo”. Já na lógica fuzzy a variável de saída pode assumir qualquer valor entre 0 e 1, assim, é possível descrever a saída de uma forma qualitativa. Pelo contrário, num sentido mais amplo, o qual é predominantemente utilizado hoje em dia, a lógica fuzzy é quase sinônimo da teoria de conjuntos fuzzy, uma teoria na qual a relação entre os diferentes elementos passa de uma forma discreta para uma forma “fuzzy” contínua [31].

3.2.1 Implicação lógica e regras de inferência

Há um aspecto relevante na forma de pensar dos seres humanos: a *implicação lógica*, que consiste na formulação de uma conexão entre causa e efeito, ou uma condição e sua conseqüência. Nesses casos, segue-se consciente ou inconscientemente *certas regras de inferência*, da seguinte forma:

$$\text{SE } \text{causa}_1 = A \quad \text{e} \quad \text{causa}_2 = B \quad \text{ENTÃO} \quad \text{efeito} = C$$

onde A,B e C são conjuntos. Em lógica fuzzy, há *um raciocínio* com números fuzzy e conjuntos fuzzy, e as afirmações podem ser consideradas como regras práticas.

3.2.2 Conjuntos Fuzzy

Em um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas, com m terminais de entrada e p terminais de saídas, pode-se aplicar um conjunto de sinais nas entradas, de forma se obter as respectivas saídas. De forma a se determinar a saída desse sistema, há uma combinação desses $m \times p$ sinais, que podem ser definidos por conjuntos. Em teoria de análise de sistemas e sinais estuda-se como a entrada é mapeada na saída pelo referido sistema: o sistema transforma a combinação de m conjuntos de entrada em p conjuntos de saída. As *operações de teoria de conjuntos* fornecem um mapeamento entrada-saída, análogo às funções de transferência da teoria de sistemas lineares [25].

3.2.2.1 Noções básicas sobre conjuntos

Uma noção básica da teoria de conjuntos é a *pertinência de um elemento x* em um conjunto A , indicada pelo símbolo $\in$:

$$x \in A$$

Uma forma de se indicar essa pertinência pode ser através de *uma função de pertinência $\mu_A(X)$* , cujo valor indica se o elemento x pertence ou não ao conjunto

A . Por exemplo, no seguinte caso, $\mu_A(X)$ é uma função bivalente [32]:

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.4)$$

A Figura 3.3(a) ilustra tais casos. Considere que cada cor represente um conjunto. Pode-se observar que se um elemento x for movido em direção aos limites do conjunto A (por exemplo, a cor amarela), no ponto de cruzamento ocorrerá subitamente um degrau no comportamento de sua pertinência: originalmente de não-membro do conjunto para membro. Outra observação é que a pertinência de um elemento que esteja exatamente nos limites é indeterminada.

Por outro lado, a lógica fuzzy pode perceber estas pequenas variações ocorridas nesses pontos, uma vez que as faixas de cores são facilmente representáveis

através da linguagem fuzzy (Figura 3.3 b). A lógica fuzzy pode detectar pequenas variações nas tonalidades, por exemplo, a tonalidade alaranjada possui um grau de pertinência na função que representa a cor vermelha de 0,6. O eixo y da Figura 3.3 é o grau de pertinência que é normalizado, definido entre 0 e 1.

Figura 3.3 Comparação entre um sistema convencional e fuzzy [7]

É importante introduzir neste momento o conceito de grau de pertinência. O grau de pertinência define o “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto. Na lógica booleana existem somente dois graus de pertinência 0% e 100%. Na lógica fuzzy pode ser usada toda a faixa entre 0% e 100%. A descrição formal de grau de pertinência, para o caso fuzzy, é dado pela equação 3.5 [2].

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\} \quad (3.5)$$

Sendo A o conjunto fuzzy

x a variável em questão

μ_A o grau de pertinência de x em A

X o universo de discurso.

3.2.3 Operações entre conjuntos fuzzy

Existem diversas operações elementares que podem ser realizadas com conjuntos fuzzy que têm como base a teoria de conjuntos clássicos. As mais utilizadas são a

intersecção, a união e complemento, definidas respectivamente pelas equações 3.6, 3.7, 3.8 e também mostradas na Figura 3.4 [32] [33].

Intersecção: $\mu_{(A \cap B)}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ (3.6)

União: $\mu_{(A \cup B)}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ (3.7)

Complemento: $\mu_{(\bar{A})}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (3.8)

Figura 3.4 Operações entre conjuntos fuzzy: (a) conjuntos A e B, (b) união, (c) intersecção (d) complemento. [2]

3.2.4 Funções de Pertinência

Funções de pertinência fuzzy representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de um sistema fuzzy. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso [31].

A Figura 3.5 mostra dois exemplos de funções de pertinência, onde o eixo vertical representa o intervalo $[0,1]$ e o eixo horizontal o universo de discurso. Embora as funções de pertinência mais utilizadas na prática são as triangulares e trapezoidais, isto não é obrigatório. A quantidade de funções em um universo de discurso e seu formato são escolhidos com base na experiência ou na natureza do processo a ser

controlado [32]. Contudo algumas dicas práticas podem ser mencionadas, como se segue [25]:

Figura 3.5 Exemplos de funções de pertinência.

- Um número prático de funções de pertinência é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa. Por exemplo, experiências mostraram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em torno de uns 15%, a partir de valores maiores, não há melhorias extremamente significativas.
- Os formatos mais freqüentemente encontrados são triangulares e trapezóides, pois são gerados com facilidade. Em casos onde um desempenho suave é de importância crítica, funções do tipo $\cos^2(x)$, gaussiana, sigmóide e spline cúbico podem ser usadas.
- Outro fator que afeta a precisão é o grau de superposição entre as funções de pertinência fuzzy. Um mínimo de 25% e um máximo de 75% foram determinados experimentalmente como adequados .
- Devido ao fato de que projetar funções de pertinência é uma tarefa trabalhosa, técnicas especiais usando redes neurais e/ou algoritmos genéticos estão disponíveis para sua geração automática. Tais sistemas são dotados de uma capacidade de aprendizagem, a partir de conjuntos de dados de entrada, com a qual identificam a posição e formato das funções de pertinência.

3.2.5 Blocos Funcionais

Sistemas de controle que utilizam a lógica fuzzy são compostos basicamente por três etapas: a primeira efetua a conversão das variáveis de entrada e saída em uma representação conhecida como conjuntos fuzzy e denomina-se fuzzificação, a

segunda estabelece as regras que relacionarão as variáveis de entrada e saída. Essas regras são obtidas do conhecimento e da experiência humana e denomina-se base de regras e a terceira denominada por defuzzificação efetua a conversão dos conjuntos fuzzy em um número que representa o estado da saída do sistema para uma determinada condição [2].

A Figura 3.6 ilustra em forma de blocos a disposição de um controlador fuzzy. Os sinais de entrada são obtidos da planta através de sensores ou transdutores que através do tratamento adequado do sinal analógico alimentam o bloco de fuzzificação (fuzzy sets) do controlador fuzzy. Através da base de conhecimento armazenada por meio de um conjunto de regras as decisões são tomadas e devolvidas ao sistema ainda em linguagem fuzzy. O bloco de defuzzificação efetua a conversão das informações para o formato analógico que é disponibilizada na saída do controlador para que seja efetuada a mudança de estado [7].

3.2.5.1 Fuzzificação

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio fuzzy. O fuzzificador atribui valores lingüísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. A fuzzificação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados o que significa que há uma computação mais veloz.

Figura 3.6 Diagrama de blocos de um controlador fuzzy [7]

3.2.5.2 Regras fuzzy

Uma regra fuzzy relaciona conjuntos fuzzy do seguinte modo:

$$\textit{Se } X = A \textit{ então } Y = B \quad (3.9)$$

Onde A e B são valores lingüísticos definidos por conjuntos fuzzy dentro dos universos de discurso X e Y respectivamente. A parte da regra “X = A” é conhecida como *antecedente ou premissa*, enquanto que a parte da regra “Y = B” é chamada de *conseqüente ou conclusão* [31]

Através de um grande volume de experiências, certas configurações de regras podem se tornar como a melhor escolha para casos específicos de controle. Na composição dos vários conjuntos fuzzy de entrada dentro de uma regra, as t-normas *min* e *produto* são mais comuns, enquanto que na composição das saídas fuzzy de cada regra, as s-normas *máx* tem sido a mais prática. Assim definem-se as estruturas *máx-min* ou *máx-produto* para controladores fuzzy. O *min* ou *produto* é um operador de intersecção fuzzy que implica num conetivo “E” e o operador *max* é um operador de união fuzzy que corresponde ao conetivo “OU” [25].

3.2.5.3 Defuzzificação

Na defuzzificação, o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras fuzzy será traduzido num valor discreto. O objetivo é obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores fuzzy inferidos da variável lingüística de saída. Os métodos mais utilizados são: Centro da área (C-o-A), Centro do Máximo (C-o-M) e Média do Máximo (M-o-M) [34].

3.2.6 Tipos e características de controladores fuzzy

Existem vários modelos de sistemas fuzzy. Na maioria dos casos, o antecedente é formado por proposições lingüísticas e a distinção entre os modelos se dá no

conseqüente das regras fuzzy. Entre os modelos mais conhecidos podemos destacar [2]:

O *modelo de Mamdani* que utiliza conjuntos fuzzy também nos conseqüentes das regras fuzzy. A saída final é representada por um conjunto fuzzy resultante da agregação da saída inferida de cada regra. Para se obter a saída usa-se um dos métodos de defuzzificação mencionados.

O *modelo de Takagi-Sugeno* no qual o conseqüente é representado por uma função das variáveis de entrada. A saída final é obtida pela média ponderada das saídas inferidas de cada regra. Os coeficientes da ponderação são dados pelos graus de ativação das respectivas regras.

O *modelo de Tsukamoto* que utiliza funções de pertinência monotônicas no conseqüente. Assim como no modelo Takagi-Sugeno, é inferido um valor não-nebuloso induzido pelo nível de ativação da regra. A saída final é obtida por média ponderada das saídas inferidas de cada regra.

Os dois modelos de sistemas nebulosos mais utilizados são o modelo Mamdani e o modelo Takagi - Sugeno que serão descritos a seguir.

3.2.6.1 O modelo de Mamdani

O modelo nebuloso do tipo Mamdani apresenta como característica básica o fato de tanto os antecedentes como os conseqüentes serem mapeados como conjuntos fuzzy, exemplo: se erro é “*grande*” então tensão é “*alta*”.

Para cada regra de inferência, caso tenhamos mais de uma variável de entrada, é necessário aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, a fim de que seja gerado um conjunto conseqüente. A agregação dos conjuntos antecedentes geralmente é dada pelas **t-normas** *min* e *produto*. No caso de existirem N regras, serão gerados N conjuntos conseqüentes. A composição desses conjuntos conseqüentes, a fim de que seja gerado o conjunto final de saída, é feita geralmente pelas **s-normas** *máx* [2] [25].

3.2.6.2 O modelo de Takagi-Sugeno

O modelo Takagi-Sugeno foi proposto como resultado de um esforço para se desenvolver, de forma sistemática, uma abordagem para a geração de regras nebulosas a partir de dados de entrada-saída. Tanto a fuzzificação das entradas como a aplicação dos operadores fuzzy é feita de igual forma que no modelo Mamdani, porém, a principal diferença entre os dois métodos está em que a função de pertinência da saída do modelo Sugeno é uma função linear ou constante [31].

Uma típica regra num modelo Sugeno tem a seguinte forma:

Se Entrada 1=x e Entrada 2=y, ENTÃO Saída é $z=ax+by+c$

O valor da saída z_i de cada regra tem um determinado peso w_i que pondera a força de disparo de cada regra. Por exemplo, para uma regra do tipo AND, com Entrada 1=x e Entrada 2=y, a força de disparo é:

$$w_i = \text{Método AND}(F_1(x), F_2(y)) \quad 3.10$$

Onde F_1 e F_2 são as funções de pertinência para as Entradas 1 e 2. A saída final do sistema é a media ponderada das saídas de cada regra, calculada com a seguinte expressão:

$$Saída\ Final = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad 3.11$$

3.2.7 Vantagens e desvantagens dos sistemas fuzzy

As principais potencialidades que tornam os sistema fuzzy relevantes podem ser enumeradas a seguir [32] [35]:

- Habilidade de controlar processos com características não-lineares e alta ordem.
- Possibilidade de controlar muitas variáveis de saída com um controlador só, sem perder a simplicidade do modelo.
- Utilização de termos e expressões utilizados na linguagem natural.
- Controle de processos quando o modelo matemático não é avaliado ou complexo à aplicação de metodologias da teoria de controle clássico.
- Possibilidade da implementação do conhecimento, aspectos intuitivos e experiência de especialista em controle utilizando-se regras lingüísticas (conhecimento qualitativo e estruturado) e entradas imprecisas.

Contudo, os sistemas fuzzy apresentam algumas limitações [32] [35]:

- Alguns autores têm discutido que os sistemas fuzzy são adequados onde o modelo matemático preciso do processo a ser controlado não é avaliado, mas é difícil projetar um controlador em que não se necessita fazer considerações sobre seu ambiente.
- Grande quantidade de parâmetros a ser configurado pelo usuário, tais como: número de subconjuntos de cada variável, número de regras, seleção do método para a realização das operações lógicas, método de desnebulização e parâmetros das funções de pertinência.
- Dificuldade da análise de aspectos de otimalidade, estabilidade e robustez.
- Para sistemas que não são completamente lineares, mas a não linearidade entre a entrada e saída é uma função suave, sem descontinuidades, operando em um ponto em torno do qual variações pequenas são lineares; a relação custo/benefício é menor para controladores PID do que para controladores fuzzy.

4 MODELAGEM DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-DIESEL-BATERIA

O objetivo geral deste capítulo consiste na modelagem e caracterização do comportamento dos componentes envolvidos no sistema híbrido de energia proposto: turbina eólica, gerador diesel, bateria e cargas dissipadoras.

Tendo em vista que este trabalho está focado no desenvolvimento de um “*controlador supervisor inteligente*”, unicamente o comportamento em regime permanente dos diferentes componentes será analisado. Os modelos matemáticos, posteriormente, serão implementados em um diagrama de blocos da caixa de ferramentas do programa de simulações Simulink do MATLAB. O desenvolvimento dos modelos adequados para o sistema híbrido de energia, permitirá avaliar, no seguinte capítulo, o desempenho de nosso controlador inteligente.

4.1 Tipos de modelagem

Nos últimos anos, muitos tipos de modelagem de sistemas híbridos de energia foram desenvolvidos. Por exemplo, pesquisadores da Europa têm criado numerosos modelos analíticos sofisticados para analisar o comportamento de sistemas híbridos de energia do tipo eólico-bateria. Trabalhos similares na Universidade de Massachusetts (Umass) têm produzido sistemas de modelagem para sistemas híbridos em geral. Comumente, estes modelos podem ser classificados em duas categorias: logísticos e dinâmicos [1].

4.1.1 Modelos logísticos

Os modelos logísticos são usados principalmente para fazer previsões de longo prazo do desempenho de sistemas híbridos, assim como para o dimensionamento dos componentes. Estes modelos provêm as entradas para a avaliação econômica da implementação de um determinado sistema híbrido. Geralmente, podem ser divididos em três categorias [1]:

- *Modelo de séries temporais (quase estático)*: este modelo requer séries temporais de longo prazo de variáveis tais como: velocidade do vento, radiação solar e carga.
- *Modelo probabilístico*: são modelos que geralmente requerem dados de longo prazo (mensais ou estacionais) tanto da demanda elétrica como das fontes de geração. O modelo analítico está baseado no uso de técnicas de modelagem estatísticas.
- *Modelo probabilístico/séries temporais*: como seu nome o especifica, são modelos que usam as técnicas de modelagem tanto probabilísticas como de séries temporais. Para a análise das variações de carga e geração em intervalos que variam tipicamente de 10 minutos a 1 hora, utiliza-se a modelagem por séries temporais, enquanto que as flutuações de mais curto prazo dentro destes intervalos, são analisadas através do uso das técnicas estatísticas.

