

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA OTIMIZAÇÃO
DA ENERGIA GERADA POR UM SISTEMA HÍBRIDO (SOLAR-
FOTOVOLTAICO E EÓLICO)**

FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia - Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Novembro de 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA OTIMIZAÇÃO
DA ENERGIA GERADA POR UM SISTEMA HÍBRIDO (SOLAR-
FOTOVOLTAICO E EÓLICO)**

FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

Orientador: Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia - Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Novembro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

C221d Caneppele, Fernando de Lima, 1977-
Desenvolvimento de um modelo fuzzy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar-fotovoltaico e eólico / Fernando de Lima Caneppele. - Botucatu : [s.n.] , 2007.
xii, 103 f. : il. , gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007
Orientador: Odivaldo José Seraphim
Inclui bibliografia

1. Lógica difusa. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Energia eólica. 4. Energia solar. I. Seraphim, Odivaldo José. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

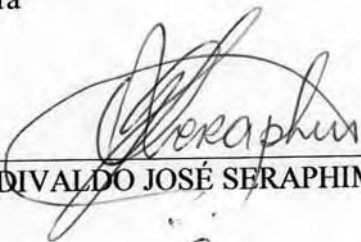
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA OTIMIZAÇÃO DA
ENERGIA GERADA POR UM SISTEMA HÍBRIDO - FOTOVOLTAICO E
EÓLICO"**

ALUNO: FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

ORIENTADOR: PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

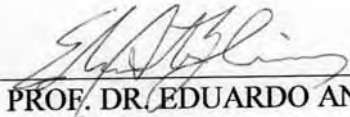
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM



PROF. DR. LUIZ FRANCISCO DA CRUZ



PROF. DR. EDUARDO ANTONIO SLEIMAN

Data da Realização: 30 de novembro de 2007.

Ao meu pai, Fernando Caneppele e,
à minha mãe, Olívia Maria de Lima Caneppele.
Obrigado pela vida e por todo amor, sempre...

OFEREÇO

A Langerton Neves da Cunha (in memorian),
“Que os nossos corações sejam unidos para sempre...”

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, inteligência suprema e causa primeira de todas as coisas.

A minha família: meus pais, meus avôs e avós, minhas irmãs, e meus sobrinhos, que sempre me apoiaram nas minhas realizações.

A minha companheira, Juliana Kelly Pascchotto, pela paciência e por todo amor e dedicação.

À Faculdade de Ciências Agronômicas - Unesp, Campus de Botucatu, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura, e ao Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim, pela orientação e pelo apoio, em todos os sentidos, ao longo do período de realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nelson Miguel Teixeira e Prof. Dr. Jayme de Toledo Piza, pelo apoio incessante quando do meu ingresso nesta instituição.

Ao Prof. Dr. Luis Francisco Cruz e Prof. Dr. José Ângelo Cagnon, pelas correções e sugestões feitas em relação a este trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, da Biblioteca e da Seção de Pós-Graduação, sempre muito atenciosos.

A Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos amigos e colegas, Luis Roberto Almeida Gabriel Filho, Jair Antonio Cruz Siqueira, João Alberto Borges de Araújo, Jair de Jesus Fiorentino e Félix Abraão Neto pelas colaborações dadas a esta pesquisa e pela amizade.

Aos amigos: André Seki, Samir Jasper, Marcelo Ferrasa, Anísio Neto, José Guilherme, Erick Bertolini, Sílvia Gabriel, Pedro Cataneo, Flávio Pereira, Adriana Smanhotto e Gérson Silva pela amizade.

Ao estagiário, Emanuel Rangel Spadim, pelas inúmeras colaborações em todas as fases deste trabalho e pela grande amizade.

Aos meus amigos: Neto e Guto, de Avaré-SP; Emerson e Dona Ana, de Uberaba-SP; Que nós continuemos seguindo e divulgando tudo que nos foi ensinado pelo Sr. Langerton.

Demais pessoas que não foram lembradas neste momento, mas que também foram importantes na realização deste trabalho.

SEMPRE QUE POSSÍVEL

Onde estejas e por onde passes, sempre que possível, deixa algum sinal de paz e luz para aqueles irmãos que estão vindo na retaguarda, a fim de que não se percam do rumo certo.

EMMANUEL / CHICO XAVIER

SUMÁRIO

	Página
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	5
4. REVISÃO DE LITERATURA	7
4.1. Energia Solar	7
4.1.1. Características da Energia Solar	7
4.1.2. Utilização	8
4.1.3. Aproveitamento da Energia Solar Fotovoltaica	9
4.1.4. Energia Solar Fotovoltaica Aplicada na Energização Rural	10
4.2. Geração Fotovoltaica	11
4.2.1. Efeito Fotovoltaico	11
4.2.2. Células Fotovoltaicas	12
4.2.3. Módulo Fotovoltaico	14
4.2.4. Eficiência do Módulo Fotovoltaico	14
4.2.5. Fatores que afetam o desempenho das células fotovoltaicas	15
4.2.6. Características dos Sistemas Fotovoltaicos	17
4.2.7. Componentes de um sistema fotovoltaico	20
4.3. Energia Eólica	22
4.3.1. Avaliação do Potencial Eólico	23
4.3.2. Eficiência de Betz	24
4.3.3. Medição do Vento	25
4.3.4. Aproveitamento do Potencial Eólico	26
4.4. Geração Eólica	27
4.4.1. Sistemas de Grande Porte Ligados à Rede	27
4.4.2. Sistemas Eólicos Isolados de Pequeno Porte	28
4.4.3. Eficiência dos Sistemas Eólicos	29
4.5. Sistemas Híbridos de Geração de Energia Elétrica	30
4.5.1. Características dos Sistemas Híbridos de Energia	30

4.5.2.	Dimensionamento de Sistemas Híbridos	31
4.6.	Sistemas de Armazenamento de Energia	32
4.6.1.	Conceitos básicos relacionados com as baterias de chumbo-ácido	33
4.7.	Teoria fuzzy	36
4.7.1.	Introdução	36
4.7.2.	Fundamentos básicos	37
4.7.3.	Funções de pertinência	39
4.7.4.	Operações de conjuntos fuzzy	40
4.7.5.	Determinação dos conjuntos fuzzy	41
4.7.6.	Base de regras	43
4.7.7.	Defuzzificação	43
4.7.8.	Sistemas de controle fuzzy	44
4.7.9.	Aplicações de sistemas de controle fuzzy	46
5.	MATERIAL E MÉTODOS	48
5.1.	Material	48
5.1.1.	Localização da Área Experimental	48
5.1.2.	Equipamentos de Medições Meteorológicas e Elétricas	49
5.1.3.	Simulações através de programas matemáticos	52
5.2.	Métodos	53
5.2.1.	Dados ambientais	53
5.2.2.	Dados característicos do sistema híbrido	53
5.2.3.	Metodologia geral de desenvolvimento fuzzy	55
5.2.4.	Modelagem do controlador fuzzy para o sistema híbrido	57
5.2.5.	Variáveis para aplicação do modelo fuzzy no sistema híbrido	59
5.2.6.	Determinação dos conjuntos fuzzy	59
5.2.7.	Grau de pertinência	61
5.2.8.	Regras Fuzzy	65
5.2.9.	Defuzzificação	67
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.1.	Ganho de energia	69
6.2.	Metodologia de projeto do controlador fuzzy	72

7. CONCLUSÕES.....	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÊNDICE	89

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Aplicações da Lógica Fuzzy	47
Tabela 2. Características da energia eólica, velocidade do vento no período de 01/07 a 31/07 de 2005.	51
Tabela 3. Características da energia solar, irradiância no período de 01/07 a 31/07 de 2005....	51
Tabela 4. Resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico, no período de 01/07 a 31/07 de 2005.	52
Tabela 5. Limites superior e inferior para Radiação Solar Global e Velocidade do Vento	53
Tabela 6: Exemplo do cálculo da energia gerada, adotando-se novo valor para o rendimento	55
Tabela 7. Resumo dos valores adotados para a simulação do controlador fuzzy.....	60
Tabela 8. Nomenclatura para os conjuntos fuzzy de entrada (RS), (VV)	60
Tabela 9. Nomenclatura para os conjuntos fuzzy de entrada (CB)	61
Tabela 10. Nomenclatura para os conjuntos fuzzy de saída (CBB).....	61
Tabela 11. Energia disponível, Energia gerada sem e com controle Fuzzy, Ganho de energia e Porcentagem de Ganho para o mês de julho de 2005.....	70
Tabela 12. Energia disponível, Energia gerada sem e com controle Fuzzy, Ganho de energia e Porcentagem de Ganho para o período de setembro de 2004 a agosto de 2005.....	71
Tabela 13. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de setembro de 2004.....	91
Tabela 14. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de outubro de 2004.	92
Tabela 15. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de novembro de 2004.	93

Tabela 16. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de dezembro de 2004.....	94
Tabela 17. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de janeiro de 2005.	95
Tabela 18. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de fevereiro de 2005.	96
Tabela 19. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de março de 2005.	97
Tabela 20. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de abril de 2005.	98
Tabela 21. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de maio de 2005.	99
Tabela 22. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de junho de 2005.	100
Tabela 23. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de julho de 2005.	101
Tabela 24. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de agosto de 2005.	102
Tabela 25. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de setembro de 2004 a agosto de 2005.....	103

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação de uma célula fotovoltaica (CEPEL/CRESESB, 2007).....	12
Figura 2. Célula de Silício monocristalino (CEPEL/CRESESB, 2007).....	13
Figura 3. Célula de Silício Policristalino (CEPEL/CRESESB, 2007)	13
Figura 4. Efeito da variação da irradiância sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica (FIORENTINO, 2004).	16
Figura 5. Efeito da variação da temperatura sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica (FIORENTINO, 2004).	17
Figura 6. Algumas configurações possíveis do sistema fotovoltaico.....	18
Figura 7. Configuração básica de um sistema fotovoltaico.....	20
Figura 8. Exemplo de sistema híbrido.	21
Figura 9. Sistema conectado à rede.	22
Figura 10. Comportamento da velocidade do vento antes e depois de passar pelo aerogerador.	24
Figura 11. Variação da tensão de uma bateria durante o processo de A) descarga e B) carga (Moura, 1996).....	34
Figura 12. Estado de carga e tensão de circuito aberto de uma bateria (CIEMAT, 2000).....	35
Figura 13. Estrutura geral de um sistema de inferência fuzzy (adaptado de HAMMELL II, 1990).....	38
Figura 14. Formas trapezoidal e triangular dos conjuntos fuzzy.....	42
Figura 15. Aplicação do método de fuzzyficação do Centro dos Máximos (SHAW e SIMÕES, 2001).....	44
Figura 16. Esquema básico de um controlador fuzzy.....	45
Figura 17. Vista panorâmica do NEAR e da instalação do sistema híbrido eólico fotovoltaico. 1 - Painel fotovoltaico do sistema; 2 - Aerogerador do sistema; N = Norte geográfico do local.	49
Figura 18. Torre utilizada para a instalação dos equipamentos de medição meteorológica e aquisição de dados. 1 – Anemômetro; 2 – Piranômetro; 3 - Termo higrômetro; 4 – Datalogger CR23-X.....	50
Figura 19. Equipamento para aquisição de dados – Datalogger CR23X.	50