4.1.2 Modelos dinâmicos

Os modelos dinâmicos são utilizados principalmente para o projeto de componentes, estudos de estabilidade e determinação da qualidade de energia fornecida pelos sistemas híbridos. São usados geralmente para a análise de sistemas híbridos sem armazenamento ou sistemas com mínimo armazenamento, semelhante a volantes de inércia. Dependendo do intervalo de tempo e do número de componentes a se modelar, os modelos dinâmicos podem ser divididos em três categorias [1]:

- *Modelo dinâmico mecânico*: baseado em equações mecânicas de movimento e balanço energético. Pode ser utilizado como uma primeira aproximação do comportamento dinâmico do sistema para avaliar, por exemplo, os efeitos de longo prazo das ligações e paradas do motor diesel. Estes modelos são úteis comumente para a análise de sistemas com muito pouco ou sem armazenamento.
- *Modelo mecânico dinâmico/elétrico estático*: este modelo junta a análise do modelo mecânico dinâmico com a análise em regime permanente dos componentes elétricos do sistema híbrido. Geralmente, serve como uma primeira aproximação do comportamento elétrico do sistema.

- *Modelo mecânico/elétrico dinâmico*: são modelos baseados em equações diferenciais tanto para a análise mecânica como elétrica dos componentes do sistema. São modelos orientados à análise de estabilidade elétrica (na escala de milissegundos) e vibrações mecânicas.

Uma das premissas desta dissertação é que o comportamento de um sistema supervisor central não depende do comportamento dinâmico dos componentes do sistema híbrido; em outras palavras, um sistema supervisor não está interessado em controlar parâmetros elétricos (dinâmicos) do sistema tais como: tensão ou frequência. Pelo contrário, o supervisor preocupa-se por coordenar e supervisionar o funcionamento de todo o sistema híbrido, olhando para questões tais como: despacho otimizado de fontes de energia, maximização de vida útil dos componentes e segurança no suprimento de energia. A Figura 4.1 mostra algumas das possíveis funções realizadas pelo controlador supervisor.

Figura 4.1 Funções do controlador supervisor

Estas funções são monitoradas em intervalos discretos de tempo que geralmente variam entre 5 minutos e 2 horas, sendo um valor típico 1 hora [1]. A cada intervalo de tempo, o controlador decide a melhor estratégia de controle para o seguinte período, baseado em informações provenientes dos diferentes elementos do sistema como: o número de ligações e paradas do gerador diesel, demanda do sistema, estado de carga da bateria, energia renovável disponível, previsão da velocidade do vento e previsão de carga. Intervalos de tempo maiores do que 3 horas deveriam ser evitados devido a incertezas na previsão tanto dos ventos como da carga. Por outra

parte, intervalos de tempo muito pequenos fariam com que o controlador se preocupasse com a parte dinâmica do sistema, perdendo-se o conceito do que é um controlador supervisorio [1].

Conseqüentemente, uma modelagem logística, com séries temporais (quase estática), é o modelo mais adequado para testar e avaliar o desempenho de nosso controlador inteligente. A seguir são apresentadas as equações que governam o comportamento em regime permanente dos diferentes componentes de um sistema híbrido eólico-diesel-bateria.

4.2 Turbina eólica

4.2.1 Descrição do modelo

Apenas uma parte da potência dos vento é possível de ser extraída por uma turbina eólica e essa parte é quantificada pelo coeficiente de potência C_p , isto é, a relação entre a potência possível de se extrair do vento e a quantidade total de potência nele contida. Esta perda de potência (mostrada por Albert Betz em 1928) é devido às características aerodinâmicas da turbina. Segundo Betz, a máxima fração de potência que pode teoricamente ser extraída da potência do vento é de 59,3% [5].

O rotor da turbina eólica deve obviamente frear o vento quando captura sua energia cinética e convertê-la em energia rotacional. Isto implica que o vento se moverá mais rapidamente justo antes de atingir o rotor do que depois de atravessá-lo. Devido ao fato de que o ar que passa através da área varrida pelo rotor (por segundo) deve ser igual ao ar que abandona o rotor (lei da continuidade de fluxo), o ar ocupará uma maior secção transversal (diâmetro) atrás do plano do rotor. Este efeito pode-se apreciar na Figura 4.2 onde se amostra um tubo imaginário, chamado de tubo de corrente de ar, em torno do rotor da turbina eólica [5].

A Figura 4.2 amostra como, no tubo de corrente de ar, o vento se movendo de direita a esquerda ocupa um maior volume na parte posterior do rotor. A perda de velocidade se produzirá gradualmente na parte posterior do rotor até atingir uma velocidade praticamente constante. A potência extraída dos ventos nas pás do rotor

é então a diferença entre a potência do vento que chega pela parte frontal da turbina e a potência contida no vento que deixa a turbina [36].

Figura 4.2 Perfil do vento ao longo de sua trajetória pelas pás de uma turbina [36]

A potência extraída do vento pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{1}{2} \times m \times (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.1)$$

onde:

P = potência mecânica extraída pelo rotor

V1= velocidade do vento na entrada da turbina

V2= velocidade do vento na saída da turbina

m = massa de ar por seg

Para efetuar-se o cálculo desejado do parâmetro “m”, é necessário que se analise o movimento da massa de ar dentro de um cilindro fictício conforme o ilustrado na Figura 4.3. O fluxo de vento desloca-se a velocidade constante e uniforme “v”.

Figura 4.3 Cilindro de vento fictício [7]

No cilindro a base “A” está em movimento, deslocando-se com o vento de velocidade “v”. O tempo necessário para o deslocamento da seção “A”, ao longo do comprimento L é definido como Δt . Portanto, a massa de ar “m” de massa específica “ ρ ”, contida no volume do cilindro fictício é calculada por:

$$\text{Massa de ar} = \rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

A velocidade média do vento através da área do rotor pode ser calculada como a média da velocidade do vento que chega pela parte frontal da turbina “ V_1 ” e a velocidade do vento que deixa a turbina “ V_2 ”.

$$v = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.3)$$

A massa de ar por segundo que passa através da turbina é obtida então das equações 4.2 e 4.3:

$$\frac{\text{Massa de ar}}{\text{seg}} = \rho \cdot A \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.4)$$

Substituindo na equação 4.1, a potência extraída do vento nas pás do rotor é expressa por:

$$P = \underbrace{\frac{1}{2} \left\{ \rho \cdot A \frac{V_1 + V_2}{2} \right\}}_{\text{I}} \cdot \underbrace{(V_1^2 - V_2^2)}_{\text{II}} \quad (4.5)$$

Verifica-se através da expressão matemática que a potência captada pela turbina possui dois termos distintos, definidos em (4.5) por I e II. O primeiro refere-se ao fluxo da massa de ar incidente na turbina; e o segundo termo retrata a variação da energia cinética da massa de ar incidente. Portanto, fica comprovado que a potência desenvolvida por uma turbina eólica é igual ao produto do fluxo da massa de ar que atravessa o rotor da turbina, pela variação da energia cinética da corrente de ar [7].

Rearranjando algebricamente a equação acima:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \times V_1^3 \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \quad (4.6)$$

A potência extraída da turbina é comumente expressa pela seguinte expressão [5]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \times V^3 \times C_p \quad \text{sendo} \quad C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \quad (4.7)$$

Sendo C_p o “coeficiente de potência” ou “eficiência do rotor”, ou seja, traduz a quantidade de potência aproveitada no eixo do rotor. O restante é desperdiçado no vento que deixa as pás do rotor” [36].

A curva de potência

A curva de potência de uma turbina eólica é um gráfico ou uma tabela de valores que indica qual será a potência elétrica disponível para diferentes velocidades do vento; cada tipo de turbina tem sua curva de potência específica. A Figura 4.4 mostra uma curva típica de potência.

Figura 4.4 Curva de potência típica de uma turbina eólica

A curva mostra que a produção de potência inicia a partir de uma certa velocidade, chamada velocidade de vento de partida. À medida que a velocidade do vento aumenta, aumenta a produção de eletricidade até atingir a potência nominal, quando o vento alcança a velocidade nominal específica de projeto. A potência máxima (geralmente igual a potência nominal) é controlada por estol aerodinâmico ou por ajuste do ângulo de posicionamento das pás. Caso a velocidade de vento continue aumentando, atinge-se a velocidade de proteção ou corte e um mecanismo de proteção é acionado com a finalidade de reduzir as cargas aerodinâmicas atuantes na estrutura [5]. É possível observar na Figura 4.4 a atuação de um mecanismo de controle de sobrevelocidade reduzindo a potência produzida em velocidades de vento acima de 14m/s.

4.2.2 Parâmetros de simulação

4.2.2.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada do modelo são: a curva de potência da turbina eólica e a série histórica de valores horários de velocidade média do vento do local.

A curva de potência: A curva de potência é normalmente obtida de catálogos dos fabricantes e é ingressada no modelo em forma de uma tabela que relaciona determinadas velocidades do vento com potências elétricas geradas. Para obter a potência elétrica gerada, a qualquer velocidade do vento, o modelo realiza uma interpolação linear entre os dois pontos conhecidos mais próximos à velocidade desejada. Em forma de equação, suponha que se necessita calcular a potência elétrica gerada a uma velocidade " V " do vento e que $V_i < V < V_{i+1}$, onde os sub-índices " i " indicam qual par de pontos da tabela está sendo considerada, então a potência gerada pela turbina é [1]:

$$P = \frac{(P_{i+1} - P_i)}{(V_{i+1} - V_i)} \cdot (V - V_i) + P_i \quad (4.8)$$

Histórico da velocidade média do vento: A velocidade do vento e a curva de potência são os parâmetros utilizados para se determinar a potência elétrica média gerada pela turbina durante o intervalo de simulação. Geralmente, a velocidade do vento é medida em uma altura diferente da altura em que as turbinas eólicas são instaladas. Assim sendo, é necessário ajustar as velocidades do vento à altura da torre. Da mecânica dos fluídos, experimentos mostram que a velocidade de um fluído que escoar próximo a uma superfície é nula, função do atrito entre o ar e a superfície do solo. Levantando-se o perfil de velocidade do fluído com a altura, verifica-se que, no sentido perpendicular à altura, a velocidade passa de um valor nulo e atinge uma velocidade de escoamento “V”. Esta alteração é mais acentuada próxima à superfície e menos nas grandes alturas. A região junto à superfície em que ocorre esta rápida alteração no valor de velocidade é conhecida como “camada limite”. No interior da “camada limite”, normalmente o ar escoar com uma certa turbulência, tendo em vista a influência de parâmetros tais como: densidade e viscosidade do fluido, o acabamento da superfície (rugosidade), a forma da superfície (presença de obstáculos) [5].

Em estudos do aproveitamento energético dos ventos, dois modelos ou “Leis” matemáticas são comumente utilizados para representar o perfil vertical dos ventos: “Lei da potência” e “Lei logarítmica”. A lei de potência resultou de estudos da camada limite sobre uma placa plana. É a mais simples de ser aplicada, porém sem uma precisão muito apurada. O modelo baseado na Lei Logarítmica é mais complexo, pois leva em conta que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento. A velocidade do vento a uma determinada altura sobre o nível do solo é dada pela seguinte equação [36]:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{H_2}{Z_o}\right)}{\ln\left(\frac{H_1}{Z_o}\right)} \quad (4.9)$$

Onde:

V_2 velocidade do vento na altura desejada

V_1 velocidade do vento na altura de referência (medida)

H_2 altura desejada

H_1 altura de referência

Z_o comprimento da rugosidade

O comprimento de rugosidade ou parâmetro de rugosidade Z_o é uma medida da rugosidade aerodinâmica da superfície sobre a qual o perfil da velocidade do vento está sendo medido. A equação (4.9) aplica-se para “condições de estabilidade atmosférica neutra”, ou seja para o caso em que a superfície do solo não está nem mais quente nem mais fria, se comparada com a temperatura do ar [36].

A Tabela 4.1 apresenta valores típicos de comprimento de rugosidade para certos tipos de terrenos.

Tabela 4.1 Comprimentos de rugosidade para diferentes terrenos

Cumprimento de rugosidade (m)	Tipo de terreno
0.0002	Superfície d'água
0.0024	Terreno completamente aberto com superfície lisa
0.03	Área agrícola aberta e com prédios muito dispersos
0.055	Terreno agrícola com algumas casas de 8 metros de altura a distância aprox. de 1250m
0.1	Terreno agrícola com algumas casas de 8 metros de altura a distância aprox. de 500m
0.2	Terreno agrícola com muitas casas, arbustos e plantas de 8 metros de altura a distância aprox. de 250 m
0.4	Povoados, cidades pequenas, terreno agrícola com muitas árvores
0.8	Cidades maiores com prédios altos
1.6	Cidades grandes com arranha-céus

O modelo utilizado neste trabalho utiliza como intervalo de simulação padrão 1 hora, e serve-se da equação (4.9) para fazer a correção de velocidade do vento à altura da torre.

4.2.2.2 Parâmetros de saída

O parâmetro de saída do modelo da turbina eólica é a potência elétrica média a cada intervalo de tempo e a energia total gerada durante o período usado na simulação. Esta é calculada, para cada turbina, em função da sua curva de potência e da velocidade média do vento ajustada à altura do cubo. Se existem várias turbinas com características semelhantes, se utiliza um fator proporcional ao número de turbinas. O modelo não leva em conta as perdas provocadas pela alteração da velocidade e perfil do vento devido à proximidade das turbinas dentro de uma fazenda eólica.

4.3 Gerador Diesel AC

4.3.1 Descrição do modelo

Os geradores diesel são constituídos basicamente por um motor diesel acoplado a um gerador de energia elétrica e a uma excitatriz, e são as máquinas primárias mais amplamente utilizadas em sistemas híbridos remotos de pequeno e médio porte. Possuem diversas vantagens, tais como: são sistemas bem compactos, entram em carga num tempo muito pequeno, são de manutenção rotineira e de fácil operação. Porém, têm a desvantagem de serem ruidosos, poluentes, instáveis quanto aos custos dos combustíveis e de necessitarem de transporte freqüente do combustível (o que complica bastante seu uso em lugares remotos) [4].

Como mencionado anteriormente, o controlador supervisorio preocupa-se por extrair o máximo desempenho possível de um determinado sistema híbrido, realizando um despacho adequado das fontes de geração e otimizando a vida útil dos diversos componentes do sistema. Considerando que durante a vida útil de um motor diesel, o consumo de combustível representa em torno de 75% do total dos custos de operação, algumas restrições na operação dos geradores diesel, que afetam diretamente a eficiência e a manutenção dos mesmos, devem ser observadas pelo controlador.