Figura 20. Diagrama esquemático das ligações elétricas do sistema híbrido eólico-fotovoltaico.	54
Figura 21. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural	56
Figura 22. Modelo Fuzzy para aplicação em um sistema híbrido solar-fotovoltaico e eólico.	57
Figura 23. Função de pertinências associada a variável de entrada “Velocidade do Vento”	62
Figura 24. Função de pertinências associada a variável de entrada “Radiação Solar”	63
Figura 25. Função de pertinências associada a variável de entrada “Carga da Bateria - A”	64
Figura 26. Função de pertinências associada a variável de saída “Carga do Banco de Baterias”	65
Figura 27. Determinação e inserção das Regras Fuzzy para o sistema de controle	66
Figura 28 Visualização gráfica das regras fuzzy	67
Figura 29. Energia gerada sem Fuzzy e Energia gerada com controle Fuzzy em julho de 2005	71
Figura 30. Energia gerada sem Fuzzy e Energia gerada com controle Fuzzy mensal	72
Figura 31. Resumo do sistema de controle fuzzy para um sistema híbrido de geração de energia (solar-fotovoltaica e eólica)	73
Figura 32. Tela inicial e de configuração básica do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB	74
Figura 33. Definição do domínio e escolha das funções de pertinência das variáveis de entrada.	75
Figura 34. Definição do domínio e escolha das funções de pertinência das variáveis de saída.	75
Figura 35. Base de regras	76
Figura 36. Exemplo de simulação do controlador. Variáveis de entrada e de saída. 1 - Valor numérico de saída (8,34)	77
Figura 37. Exemplo de simulação do controlador. Variável de saída e significado do valor numérico de saída (8,34)	78

1. RESUMO

O uso de energias alternativas e renováveis tem sido cada vez mais discutido em todos os setores da sociedade. O interesse nessas fontes de energias, alternativas e renováveis, é de fundamental importância, tanto no que se refere à escassez, quanto ao preço do petróleo, além das questões ambientais envolvidas no uso dessas energias.

Sistemas de geração eólica e fotovoltaica com armazenamento de energia em baterias tem-se apresentado como uma forma de geração alternativa de energia. A variabilidade na intensidade da energia eólica e solar pode ser contornada pela complementação entre uma fonte e outra, ou pela maior estabilidade configurada à geração do sistema.

O objetivo desta dissertação é criar uma metodologia fuzzy e simular seu uso no controle inteligente de um sistema híbrido de geração de energia elétrica, utilizando as energias solar-fotovoltaica e eólica.

Quando utilizamos um sistema de controle baseado na lógica fuzzy, é atingido o ponto de máxima geração de energia, desta forma transferindo toda a energia gerada à partir das fontes alternativas, solar-fotovoltaica e eólica, à carga e/ou as baterias quando seu uso não imediato.

O modelo utilizado adota três variáveis de entrada, que são: velocidade do vento, radiação solar e carga do banco de baterias.

Serão utilizados para as simulações alguns softwares como o MATLAB e outros, que serão citados ao longo do trabalho. Nestes ambientes serão analisadas e simuladas todas as modelagens matemáticas, regras e demais variáveis descritas no sistema fuzzy.

Este modelo foi utilizado para a implementação de um sistema de controle de sistemas híbridos de geração de energia, proporcionando o melhor aproveitamento das fontes de energia, sol e vento, de modo que possamos extrair o máximo de energia possível dessas fontes alternativas sem nenhum prejuízo ao meio ambiente.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Energização Rural, do Departamento de Engenharia Rural da UNESP-FCA. Os dados usados neste experimento foram gerados a partir dos trabalhos já realizados no NEAR - Núcleo de Estudos de Energias Alternativas e Renováveis, que faz parte do Laboratório acima citado. Todos os artigos, dissertações e teses utilizadas serão citadas ao longo deste trabalho, quando assim necessário.

Comparando com o sistema híbrido anteriormente analisado por Siqueira(2005) no NEAR, o resultado desta aplicação foi um considerável ganho no aproveitamento da energia renovável disponível no meio ambiente, utilizando-se um controlador baseado na teoria fuzzy para o gerenciamento das energias envolvidas e baterias para seu armazenamento e posterior uso, quando assim necessário.

Palavras-chave: energia eólica, energia solar fotovoltaica, sistemas híbridos, teoria fuzzy

DEVELOPMENT OF A FUZZY MODEL FOR OPTIMIZATION OF THE ENERGY GENERATED BY A HYBRID SYSTEM (SOLAR-PHOTOVOLTAIC AND WIND)

Botucatu, 2007. 103p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

Adviser: ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

2. SUMMARY

The use of alternative and renewable energy has been increasingly discussed in all sectors of society. The interest in these sources of energy, alternative and renewable, it is of fundamental importance, both in terms of shortage, as the price of oil, in addition to the environmental issues involved in the use of these energies.

Systems with photovoltaic and wind generation storage of energy in batteries has been presented as a form of alternative energy generation. The variability in the intensity of solar and wind energy can be circumvented by complementation between a source and another, or the more stable set to the generation of the system.

The objective of this dissertation is to create a methodology fuzzy and simulate their use in intelligent control of a hybrid system of generating power, using the energy solar-photovoltaic and wind.

When you use a system of control based on fuzzy logic, is reached the point of maximum generation of energy, thus transferring all the energy generated on the basis of alternative sources, solar, photovoltaic and wind, to the load and / or batteries when its use not immediately.

The model takes three variables of entry, which are: wind speed, solar radiation and loading the bank of batteries.

The simulations will be used for some software such as MATLAB and others, that will be cited during the work. In these environments will be analyzed and simulated all mathematical modeling, rules and other variables in the system described fuzzy.

This model could be used in the implementation of a system of control of hybrid systems to generate energy, providing the best use of energy sources, sun and wind, so we can extract the maximum energy possible these alternative sources without any prejudice to the environment.

The work was developed in the Laboratory of Energização Rural, of the Department of Rural Engineering of UNESP - FCA.

The data used in this experiment were generated from the work already done in the NEAR - Center for Studies on Alternative and Renewable Energies, which is part of the Laboratory above. All articles, dissertations and theses used will be cited throughout this work, when so required.

Compared with the hybrid system previously reviewed by Siqueira (2005) in the NEAR, the result of this application was a considerable gain in the use of renewable energy available in the environment, using a controller based on fuzzy theory to the management of energy involved and batteries for their storage and subsequent use, when so required.

Keywords: wind power, solar photovoltaics, hybrid systems, fuzzy theory

3. INTRODUÇÃO

Desde a crise do petróleo na década de 70, a utilização da energia solar fotovoltaica e a aerogeração tem crescido significativamente. As energias solar e eólica são fontes renováveis e não poluentes, constituindo recursos alternativos opcionais para geração de energia elétrica. Muitos países, com velocidades médias de vento na faixa de 5 a 10 ms^{-1} , estão utilizando sistemas de conversão da energia eólica em energia elétrica (geradores eólicos), em um esforço para minimizar a dependência de combustíveis fósseis que não são renováveis (BELLARMINE, 1996). Atualmente milhares de sistemas fotovoltaicos, em regiões com radiação solar média diária na faixa de 3 a 6 kWhm^{-2} , estão instalados ao redor do mundo, provendo pequenas potências, aplicações em redes independentes ou em sistemas individuais em regiões isoladas (MAHMOUD, 1990).

Segundo Siqueira (2005), o gerador eólico individual não produz energia utilizável por porção considerável de tempo durante o ano e, nem tão pouco em todas as horas do dia. Isto se deve às variações ocorridas na intensidade da velocidade do vento, abaixo do valor necessário para acionar o gerador eólico. Para superar este tempo de baixa produção, o uso de sistemas híbridos é recomendado.

Embora a energia solar seja ambientalmente benigna, e disponível em abundância, o sistema fotovoltaico individual é uma opção cara. Outra desvantagem principal de sistema fotovoltaico individual é a dependência em horas de brilho de sol variáveis, resultando em pequena capacidade de utilização, como também, na necessidade de armazenamento de energia e sistemas de complementação (HANSEN, 1998).

A manutenção requerida para sistemas de geração eólica e fotovoltaica é muito pequena quando comparada com a de um gerador diesel.

Por outro lado, uma desvantagem comum para as energias eólica e solar reside na dependência das variações climáticas. Ambas as formas de energia, se usadas independentemente, teriam que ser superdimensionadas, para tornarem-se confiáveis, resultando em um custo total muito mais elevado. Porém, uma combinação da energia solar e eólica em um sistema de geração híbrido pode atenuar as flutuações individuais destas formas de energia, aumentando a produção de energia global e reduzindo significativamente a necessidade de armazenamento de energia. Devido a esta combinação, a despesa global para sistemas autônomos pode ser reduzida drasticamente para um grande número de casos (BAGUL, 1996).

Modelos matemáticos implantados em programas computacionais têm apresentado significativos resultados em sistemas não lineares e complexos nas mais diversas áreas, entre as quais, a teoria de controle, modelo de reconhecimento e análise de decisão. Esses programas são capazes de resolver questões que os modelos clássicos, via de regra, não são capazes de fazê-lo. São os chamados de sistemas inteligentes dentre os quais se destacam as Redes Neurais e a Lógica Fuzzy (SOUZA, 2004).

O termo inteligente é aplicado a determinados programas computacionais cuja metodologia de cálculo é baseada no raciocínio humano. A lógica fuzzy possibilita a interpretação de fenômenos não quantitativos e vagos utilizando uma lógica capaz de adequar o controle nebuloso ao raciocínio do senso comum (SOUZA, 2004).

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo específico de descrever o uso da teoria fuzzy para o controle de um sistema híbrido de geração de energia eólico-fotovoltaico de pequeno porte no suprimento de energia requerido por uma residência de uma propriedade rural, tirando o máximo de energia das variáveis meteorológicas sobre a produção de energia elétrica pelo sistema.

Através deste controle, foi atingido o ponto de máxima transferência de energia das variáveis sol e vento para a aplicação e difusão do uso de sistemas híbridos de energia, tornando-se uma alternativa possível e viável para pequenos consumidores rurais excluídos do acesso à rede de distribuição elétrica convencional.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Energia Solar

A energia proveniente do sol é a responsável por inúmeros fenômenos naturais que ocorrem neste planeta, entre eles a formação das zonas de altas pressões, responsáveis pelos fluxos de vento. O petróleo, gás natural e carvão formaram-se em consequência dos resíduos de plantas e animais que sobreviveram devido a um ciclo em que o sol foi fundamental. As reações químicas no processo de decomposição da matéria orgânica no solo. O processo de evaporação, que permite o represamento das águas etc. Percebe-se que a energia do sol é a responsável de forma indireta por praticamente toda a energia na terra (ANEEL, 2007).

4.1.1. Características da Energia Solar

De acordo com CEPEL/CRESESB (1999), antes de atingir o solo, as características da radiação solar, intensidade, distribuição espectral e angular, são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado massa de ar (AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas.

A radiação solar contém fótons que compreendem todas as intensidades luminosas relacionadas com a distribuição espectral. Fora da atmosfera, o espectro solar (espectro AM0) se aproxima ao de um corpo negro a temperatura de 5.800K e o valor da irradiação é de 1367 Wm^{-2} . Ao nível do mar, esse espectro se modifica devido à absorção atmosférica (espectro AM 1,5) e a irradiação decresce até o valor de 1000 Wm^{-2} , aproximadamente (LORENZO, 1994).

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre, é de maior importância para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações (CEPEL/CRESESB, 1999).

Segundo CEPEL/CRESESB (1999), de acordo com as normas preestabelecidas pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia) são determinados limites de precisão para quatro tipos de instrumentos: de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe. As medições padrões são: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal.

4.1.2. Utilização

Para se aproveitar esta energia por um processo direto tem-se algumas técnicas de utilização tais como: Energia Solar Fototérmica, Arquitetura Bioclimática e a Energia Fotovoltaica (CEPEL/CRESESB, 2007):

a. Energia solar fototérmica

Este tipo de aproveitamento está baseado no fenômeno de absorção da energia térmica pelos corpos, a partir da radiação solar incidente. O importante a ser observado nesta técnica é saber-se como captar esta energia e armazená-la. Os equipamentos destinados a esta tarefa de aproveitamento da energia solar fototérmica são os *coletores solares*.

b. Arquitetura bioclimática

A Arquitetura Bioclimática visa harmonizar as construções ao clima e as características locais, objetivando unicamente o bem estar do homem em seu lar ou local de trabalho, tirando partido da energia solar, através das correntes convectivas naturais e de microclimas criados por vegetação apropriada (CEPEL/CRESESB, 1999). Em outras palavras é a adoção de soluções arquitetônicas e urbanísticas adaptadas às condições específicas de cada lugar utilizando a energia que pode ser diretamente obtida das condições locais.

c. Energia solar fotovoltaica

É a energia elétrica que pode ser obtida diretamente da energia solar, convertida através de dispositivos especiais denominados por Células Fotovoltaicas. O efeito fotovoltaico, pesquisado por Edmond Becquerel em 1839 (CEPEL/CRESESB, 1999), é o fenômeno que provoca o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz.

4.1.3. Aproveitamento da Energia Solar Fotovoltaica

Para Tomalsquim (2003), o sol como fonte de calor e luz, é uma das fontes de energia mais promissoras para enfrentar as crises energéticas deste milênio, uma vez que existem várias técnicas disponíveis para o aproveitamento desta fonte energética. A energia proveniente do sol é a responsável por inúmeros fenômenos naturais que ocorrem neste planeta, entre eles a formação das zonas de altas pressões, responsáveis pelos fluxos de vento.

A Terra recebe anualmente $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, o que corresponde a 1000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (CEPEL/CRESESB, 1999).

4.1.4. Energia Solar Fotovoltaica Aplicada na Energização Rural

No Brasil, a eletrificação rural com sistemas fotovoltaicos começou em escala definitiva entre 1992 e 1994, mediante projetos-piloto em cooperação com outros países, principalmente Alemanha e USA.

Ao PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios, promovido pelo Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia, em parceria com as concessionárias de energia dos estados, coube a tarefa de iniciar a eletrificação das comunidades rurais não servidas pela rede convencional de energia elétrica, com fontes renováveis de energia.

Dentre as áreas de atuação do PRODEEM, destacam-se:

- a. Energização Comunitária em escolas, postos de saúde, bombeamento d'água e irrigação comunitária; centros comunitários; postos de comunicação (rádio/telefone);
- b. Energização dos processos de produção rurais: energia elétrica para irrigação, mecanização e beneficiamento da produção, eletrificação de cercas;
- c. Complementação da oferta de energia: apoio à implantação de sistemas utilizando energias renováveis (PCHS, biomassa, solar fotovoltaica e térmica, eólica, sistemas híbridos e outros) através de projetos das concessionárias ou de produtores independentes de energia elétrica.

Segundo Zumarán (2000), os Sistemas Fotovoltaicos nasceram como uma alternativa de geração de eletricidade para pequenas aplicações em lugares geralmente isolados ou que não tinham possibilidade de fornecimento convencional de eletricidade. O desenvolvimento da tecnologia de fabricação das células e a utilização de novos materiais semicondutores fizeram com que o custo médio de geração de eletricidade desses sistemas atingisse nível muito atrativo para o caso específico da eletrificação rural. No entanto, a característica não poluente desse tipo de tecnologia de geração de eletricidade, fez com que países preocupados com a redução dos efeitos ambientais do setor energético encorajassem a implementação de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas para operarem em paralelo com a rede elétrica convencional e, desse modo, melhorar a participação das tecnologias renováveis na sua matriz energética.

A eletrificação fotovoltaica é a que tem oferecido os melhores resultados para a eletrificação de comunidades isoladas e dispersas, tanto em termos da relação custo/benefício, quanto em termos da satisfação do usuário. No entanto, esses resultados ocorrem no âmbito de comunidades rurais remotas, onde as outras opções estão longe de oferecer um serviço de menor custo e maior satisfação (SERPA, 2001).

No contexto mundial da eletrificação rural, com energias renováveis, o sistema fotovoltaico oferece as seguintes vantagens:

- a. Modularidade - os módulos permitem desenvolver os projetos por etapas e acompanhar o ritmo da demanda energética;
- b. Flexibilidade - a variedade de arranjos permite desenho otimizado dos projetos;
- c. Segurança energética - o uso local do recurso solar permite que as comunidades planejem seus projetos sem sofrer interferências do mercado externo de eletricidade;
- d. Não contaminantes - ao contrário das outras fontes de energia, a energia solar fotovoltaica não polui, na sua geração, o meio ambiente. Entretanto, a má disposição de alguns elementos da tecnologia, como as baterias, pode afetar o meio ambiente;
- e. Controle local - a energia fotovoltaica permite que os sistemas sejam controlados localmente. Esse princípio vem incrementar a capacidade de gestão do sistema, a auto estima e o sentido de ganho das comunidades.

4.2. Geração Fotovoltaica

A conversão direta da energia solar em energia elétrica, é feita através de módulos fotovoltaicos e denominada Energia Solar Fotovoltaica (SIQUEIRA, 2005).

4.2.1. Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais semicondutores na presença da luz, constituindo-se no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura do material. Entre os materiais mais

usados para a conversão da radiação solar em energia elétrica destaca-se o silício (GREEN ET AL., 2000).

4.2.2. Células Fotovoltaicas

Lorenzo (1994) cita que as células de silício monocristalino são historicamente as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade. As fotocélulas comerciais obtidas com esta tecnologia atingem uma eficiência de até 15%, podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

A eficiência de conversão das células fotovoltaicas, para Green et al. (2000), é medida pela proporção da radiação solar incidente na superfície da célula que é convertida em energia elétrica.

A Figura 1 mostra a representação de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

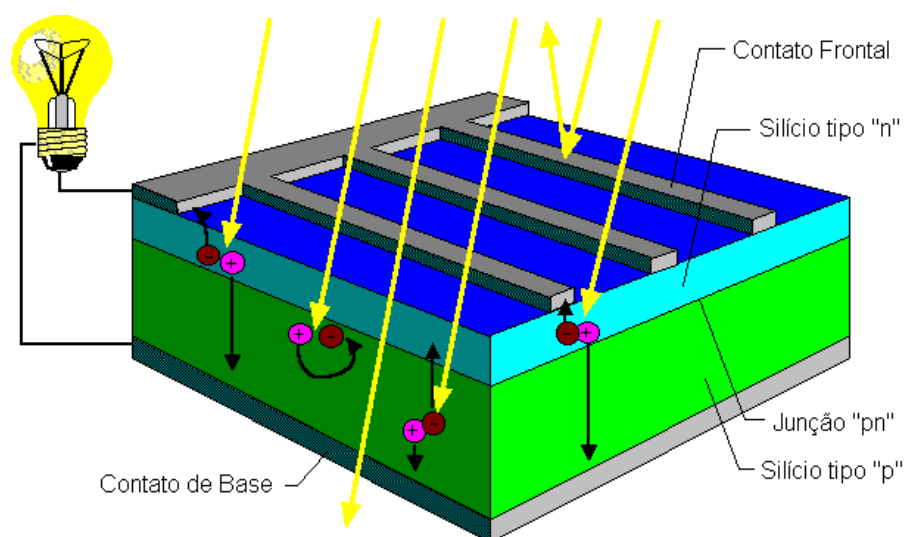


Figura 1. Representação de uma célula fotovoltaica (CEPEL/CRESESB, 2007)

Conforme Prieb (2002) citado por (Fiorentino, 2004), uma célula fotovoltaica é um dispositivo semiconductor similar a um diodo de junção. De acordo com a forma em que os átomos do semiconductor estão estruturados, as células podem ser classificadas em cristalinas (subdivididas em monocristalinas e multicristalinas) e amorfas. Existem células constituídas tanto por elementos singelos (silício, germânio, selênio), como

por ligas e compostos (arsenieto de gálio, sulfeto de cádmio, telureto de cádmio, disseleneto de cobre e índio, etc.).