As principais restrições na operação dos motores diesel são:

- *Potência mínima:* Os motores diesel não podem ser operados abaixo de uma determinada porcentagem de sua potência nominal tanto por questões de rendimento como de manutenção. Se operados continuamente com cargas baixas, problemas de manutenção especialmente em locais frios podem se apresentar. Devido à pobre combustão e as baixas temperaturas o motor não atinge a temperatura normal de trabalho, conseqüentemente o óleo que normalmente se queima no cilindro, só é aquecido e forma uma camada de sedimento na camisa do cilindro. Esta camada produz uma fumaça azul durante a operação do motor e é necessário submeter o motor a operações de manutenção para eliminá-la, ou na maioria das vezes, para substituir a camisa danificada. Geralmente a carga mínima permitida está em torno dos 30 a 40% da potência nominal [4] [9].
- *Tempo mínimo de funcionamento:* é o tempo mínimo durante o qual o motor diesel deve funcionar (sem interrupções) após ser ligado. Como se mencionou anteriormente, para evitar o acúmulo de depósitos nos cilindros do motor é útil manter a temperatura nominal de trabalho durante sua operação, conseqüentemente os motores diesel têm que ser operados por algum período de tempo mínimo uma vez que são ligados [1]. Em nossa simulação, o tempo mínimo de funcionamento é fixado em 1 hora (igual ao intervalo de simulação), tempo razoável para geradores de pequeno e médio porte.
- *Número de ligações e paradas:* sistemas de arranque são projetados para ligar os motores diesel um determinado número de vezes. Se o ciclo de ligações e paradas exceder este valor, manutenções periódicas nos componentes do sistema de arranque (motor elétrico, engrenagens, correias, bateria) serão necessárias [9].
- *Reserva girante:* um aspecto que deve ser levado em conta é que as possibilidades de sobrecarga de um motor diesel são muito limitadas e não excedem de 5 a 10% da potência de plena carga. Por esta razão, geradores diesel não trabalham muito perto da sua potência nominal, pois variações consideráveis de carga ou perda de alguma unidade geradora produziriam um blackout no sistema [4] [9]. A Tabela 4.2 cita como exemplos os valores de sobrecarga que, geralmente, são empregados pelas firmas fabricantes de motores diesel:

Tabela 4.2 - Valores de Sobrecarga Típicos [4]

Sobrecarga em % da potência nominal	Duração
6%	30 minutos
12.5%	5 minutos
até 20%	Oscilações momentâneas de carga

O consumo de combustível de um motor diesel pode ser estimado assumindo-se que este é uma função da potência gerada. Uma relação linear entre potência e consumo tem-se mostrado como uma boa aproximação para a maioria dos geradores diesel utilizados em sistemas híbridos de pequeno e grande porte [1]. A Figura 4.5 ilustra uma curva típica de consumo de combustível versus potência gerada para um motor diesel de pequeno porte. Neste gráfico pode-se observar o ajuste linear feito aos dados medidos.

O consumo de combustível é calculado pela seguinte equação [1]:

$$F = a + b.P \quad (4.10)$$

Onde:

F = consumo de combustível [unidades de combustível/hora]

P = potência fornecida pelo motor diesel [kW]

a = consumo de combustível em vazio [unidades de combustível/hr].

b = inclinação da curva consumo vs. potência [unidades de combustível/kWh].

Em toda a faixa operacional do motor diesel (0 kW até potência nominal) a relação entre o consumo e a potência não é exatamente linear. Porém, como se mencionou anteriormente, o motor diesel está restringido a trabalhar numa faixa acima dos 30% da potência nominal, fato que melhora a precisão dos resultados obtidos com a equação (4.10).

Figura 4.5 Curva de consumo típica de combustível com ajuste linear [1]

O parâmetro “b” pode ser calculado conhecendo-se o consumo de combustível a plena carga (c) mediante a equação (4.11):

$$b = \frac{c - a}{P_n} \quad (4.11)$$

Onde:

c = consumo de combustível a plena carga [unidades de combustível/hr].

P_n = potência nominal do motor diesel [kW]

4.3.2 Parâmetros de simulação

4.3.2.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada do modelo do gerador diesel são: potência nominal, potência mínima, consumo de combustível em vazio e consumo de combustível a plena carga. Adicionalmente para cada intervalo de simulação, será necessário ingressar no modelo a potência elétrica requerida do gerador.

Potência nominal (P_n): a potência nominal do gerador diesel é a carga de operação máxima aceitável em regime permanente, expressa geralmente em kW.

Potência mínima: a potência mínima que poder ser fornecida pelo gerador, sem comprometer sua vida útil. É expressa como porcentagem da potência nominal.

Consumo de combustível em vazio (a): é o consumo de combustível quando nenhuma carga é imposta ao gerador. Este parâmetro geralmente está especificado em “litro/hora” ou “kg/hora”.

Consumo de combustível a plena carga (c): é o consumo de combustível registrado quando o gerador trabalha a potência nominal. Este parâmetro deve ser expresso nas mesmas unidades que o “consumo de combustível em vazio”.

Potência elétrica requerida: para cada intervalo de simulação, o modelo calcula a potência média (kW) requerida dos geradores diesel para manter o balanço de energia.

4.3.2.2 Parâmetros de saída

As saídas do modelo são: a energia gerada, o consumo de combustível, o número de horas de operação e o número de ligações do motor.

Energia gerada: é a energia elétrica total fornecida por cada uma das unidades geradoras, expressa em kWh. Para cada intervalo da simulação, o modelo faz um somatório das energias geradas nos diferentes períodos, obtendo-se ao final da simulação, a energia total gerada por cada um dos geradores diesel.

Consumo de combustível: é o consumo de combustível total, de uma determinada unidade geradora, registrado durante todo o período de simulação. Para cada intervalo da simulação, o modelo faz um somatório dos consumos dos diferentes períodos. As unidades de consumo em que é fornecida esta saída, dependerá das unidades utilizadas nos parâmetros de entrada “a” e “c”.

Número de horas de operação: é o número de horas totais de funcionamento, de uma determinada unidade geradora, durante todo o período de simulação.

Número de ligações do motor: é o número de vezes em que uma determinada unidade geradora, foi ligada durante todo o período de simulação.

4.4 Bateria

4.4.1 Descrição do modelo

4.4.1.1 Conceitos gerais

Antes de apresentar o modelo matemático da bateria, alguns conceitos fundamentais sobre baterias são brevemente apresentados [37] [38]:

- Capacidade Nominal (q_{nom}): é a capacidade máxima, em amperes-hora (Ah), que pode ser extraída da bateria, sob condições padrões de descarga (temperatura e corrente).
- Regime de Carga/Descarga: é o parâmetro que indica a relação entre a capacidade nominal da bateria e a corrente na qual esta é carregada ou descarregada; este parâmetro é expresso em horas.
- Capacidade Máxima ($q_{\text{máx}}$): é a capacidade máxima, em amperes-hora (Ah), que podem ser extraídos de uma bateria completamente carregada, com um regime de descarga extremamente alto (com corrente infinitesimal).
- Estado de carga (SOC): é a relação entre a capacidade disponível e a capacidade máxima. $SOC = q / q_{\text{máx}}$.
- Profundidade de descarga (DOD): é a razão entre a energia removida de uma bateria e sua capacidade máxima, expressa como porcentagem. Dependendo do tipo de bateria, o valor de DOD pode ser tão alto como 80% (baterias de descarga profunda) ou pode ter valores baixos como 20%, típico das baterias chumbo-ácido utilizadas em automóveis.
- Eficiência: é a razão entre a carga extraída durante a descarga e a quantidade de carga necessária para restaurar o estado inicial de carga. Este parâmetro é dependente do estado de carga SOC e da corrente de carga e descarga.
- Vida útil: é o número de ciclos carga/descarga que uma bateria pode fornecer antes de perder o 20% da sua capacidade nominal.
- Tensão nominal de uma célula de chumbo-ácido: é por definição 2,0 V.
- Tensão final de carga: é a tensão na qual a bateria é considerada tecnicamente descarregada. Tensões menores indicam que a bateria foi descarregada além do permitido, comprometendo sua vida útil.

- **Tensão de flutuação:** também conhecida como tensão de recarga, é uma tensão acima da tensão de circuito aberto, acrescida apenas do necessário para carregar e manter o acumulador no estado de plena carga.
- **Carga de equalização:** é uma carga efetuada em um nível de tensão maior que o de operação normal (tensão de flutuação), realizada com a finalidade de promover a mistura do eletrólito e equalizar às tensões individuais entre os elementos e monoblocos da bateria.

As principais restrições na operação de baterias de chumbo-ácido são:

Profundidade de descarga: a vida útil de uma bateria depende fortemente da profundidade de descarga (DOD) atingida durante os ciclos de carga e descarga como é mostrado na Figura 4.6. Conseqüentemente, devem-se minimizar no possível as descargas profundas do banco de baterias [9].

Figura 4.6 Profundidade de descarga vs. Ciclos. Adaptada [9]

Estados de carga baixos: Outro problema que deve ser evitado é deixar a bateria com estados de carga (SOC) baixos por muito tempo. Se esta condição acontecer freqüentemente, cristais de sulfato aparecerão nas placas que se tornarão cada vez maiores e mais difíceis de desaparecerem com a recarga. Este fenômeno reduz permanentemente a capacidade de recarga das células [4].

Regime de carga: Há dois problemas associados com a recarga de uma bateria. O primeiro é que um processo de carga inadequado pode propiciar uma recarga insuficiente ao banco de baterias, diminuindo a sua capacidade; e o segundo e mais

grave, a recarga com níveis inadequados de tensão pode reduzir em mais de 50% a vida útil das baterias. Basicamente, o regime de carga deve ser incrementado conforme a bateria atinge sua capacidade nominal [38].

Carga de equalização: A utilização de baterias de chumbo-ácido requer uma carga de equalização a cada seis meses. O procedimento consiste em carregar a bateria mesmo que esteja carregada, a tensão constante, com valor da tensão de equalização de 6 a 12 horas [38].

Tensão de flutuação e equalização: A aplicação de uma tensão de flutuação incorreta prejudica a bateria. No caso da aplicação de uma baixa tensão de flutuação há problemas de recarga insuficiente e/ou sulfatação irreversível. A aplicação de uma alta tensão de flutuação gera uma maior perda de água, corrosão prematura da grade positiva e aumento da corrente de flutuação [38].

Temperatura: a temperatura de operação tem um impacto significativo tanto na vida útil como no desempenho de uma bateria. Quando a temperatura aumenta, a capacidade total também aumenta. Isto é claramente uma vantagem porém, acarreta alguns inconvenientes tais como o aumento da taxa de auto-descarga, redução do ciclo de vida e sulfatação acelerada em baterias que não estão totalmente carregadas. As baterias não devem ser operadas continuamente acima de 40°C; caso contrário, ocorrerão danos permanentes nas placas [38].

4.4.1.2 Métodos de Carga de Baterias de Chumbo-Ácido

Os métodos de carga das baterias de chumbo-ácido são diferenciados conforme a característica de corrente e tensão. De uma maneira geral há três métodos bem definidos de carga, que se caracterizam por aplicar tensão constante, corrente constante ou potência constante. A partir desses três tipos é possível obter métodos variados, alterando durante o processo de carga a variável que se deseja controlar (tensão, corrente ou potência). Os métodos recomendados mesclam essas características para prolongar a vida útil das baterias. Eles possuem uma seqüência de carga dividida em etapas, nas quais são aplicadas tensões e/ou correntes constantes. Isto requer o uso de sensores de corrente, de tensão, de temperatura e de um algoritmo de carga [38].

O método de carga que se utilizou neste trabalho foi o “*método duplo nível de tensão*”, o qual é o mais apropriado para o carregamento de um banco de baterias sob condições de carga e descarga típicas de um sistema eólico isolado [39]. Este método consiste de 5 estágios, como mostrado na Figura 4.7 e não necessariamente todos eles devem ser realizados em seqüência.

No primeiro estágio, Recuperação (I-Phase), é imposta uma faixa de corrente de valor constante, com valor recomendado entre 10% e 20% da capacidade atual da bateria, até que a tensão chegue à tensão de equalização. Neste estágio tipicamente se alcança um estado de carga em torno de 70%.

Figura 4.7 Processo de recarga usando o método duplo nível de tensão.
(Adaptado de [39])

O segundo estágio, Carga Rápida (Boost Charge), mantém a tensão de equalização sobre a bateria durante 2 horas. O limiar de tensão de equalização (2,40 V em cada célula) sugere o fim do processo de injeção de corrente e a estabilização da tensão na bateria. Isso faz com que a corrente diminua rapidamente a um valor de manutenção de carga. Estas duas etapas (Recuperação + Carga Rápida) combinadas é o processo de carga mais freqüentemente realizado por carregadores de baterias em sistemas isolados com energia renovável, devido a sua curta duração e aos altos estados de carga atingidos (entre 85 e 90%). Após este estágio, a bateria está pronta para atender a carga, começando um novo ciclo de carga e descarga.

O terceiro estágio, Carga Total (Full Charge), deve se realizar somente a cada 14 dias. Esta etapa mantém a tensão de equalização durante 5 horas ao invés de apenas 2 horas, como na Carga Rápida. O objetivo é alcançar estados de carga de aproximadamente 95% e remover qualquer efeito negativo ocasionado pelos níveis de carga relativamente baixos resultantes do processo de Recuperação + Carga Rápida.

O quarto estágio, Equalização (Equalization Charge), é realizado a cada 6 meses e consiste em manter uma tensão de flutuação sobre a bateria durante 10 horas. Este processo garante uma recarga de 100%.

Finalmente, um quinto estágio, Flutuação (Float Phase), permite manter a carga da bateria durante os períodos de excesso de energia disponível. Esta fase garante manter um estado de carga de 100%, evitando-se os problemas de sulfatação devido às baterias ficarem muito tempo sob o mesmo estado de carga.

4.4.1.3 O modelo KiBaM

Existem vários modelos desenvolvidos para a simulação de baterias, cada um deles com suas vantagens e desvantagens. Nesta dissertação foi escolhido o modelo “*Kinetic Battery*” (KiBaM) desenvolvido na Universidade de Massachussetts. O KiBaM foi escolhido pelas seguintes razões [40]:

- O KiBaM não requer dados obtidos em testes detalhados aparte dos dados supridos pelo fabricante. Testes adicionais são muito custosos. Os valores nominais da bateria junto com as curvas de tensão e capacidade, a corrente constante, são suficientes para calcular os parâmetros requeridos.
- O KiBaM foi desenvolvido com particular enfoque a sistemas híbridos do tipo eólico-diesel-bateria.
- Embora o KiBaM não tenha incorporado o efeito da temperatura dentro do modelo matemático, pode-se assumir que na maioria dos sistemas híbridos as baterias são colocadas em instalações acondicionadas para elas, onde mudanças drásticas de temperatura não são esperadas.

- O KiBaM tem a mesmo grau de precisão que os outros modelos, mais complexos.
- O modelo é relativamente simples e fácil de entender, com poucas constantes a se determinar.

No modelo KiBaM a bateria é vista como uma fonte de tensão em série com uma resistência. A resistência interna é assumida constante e a tensão interna varia com a corrente e o estado de carga como se vê na Figura 4.8 [37].

A tensão terminal é dada por:

$$V = E - I.R_o \quad (4.12)$$

No modelo, a convenção é que a corrente de descarga é positiva e a corrente de carga é negativa. O modelo é composto de três partes principais que são: modelo de capacidade, modelo de tensão e modelo de carga transferida.

Figura 4.8 Diagrama esquemático da bateria. Adaptado [37]

Modelo de capacidade: O modelo se fundamenta no conceito de que apenas uma parte da capacidade da bateria está disponível para o atendimento imediato da carga, sendo que o resto é quimicamente retido. Para compreender este aspecto, é útil imaginar que a carga da bateria é contida em dois reservatórios, como se mostra na Figura 4.9.

- Reservatório1, com largura c , contem a capacidade imediatamente disponível $q1$.
- Reservatório 2, com largura $1-c$, contem a capacidade quimicamente retida $q2$.

Note, que a área total dos reservatórios é igual a 1. Deste modo, a capacidade é medida pelo volume dos reservatórios. A capacidade total (q) da bateria, em qualquer tempo, será igual à soma da capacidade disponível (q_1) e a capacidade retida (q_2) [37].

$$q = q_1 + q_2 \quad (4.13)$$

Figura 4.9 Modelo KiBaM da bateria [37]

A razão de fluxo de carga entre os dois reservatórios é dada pelo parâmetro k' e a diferença na altura h_1 e h_2 . O parâmetro “ c ” é conhecido como a *relação de capacidades*, e corresponde à fração da carga total na bateria imediatamente disponível [41].