As células de silício monocristalino, representada pela Figura 2, são historicamente as mais comumente utilizadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade; os demais tipos de células fotovoltaicas possuem comportamento elétrico semelhante. (Fiorentino, 2004)

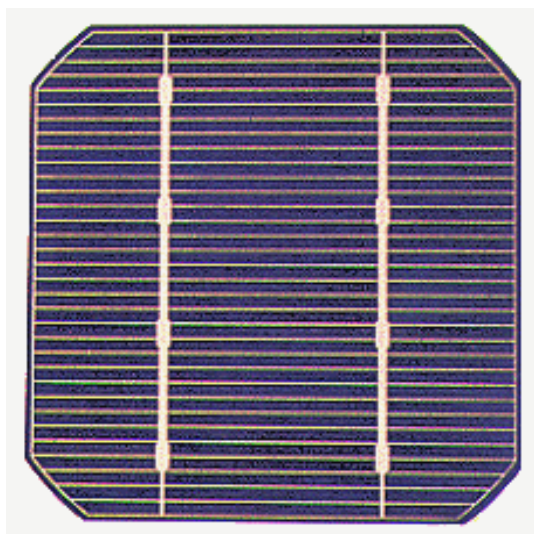


Figura 2. Célula de Silício monocristalino (CEPEL/CRESESB, 2007)

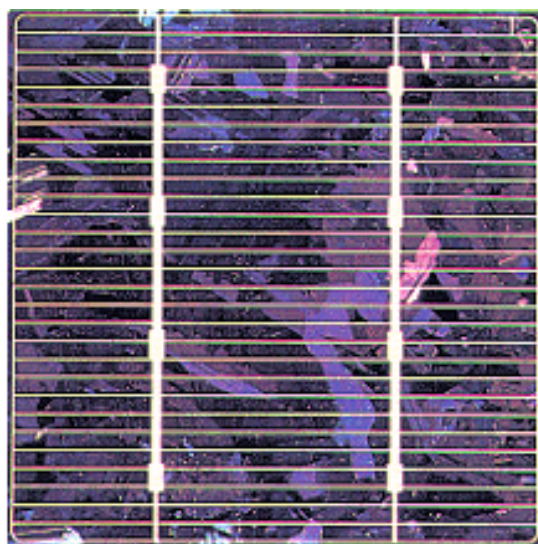


Figura 3. Célula de Silício Policristalino (CEPEL/CRESESB, 2007)

As células de silício policristalino, representada pela Figura 3, são mais baratas que as de silício monocristalino em função de diferenças no processo de fabricação. A eficiência, no entanto, é inferior em comparação com a célula de silício monocristalino.(Fiorentino, 2004)

Segundo Silva (2000) citada por Siqueira (2005), um dos fatores que impossibilitava a utilização de energia solar fotovoltaica em larga escala seria o alto custo das células. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$ 600,00/Wp, para programa espacial. Para Montenegro (2000), com a implementação do mercado e várias empresas voltadas para produção de células, o preço tem reduzido ao longo dos anos podendo ser encontrado, ao custo médio de US\$ 8,00/Wp.

4.2.3. Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é composto de células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente em nível suficiente para o aproveitamento da energia elétrica gerada (SIQUEIRA, 2005).

Lorenzo (1994) comenta que, o módulo fotovoltaico é a unidade básica comercialmente disponível, proporcionando proteção mecânica e ambiental às células e permitindo a sua utilização exposta às intempéries, sendo, portanto, composto de células encapsuladas e conectadas eletricamente em série e/ou em paralelo, produzindo níveis de tensão e corrente adequados à utilização ..

Segundo Fraidenraich (1995), os módulos são disponíveis em diversos níveis de tensão e potência, sendo que as potências são medidas em Watt-pico (Wp). Comercialmente são disponíveis módulos na faixa de 10Wp a cerca de 300Wp. Os módulos fotovoltaicos são dispositivos bastante confiáveis e de grande durabilidade, sendo que a maioria dos fabricantes oferece uma garantia de 20 anos.

4.2.4. Eficiência do Módulo Fotovoltaico

A eficiência do módulo fotovoltaico é a relação entre a energia produzida pela energia recebida no local (CAMARGO ET AL, 2000).

Segundo Lorenzo (1994), a eficiência do módulo fotovoltaico, sob condições particulares de irradiância e temperatura, é calculada pela Equação 01:

$$\eta_{(Gi)} = \frac{P_{MÁX(Gi)}}{A \times G_i} \quad (01)$$

Em que, $P_{MÁX(Gi)}$ é a potência máxima do sistema determinada para as condições particulares desejadas, A é a área da face ativa do módulo, G_i é a irradiância à qual foi submetido o módulo para fornecer o valor de potência máxima utilizado.

Segundo Montenegro (2000), o máximo de eficiência para células de silício individuais em laboratório é atualmente de 24%, bastante próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado, porém, têm eficiência aproximada de 15%, a diferença entre a eficiência da melhor célula de laboratório e painéis comerciais incluem perdas de interconexão entre células no módulo fotovoltaico, área ativa do módulo fotovoltaico e rendimento do processo produtivo.

4.2.5. Fatores que afetam o desempenho das células fotovoltaicas

Fatores como a intensidade de radiação luminosa (radiação solar) e variações de temperatura afetam o desempenho dos módulos fotovoltaicos:

a. Influência da Radiação Luminosa (Solar)

De acordo com Siqueira (2005), vários são os fatores que afetam a radiação solar na superfície de uma unidade fotovoltaica; entre os mais observados são: o movimento aparente do sol de acordo com a hora do dia e os dias nublados. Considerando que os painéis fotovoltaicos são fixos em uma determinada estrutura, é importante que se determine a melhor posição de inclinação, considerando a região em que o painel será instalado.

A Figura 4 representa as curvas características de uma célula de 1 cm^2 mantida em temperatura constante e sob diferentes condições de iluminação. Pode-se observar um incremento na corrente de curto circuito proporcional à intensidade de radiação solar

incidente, enquanto a tensão de circuito aberto aumenta logarithmicamente, exceto para valores de irradiância muito baixos (FIORENTINO, 2004).

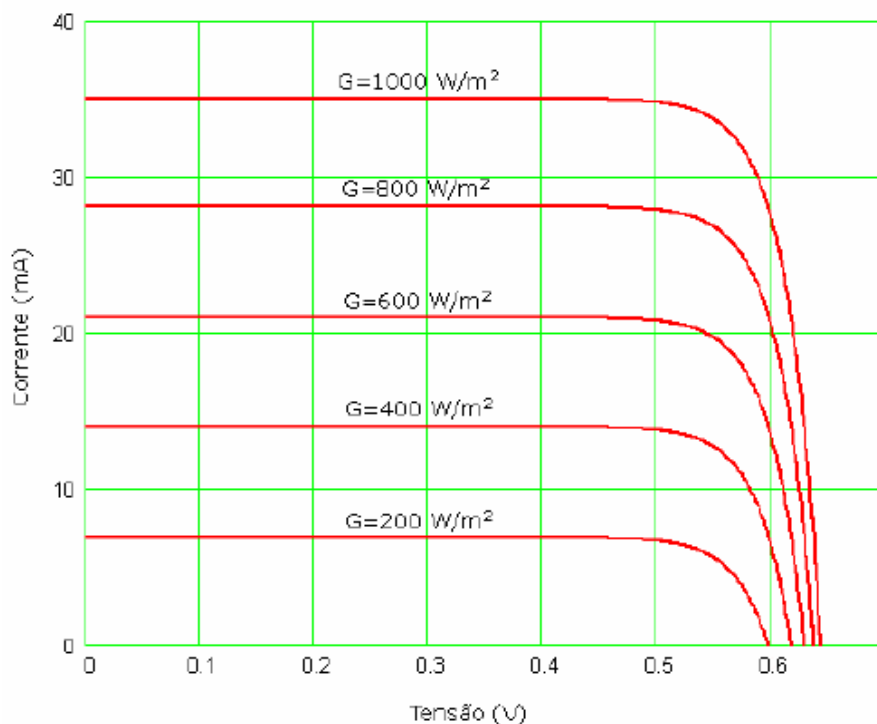


Figura 4. Efeito da variação da irradiância sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica (FIORENTINO, 2004).

b. Influência da Temperatura

Ainda segundo Siqueira (2005), a incidência da luz do sol na superfície dos módulos fotovoltaicos e a temperatura das massas de ar fazem com que aumentem a temperatura nos módulos, afetando o seu desempenho. Este efeito deverá ser considerado no modelo a ser desenvolvido. Como em qualquer dispositivo, um aumento da temperatura compromete o rendimento; este fato também é observado nas células.

A Figura 5 mostra as curvas características de uma célula de 1 cm^2 , sob intensidade de radiação solar incidente constante, variando-se a temperatura da célula. Pode-se observar uma diminuição na tensão de circuito aberto proporcional ao aumento da temperatura. Essa taxa de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura é chamada

β e, para o silício, assume valores tipicamente ao redor de $-2,3 \text{ mV}^\circ\text{C}^{-1}$. A diminuição da tensão de circuito aberto altera toda a curva, sendo que a célula sofre uma nítida perda de potência com o aumento da temperatura (FIORENTINO, 2004).

A corrente de curto circuito apresenta um incremento com o aumento da temperatura, da ordem de $0,0003 \text{ A}^\circ\text{C}^{-1}$ e é chamada de α . Esse acréscimo reflete-se também na potência, sendo, porém, insuficiente para compensar a perda de potência causada pela diminuição da tensão. A taxa de variação da corrente de curto circuito com a temperatura é denominada α .