As equações que descrevem o modelo KiBaM são [37]:

$$I = -\frac{dq_1}{dt} - \frac{dq_2}{dt} \Rightarrow \frac{dq_1}{dt} = -I - \frac{dq_2}{dt} \quad (4.14)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k' \cdot (h_1 - h_2) \quad (4.15)$$

A altura de cada reservatório é calculada de acordo com as equações seguintes:

$$h_1 = \frac{q_1}{c} \quad h_2 = \frac{q_2}{1-c} \quad (4.16) \quad (4.17)$$

Por simplicidade uma nova constante “k” é definida como:

$$k = \frac{k'}{c.(1-c)} \quad (4.18)$$

Substituindo a equação (4.16) e (4.17) em (4.14) e (4.15) se tem:

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k.(1-c)q_1 + k.c.q_2 \quad (4.19)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k.(1-c)q_1 - k.c.q_2 \quad (4.20)$$

Quando as equações (4.19) e (4.20) são resolvidas pelo método de Laplace, a capacidade da bateria, como função da corrente constante I, pode ser encontrada pela seguinte expressão:

$$q_{\max}(I) = \frac{q_{\max}.k.c.T}{1 - e^{-k.T} + c.(k.T - 1 + e^{-k.T})} \quad (4.21)$$

Onde,

$q_{\max}(I)$ = máxima capacidade que pode ser extraída a corrente constante I [Ah]

I = corrente constante de carga ou descarga [A]

T = tempo de carga ou descarga, definido por $T = \frac{q_{\max}(I)}{I}$ [h]

$q_{\max}$ = capacidade máxima [Ah]

As três constantes, $q_{\max}$, k , c podem ser encontrados diretamente em catálogos ou calculados das curvas de carga e descarga fornecidas pelos fabricantes através de métodos não-lineares de ajuste de curvas (non-linear curve fitting methods). Os dados dos fabricantes geralmente são disponíveis unicamente para a condição de descarga, mas pode-se assumir que as constantes têm os mesmos valores tanto para carga como descarga [1].

A equação (4.21) foi derivada assumindo-se correntes constantes durante todo o tempo de descarga T , o qual tipicamente é de várias horas. Porém, nossa simulação utiliza intervalos de tempo de 1 hora, pelo qual é necessário discretizar o modelo. Em geral, se assumirá que a corrente de carga ou descarga durante todo o intervalo de simulação é constante. Deste modo, a carga disponível (q_1) e a carga retida (q_2) ao final de cada intervalo de tempo será:

$$q_1 = q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - 1)(1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} - \frac{I \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k} \quad (4.22)$$

$$q_2 = q_{2,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot (1 - c)(1 - e^{-k \cdot \Delta t}) - \frac{I \cdot (1 - c)(k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k} \quad (4.23)$$

Onde,

q_1 = carga disponível ao final do intervalo [Ah]

q_2 = carga retida ao final do intervalo [Ah]

$q_{1,0}$ = carga disponível ao início do intervalo [Ah]

$q_{2,0}$ = carga retida ao início do intervalo [Ah]

I = corrente de carga/descarga constante durante todo o intervalo [A]

Δt = intervalo de simulação [h]

q_0 = carga total ($q_0 = q_{1,0} + q_{2,0}$) ao início do intervalo [Ah]

Modelo de tensão: Esta parte do modelo provê a magnitude da tensão terminal como uma função de:

- O estado de operação da bateria (carga ou descarga).
- O estado de carga da bateria (SOC).
- A resistência interna da bateria (R_o).
- A magnitude da corrente de carga ou descarga.

O modelo é capaz de prever a queda de tensão lenta (linear) durante a primeira etapa de descarga e a queda de tensão rápida ao final, quando a bateria está próxima ao estado final de carga [37].

No modelo KiBaM, se assume que a tensão interna “E” varia de acordo com a seguinte expressão:

$$E = E_0 + A.X + \frac{C.X}{(D - X)} \quad (4.24)$$

Onde,

E_0 = tensão interna extrapolada para corrente zero de uma bateria completamente carregada (após o transitório inicial) [V].

A = parâmetro que reflete a variação linear inicial da tensão interna com o SOC [V].

C, D = parâmetros que refletem o decremento ou incremento da tensão quando a bateria é progressivamente carregada ou descarregada [V].

X = capacidade máxima normalizada [Ah].

A capacidade máxima normalizada, X , durante a carga é definida em termos da carga na bateria por:

$$X = \frac{q}{q_{\max}(I)} = \frac{(q_1 + q_2)}{q_{\max}(I)} \quad (4.25)$$

Na descarga, X , é definida em termos da carga removida por:

$$X = \frac{(q_{\max} - q)}{q_{\max}(I)} = \frac{[q_{\max} - (q_1 + q_2)]}{q_{\max}(I)} \quad (4.26)$$

Como se pode observar, o modelo de tensão está caracterizado por quatro parâmetros, E_0 , A , C , D . Eles também podem ser determinados por métodos não-lineares de ajuste de curvas (non-linear curve fitting methods) aplicados aos testes

de carga e descarga fornecidos pelos fabricantes. Ao contrário do modelo de capacidade, os parâmetros de tensão são melhor determinados se calculados em separado para as condições de carga e descarga. Conseqüentemente, na realidade, se tem oito parâmetros que definem o modelo; quatro para carga e quatro para descarga [37].

Modelo de carga transferida: a carga transferida à ou pela bateria, durante um intervalo de tempo, depende da potência disponível ou requerida respectivamente; e também do SOC e a tensão nominal da bateria. No modelo, a cada intervalo de simulação, é necessário calcular previamente a potência máxima que a bateria pode suprir ou receber durante o próximo intervalo de simulação.

Como o modelo está baseado na corrente de carga ou descarga da bateria, se assume por simplicidade que durante todo o intervalo da simulação, a tensão nos terminais da bateria permanece constante. Assim, a corrente que se deseja extrair da bateria se pode calcular com a seguinte expressão [1]:

$$I_d = \frac{P_{requerida}}{V} \quad (4.27)$$

Onde,

I_d = corrente constante desejada durante todo o intervalo de tempo [A]

$P_{requerida}$ = potência ativa requerida durante todo o intervalo de tempo [W]

V = tensão nos terminais da bateria [V]

Conseqüentemente, para verificar se a bateria tem a carga suficiente para atender a corrente desejada durante todo o intervalo (Δt), calcula-se a máxima corrente ($I_{d,max}$) que a bateria pode fornecer. Assume-se que ao final do período $q_1 = 0$.

$$I_{d,max} = \frac{k \cdot q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad (4.28)$$

A máxima carga que pode ser transferida durante o intervalo de tempo é portanto: $I_{d,\max} \cdot \Delta t$. Se a carga requerida for maior do que este máximo, a bateria só poderá suprir $I_{d,\max} \cdot \Delta t$, e o resto da demanda deverá ser atendido por outras fontes.

Similarmente para a carga, se existe uma potência em excesso, a corrente de carga será:

$$I_C = \frac{P_{\text{excesso}}}{V} \quad (4.29)$$

Onde,

I_C = corrente constante desejada durante todo o intervalo de tempo [A]

P_{excesso} = potência ativa fornecida durante todo o intervalo de tempo [W]

V = tensão nos terminais da bateria [V]

Deve-se mencionar que no processo de carregamento da bateria, I_C será um valor negativo. A máxima corrente de carga, $I_{C,\max}$, é calculada com base na máxima energia que a bateria pode receber num determinado intervalo de tempo com a seguinte expressão:

$$I_{C,\max} = \frac{-k \cdot c \cdot q_{\max} + k \cdot q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad (4.30)$$

Se I_C for maior do que $I_{C,\max}$, a bateria só poderá ser carregada com uma carga igual a $I_{C,\max} \cdot \Delta t$; o resto deverá ser utilizado por cargas secundárias ou dissipado.

Vida útil da bateria: pode ser estimada utilizando-se as curvas de vida útil fornecidas pelo fabricante junto com um algoritmo de contagem de ciclos que determina os ciclos completos ocorridos no SOC da bateria. Deve-se mencionar que o modelo de bateria implementada neste trabalho, não é capaz de estimar a vida útil

da bateria diretamente a partir dos dados de entrada. Em seu lugar, utilizou-se o software “KiBaM Battery Model” desenvolvido pela Universidade de Massachusetts (Umass) e melhorado como parte do projeto Benchmarking: “*Modelagem da vida útil da bateria*”. A seguir se explica brevemente a metodologia utilizada pelo software “KiBaM Battery Model” .

As curvas de vida útil geralmente relacionam o número de ciclos *completos* que uma bateria pode fornecer, antes de perder os 20% da sua capacidade nominal, em função da profundidade de descarga. Entende-se que a bateria completa um ciclo quando o estado de carga retorna ao seu valor inicial, após ter atingido a máxima profundidade de descarga e ser carregada novamente. Devido à condição variável dos ventos, num sistema híbrido eólico-diesel-bateria não é possível ter ciclos completos de carga e descarga da bateria. Deste modo, não se pode estimar a vida útil do banco de baterias aplicando simplesmente a curva de vida útil fornecida pelo fabricante. Quando a bateria é submetida a ciclos irregulares de carga e descarga, um algoritmo de contagem de ciclos é adicionado ao cálculo da vida útil [42].

Um aspecto importante, que é tomado em conta pelo algoritmo de contagem, é que a perda da vida útil de uma bateria é principalmente uma função da profundidade de descarga e não do SOC atingido. Por exemplo, o efeito ocasionado num ciclo completo na faixa de 10% até 30% do SOC, é aproximadamente igual ao ocasionado num ciclo completo na faixa de 50% até 70% do SOC. Conseqüentemente, o nosso algoritmo de contagem dará mais prioridade à profundidade de descarga do que ao SOC atingido [42].

Como um primeiro passo na estimação da vida útil, se determina uma equação matemática aproximada que melhor se ajuste à curva de vida útil (empírica) fornecida pelo fabricante (Figura 4.10). Isto também é feito através de métodos não-lineares de ajuste de curvas (non-linear curve fitting methods). A forma da equação que melhor se ajusta é do tipo duplo exponencial [42]:

$$C_F = a_1 + a_2 \cdot e^{a_3 \cdot R} + a_4 \cdot e^{a_5 \cdot R} \quad (4.31)$$

Onde,

C_F = número de ciclos

a_i = constantes de ajuste

R = faixa do ciclo (profundidade de descarga do ciclo)

A fração de vida útil utilizada durante um determinado ciclo é dada pela expressão $\frac{1}{C_F}$. Quando a somatória das frações dos diferentes ciclos de carga e descarga atinge o valor 1, se assume-se que a vida útil da bateria acabou, e que deve ser substituída por outra.

Como mencionado, num sistema híbrido eólico-diesel-bateria, freqüentemente a bateria está sujeita a ciclos irregulares de carga e descarga, pelo qual não se pode utilizar a equação (4.31) diretamente para estimar a vida útil da bateria. Assim, como um segundo passo na estimação da vida útil, aplica-se o algoritmo de contagem.

O algoritmo é aplicado à série temporal dos estados de carga da bateria em duas etapas. A primeira consiste em identificar os pontos altos e baixos relativos (picos e vales), tendo como resultado, uma nova e mais curta série temporal dos estados de carga. A segunda etapa consiste em encontrar ciclos individuais dentro da nova série de picos e vales. Após os ciclos individuais serem identificados, eles são classificados em intervalos. Os intervalos correspondem a diferentes faixas de profundidade de descarga, independentemente do estado de carga atingido.

Figura 4.10 Curva de vida útil de uma bateria [42]

Por exemplo, uma descarga que partindo de 10% de SOC atingiu o 30% de SOC e voltou à condição inicial (10% de SOC), será classificada dentro do mesmo intervalo do que outra que partindo de 50% de SOC atingiu o 70% de SOC e voltou à condição inicial (50% de SOC). A faixa total de descarga é dividida geralmente em 20 intervalos iguais, sendo que o ultimo intervalo corresponde a uma descarga e recarga completa da bateria. Identificados os intervalos, realiza-se uma contagem do número de ciclos individuais e aplica-se a equação (4.31) para estimar a vida útil da bateria.

4.4.2 Parâmetros de simulação

4.4.2.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada do modelo são:

- A capacidade máxima ($q_{\max}$)
- A relação de capacidades (c)
- A constante KiBaM (k)
- As quatro constantes de carga do modelo de tensão (E_0, A, C, D)
- As quatro constantes de descarga do modelo de tensão (E_0, A, C, D)
- A resistência interna da bateria (R_o)
- O mínimo SOC permitido.
- O número de baterias em paralelo que formam o banco de baterias.
- O número de baterias em série que formam o banco de baterias.
- A potência fornecida ou recebida pela bateria a cada intervalo de simulação.

As constantes dos modelos de capacidade e tensão, são calculadas mediante a utilização do software “KiBaM Parameter Finder” desenvolvido pela Universidade de Massachusetts (Umass) [42].

4.4.2.2 Parâmetros de saída

Os parâmetros de saída do modelo são:

- A tensão nos terminais da bateria durante todo o intervalo de tempo [V].
- A corrente fornecida ou recebida durante todo o intervalo de tempo [A]
- O estado de carga (SOC) ao final do intervalo de tempo [%].
- A máxima potência de carga ou descarga permitida durante todo o intervalo de tempo [A]

4.5 Carga dissipadora

4.5.1 Descrição do modelo

Como se mencionou no capítulo 2, uma carga dissipadora é um dispositivo utilizado para consumir a potência ativa que não pode ser usada pelas cargas primárias ou secundárias nem pelo sistema de armazenamento. Isto acontece, por exemplo, quando se tem pouca demanda, muita energia renovável e o sistema de armazenamento esta cheio. Sendo a carga dissipadora um aparelho elétrico (geralmente composto por resistores), esta é modelada como um componente separado do sistema híbrido. A potência em excesso a ser dissipada é calculada através de um balanço de energia da seguinte forma:

$$L_D = W + D \pm B - L_C \quad (4.32)$$

Onde,

L_D = potência a ser dissipada [kW]

W = potência gerada pela turbina eólica [kW]

D = potência gerada pelos geradores diesel [kW]

$+ B$ = potência suprida pelo banco de baterias [kW]

$- B$ = potência consumida para carregar o banco de baterias [kW]

L = demanda do sistema [kW].

4.5.2 Parâmetros de simulação

4.5.2.1 Parâmetros de entrada

O único parâmetro de entrada do modelo é o excesso de potência a ser dissipado para cada intervalo de tempo da simulação [kW].

4.5.2.2 Parâmetros de saída

As saídas do modelo são:

- A energia total dissipada [kWh] durante toda a simulação.
- A máxima potência dissipada [kW] durante toda a simulação.

5 SIMULAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento e a modelagem do sistema de controle supervisorio. O algoritmo de controle foi desenvolvido usando uma combinação de redes neurais, lógica neuro-fuzzy e outras técnicas de lógica booleana convencional.

O objetivo é abordar primeiramente o estado da arte das estratégias de controle utilizadas em sistemas híbridos, e no que diz respeito ao sistema de controle supervisorio, fazer uma análise das funções que os equipamentos atualmente disponíveis no mercado são capazes de realizar. Esta etapa é importante, pois duas das estratégias analisadas servirão como ponto de comparação para avaliar o desempenho do controlador supervisorio proposto.

Em seguida, apresenta-se o desenvolvimento e a modelagem da estratégia de controle do supervisorio, utilizando-se as ferramentas computacionais conhecidas como “adaptive neuro-fuzzy inference system”, que auxiliam na construção e treinamento de sistemas inteligentes.

Então se apresentam os resultados das simulações feitas no ambiente MATLAB/SIMULINK, onde os modelos dos componentes do sistema híbrido apresentados no capítulo 4, a estratégia do controlador supervisorio inteligente e mais duas estratégias de controle comumente utilizadas em sistemas híbridos; foram carregadas para fazer uma comparação entre as mesmas do ponto de vista de desempenho técnico.

No final do capítulo é feita uma análise econômica utilizando a figura de mérito do custo de ciclo de vida (CCV), a fim de determinar qual das estratégias de controle é mais atrativa economicamente.

5.1 Estratégias de Controle

As estratégias de controle para sistemas híbridos visam otimizar a operação reduzindo o custo da energia gerada. Este objetivo pode ser alcançado minimizando o consumo de combustível, aproveitamento de melhor forma a energia proveniente das fontes renováveis, maximizando a vida útil do banco de baterias, gerenciando o atendimento das cargas, entre outros. Os principais fatores que determinarão uma operação ótima de um sistema eólico-diesel-bateria, são as formas de utilização do grupo gerador e do banco de baterias, ou seja, a pergunta que se deve fazer é: quando e como o grupo gerador deve ser conectado ao sistema e como deve ser gerenciada a energia do banco de baterias?

A resposta para “como” se deve conectar o grupo gerador ao sistema depende, basicamente, da configuração do sistema (série, paralelo ou híbrido), enquanto que a resposta para “quando” se deve conectar, depende da estratégia de controle adotada. A estratégia de utilização do banco de baterias pode priorizar o uso das baterias ou utilizá-las apenas para reduzir picos de carga e flutuações [22].

Devido a grande quantidade de variáveis envolvidas na otimização da operação de um sistema híbrido, existem muitas possibilidades de se criar estratégias de controle. Como exemplo, softwares de simulação do desempenho de longo prazo de sistemas híbridos como o Hybrid2 [43], oferecem ao usuário a possibilidade de testar até 180 combinações diferentes de possíveis estratégias de controle, sendo que muitas delas poderiam ser não recomendadas para determinadas configurações de sistemas híbridos, ou até mesmo impraticáveis, devido a problemas de estabilidade do sistema.

Apesar da estratégia de controle ser um ponto fundamental para se obter o melhor aproveitamento dos recursos renováveis, até hoje não foram feitos estudos significativos nesta área, levando a uma falta de consenso nas conclusões feitas pelos pesquisadores acerca deste tema. De particular interesse e controvérsia é a possibilidade de utilizar a energia do grupo gerador diesel para carregar as baterias. Alguns autores chegam a descartar a utilização do gerador diesel para carregar o banco de baterias, concluindo que o desempenho do sistema nestas circunstâncias

é pobre demais. Porém, existem diversos trabalhos publicados que indicam justamente o contrário; que o desempenho do sistema pode ser otimizado com a utilização do grupo gerador diesel para o carregamento do banco de baterias [22]. Possivelmente esta diferença de opiniões seja justificada por análises econômicas, já que dependendo do custo do combustível diesel, incluindo a manutenção, pode ser bom ou não ligar o gerador para carregar o banco de baterias.

Este trabalho, pelo contrário, visa desenvolver um algoritmo de controle inteligente e modular de forma a permitir que o mesmo controlador supervisor possa ser utilizado em vários sistemas híbridos de configurações e tamanhos diferentes. A estratégia de controle deve-se basear em critérios básicos e “universais” do funcionamento de sistemas híbridos de energia.

Por esta razão somente serão analisadas brevemente, três das estratégias de controle mais utilizadas em sistemas híbridos do tipo eólico-diesel-bateria. Duas delas, servirão como ponto de comparação para avaliar o desempenho do controlador supervisor proposto.

A estratégia de despacho que pode ser considerada a mais simples é aquela onde o gerador diesel é acionado automaticamente quando a bateria atinge um certo nível mínimo de tensão, determinado pela sua profundidade máxima de descarga. Uma vez acionado, o gerador permanece conectado ao sistema até que o estado de carga do banco de baterias atinja um determinado valor. Devido à simplicidade do sistema, geralmente este controle é realizado pelo carregador do banco de baterias através do monitoramento da tensão CC [14] [22]. Esta estratégia será referida daqui por diante como estratégia “*sem supervisor*”. O fluxograma de controle é apresentado no ANEXO A.

Uma estratégia um pouco mais sofisticada é a que também leva em consideração a potência demandada no instante do acionamento do grupo gerador. Neste caso, o gerador é acionado quando o estado de carga do banco de baterias está baixo ou quando a potência demandada pelas cargas é muito elevada. O valor de potência no qual o grupo gerador deve ser acionado, potência crítica, é determinada por um critério que estabelece uma relação entre o custo da energia das baterias e o custo

de operação do grupo gerador [22]. Existe na atualidade inversores/carregadores de bateria que podem ser programados para realizar este tipo de controle, não sendo necessária a utilização de um controlador supervisor específico.

Finalmente, uma outra estratégia, que pode ser considerada uma melhoria da estratégia anterior, é aquela que leva em consideração, além da demanda e o estado de carga do banco de baterias, a potência eólica disponível e o tempo de funcionamento mínimo do motor diesel (Minimum Diesel Runtime). Esta estratégia tem dois objetivos principais. Por um lado, visa diminuir as manutenções periódicas do motor diesel, levando em consideração o tempo mínimo de funcionamento do motor. Por outra parte, tenta aumentar a vida útil da bateria, despachando-a unicamente quando existe uma grande contribuição, para atender a demanda, por parte da(s) turbina(s) eólica(s); evitando-se assim descargas profundas do banco [14]. A implementação desta estratégia requer a utilização de um controlador supervisor, e será referida daqui por diante como estratégia com “*controlador supervisor básico*”. O fluxograma de controle é apresentado no ANEXO B.

5.2 Sistemas de controle

Os componentes de um sistema híbrido já apresentam um alto nível de maturidade tecnológica, encontrando-se diversas opções de produtos confiáveis no mercado. Os componentes de geração como a turbina eólica e o grupo gerador, já estão disponíveis no mercado há diversos anos. Já os componentes de controle e condicionamento de potência para geradores solares, banco de baterias e turbinas eólicas tiveram seu desenvolvimento consolidado apenas nos últimos anos. Sistemas de controle supervisor para sistemas híbridos, no entanto, estão ainda em desenvolvimento [22] [23].

No atual estado da arte existem duas formas de abordar o problema do controle de sistemas híbridos: desenvolver um controlador supervisor específico para cada sistema ou utilizar inversores/condicionadores de potência com lógica supervisória embarcada, disponíveis no mercado.

No primeiro caso, o controlador supervisor é concebido para atender os requisitos de um determinado local. É considerado um trabalho altamente especializado de projeto de engenharia, desenvolvido com componentes comerciais de controle e automação, como CLPs, microcomputadores industriais, redes de comunicação com protocolos próprios, etc. Neste caso, o sistema supervisor tem hardware próprio não sendo parte do sistema condicionador de potência. A vantagem deste tipo de abordagem é a flexibilidade enquanto à configuração do sistema e aplicação de estratégias de controle, porém, apresenta como desvantagem altos custos de projeto e implementação (unicamente firmas especializadas podem desenvolver esta tarefa), além disso, mudanças nas características do sistema como crescimento da demanda ou substituição de componentes antigos por outros mais eficientes, se não são inicialmente levadas em consideração durante a etapa do projeto do controlador, requerem uma completa reestruturação do sistema [23].

No caso de inversores/condicionadores de potência com lógica supervisória embarcada, o inversor e o controle supervisor são uma única entidade, implementados num hardware único, sendo que as tarefas de supervisão e controle dinâmico estão associadas. O conhecimento de especialistas em sistemas híbridos é usado para determinar a lógica do sistema supervisor, onde algumas combinações de componentes (configuração do sistema) são controladas de acordo com regras pré-definidas de operação (estratégia de controle). Neste caso, um apropriado dimensionamento do sistema é importante para garantir a eficiência do sistema em diferentes aplicações [23].

Existe no mercado alguns equipamentos, que variam tanto em tamanho como em complexidade. Os equipamentos mais simples são basicamente inversores/carregadores inteligentes de bateria. Com potências na faixa de poucas centenas de watts até poucos kilowatts, são fundamentalmente dispositivos que realizam a tarefa de gerenciamento do banco de baterias. Através do monitoramento da temperatura e de um processo de recarga multi-etapas, garantem uma recarga rápida e adequada do banco. Por outra parte, contam também com um circuito de proteção contra descargas profundas, que desliga o banco de baterias quando este atinge um determinado estado de carga baixo. A maioria destes inversores produz uma onda quadrada modificada, chamada geralmente de senoidal-modificada ou

quase-senoidal. Apesar de a grande maioria de aparelhos CA poder funcionar satisfatoriamente com este tipo de onda, existem algumas exceções, como por exemplo: impressoras laser, lâmpadas fluorescentes, amplificadores de áudio e até mesmo motores elétricos, que perdem eficiência ou simplesmente não funcionam com este tipo de onda [44].

Os equipamentos mais complexos geralmente produzem uma onda senoidal pura. Com potências na faixa de 1 até 5 kilowatts, estes inversores podem ser programados para realizar múltiplas tarefas. Funções típicas realizadas por estes aparelhos são [44]:

- Conexão ou desconexão das fontes renováveis.
- Conexão ou desconexão de carga.
- Gerenciamento do banco de baterias.
- Ligação automática de geradores diesel se o estado de carga da bateria é muito baixo ou se a demanda é muito alta.
- Sincronismo paralelo “inversor-gerador diesel”.

Até a década passada, este tipo de inversor era utilizado unicamente em configurações de sistemas híbridos onde todas as fontes de geração renováveis eram ligadas num barramento CC, com a bateria como componente central, como mostrado na Figura 5.1(a). Neste caso as cargas CA eram supridas por um único inversor. Porém, nos últimos anos, o conceito de modularidade foi incorporado nos condicionadores de potência, sendo que os novos inversores têm a capacidade de trabalhar em sincronismo paralelo, permitindo assim o acoplamento de todas as fontes de geração num barramento CA como mostrado na Figura 5.1(b) [45].

A utilização de inversores/condicionadores de potência, com lógica supervisória embarcada, apresenta como vantagem a facilidade de implementação, já que os sistemas de condicionamento e supervisão estão integrados. Além disso, os novos inversores modulares permitem a expansão do sistema, podendo-se incrementar facilmente novas fontes de geração para atender o incremento da demanda [39].

Como desvantagem está o fato de que se cria uma dependência supervisorio-inversor que dificulta a tarefa de supervisão, pois as decisões tomadas por este tipo de equipamento, esta baseada unicamente no monitoramento do banco de baterias. Qualquer decisão tomada pelo inversor, como o despacho do gerador diesel ou o corte de carga, está orientada unicamente a preservar a vida útil da bateria, pois não apresentam em seus algoritmos de supervisão nenhum método de registro histórico e previsão de geração ou consumo de energia; as decisões tomadas somente são baseadas em medições instantâneas de tensão ou frequência. Por esta razão, existe pouca ou nenhuma flexibilidade quanto à estratégia de controle adotada [39].

Figura 5.1 Comparação entre acoplamento CC e CA

Já o controlador supervisorio proposto, apresenta como vantagem a dissociação das tarefas de supervisão e controle dinâmico, sendo ao mesmo tempo modular, autônomo e inteligente; podendo ser integrado em qualquer arquitetura de geração e consumo, pois todas as variáveis de entrada do controlador estão em por unidade (p.u), reduzindo notavelmente o trabalho altamente especializado de projeto do sistema. Neste caso, o controlador supervisorio não unicamente toma decisões baseado no estado atual do banco de baterias, e sim, no estado de todos os componentes do sistema, melhorando o desempenho técnico do sistema híbrido como um todo.

As características, vantagens e desempenho do controlador supervisorio são mostradas com mais detalhe a seguir.

5.3 Desenvolvimento do algoritmo de controle do sistema supervisorio proposto

O algoritmo de controle foi desenvolvido usando uma combinação de redes neurais (RNA), lógica fuzzy e outras técnicas de lógica booleana convencional. A Figura 5.2 mostra o diagrama de fluxo da estratégia de controle.

Figura 5.2 Fluxograma da Estratégia de Controle

A estratégia de controle começa com o *Sistema Identificador*. Nesta etapa, parâmetros obrigatórios e opcionais são monitorados. Entre os parâmetros de leitura obrigatória encontram-se: demanda real do sistema, estado de carga da bateria, modo de operação atual do sistema e velocidade do vento. Outras variáveis

meteorológicas como: temperatura, umidade, pressão, etc. como será analisado mais adiante, só ajudam a melhorar os resultados do Módulo de Previsão, e são considerados parâmetros opcionais.

A seguir, três módulos são executados em ordem seqüencial: O módulo de Previsão, o módulo Neuro-Fuzzy e o módulo Lógico.

5.3.1 Módulo de Previsão

Como indicado pelo nome, este módulo é o encarregado de fazer as previsões de demanda e velocidade do vento. O conhecimento do comportamento futuro da carga assim como da velocidade do vento é de fundamental importância no planejamento do despacho dos geradores diesel num sistema híbrido. A previsão de curto prazo permite que o supervisor ajuste os diversos controles disponíveis para satisfazer a demanda do sistema, bem como gerenciar a utilização do banco de baterias e dos geradores diesel, evitando eventuais operações fora dos limites operacionais dos componentes, com a conseqüente redução de sua vida útil.

Várias abordagens têm sido aplicadas na área de previsão tais como: regressão linear, suavizamento exponencial, processos estocásticos, métodos de estado espacial e sistemas especialistas. Todavia, as RNA têm se afirmado como o melhor método na previsão de velocidade de vento e de demanda de curta duração, uma vez que elas não se baseiam em experiência humana, nem em modelos matemáticos analiticamente bem definidos [28] [46] [47].

Um dos grandes desafios no problema da previsão de carga, em sistemas de pequeno porte (menores que 100 kW), é tentar antecipar com a menor margem de erro possível a variação acentuada de demanda. Esta variação impossibilita realizar previsões, relativamente precisas, em intervalos de tempo muito longos. Neste trabalho se experimentaram intervalos de previsão de até 8 horas. Os testes mostraram que com previsões de demanda de 4 horas na frente, se obtém o melhor desempenho do sistema. Este valor é bastante razoável, tomado em consideração que um banco de baterias do tipo chumbo-ácido pode ser carregado até 85% do SOC em 4 horas, sem comprometer sua vida útil [38].

Os parâmetros de entrada que são levados em conta no Módulo de Previsão são valores de velocidade de vento e carga passados. Entretanto, para se obter uma maior precisão nas previsões, podem-se fornecer outras informações, como temperatura, umidade, pressão, radiação solar, entre outras. Artigos publicados nesta área mostram que, a velocidade do vento e a variação da curva de demanda, estão intimamente ligadas com a variação das condições de temperatura, umidade e radiação solar [28] [47].

Sendo assim, o Módulo de Previsão está formado basicamente por duas RNAs, do tipo perceptron multi-camadas (MLP). Uma delas é encarregada de fazer as previsões de demanda e a outra é encarregada da previsão da velocidade do vento. O treinamento dos MLP é realizado offline e se utiliza um banco de dados histórico do local que coleta informações de velocidades dos ventos e cargas passadas. Como mencionado no capítulo 3, o método de treinamento escolhido neste trabalho é o algoritmo Levenberg-Marquardt, do Neural Network Toolbox do MATLAB.

Utilizando-se a curva de potência da turbina eólica e as previsões de velocidade dos ventos, o módulo computa a potência elétrica gerada pela turbina eólica durante as próximas 4 horas. Para cada intervalo de tempo, calcula-se a razão entre a saída de potência estimada da turbina e a demanda prevista. A média aritmética dos quatro valores fornece um novo parâmetro, chamado de ***“previsão-4h”***, que permite avaliar a porcentagem da carga que pode ser suprida pela turbina eólica durante as próximas 4 horas.

A demanda prevista, uma hora na frente ***“previsão-1h”***, também forma parte das saídas do módulo de previsão. Os parâmetros, *previsão-4h* e *previsão-1h*, formam parte das entradas do módulo neuro-fuzzy e do módulo lógico respectivamente.