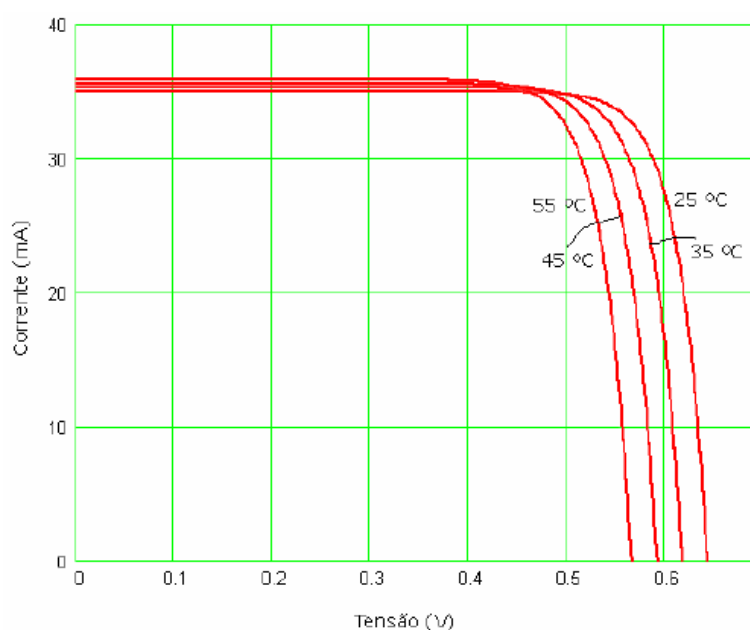


Figura 5. Efeito da variação da temperatura sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica (FIORENTINO, 2004).

4.2.6. Características dos Sistemas Fotovoltaicos

Fraidenraich (1995) entende que sistema fotovoltaico é o conjunto de elementos capazes de converter a energia radiante solar em energia utilizável pelo usuário, mediante o emprego de fotocélulas. Tal sistema é constituído de um elemento conversor, formado pela interligação elétrica de vários módulos, que geralmente recebe o nome painel fotovoltaico, e por outros aparatos relativamente convencionais que transformam ou armazenam a energia elétrica para que possa ser utilizada pelo usuário.

Segundo o CEPEL/CRESESB (1999), um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede.

Os sistemas isolados fotovoltaicos atendem a uma determinada carga utilizando exclusivamente a energia solar fotovoltaica (COSTA, 2001).

Sua configuração básica compreende, além do módulo fotovoltaico, a unidade de controle de carga e a unidade de armazenamento de energia. A ordem de grandeza da potência fotovoltaica instalada deste tipo de sistema varia tipicamente de centenas de Wp a unidades de kWp.

Na Figura 6, o CEPEL/CRESESB (1999) apresenta quatro dentre as muitas configurações possíveis para um sistema fotovoltaico isolado, denominadas tipo A,B,C e D:

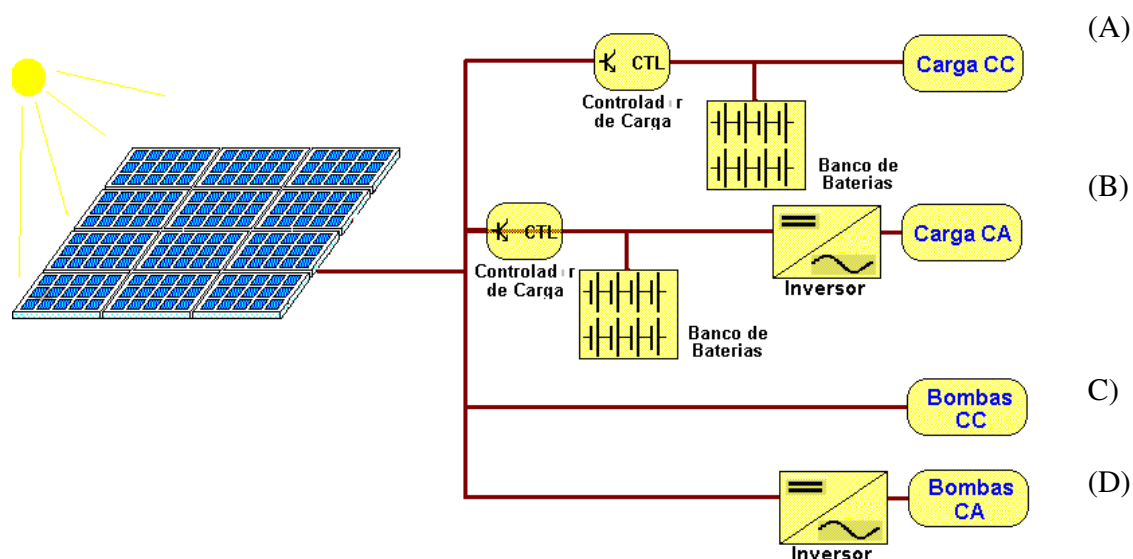


Figura 6. Algumas configurações possíveis do sistema fotovoltaico.

- Tipo A: alimentação de uma carga CC diretamente a partir de um banco de baterias, cuja carga é controlada por um controlador de carga;
- Tipo B: alimentação de uma carga CA por meio de um inversor, conectado diretamente ao banco de baterias, cuja carga é controlada por um controlador de carga;

- Tipo C: conexão direta de uma carga CC ao módulo fotovoltaico, no caso, uma bomba d'água com motor CC;
- Tipo D: conexão de uma carga CA ao módulo fotovoltaico por meio de um inversor, no caso uma bomba d'água com motor CA.

A maior limitação na utilização da energia fotovoltaica consiste no custo de aquisição e instalação do sistema fotovoltaico como um todo. Sendo assim, os módulos fotovoltaicos, por serem ainda caros, são recomendados apenas para baixos níveis de consumo. Por isso, a grande aplicação da energia solar fotovoltaica está ainda restrita ao atendimento de locais remotos ou áreas de difícil acesso, distantes da rede elétrica (MESQUITA ET AL., 2004).

Ainda para Mesquita et al (2004), no Brasil, a inserção dos sistemas fotovoltaicos ocorreu no meio rural, em geral, através de iniciativas governamentais ou de concessionárias que financiam a instalação de sistemas fotovoltaicos autônomos como os Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares e os Sistemas de Bombeamento de Água.

Mais recentemente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados integrados em telhados e fachadas de edificações. Nesse caso, tem-se que, além de consumidoras de energia, essas edificações passam a produzir energia, podendo, em algumas situações, verter o excedente à rede de distribuição de eletricidade.

A edificação poderá consumir energia da rede ou do sistema fotovoltaico. No caso em que o consumo de energia for menor do que o proporcionado pelo sistema fotovoltaico, o excedente pode ser injetado à rede de distribuição.

O principal aporte dos sistemas fotovoltaicos para a sociedade é a geração de energia elétrica com níveis mínimos de emissões poluentes ao meio ambiente, e por se tratar de uma fonte inesgotável de energia. Tecnicamente, esses sistemas se apresentam como concorrentes dos geradores elétricos convencionais; no entanto, essa concorrência ocorre em condições desfavoráveis para os sistemas fotovoltaicos porque a formação de preços não atribui nenhum valor à redução das emissões e a origem renovável.

É importante lembrar que a busca desses mecanismos de incentivo torna-se particularmente importante, quando se observa que muitas das vantagens que as fontes renováveis e não convencionais apresentam não produzem um retorno financeiro ao

investidor propriamente dito, trazendo sim grandes benefícios à comunidade, a sociedade e ao meio ambiente.

Como a energia solar fotovoltaica ainda possui custos elevados, para que possa continuar desenvolvendo-se é necessário estabelecer mecanismos capazes de viabilizá-la.

4.2.7. Componentes de um sistema fotovoltaico

De acordo com CEPEL/CRESESB (2007), um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados a rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento conforme a Figura 7:

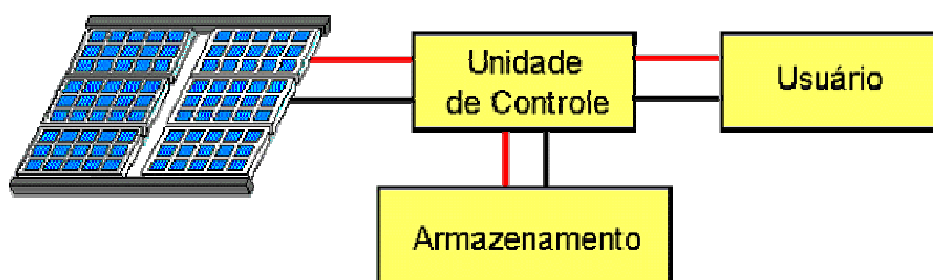


Figura 7. Configuração básica de um sistema fotovoltaico.

a. Sistemas Isolados

Sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou armazena-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocada em reservatórios.

Em sistemas que necessitam de armazenamento de energia em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria. O "controlador de carga" tem como principal função não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou

descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de eletrodomésticos convencionais.

b. Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que, desconectado da rede convencional, apresenta várias fontes de geração de energia como, por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras, conforme exemplo na Figura 8. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica torna-se complexo na necessidade de otimização do uso das energias. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.



Figura 8. Exemplo de sistema híbrido.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido a grande

complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso.

c. Sistemas Interligados à Rede

Estes sistemas utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual esta conectada. Todo o arranjo é conectado em inversores e logo em seguida guiado diretamente na rede, conforme ilustrado na Figura 9. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

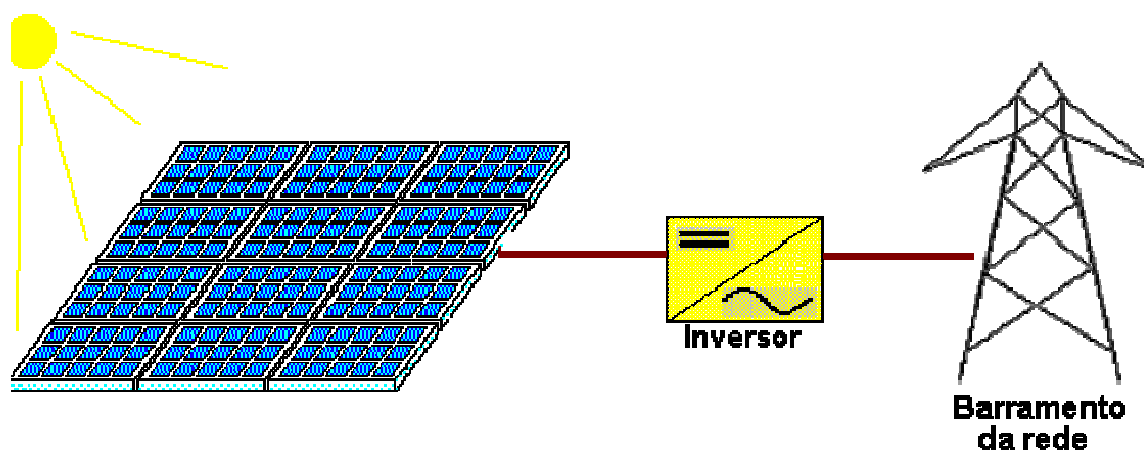


Figura 9. Sistema conectado à rede.