5.3.2 Módulo Neuro-fuzzy

É o módulo principal do algoritmo de controle, que através da base de conhecimento armazenada por meio de um conjunto de regras, é o responsável pela tomada de decisões, garantindo um bom desempenho global do sistema. É o ponto chave do sistema supervisor.

A utilização de funções fuzzy e de um tipo de computação baseada na regra composicional de inferência, com seus operadores associados, resulta em sistemas de decisão, estruturados no formato de uma base de regras nebulosas, adequados para a implementação de processos dedutivos, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem.

O maior problema encontrado no desenvolvimento de controladores fuzzy do tipo Mamdani, é a determinação do número e forma das funções de pertinência que melhor se ajustem aos requisitos do controlador. São necessários ajustes minuciosos e geralmente se requer o conhecimento de operadores experientes [25]. Por esta razão, para desenvolver o sistema de inferência fuzzy se utilizou o modelo *de Takagi-Sugeno*, no qual o conseqüente é representado por uma função das variáveis de entrada. A saída final é obtida pela média ponderada das saídas inferidas de cada regra. Os coeficientes da ponderação são dados pelos graus de ativação das respectivas regras. A vantagem do modelo Takagi-Sugeno é que permite desenvolver, de forma sistemática, as funções de pertinência e regras de inferência nebulosas, a partir de dados de entrada-saída [25].

5.3.2.1 Construção e Treinamento do Módulo Neuro-Fuzzy

Os parâmetros de entrada do Módulo Neuro-Fuzzy são os seguintes: demanda atual normalizada sobre a demanda máxima do sistema, “previsão 4h”, estado de carga da bateria (SOC) normalizada sobre a capacidade nominal do banco e o modo de operação atual do sistema. Estes parâmetros são obtidos tanto do *Módulo de Previsão*, quanto do *Sistema Identificador*. A saída defuzzificada do módulo sugere o melhor “*Modo de Operação*” do sistema híbrido, para o seguinte intervalo de tempo.

Existem ferramentas computacionais conhecidas como “adaptive neuro-fuzzy inference system”, que auxiliam na construção e treinamento de sistemas neuro-fuzzy do tipo Takagi-Sugeno, a partir de dados de *entrada e saída*. Neste trabalho se utilizou o “Fuzzy Logic Toolbox” do programa computacional MATLAB para gerar as funções de pertinência e regras de inferência [31].

Como já se mencionou no capítulo 2, uma das vantagens dos sistemas fuzzy é a capacidade de fornecer respostas a situações específicas, mesmo em condições novas ou inesperadas, fazendo com que tal comportamento seja "único" ou até mesmo considerado como "criativo". Sendo assim, os dados de “*entrada-saída*” necessários para o treinamento do módulo, foram obtidos a partir da simulação de somente 9 (nove) possíveis cenários representativos de operação do sistema híbrido. Os cenários simulados foram os seguintes:

- *Demanda= Alta & Previsão-4h= Baixa*

A prioridade é atender a carga principal sem carregar o banco de baterias, pois se tenta evitar sobrecarregar os geradores diesel. Um banco de baterias descarregado demanda muita potência do sistema e a contribuição de energia eólica é muito pouca. Independentemente do SOC da bateria, ela nunca é descarregada, pois se evita as descargas profundas devido às altas demandas que comprometem a vida útil da bateria.

- *Demanda= Alta & Previsão-4h= Média*

Supre-se a carga e ao mesmo tempo se carrega o banco de baterias. Se existe suficiente potência eólica para atender a carga e carregar a bateria, o motor diesel é desligado. Independentemente do SOC da bateria, ela nunca é descarregada, pois se evita as descargas profundas devido às altas demandas.

- *Previsão-4h= Alta*

Independentemente da porcentagem de demanda e do SOC da bateria, os geradores diesel são desligados uma vez que existe suficiente potencial eólico para atender a carga e carregar a bateria durante pelo menos as próximas 4 horas se for necessário.

- *Demanda= Baixa & SOC=Alto*

Independentemente da previsão-4h, os geradores diesel são desligados com o objetivo de evitar que os motores diesel trabalhem com cargas baixas, onde são ineficientes e apresentam problemas de carbonização. A bateria e a turbina eólica são responsáveis pelo suprimento de energia à carga.

▪ *Demanda=Baixa & SOC= Baixo*

Neste caso a decisão tomada depende do modo de operação anterior do sistema. Se no intervalo de tempo anterior a bateria e a turbina eólica estavam atendendo à carga, se mantém este modo de operação; economizando-se combustível e diminuindo o número de ligações e paradas dos motores diesel. Caso contrário, se a bateria estava sendo carregada, continua-se o processo de carregamento, ligando os motores diesel se for necessário. Uma bateria com SOC baixo demanda uma potência relativamente grande do sistema para ser carregada, o que contribui a evitar que os motores diesel trabalhem com baixas potências.

▪ *Demanda=Média & Previsão-4h= Baixa*

Os geradores diesel atendem a carga e ao mesmo tempo carregam o banco de baterias se for necessário. A bateria não é despachada devido a que com tão pouca contribuição eólica durante as próximas horas, o descarregamento é relativamente rápido, forçando o sistema a ligar e desligar os motores diesel constantemente.

▪ *Demanda=Média & Previsão-4h= Média & SOC=Baixo, Alto ou Muito Alto*

Os geradores diesel são desligados, pois existe grande contribuição por parte da turbina eólica durante as próximas horas, o que garante uma taxa de descarga baixa da bateria.

▪ *Demanda=Média & Previsão-4h= Baixa & SOC= Alto*

A decisão tomada depende do modo de operação anterior do sistema. Se no intervalo de tempo anterior a bateria e a turbina eólica estavam atendendo à carga, se mantém este modo de operação; caso contrário, se a bateria estava sendo carregada, continua-se o processo de carregamento, ligando os motores diesel. Este processo economiza combustível e diminui o número de ligações e paradas dos motores diesel.

▪ *Previsão-4h= Média ou Baixa & SOC= Muito Baixo*

Independentemente da porcentagem de demanda, os geradores diesel são ligados e o banco de baterias é carregado. Esta ação evita danificar a bateria ao ser operada abaixo de um determinado SOC dado pelo fabricante.

Os 9 (nove) cenários assim definidos, se baseiam em critérios básicos e universais, podendo ser aplicados em qualquer configuração de sistema híbrido eólico-diesel-bateria. Para poder representar cada cenário através de uma série de dados de *entrada-saída*, que possam ser utilizados para a construção e o treinamento sistematizado do módulo Neuro-Fuzzy, é necessário traduzir as expressões verbais utilizadas nas regras de inferência, como por exemplo *Demanda=Alta & Previsão-4h= Baixa*, em valores numéricos.

A determinação destes parâmetros é totalmente experimental, ou seja, variam-se os valores dos parâmetros de forma conveniente, até obter um bom desempenho do sistema. As várias simulações realizadas com ajuda do “Fuzzy Logic Toolbox” do programa computacional MATLAB, mostraram que o melhor resultado se obtém com os valores mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Parâmetros Fuzzy

DEMANDA [%]		Previsão-4h (Pot. Eólica/Demanda)		SOC [%]	
Alta	75 - 100	Alta	> 2,0	Muito Alto	85 - 100
Média	30 - 75	Média	1,0 - 2,0	Alto	70 - 85
Baixa	0 - 30	Baixa	0 - 1,0	Baixo	40 - 70
				Muito Baixo	20 - 40

Para cada um dos 9 (nove) cenários se geraram aleatoriamente 300 combinações possíveis dos valores de *entrada-saída* de acordo com a Tabela 5.1, obtendo-se no total um banco de dados de *entrada-saída* composto por 2700 valores.

Foram testadas várias arquiteturas de sistemas neuro-fuzzy, sendo a de melhor desempenho aquela formada por 81 regras de inferência, com funções de pertinência do tipo gaussiano para cada uma das quatro entradas do sistema. O algoritmo de treinamento utilizado foi o backpropagation sendo que o conjunto de dados *entrada-saída*, foi apresentado 300 vezes à rede.

A Figura 5.3 ilustra em forma de blocos a estrutura final do módulo Neuro-Fuzzy. A saída defuzzificada do módulo sugere um “*Modo de Operação*” do sistema híbrido, para o seguinte intervalo de tempo (t+1), que otimiza o desempenho do sistema.

5.3.3 Módulo Lógico

A tarefa principal deste módulo é garantir que tanto o banco de baterias como os geradores diesel trabalhem dentro de seus limites operacionais.

Devido a que as decisões tomadas pelo Módulo Neuro-Fuzzy estão baseadas em estimativas de demanda e velocidade dos ventos, é necessário desenvolver um sistema que garanta que, mesmo com previsões pouco precisas, o sistema continue a fornecer energia elétrica atendendo as restrições de operação dos componentes, dando confiabilidade ao sistema híbrido. Conseqüentemente este módulo tem a capacidade de alterar o *Modo de Operação* calculado pelo Módulo Neuro-Fuzzy, mudando a operação do sistema de um modo de otimização para um modo de segurança, caso seja necessário.

Figura 5.3 Módulo Neuro-Fuzzy

O módulo está formado por 2 blocos principais. No primeiro são aplicadas as restrições de operação da bateria e no segundo as restrições de operação do motor diesel, obtendo-se ao final, o "Modo Correto" de operação do sistema e a seqüência de despacho dos motores diesel.

5.4 Estudo de Caso

Para testar e avaliar o desempenho do controlador supervisor, os modelos matemáticos de todos os componentes do sistema híbrido eólico-diesel-bateria foram implementados no programa de simulações Simulink do MATLAB.

Medidas reais de carga e velocidades de vento foram utilizadas como dados de entrada para simulação. Utilizou-se um banco de dados histórico de demanda e dois bancos de dados históricos de velocidade de vento com características bem diferentes. O período de simulação compreendeu 4380 horas (meio ano).

Com o objetivo de estabelecer parâmetros palpáveis de comparação, mais duas simulações foram realizadas. A primeira utilizando a estratégia “*sem supervisor*” e a segunda utilizando a estratégia com “*controlador supervisor básico*” mostradas na seção 5.1. Com os resultados das simulações foi realizada uma análise comparativa entre as três estratégias de controle, a fim de determinar qual delas apresenta o melhor desempenho técnico e econômico.

5.4.1 Caracterização da carga

Como carga de teste, se utilizou o histórico de demanda elétrica do prédio “Centro de Divulgação Científica” do campus USP em São Carlos, SP. O banco de dados fornece, além dos valores de demanda, valores horários de temperatura e umidade do ar. As características são sumarizadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Característica da carga e parâmetros meteorológicos

	DEMANDA [kW]	Temp [°C]	Umidade [%]
Máxima	59.13	35.66	95.83
Mínima	3.00	5.07	18.11
Média	16.33	21.65	72.52
Desvio padrão	13.03	5.21	18.64

5.4.1.1 Previsão de carga

Existem dois aspectos básicos que devem ser considerados na modelagem de uma RNA que será utilizada na realização de prognósticos de séries temporais: a determinação do número de camadas e a determinação do número de neurônios. A determinação do número de neurônios é realizado em etapas, primeiro a camada de entrada e depois a camada oculta, uma vez que já se sabe que a camada de saída terá sempre quatro neurônios, que representam os valores de carga prognosticados quatro horas na frente.

Com o objetivo de fornecer à rede o maior número de informações possíveis utilizou-se os seguintes parâmetros de entrada:

- Valor da demanda medida no instante da previsão.
- 2 valores de demanda passada.
- Valor da temperatura ambiente medida no instante da previsão.
- 2 valores de temperatura passada.
- Valor da umidade medida no instante da previsão.
- 2 valores de umidade passada.
- hora da previsão.
- mês da previsão

Conseqüentemente a camada de entrada é composta por 11 neurônios. Já a camada oculta foi determinada de forma experimental. Os testes mostraram que a arquitetura formada por duas camadas ocultas com 11 e 24 neurônios respectivamente, foi a que obteve a melhor performance. A Rede neural utilizada foi do tipo MLP, com função de ativação sigmóide para as duas camadas ocultas, e do tipo linear para a camada de saída.

O desempenho das RNAs pode ser avaliado através da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). Contudo, é recomendável analisar a resposta da rede com mais detalhamento. Uma opção é realizar uma análise de regressão linear entre os dados medidos e os calculados pela rede. A análise fornece 3 parâmetros de avaliação. Os dois primeiros, ***m*** e ***b***, correspondem à inclinação e à interseção com o eixo *y*,

respectivamente, da regressão linear que melhor se ajuste aos dados que relacionam a saída calculada pela RNA com os dados medidos. Se a saída da rede for exatamente igual aos dados medidos, o valor de m seria 1 e o valor de b seria 0. O terceiro parâmetro, R , é o coeficiente de correlação entre os valores medidos e a previsão. No caso de ter uma previsão exatamente igual aos valores medidos, o valor de R seria 1 [29].

A Tabela 5.3 e a Figura 5.4 mostram os resultados obtidos para as previsões com: 1h (a), 2h (b), 3h (c) e 4h (d) de antecedência.

Tabela 5.3 Parâmetros de avaliação-Previsão de carga

	RMSE [kW]	r	m	b
Previsão 1h	2.29	0.984	0.972	0.485
Previsão 2h	2.92	0.975	0.954	0.732
Previsão 3h	3.19	0.970	0.942	0.887
Previsão 4h	3.28	0.968	0.939	0.969

Figura 5.4 Previsão de carga.

Como se esperava, os resultados mostram que quanto maior é o intervalo de previsão, menor é o desempenho da rede. A Figura 5.4 (d) mostra que para previsões 4 horas à frente, podem-se ter erros na faixa de 10 kW, que representa

16% da demanda máxima. Estes resultados validam a decisão tomada de limitar a 4 horas o horizonte de previsão do controlador. Ainda assim, devemos ressaltar que para previsões um passo à frente (1h), o desempenho da rede é muito bom, confirmado-se a capacidade das RNAs de realizar prognósticos acurados.

5.4.2 Caracterização dos ventos

Com o intuito de testar o performance do controlador, nas mais variadas situações, escolheu-se dois históricos de velocidade de vento, com características bem diferentes. Basicamente, o primeiro histórico corresponde a um local com pouco potencial eólico, enquanto que o segundo corresponde a um local com excelentes recursos eólicos. Os bancos de dados utilizados fornecem unicamente a velocidade do vento.

A Tabela 5.4 e a Figura 5.5 mostram as características dos dois locais.

Tabela 5.4 Características dos ventos

	Velocidade [m/s]	Velocidade [m/s]
Local	Sucurijú-Amapá	Finley ND - USA
Máxima	13.38	24.47
Mínima	0	0.86
Média	3.79	9.57
Desvio padrão	1.93	4.39

Figura 5.5 Características dos ventos

5.4.2.1 Previsão da velocidade dos ventos

A metodologia utilizada para determinar a arquitetura da rede é a mesma utilizada no caso da previsão da carga. Sendo assim, a camada de saída terá quatro neurônios, que representam os valores de velocidade prognosticados quatro horas à frente. Devido à falta de dados, os únicos parâmetros de entrada que são fornecidos à rede são:

- Valor da velocidade do vento medida no instante da previsão.
- 3 valores de velocidade passadas.
- hora da previsão.
- mês da previsão

Conseqüentemente a camada de entrada é composta por 6 neurônios. Os testes mostraram que a arquitetura formada por uma camada oculta apresentou os melhores resultados para os dois casos de estudo. Para o primeiro local (Sucuriú) obteve-se o melhor desempenho com 24 neurônios, enquanto que para o segundo local (Finley), se obteve o melhor performance com 20 neurônios. As Redes neurais utilizadas foram do tipo MLP, com função de ativação sigmóide para a camada oculta, e do tipo linear para a camada de saída.

O desempenho das RNAs foi avaliado através dos mesmos parâmetros utilizados anteriormente. A Tabela 5.5 e as Figura 5.6 e Figura 5.7 mostram os resultados obtidos para as previsões com: 1h (a), 2h (b), 3h (c) e 4h (d) de antecedência dos dois locais.

Tabela 5.5 Parâmetros de avaliação-Previsão de vento

	SUCURIJÚ - AMAPA				FINLEY - USA			
	RMSE [kW]	r	m	b	RMSE [kW]	r	m	b
Previsão 1h	0.62	0.947	0.902	0.378	1.52	0.938	0.883	1.150
Previsão 2h	0.75	0.920	0.851	0.571	2.17	0.868	0.762	2.290
Previsão 3h	0.81	0.907	0.831	0.643	2.59	0.806	0.663	3.250
Previsão 4h	0.86	0.895	0.809	0.727	2.91	0.747	0.568	4.140

Como se pode perceber após a análise dos 4 parâmetros de avaliação (RMSE, r, m e b), a previsão de velocidade dos ventos para Sucuriú é muito mais acurada que para Finley.

Figura 5.6 Previsão de velocidade de vento – Sucuriú-Amapá

Figura 5.7 Previsão de velocidade de vento – Finley-USA

Este fato reflete-se nas curvas mostradas na Figura 5.7, onde percebe-se facilmente a dificuldade que apresentou a rede em acompanhar a variação estocástica do vento, especialmente 4 horas à frente. Ainda assim, ressalta-se novamente que para previsões um passo à frente (1h), o desempenho da rede é muito preciso. Feito assim o treinamento offline, as RNAs são carregadas no “Módulo de Previsão”, do controlador supervisor.

5.4.3 Configuração do sistema

Para testar o controlador se escolheu a configuração tipo paralelo de sistema híbrido mostrada na Figura 5.8, pelas várias vantagens de eficiência e flexibilidade analisadas no capítulo 2. Três modos de operação são propostos e são descritos a seguir:

- Modo 1: O gerador diesel atende a carga e injeta potência no banco de baterias através do retificador AC/DC. Os switch 1 e 2 são fechados e os switch 3 e 4 abertos.
- Modo 2: O gerador diesel atende a carga e a turbina eólica injeta potência no banco de baterias. Unicamente o switch 1 é fechado.
- Modo 3: A turbina eólica e a bateria são responsáveis pelo suprimento de energia à carga. O banco de baterias pode fornecer ou receber potência dependendo da quantidade de energia eólica disponível e do estado de carga da mesma. Os switch 1 e 2 são abertos e os switch 3 e 4 fechados.

Figura 5.8 Configuração do sistema híbrido proposto.

5.4.4 Dimensionamento do sistema

Uma questão também fundamental para o desempenho de sistemas híbridos é o seu dimensionamento. Embora o controlador supervisor seja projetado para se adaptar a sistemas híbridos de diferentes potências, existem alguns critérios de dimensionamento e característica dos componentes que devem ser levados em conta com o intuito de garantir um ótimo desempenho do controlador supervisor.

Existem basicamente dois tipos de critérios de dimensionamento que devem ser considerados: os que são comuns a qualquer sistema híbrido eólico-diesel-bateria de pequeno porte, e aqueles que são resultado de restrições próprias do projeto do controlador supervisor proposto.

Quanto ao dimensionamento da(s) turbina(s) eólica(s), não existe nenhuma restrição própria do controlador. Neste caso a escolha do tamanho das turbinas dependerá das características eólicas do local. Existe uma série de formas de realizar este dimensionamento. Os métodos encontrados na literatura variam desde técnicas simples e pouco precisas, baseadas apenas em estimativas de demanda e velocidade de vento; até métodos muito mais complexos que consistem em realizar simulações sucessivas do comportamento do sistema durante um longo período de tempo, e que logicamente, fornecem resultados mais confiáveis e precisos [22].

Sendo que o alvo do presente trabalho não é a análise do dimensionamento de sistemas híbridos, e sim testar o controlador num sistema que esteja adequadamente dimensionado, se utilizou um método simples que permite realizar uma escolha adequada da(s) turbina(s) eólica(s), considerando unicamente o ponto de vista técnico.

O método utilizado evita, por um lado, o sub-dimensionamento do sistema por não atender às necessidades energéticas para o qual ele foi requerido; por outro lado, evita o sobre-dimensionamento do sistema que pode levar à inviabilidade econômica do projeto.

A metodologia utilizada consiste basicamente em determinar a demanda energética da localidade a ser atendida, e em função deste parâmetro, escolher uma ou várias turbinas eólicas que atendam uma determinada porcentagem desta demanda. Como mencionado anteriormente, pretende-se avaliar o desempenho do controlador em duas situações diferentes. Para o primeiro local (Sucurijú), que tem um baixo potencial eólico, se escolheu uma penetração eólica baixa (em torno de 30%), e para o segundo local (Finley), se escolheu uma penetração eólica alta (em torno de 80%). Para atender estes requisitos se determinou, através de simulações, que para o primeiro local se necessitam duas turbinas eólicas de 50 kW de potência nominal, enquanto que para o segundo local se necessita uma turbina eólica de 20 kW de potência nominal.

Já para o dimensionamento do banco de baterias, do grupo gerador diesel e da carga dissipadora, existem restrições próprias relacionadas ao projeto do controlador que devem ser respeitadas.

No caso da bateria, o sistema deve contar com um banco do tipo chumbo-ácido ciclo profundo, com autonomia mínima de 4 horas à demanda média. Segundo a Tabela 5.1, “*demanda média*” é considerada aquela com até 75% da demanda máxima. Considerando que a demanda máxima do sistema é 60 kW, a “*demanda média*” para propósitos de dimensionamento é 45 kW, que em uma tensão de saída de 120 V, gera uma corrente de 375 A. Para atender esta demanda durante 4 horas, a capacidade do banco deverá ser de pelo menos 1500 Ah ($375\text{A} \times 4\text{ h}$). Sendo assim, se escolheu utilizar um banco de bateria 1500Ah@120VDC, do tipo ciclo profundo.

No caso do grupo gerador, a potência diesel instalada deve ser maior ou igual à demanda máxima da carga. Para atender este requerimento, se utilizaram 2 geradores diesel com potências nominais de 60 kW e 30 kW respectivamente. Para o trabalho em paralelo, os droops dos geradores foram fixados em 5%.

Finalmente, a potência nominal da carga dissipadora deve ser no mínimo igual à potência eólica instalada. Sendo assim, para o primeiro local se utilizou uma carga dissipadora com potência nominal de 100 kW, enquanto que para o segundo local se utilizou uma carga dissipadora com potência nominal de 20 kW.

5.4.5 Apresentação e análise de resultados

Para se estabelecer parâmetros de comparação três diferentes simulações foram realizadas. No primeiro caso se simulou o sistema com o “Controlador Supervisório Inteligente” (CSI) proposto neste trabalho, para os dados de velocidades de vento dos dois locais descritos na seção 5.4.2.

Mantendo-se o mesmo dimensionamento do sistema, e com os mesmos dados de entrada, uma segunda e terceira simulação foram realizadas, desta vez utilizando-se a estratégia de controle “*Sem Supervisório*” e a estratégia de controle com “Controlador Supervisório Básico” (CSB) respectivamente, mostradas na seção 5.1.

O período de simulação em todos os casos compreendeu 4380 horas (meio ano) para todos os casos. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.6 e Tabela 5.7

Tabela 5.6 Resultados da simulação – Local 1

	Sem Supervisório		Controlador Supervisório Básico		Controlador Supervisório Inteligente	
	D1[60 kW]	D2[30 kW]	D1[60 kW]	D2[30 kW]	D1[60 kW]	D2[30 kW]
Consumo combustível (lt)	15170	5743	11470	11740	15750	4619
Tempo de funcionamento motor Diesel (h)	994	704	756	2223	1026	569
No. de partidas e paradas motor Diesel	287	310	142	202	152	188
Energia gerada pelo gerador Diesel (kWh)	41280	16120	31090	24910	42970	12940
Consumo combustível Total (lt)	20913		23210		20369	
Energia eólica gerada (kWh)	12570		12570		12570	
Vida útil estimada Bateria (anos)	3.87		11.68		5.25	
Energia dissipada (kWh)	1706		2818		1372	

Tabela 5.7 Resultados da simulação – Local 2

	Sem Supervisório		Controlador Supervisório Básico		Controlador Supervisório Inteligente	
	D1[60 kW]	D2[30 kW]	D1[60 kW]	D2[30 kW]	D1[60 kW]	D2[30 kW]
Consumo combustível (lt)	7367	2627	7175	4450	7334	1765
Tempo de funcionamento motor Diesel (h)	479	371	473	708	478	225
No. de partidas e paradas motor Diesel	108	129	120	155	93	96
Energia gerada pelo gerador Diesel (kWh)	20120	6872	19460	10820	20003	4865
Consumo combustível Total (lt)	9994		11625		9099	
Energia eólica gerada (kWh)	53260		53260		53260	
Vida útil estimada Bateria (anos)	3.90		8.22		6.66	
Energia dissipada (kWh)	13380		17540		11710	

Como era previsto os resultados obtidos para os dois locais são bem diferentes. No primeiro é possível perceber um elevado consumo de combustível, resultado do baixo potencial eólico. Já no segundo local, a alta contribuição de energia por parte da turbina eólica diminui em aproximadamente 50% o consumo de combustível, independentemente do tipo de controlador.

O fato de ter baixa contribuição eólica se reflete também no número de partidas e paradas dos motores diesel, que em todos os casos se incrementa do segundo para o primeiro local, sendo que o sistema “Sem supervisor” e com CSI apresentam um incremento em torno de 50%, enquanto que o sistema com CSB, apresenta um incremento de 20%.

Por outra parte é importante ressaltar que ao contrário do que acontece com o comportamento dos motores diesel, a vida útil da bateria é pouco dependente do potencial eólico do local e sim da estratégia de controle utilizada. Este fato pode ser corroborado ao se observar que com a estratégia do CSB, a vida útil da bateria no local 1 é maior do que no local 2.

Quanto à energia dissipada, observa-se que esta também é função do potencial eólico do local, sendo que em todos os casos a energia dissipada no local 2, independentemente da estratégia adotada, supera em aproximadamente 7 vezes à energia dissipada no local 1.

Com a finalidade de estabelecer qual sistema de controle apresenta os melhores resultados globais, os valores das Tabela 5.6 e Tabela 5.7 são representados nas Figura 5.9 e Figura 5.10. Da análise dos gráficos pode-se concluir que:

- Independentemente do potencial eólico do local, o sistema com CSI apresenta o menor consumo de combustível, sendo que o maior consumo é registrado pelo sistema com CSB.
- Como no caso anterior, o menor tempo de funcionamento dos motores diesel é registrado pelo sistema com CSI, independentemente da contribuição eólica por parte da(s) turbina(s). Ainda assim é importante ressaltar que no primeiro caso,

os resultados obtidos com o sistema “Sem Supervisório” são muito próximos aos do CSI. Em todos os casos, o sistema com CSB apresentou os maiores tempos de funcionamento.

Figura 5.9 Gráfico comparativo dos resultados simulados – Local 1.

- Resultados similares são obtidos no número de partidas e paradas dos motores diesel. Em todos os casos, o melhor desempenho é apresentado pelo sistema com CSI. Porém, desta vez se observa que em locais com pouco vento (local 1), o sistema “Sem Supervisório” tem menor desempenho que o sistema com CSB.

Figura 5.10 Gráfico comparativo dos resultados simulados – Local 2.

- Como era previsto, o melhor desempenho quanto à vida útil da bateria é apresentado pelo sistema com CSB em todos os casos. Isto se deve como foi mencionado, à estratégia de controle deste supervisorio que foi desenvolvida com o intuito de aumentar a vida útil da bateria, despachando-a unicamente quando existe uma contribuição de mais do 50% da demanda, por parte da(s) turbina(s) eólica(s). Contudo, é importante ressaltar que em locais com bom potencial eólico (local 2), o sistema com CSB apresenta resultados bem próximos ao dos registrados pelo sistema com CSI.

- Independentemente da contribuição eólica, o sistema com CSI apresenta os valores mais baixos de energia dissipada, sendo que o sistema com CSB apresentou os piores resultados em todos os casos.

Finalmente é de vital importância avaliar o custo-benefício das diferentes alternativas através de técnicas que considerem, além dos custos dos equipamentos, os custos de operação e manutenção (O&M) com taxa real de juros. Existem vários métodos de avaliação econômica, sendo que neste trabalho se escolheu o método do *Custo do Ciclo de Vida* (CCV), devido a que esta figura de mérito possibilita que várias alternativas, com mesma vida útil, sejam comparadas diretamente.

O Custo do Ciclo de Vida de uma alternativa de investimento é o valor presente de todos os gastos relativos à essa alternativa. O CCV faz uma comparação direta entre várias alternativas. O CCV de cada alternativa com a mesma vida útil é calculado e a opção que apresentar o menor custo do ciclo de vida é a mais atrativa.

O CCV de um sistema híbrido pode ser dividido em dois grupos, os custos iniciais e os custos de operação e manutenção. Os custos iniciais estão relacionados ao custo dos equipamentos que compõem o sistema, às obras civis, ao custo de mão-de-obra para execução do projeto, etc. Os custos de operação e manutenção são compostos pelo custo de aquisição do óleo diesel, serviços de manutenção preventiva e corretiva, reposição dos componentes, etc.

Como o objetivo da presente análise econômica é determinar qual dos três sistemas avaliados apresenta os menores gastos de operação e manutenção ao longo de toda à vida útil do projeto, valores que não dependem do tipo de controlador escolhido, ou que são comuns aos três sistemas são retirados da análise econômica. Os três tipos de controle avaliados neste trabalho afetam significativamente os custos de operação e manutenção dos sistemas em três principais aspectos: o consumo de combustível, a degradação do grupo gerador diesel e a degradação do banco de baterias. Se considera que os custos de operação e manutenção relacionados à turbina eólica são proporcionais à energia gerada, e sendo que a mesma não é função da estratégia de controle utilizada (como pode ser observado nas Tabela 5.6 e Tabela 5.7), seus custos não são

afetados pelo tipo de controlador utilizado. Por outra parte, a quantidade de energia dissipada apresenta também uma informação importante sobre o uso racional da energia produzida por um sistema, porém ela não afeta os custos do mesmo. Além disso, não existe uma relação direta entre a energia excedente e o CCV apresentado por um sistema [22].

Para o cálculo do CCV dos sistemas, considerou-se um período de estudos de 15 anos e uma taxa de desconto de 12% ao ano. A Tabela 5.8 mostra os parâmetros assim como os valores referenciais que serão utilizados em nossa análise [48].

Tabela 5.8 Custos de Investimento-O&M - Substituição

COMPONENTES	Custos O&M*	
	60 (kW)	30 (kW)
Custo grupo gerador (R\$)	40800	26800
Custo motor diesel (R\$)	20400	13400
Custo manutenção motor diesel (R\$/kWh)	0.12	0.12
Horas de funcionamento para manutenção do motor diesel (h)	200	200
Custo manutenção sistema arranque do motor diesel (R\$)	1632	1072
No. Partidas/manutenção sistema de arranque	200	200
Horas funcionamento/substituição motor diesel (h)	5000	5000
Custo Banco Baterias (R\$/bateria)	2744	
Custo combustível (R\$/lt)	2.00	

* Valores de 2006

Os custos de investimento e manutenção tanto do “Controlador Supervisório Básico” como do “Controlador Supervisório Inteligente” são de difícil estimação, pois dependem de diversos fatores que necessitam estudos mais detalhados para ser determinados, e no caso do CSI, o problema é ainda mais complexo, pois na atualidade não existe no mercado controladores supervisórios para sistemas híbridos baseados em inteligência artificial. Desta forma, na análise econômica realizada neste trabalho, se considerou para o caso do CSB custos unitários (R\$/kW) calculados com base em projetos de controle para sistemas híbridos similares, que fornecem boas estimativas em por unidade da potência instalada [49]. Com base na maior complexidade do Controlador Supervisório Inteligente, considerou-se razoável um acréscimo de 50% no custo deste controlador com relação ao custo do CSB.