4.3. Energia Eólica

O homem tem empregado o vento como fonte de energia a milhares de anos, mas foi após a crise do petróleo que esta forma de energia adquiriu grande desenvolvimento (BASTIANON, 2003).

Cerca de 2% da energia solar incidente sobre a Terra é convertida em energia eólica. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DWIA, 2007a).

Segundo Moragues e Rapallini (2007) o aquecimento diferenciado da superfície terrestre, pela ação da radiação solar, é a causa principal dos ventos. Nas regiões equatoriais tem-se uma maior absorção da radiação solar que nas polares. O ar quente que se eleva nos trópicos é substituído pelas massas de ar frios superficiais provenientes dos pólos. O ciclo se fecha com o deslocamento do ar quente até os pólos pelas regiões mais elevadas da atmosfera. Entretanto, como a Terra gira, esta circulação é alterada pelo movimento de rotação do globo gerando zonas de ventos dominantes que respondem a padrões definidos.

4.3.1. Avaliação do Potencial Eólico

Para Johansson et al. (1993) os ventos possuem energia cinética, que pode ser aproveitada com o uso de aerogeradores, os quais têm a capacidade de converter esta energia cinética disponível nos ventos em energia elétrica. Assim, a energia cinética (E_c) contida em uma amostra de volume de ar ($A(\delta x)$), com a densidade do ar (ρ) movendo-se com uma velocidade (v) onde (A) é a unidade de área perpendicular à direção do vento e (δx) é paralelo à direção dos ventos, é dada pela Equação 02:

$$E_c = \frac{M v^2}{2} = \frac{\rho A (\delta x) v^2}{2} \quad (02)$$

O fluxo de energia (P) é obtido pela derivada da energia cinética (dE_c) por unidade de área, em relação ao tempo (dt), conforme a Equação 03:

$$P = \frac{dE_c}{dt} \times \frac{1}{A} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\delta x}{\delta t} \right) v^2 = \frac{\rho v^3}{2} \quad (03)$$

Assim, a energia disponível no vento (E) é dada pela Equação 04:

$$E = P \cdot h = \frac{\rho v^3}{2} \cdot h \quad (04)$$

Em que, h representa o tempo, em horas.

A densidade do ar pode ser calculada aproximadamente pela temperatura (T) e a pressão (P) do local onde o aerogerador está posicionado pela Equação 05:

$$\rho = \frac{P}{R T} \quad (05)$$

Em que, (R) é a constante do ar.

4.3.2. Eficiência de Betz

A Lei de Betz foi formulada pela primeira vez por Albert Betz em 1919. Pela Lei, só pode-se converter 16/27 (ou 59%) da energia cinética do vento em energia mecânica usando-se um aerogerador (DWIA, 2007b).

Ainda segundo DWIA (2007b), para demonstrar a Lei de Betz, pode-se considerar que v_1 seja a velocidade do vento antes de passar pelo aerogerador e v_2 a velocidade após a passagem pelo aerogerador, como apresentado na Figura 10. Pode-se dizer, então, que a massa de fluxo de ar (m) que passa pelo aerogerador é dada pela Equação 06:

$$m = \frac{\rho A (v_1 + v_2)}{2} \quad (06)$$

Em que, (ρ) é a densidade do ar e (A) a área varrida pelo rotor.

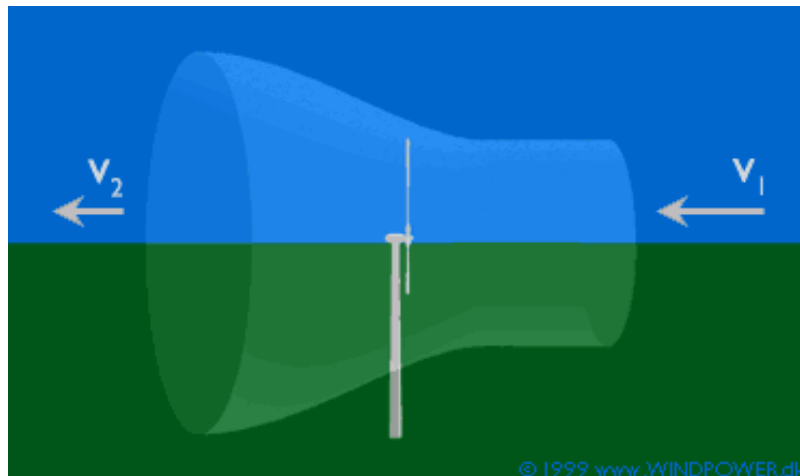


Figura 10. Comportamento da velocidade do vento antes e depois de passar pelo aerogerador.

A potencia do vento (P) extraída pelo rotor é igual ao produto entre a massa do fluxo de ar e a diferença dos quadrados da velocidade do vento, conforme a Equação 07.

$$P = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (07)$$

Substituindo-se o fluxo de massa de ar (m) na Equação 07 pelo encontrado na Equação 06, tem-se a Equação 8, para a potência extraída do vento (P):

$$P = \left(\frac{\rho}{4}\right)(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)A \quad (08)$$

A potência extraída pelo vento (P_0) para a mesma área (A) sem nenhum tipo de obstáculo ao fluxo de ar é dada pela Equação 09:

$$P_0 = \frac{\rho v_1^3 A}{2} \quad (09)$$

A razão entre as Equações 08 e 09 é dada pela Equação 10:

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right) \quad (10)$$

O ponto máximo da Equação 10 é obtido quando v_2/v_1 é igual a 1/3. Neste ponto P/P_0 é igual a 0,59 vezes o valor de P_0 ou, 16/27 da potência disponível no vento.

4.3.3. Medição do Vento

As medições das velocidades do vento se realizam normalmente usando um anemômetro de conchas. Estes anemômetros têm um eixo vertical e três conchas impulsionadas pelo vento. O número de revoluções por segundo pode ser registrado eletronicamente. Normalmente, o anemômetro é provido de um direcionador, conhecido como bandeira, para detectar a direção do vento (DWIA, 2007c).

Ainda com relação aos equipamentos para medição da velocidade e direção do vento, Castro (2004) informa que é essencial que a instrumentação esteja bem exposta a todas as direções do vento, isto é, os obstáculos devem estar situados a uma

distância de, pelo menos, dez vezes a sua altura. A medição do vento deve ser efetuada a uma altura próxima da altura a que vai ficar o cubo do rotor da turbina. De forma a permitir correlacionar os dados do local com os registros existentes em estações meteorológicas próximas, é desejável uma medida adicional à altura normalizada de 10 metros.

4.3.4. Aproveitamento do Potencial Eólico

De acordo com DWIA (2006), a utilização da energia eólica para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e, através de conhecimentos da indústria aeronáutica, os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia.

Lacera e Xiberta (2004), afirmam que a avaliação da energia eólica disponível é a curto, médio e longo prazo uma tarefa complexa. O vento é uma fonte com substanciais variações temporais e espaciais, tanto na superfície como na altura, e que conta, além disso, com uma componente aleatória importante. Ao mesmo tempo, se deve considerar que a energia eólica disponível por unidade de área exposta ao vento é proporcional ao cubo da velocidade, por isso pequenas variações desta, afetam sensivelmente a energia fornecida.

ECDGE (2007) comenta que no início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão. Mais de 50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e equipamentos foi desenvolvida. Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 30% e movimentando cerca de 2 bilhões de dólares em vendas por ano.

De acordo com a GWEA (2007) existem mais de 30.000 turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. No âmbito do Comitê Internacional de Mudanças Climáticas, está sendo projetada a instalação de 30.000 MW, por volta do ano 2030, podendo tal projeção ser estendida em função da perspectiva de venda dos "Certificados de Créditos de Carbono".

No Brasil, conforme informam Rosas e Estanqueiro (2003) citado por Siqueira (2005), embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito

tradicionalmente com a utilização de cata-ventos múltiplos para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico para geração de energia elétrica, ainda não explorado. A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com turbinas eólicas de médio e grande portes conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas - bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

4.4. Geração Eólica

A geração eólica consiste na utilização de turbinas eólicas para a conversão direta da energia contida no vento em energia elétrica. Os sistemas de geração de energia eólica existem em diversas dimensões e para diferentes níveis de geração (SIQUEIRA, 2005).

4.4.1. Sistemas de Grande Porte Ligados à Rede

De acordo com DWIA (2006), as dimensões típicas das turbinas eólicas de eixo horizontal de ligação à rede situam-se numa gama entre 50 kW e 2 MW. A tentativa de especificar um ponto ótimo para a dimensão dos aerogeradores tem alimentado grande número de discussões. No entanto ainda não existe evidência de que exista um ótimo econômico.

Para a GWEA (2007) a tecnologia de sistemas eólicos atingiu, nos EUA e na Europa, a maturidade. A Europa tem vantagem competitiva ao nível de aerogeradores de grande dimensão (ordem de MW), pois o desenvolvimento destes sistemas teve início neste continente. Estas máquinas são desenvolvidas com base em experiências não comerciais de projetos de investigação e demonstração.

Rosas e Estanqueiro (2003) citam que aerogeradores de ligação à rede funcionam agrupados em estruturas denominadas parques eólicos. A dimensão dos parques eólicos varia entre alguns 0.1 MW a dezenas de MW.

Ainda segundo a GWEA (2007) os aerogeradores atualmente no mercado usam, para a conversão de energia mecânica em elétrica, geradores assíncronos. A

designação de aerogeradores de velocidade fixa vem da tentativa de manter a velocidade fixa a partir de sistemas mecânicos ou aerodinâmicos. No entanto, o gerador assíncrono utilizado por estes aerogeradores não têm que funcionar forçosamente a uma velocidade fixa, tal como acontece com o gerador síncrono, mas sim dentro de uma gama de velocidades recomendável. A grande desvantagem dos geradores assíncronos reside no fato de precisarem absorver energia reativa da rede o que, para além de uma dependência desta, lhe trás problemas de controle de tensão e frequência.

A DWIA (2006) explica que os modelos de velocidade variável baseiam-se no uso de geradores síncronos e permitem um melhor aproveitamento da energia. Os geradores síncronos têm capacidade de controlar, através da excitação, a tensão e a potência reativa gerada o que era impossível nos geradores assíncronos. No entanto, a frequência é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor pelo que são necessários sistemas de conversão de frequência. Os sistemas de conversão de frequência baseiam-se em sistemas eletrônicos de potência, mais concretamente: um retificador AC-DC e um inversor DC-AC. Estes sistemas possibilitam uma total manipulação da onda de saída: forma, frequência, fator de potência e tensão.

4.4.2. Sistemas Eólicos Isolados de Pequeno Porte

Estes sistemas delimitam uma gama de potências entre 25 W e 10 kW e são usados para carga de baterias, bombeamento de água, aquecimento, etc. Para sistemas de carga de pequenas baterias, com potências entre 25 W e 150 W (usando turbinas com diâmetro de rotor de 1 a 3 m), sendo este tipo de sistemas o mais bem sucedido comercialmente (HANSEN, 1999).

Powell (1981) citado por (Siqueira, 2005), explica que os aerogeradores têm um comportamento menos padronizado que os sistemas fotovoltaicos, e apesar da forma da sua curva de potência ser típica (potência em função da velocidade do vento), é mais difícil estabelecer uma equação que defina um comportamento geral. Assim, para o modelo mais simples, os valores de potência e velocidade do vento da curva fornecida pelo fabricante são tabelados.

4.4.3. Eficiência dos Sistemas Eólicos

A eficiência do sistema eólico pode ser determinada pela relação entre a potência disponível no vento com a potência final que é fornecida pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade, ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor. Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele (JOHANSSON ET AL., 1993).

Bastianon (2003) explica que da potência disponível no vento, só uma parte pode ser captada pelas pás e o grau de eficiência destas é medido pelo coeficiente de potência. Para o cata-vento multipás o valor máximo do coeficiente de potência pode chegar a 0,12, enquanto que, para um aerogerador eficiente de três pás, pode chegar a 0,42. O valor máximo do coeficiente de potência representa o rendimento aerodinâmico que as pás do aerogerador podem obter.

A potência fornecida pela turbina depende do coeficiente de potência e que, este coeficiente é obtido a partir da razão entre a potência captada e a potência eólica existente na massa de ar (SIQUEIRA, 2005).

Terciete (2002) comenta que, com relação ao rotor, o mesmo deve ser fabricado com grande precisão nos perfis aerodinâmicos e bom acabamento superficial, requisitos para maximizar a eficiência aerodinâmica. Esta depende das seguintes características geométricas das pás:

a. Tamanho (comprimento): está determinado em função da potência desejada e fixado também pela frequência de rotação máxima, a qual a hélice não deve ultrapassar evitando, desta forma, tensões nas pás devido à força centrípeta. É importante estudar a vibração e a fadiga das pás, principalmente nas maiores;

b. Perfil: está relacionado com o desenho da borda da pá, sendo um parâmetro de grande importância, já que o rendimento do rotor depende deste perfil. Em estudo realizado por Hulscher e Frankel (1994), comprovou-se que o perfil de asa de avião proporciona um empuxo máximo e resistência mínima, que é muito útil para a construção das pás;

c. Ângulo de ataque: escolhidos o perfil e a velocidade típica do rotor, se determina esse fator, que permite obter a potência ótima e também utilizá-lo como sistema de regulação;

d. Espessura: não intervém na potência de saída da turbina eólica (que depende da área varrida pelas pás) mas no arranque (partida). Com pás mais estreitas e finas se consegue uma velocidade de rotação maior, ao passo que com pás mais espessas se consegue uma velocidade menor, porém com torque de partida maior.

4.5. Sistemas Híbridos de Geração de Energia Elétrica

4.5.1. Características dos Sistemas Híbridos de Energia

Barbosa et al. (2004), considera um sistema híbrido aquele que utiliza conjuntamente mais de uma fonte de energia, dependendo da disponibilidade dos recursos energéticos locais, para geração de energia elétrica. A opção pelo hibridismo é feita de modo que uma fonte complemente a eventual falta da outra.

Estes sistemas podem ser sistemas de geração eólicos combinados com sistemas fotovoltaicos, diesel ou hídricos, em que podem ou não ser usados sistemas de armazenamento de energia. Além disto, estes sistemas são usados para pequenas redes isoladas ou para aplicações especiais tais como bombeamento de água, carga de baterias, atendimento de pequenas comunidades e dessalinização, por exemplo. A dimensão destes sistemas varia entre 10 kW e 200 kW sendo os modelos criados e dimensionados especialmente para cada caso de estudo, o que justifica o elevado custo deste tipo de sistemas (ROSAS E ESTANQUEIRO, 2003).

Dentre as fontes energéticas utilizadas pelos sistemas híbridos, as que mais se sobressaem são a solar e a eólica, ambas de caráter renovável (BARBOSA ET AL., 2004).

Rosas e Estanqueiro (2003) avaliam que o objetivo destes sistemas é produzir o máximo de energia possível a partir das fontes renováveis, enquanto mantidas a qualidade da energia e a confiabilidade especificada para cada projeto.

Segundo Beyer et al. (1995) armazenando-se a energia em banco de baterias, o sistema é capaz de absorver o excedente de energia quando a disponibilidade

eólica é elevada e garantir o armazenamento da energia demandada para complementar – ou suprir – a energia produzida pelo aerogerador quando a disponibilidade eólica não é suficiente. O resultado tem sido 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 .

A maturidade da tecnologia renovável e a expansão dos sistemas com o aproveitamento das energias solar e eólica favorecem a diminuição dos preços dos componentes e novos controles poderão permitir a eliminação ou uma maior redução do tamanho do banco de baterias (BHATTI, 1997).

McGowan e Manwell (1999) consideram que as maiores contribuições com relação a sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos provêm de institutos de pesquisa e outras instituições interessadas na utilização de energias renováveis, que têm patrocinado a instalação e/ou o monitoramento de várias instalações, e que, através de diversas vias, têm divulgado suas experiências.

4.5.2. Dimensionamento de Sistemas Híbridos

Castedo et al. (1996) avalia que os métodos para o dimensionamento dos sistemas híbridos são geralmente do tipo energético e partem da condição que a energia produzida com a participação dos diferentes geradores possa satisfazer a demanda, considerando o custo em alguns casos.

Para Elhadidy e Shaahid (2000) de forma geral, pode-se escolher um aerogerador que satisfaça uma grande porção da demanda para diminuir a participação fotovoltaica, dado seu maior preço relativo.

García (2004) explica que um procedimento mais aperfeiçoado baseado no mesmo princípio de complementaridade é empregado para sistemas sem a presença do gerador diesel, isto é, eólico-fotovoltaicos puros. O procedimento considera a produção das componentes eólica e fotovoltaica e muda, complementariamente, o tamanho de ambas componentes para satisfazer a demanda.

Habib et al. (1999) consideram o custo do sistema e escolhem a configuração de custo mínimo, que para sua aplicação, com uma demanda constante de 5 kW, combina 59% de participação eólica e 41% de fotovoltaica.

De acordo com Siqueira (2005), é comum a estes métodos realizar a análise a partir das características reais de uma bateria, um módulo fotovoltaico e/ou um aerogerador. O processo de seleção determinará o número de elementos de cada subsistema. Assim por exemplo, para a capacidade do banco de bateria predeterminada, o método de Protogeropoulos et al. (1993) indica o número de módulos e de aerogeradores necessários.

No método de Habib et al. (1999) a combinação fica definida com a relação solar/eólica que projeta o menor custo.

Para simular o desempenho energético dos sistemas híbridos, os grupos e institutos de pesquisas têm desenvolvido alguns programas computacionais, a partir da modelagem de cada um dos componentes do sistema (Morgan et al., 1997, Macêdo, 2002, Giacomini, 2002).

McGowan et al., (1996), testaram 11 configurações para sistemas de telecomunicações típicos do Brasil, sendo que a mais econômica resultou ser uma das que combinava apenas as componentes eólica e fotovoltaica (com banco de baterias).

A bateria ou o banco de baterias, fazem parte dos componentes de modelagem complexa, pois seu funcionamento compreende processos químicos de carga e descarga, cada um dos quais responde diferentemente a diversos fatores como correntes, temperatura e estado de carga (COPETTI ET AL., 1993).

Segundo García (2004), os modelos empregados têm por objetivo determinar a capacidade da bateria, para gerenciar a quantidade de energia armazenada ou possível de armazenar e assim poder estimar-se a autonomia do sistema e sua confiabilidade.

4.6. Sistemas de Armazenamento de Energia

Nos sistemas para o aproveitamento das energias renováveis, em geral, podem ser necessários sistemas de armazenamento de energia, visto que o comportamento das energias primárias pode ser muito irregular, tendo inclusive períodos de baixa ou nula disponibilidade.

Entre os sistemas para o armazenamento o mais empregado é o constituído por acumuladores químicos, isto é, por baterias.

No mercado existem diversos tipos de baterias, dentre as quais as mais importantes são a de níquel-cádmio e as de chumbo-ácido. As de níquel-cádmio tem algumas vantagens, porém o menor custo das de chumbo-ácido tem determinado a sua generalização e continuidade de uso.

4.6.1. Conceitos básicos relacionados com as baterias de chumbo-ácido

De acordo com García (2004), a bateria de chumbo-ácido é o elemento capaz de transformar a energia potencial química em energia elétrica. Sua célula básica é composta essencialmente de dois eletrodos submersos em uma solução aquosa, ionizada pela adição de ácido sulfúrico e chamada de eletrólito e onde se produzem as reações químicas devidas à carga/descarga. A tensão nominal da célula básica é de 2 V, de modo que para atingir-se tensões maiores devem ser acopladas várias delas em série, constituindo as baterias ou acumuladores, cuja tensão mais comum é de 12 V, produzindo-se em menor medida de 6 e 24 V.