Os resultados do CCV podem ser visualizados na Tabela 5.9 e Tabela 5.10.

Tabela 5.9 Análise econômica - Local 1

VALOR PRESENTE	Sem Supervisório	Supervisório Básico	Supervisório Inteligente
	(R\$)	(R\$)	(R\$)
Grupo Gerador Diesel	188.220	160.828	68.455
Combustível	653.394	725.161	636.398
Banco de baterias	189.986	93.465	150.622
Controlador supervisório	0	27.600	41.400
TOTAL	1.031.600	1.007.054	896.875

Tabela 5.10 Análise econômica - Local 2

VALOR PRESENTE	Sem Supervisório	Supervisório Básico	Supervisório Inteligente
	(R\$)	(R\$)	(R\$)
Grupo Gerador Diesel	157.525	178.722	144.705
Combustível	312.247	363.205	284.295
Banco de baterias	188.788	112.114	127.968
Controlador supervisório	0	27.600	41.400
TOTAL	658.560	681.642	598.369

Os resultados mostram que para os dois casos de estudo, o melhor desempenho econômico é apresentado pelo Controlador Supervisório Inteligente (CSI). Através da análise das Tabela 5.9 e Tabela 5.10 é possível perceber que em locais com baixo potencial eólico (local 1), o ganho econômico obtido com o CSI é bem maior do que com o CSB ou com o sistema “*Sem Supervisório*”. Já para o local 2, provavelmente o desempenho do controlador, viu-se reduzido devido à previsão pouco acurada da velocidade dos ventos. Por outra parte, também é importante ressaltar que a utilização do CSB nem sempre melhora o desempenho de um sistema híbrido. Para o local 2, o CCV mostra que um sistema “*Sem Supervisório*” é economicamente mais atrativo do que um sistema com CSB.

Estes dois resultados corroboram o fato de que o desempenho de estratégias de controle convencionais e simples, depende de diversos fatores particulares de cada caso como são: o potencial eólico do local, a curva de carga, o dimensionamento do sistema, etc. Pelo contrário, a utilização de um algoritmo de controle inteligente e modular, com uma estratégia de controle baseada em critérios básicos e “universais” do funcionamento de sistemas híbridos de energia, apresenta sempre o melhor desempenho, independentemente das características de oferta e demanda do local.

Para visualizar de melhor forma a contribuição de cada um dos custos envolvidos para o total do valor presente, os valores das Tabela 5.9 e Tabela 5.10 foram colocados em forma percentual em relação ao custo total de cada uma das alternativas. As Figura 5.11 e Figura 5.12 mostram os resultados.

Figura 5.11 Custos envolvidos em porcentagem do custo total. Local -1

Figura 5.12 Custos envolvidos em porcentagem do custo total. Local -2

A análise das Figura 5.11 e Figura 5.12 mostra os gastos relativos a cada alternativa, dependem fortemente das características eólicas do local avaliado. No caso do local 1, e como era esperado, mais do 64% dos gastos estão associados ao consumo de combustível, independentemente da estratégia de controle utilizada. Já para o segundo caso, a parcela do combustível fica em torno de 50%, variando levemente de uma alternativa para outra. Contudo, é importante observar que nos dois locais, a participação do custo do combustível é majoritária.

Por outra parte observa-se que com a estratégia do CSB, o ponto crítico do sistema é o consumo de combustível, enquanto que num sistema “*Sem Supervisorio*” é o banco de baterias.

6 Conclusões

Apesar dos sistemas híbridos eólico-diesel-bateria serem utilizados há mais de 30 anos como uma alternativa viável para o fornecimento de energia elétrica em locais isolados, fica claro que sua utilização é ainda uma solução em desenvolvimento e pesquisas nesta área são intensas, e novos protótipos são testados e seus desempenhos analisados.

Conseqüentemente, sua utilização em larga escala, ainda depende de avanços na área tecnológica, no que se refere à projeto e operação destes sistemas, sendo que as principais limitações estão relacionadas com o controle e supervisão de todo o sistema.

Este trabalho teve como finalidade desenvolver e simular um controlador supervisor inteligente, baseado numa combinação de redes neurais, lógica neuro-fuzzy e outras técnicas de lógica booleana convencional. O algoritmo de controle, inteligente e modular, permite que o mesmo controlador supervisor possa ser utilizado em vários sistemas híbridos de configurações e tamanhos diferentes, já que a estratégia de controle foi desenvolvida utilizando-se critérios básicos e “universais” do funcionamento de sistemas híbridos de energia.

Para avaliar o desempenho do Controlador Supervisor Inteligente, mais duas estratégias de controle, utilizadas comumente em sistemas híbridos, foram simuladas. A primeira utilizando uma estratégia de controle “*sem supervisor*” e a segunda utilizando uma estratégia de controle com um “*supervisor básico*”

Medidas reais de carga e velocidades de vento foram utilizadas como dados de entrada e várias simulações, com diferentes graus de participação da fonte eólica, foram realizadas. As simulações permitiram avaliar e comparar tecnicamente as três estratégias de controle com base em cinco parâmetros importantes do sistema que são: consumo de combustível diesel, tempo de funcionamento dos geradores diesel, número de partidas e paradas dos geradores diesel, vida útil do banco de bateria e energia dissipada. A partir destes resultados, foi feita uma análise econômica

utilizando a figura de mérito do ciclo de custo de vida (CCV), a fim de se determinar qual das três estratégias é a mais adequada, desde o ponto de vista econômico, para a operação de sistemas híbridos do tipo eólico-diesel-bateria de pequeno porte.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que independentemente das características eólicas do local, a estratégia de controle sofisticada implementada no Controlador Supervisório Inteligente, foi a de melhor desempenho técnico e econômico. Já para o caso de estratégias de controle convencionais e simples, os resultados mostram que não existe uma melhor estratégia de operação genérica para sistemas híbridos, e sim estratégias de operação que se adaptam melhor a determinadas condições de oferta de energia renovável.

A aplicação das três diferentes estratégias de controle: “*Sem Supervisório*”, com CSB, e com CSI; para um mesmo sistema com mesma curva de carga e mesmo potencial eólico disponível, ocasionou variações de até 15% nos custos de ciclo de vida do sistema; sendo que em todos os casos, a parcela correspondente ao consumo de combustível foi majoritária de entre todos os outros gastos relacionados a investimento e O&M de sistemas híbridos. Numa situação onde os preços dos combustíveis tendem a subir cada vez mais, o aumento da contribuição de energia eólica ao sistema, mesmo que acarrete elevados custos de investimento, se mostra economicamente mais atrativa ao se avaliarem os custos de ciclo de vida desses sistemas.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a inclusão de mais um “Sistema Especialista” na lógica de controle do algoritmo supervisorio: **a análise dinâmica dos transitórios de operação**. A razão disto é que durante a operação do sistema, onde diferentes elementos são ligados e/ou desligados, existem transitórios que podem afetar a estabilidade do sistema, ocasionando grandes variações de tensão, corrente e frequência, e em casos extremos, blackout. Conseqüentemente, as decisões que um controlador supervisorio deve tomar, não somente devem avaliar a disponibilidade e possível otimização das fontes de geração, mas também a qualidade e confiabilidade da energia suprida. Conseqüentemente este “Sistema Especialista” deverá ajudar em tempo real ao sistema supervisorio central na toma de decisões, aperfeiçoando o desempenho do controlador.

7 Referências Bibliográficas.

- [1] MANWELL, J.F.; ROGERS, A.; HAYMAN, G.; AVELAR, C.T.; McGOWAN, J.G. Hybrid2-A Hybrid System Simulation Model: Theory Manual. Renewable Energy Research Laboratory Department of Mechanical Engineering. UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS, Nov 1998.
- [2] FERNANDES, R.T. Supervisão de um sistema híbrido eólico/diesel usando lógica fuzzy. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2005, 118p.
- [3] ENERGIA EÓLICA, Princípios e Aplicações, Tutorial do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, CRESESB. <http://www.cresesb.cepel.br/abertura.htm>. (Consultado em Novembro de 2006).
- [4] FARRET, F.A. Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1999. 245p.
- [5] FADIGAS, E.A. Energia Eólica: Curso de Geração Distribuída e Cogeração. Programa de Educação Continuada Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2005. 72 p.
- [6] NETO, J.P. Conexão de Sistemas de Geração Eólica a velocidade fixa à Rede Elétrica Interligada. Universidade Salvador. <http://www.unifacs.br/pesquisa/iniciacao/juic/resumosjuic2/ecc/Resumo%20Jos%C3%A9%20Peroba.pdf>. (Consultado em Novembro de 2006).
- [7] REIS, L.O.M. Lógica Fuzzy aplicada ao Controle de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica: Eólica, Fotovoltaica e Biogás. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2002, 181p.

- [8] ENERGIA SOLAR, Princípios e Aplicações, Tutorial do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, CRESESB. http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.pdf. (Consultado em Novembro de 2006).
- [9] PANICKAR, P.S.; RAHMAN, M.S.; ISLAM, S.M. A Neuro Fuzzy Model for the Control Operation of a Wind-Diesel-Battery Hybrid Power System. In: Journal of Electrical and Electronics Engineering Australia, Volume 22, 2002. Part 1. Page. 9-16.
- [10] BAITILO, R.L. Identificação, caracterização e avaliação dos Recursos de Demanda: Previsão, Projeções e Cenários. Notas de aula da disciplina “Planejamento Integrado de Recursos PIR”, Universidade de São Paulo, 2005.
- [11] AONDE VAMOS: <http://www.aondevamos.eng.br/textos/texto10.htm>. (Consultado em Novembro 2006).
- [12] CRUZ, I.C. Diseño de sistemas híbridos para poblaciones rurales aisladas: Parte1, Taller: Diseño de Sistemas Híbridos de Generación Eléctrica para Electrificación Rural. Rble Programa Energía Cólica CIEMAT. Santiago de Chile, Junio 2004, 55p.
- [13] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=020170031202>. (Consultado em Dezembro 2006).
- [14] PEREIRA, A.L. Hybrid Power Systems Configuration. March 1997.52p.
- [15] CRUZ, J.A. Desempenho de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de pequeno Porte para Energização Rural. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu-SP, 2005, 190p.
- [16] MESSENGER, R.; VENTRE, J. Photovoltaic systems engineering. 1 edition, Boca Raton, CRC Press, 1999, 400p.

- [17] CHOI, S.S.; LARKIN, R. Performance of an autonomous diesel-wind turbine power system. In: Electric Power System Research, volume 33, nº2, 1995. Pp 87-99.
- [18] BEYER, H.G.; DEGNER, T.; GABLER, H. Operational behavior of wind diesel systems incorporating short-term storage: an analysis via simulation calculations. In: Solar Energy, volume 54, nº6, 1995. Pp 429-439.
- [19] PINHO, J.T.; BLASQUES, L.C.; GALHARDO, M.A.; Operation Strategies of Wind-Diesel Systems for electricity generation using Intelligent Systems. In: Global WindPower 2004 Conference, Chicago, IL USA, March 2004, 11p.
- [20] GARCÍA, F. H. Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004, 209p.
- [21] ASHARI M.; NAYAR, C.V. An Optimum Dispatch Strategy using set points for a Photovoltaic (PV)-Diesel-Battery Hybrid Power System, In: Solar Energy, volume 66. Nº 1, pp. 1-99, 1999.
- [22] HAUSCHILD, L. Avaliação de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006, 117p.
- [23] PEREIRA, A.L. Modular Supervisory Controller for Hybrid Power Systems. Tese de Doutorado, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. June 2000, 227p.
- [24] TEXEIRA, R.A. Controle de um manipulador PUMA 560 utilizando redes neurais artificiais com adaptação em tempo real. In: Anais do V Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, Belo Horizonte. 1998. Pp 146-151.
- [25] SHAW, I.S; GODOY,M. Controle e Modelagem fuzzy. 1ª. edição. São Paulo: Edgard Blucher: FAPESP, 1999. 165 p.

- [26] HECHT-NIELSEN, R. Applications of Counterpropagation Networks. Neural Networks, Elmsford, NY, v.1, n.1, p. 131-140, May 1989.
- [27] LEÃO FERNANDES, Luiz G. Utilização de Redes Neurais na Análise e Previsão de Séries Temporais. Tese de Mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 1995, 76p.
- [28] YASUOKA, J. Previsão de carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando Redes Neurais Artificiais. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002, 102 p.
- [29] Manual Neural Network toolbox do MATLAB, versão 7.0. May, 2004.
- [30] ZADEH, L. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. In: IEEE Trans. Systems Man Cybernetics, Vol. 28, pp 28-44, 1978.
- [31] Manual Fuzzy logic toolbox do MATLAB, versão 7.0. May, 2004.
- [32] LEWIS, H.W, The foundations of fuzzy control. New York: Plenum Press, 1997. 299 p.
- [33] DELGADO, M.R. Projeto Automático de Sistemas nebulosos: uma Abordagem CoEvolutiva. UNICAMP. Tese de Doutorado. Campinas, SP, 2002. 186p.
- [34] PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F.: An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design. MIT Press. Cambridge, 1998. 456 p.
- [35] SBA: CONTROLE & AUTOMAÇÃO SOCIEDADE BRASILEIRA DE AUTOMATICA:
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-7592003000100003&script=sci_arttext. (Consultado em Janeiro 2007).

- [36] ENERGIA EÓLICA NA DINAMARCA:
<http://www.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>. (Consultado em janeiro 2007).
- [37] HANSEN, A.D; SORENSEN, P. Models for a Stand-Alone PV System. RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark. 2000. 78 p.
- [38] LAZZARIN, T. Estudo e Implementação de um Carregador de Baterias com uma Técnica de Avaliação de sua Vida Útil. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 227p.
- [39] Sunny Island 5048, Installation & Instruction Manual, SMA Technologie AG. 2006.
- [40] HARMAN, K. Grid Connection of Wind Turbines Applying Battery Storage. RisØ National Laboratory, Loughborough University, Denmark. 1997. 97 p.
- [41] RAO, V; SINGHAL, G; Battery Model for Embedded Systems. In: 18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design. IEEE. 2005.
- [42] MANWELL, J.F; MCGOWAN, J.G. Improvements to the Hybrid2 Battery Model. American Wind Energy Association, Windpower 2005 Conference, Massachusetts 2005.
- [43] BARING, E.I; Hybrid2-The Hybrid System Simulation Model version 1.1: Users Manual. National Renewable Energy Laboratory. UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS, Feb 1998.
- [44] FRAZER, J. On & Off Grid Power Systems for Homes & Buildings, In Automated buildings.com. <http://www.automatedbuildings.com/news/sep99/articles/jf/jf.htm>. (Consultado em outubro 2007).

- [45] CRAMER, G. State of the art and trends in decentralized electrification: PV system technologies. In: Refocus, volume 5, Issue 1, January-February 2004, Pages 38-42.
- [46] MOHAMED, A; TALAL O. A Neural Networks Approach for Wind Speed Prediction. In: Renewable Energy, Vol. 13, No. 3, pp 345-354, 1998.
- [47] PÉREZ, C; BAIZAN, F. Local Short-Term Prediction of Wind Speed: A Neural Network Analysis. Dpt. Informática, Universidade de Oviedo, Campus Viesques, Gijón, Spain. 2000.
- [48] Comunicação interna com o coordenador do projeto “Eletrificação da Vila de Sucurijú com Sistema Híbrido de Energia”, PHD. Alexandre de Lemos Pereira. Outubro 2007.
- [49] GRAHAM, J; DOU, CH. China Village Power Project Development Guidebook: A Practical Guidebook for the Development of Renewable Energy Systems for Village Power Projects. August 2005.

ANEXOS

ANEXO A - Fluxograma da Estratégia de Controle “Sem Supervisório”