Com os processos de carga/descarga a tensão da bateria aumenta ou diminui, até atingirem-se determinados valores limites, além dos quais os componentes se modificam irreversivelmente. A magnitude do prejuízo nestes casos é acumulativa, isto é, por menores que sejam (quando a tensão está fora dos limites) conduzirão à deterioração da bateria e à diminuição da sua vida útil. Os limites de tensão mais comuns entre as baterias são em torno de 1,75 V e 2,35 V por célula e, ao ultrapassá-los se diz que as baterias estão sobre-d Descarregadas ou sobre-carregadas respectivamente.

Ainda segundo García (2004), a capacidade nominal da bateria é o número total de Ampères-hora que pode ser retirado de uma bateria nova, plenamente carregada, para os valores especificados de corrente de descarga, temperatura e tensão de corte. A capacidade tem uma forte dependência do tempo de descarga, diminuindo (em relação à nominal) quando o tempo é muito pequeno, isto é, quando a corrente de descarga é elevada, ou aumentando quando a corrente é pequena, onde, conseqüentemente, o tempo para a descarga é maior. Deste modo, a capacidade das baterias é medida em Ampères-hora e sua

magnitude identificada pela unidade Ah. Durante a carga a tensão limite superior é alcançada na proporção inversa ao tempo empregado para conseguí-la, sendo que a capacidade armazenada, ou corrente que poderá ser extraída posteriormente é menor quanto maior for a corrente de carga.

Estes comportamentos são mostrados na Figura 11, para uma bateria automotiva de 36 Ah. A capacidade da bateria em cada instante é conhecida pela multiplicação da corrente de carga/descarga com o tempo empregado para se atingir determinada tensão.

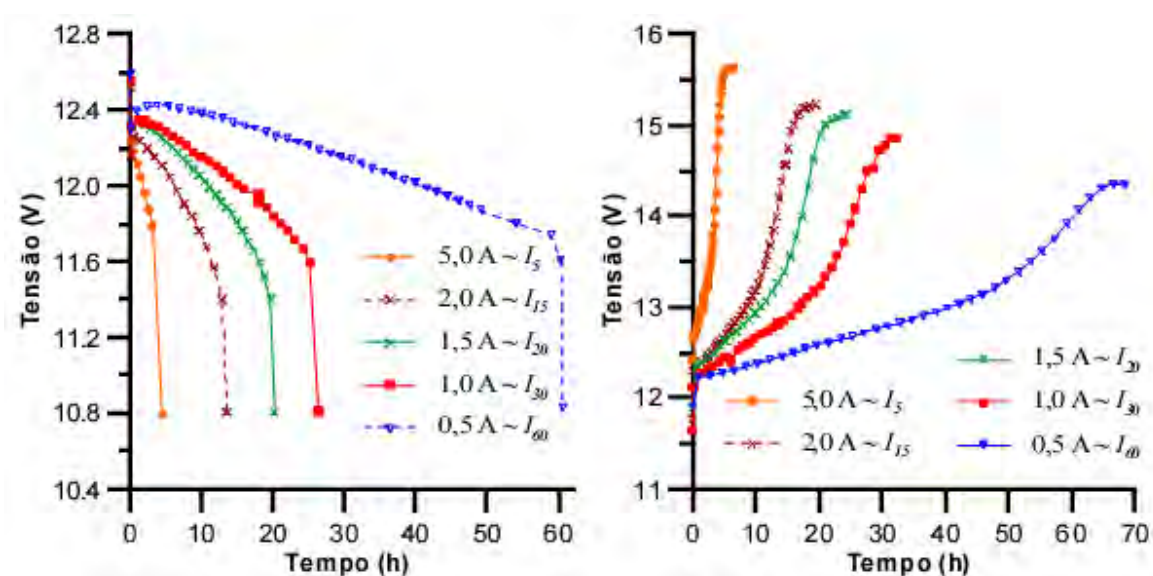


Figura 11. Variação da tensão de uma bateria durante o processo de A) descarga e B) carga (Moura, 1996).

O conhecimento do estado de carga das baterias é importante para prevenir os estados de sobrecarga e sobredescarga e poder administrar adequadamente a capacidade disponível. O estado de carga pode ser determinado por diversos métodos, alguns dos quais são referidos por Ciemat (2000) e analisados por Moura (1996).

Como mostra a Figura 11, um valor de tensão nos terminais da bateria é atingido por diferentes correntes de descarga em diferentes períodos (corrente x tempo = Ah), de modo que o mesmo pode ser indicativo de diferentes estados de carga da bateria. Não obstante, quando as baterias permanecem durante algum tempo em repouso, isto é, sem serem carregadas e nem descarregadas a tensão nos seus terminais é um bom indicativo do seu

estado de carga, tendo a relação entre ambas variáveis um comportamento linear como o mostrado na Figura 12.

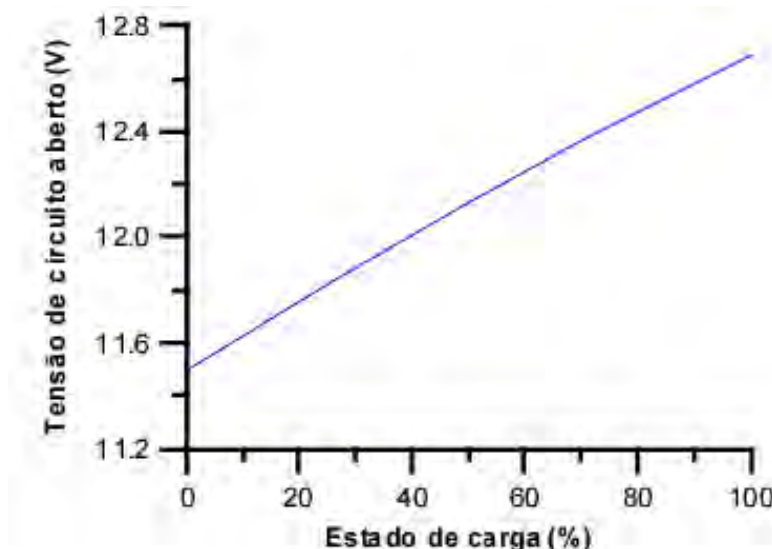


Figura 12. Estado de carga e tensão de circuito aberto de uma bateria (CIEMAT, 2000).

Segundo García (2004), definidas estas características os seguintes conceitos podem ser definidos:

- a. Carga/descarga: são os processos de conversão de energia elétrica em química (carga) quando à bateria é imposta uma corrente de uma fonte externa ou, de energia química em elétrica (descarga) quando à bateria é conectada uma carga elétrica.
- b. Capacidade nominal: é o número total de Ampères-hora que pode ser retirado de uma bateria nova, plenamente carregada, para os valores especificados de corrente de descarga, temperatura e tensão de corte.
- c. Capacidade disponível: é o número total de Ampères-hora que pode ser retirado de uma bateria no estado de carga em que se encontre, para um conjunto específico de condições operacionais.
- d. Regime de carga/descarga: é o valor da corrente elétrica utilizado durante a carga/descarga para restabelecer/consumir a capacidade total da bateria. Está geralmente normalizado para a capacidade nominal e períodos de carga/descarga de 10, 20, 100 horas, ou outras. É indicado como I_{10} , I_{20} , I_{100} .

- e. Estado de carga, EC: é a capacidade disponível na bateria, expressa como uma porcentagem da capacidade nominal.
- f. Profundidade de descarga, PD: percentual da capacidade nominal da bateria que foi retirado a partir do estado de plena carga.
- g. Tensão de corte: tensão na qual deve finalizar a descarga da bateria.
- h. Autodescarga: perda da capacidade disponível para uma bateria não submetida a processos de carga/descarga.
- i. Ciclo: sequência de carga/descarga para uma profundidade e regime de descarga determinados.
- j. Ciclo de vida: número de ciclos que uma bateria pode suportar sob determinadas condições de operação.
- k. Vida útil: período de tempo durante o qual uma bateria é capaz de trabalhar sob determinadas condições, mantendo a capacidade e o nível de rendimento
- l. Rendimento energético: relação entre a energia extraída da bateria durante a descarga e a energia requerida para restabelecer o estado de carga ao início do processo.
- m. Rendimento faradaico: relação entre a quantidade de Ampères-hora retirada de uma bateria durante a descarga e a quantidade necessária para restaurar o estado de carga inicial.

4.7. Teoria fuzzy

4.7.1. Introdução

Ciências como a engenharia, a química e a física criam modelos matemáticos exatos a partir de fenômenos empíricos e utilizam tais modelos para fazer previsões. Alguns aspectos do “mundo real” sempre escapam destes modelos matemáticos precisos e normalmente existe uma inexatidão percebida como parte do modelo original (SILVA, 2005).

Segundo Souza (2004), muitos fenômenos são compreendidos através de simulações que representam determinado comportamento de um dado sistema, podendo ser

analisado por simulações clássicas ou através de simulações que utilizem os sistemas inteligentes (programas de computador que respondem a dados de entrada, dando respostas baseadas na lógica do raciocínio humano).

Silva (2005), acredita que estruturas inexatas sejam bastante ricas em operações e propriedades que permitem a construção de modelos para uma grande variedade de situações. Além disso, estas propriedades matemáticas fornecem um guia prático para o raciocínio técnico e filosófico.

Conforme Cruz (2001), na Lógica Clássica, o valor verdade de uma proposição assumirá, somente, o valor falso (0) ou o valor verdadeiro (1) e, necessariamente, terá que assumir um desses dois, não havendo outra possibilidade. Já na Lógica Fuzzy, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto fuzzy de qualquer conjunto parcialmente ordenado. Geralmente é adotado o intervalo fechado de números reais $[0,1]$. Assim, na Lógica Fuzzy não existem apenas o verdadeiro (1) e falso (0), mas uma infinidade de valores verdades, os quais são expressões lingüísticas interpretadas como subconjuntos fuzzy do intervalo unitário. Por exemplo: falso, muito falso, um pouco falso, mais ou menos falso, pouco verdadeiro, muito verdadeiro, verdadeiro, etc.

No passado havia um grande interesse na construção de uma fundamentação lógica para a tomada de decisão sob condições de incerteza. Muitos autores foram pioneiros no tratamento das incertezas, mas a maioria preferiu construir funções de decisões que dependem da utilização de informações prévias ou de probabilidades subjetivas sobre a origem da incerteza (ZADEH, 1975).

Zadeh, reconhecidamente considerado o “Pai da Lógica Fuzzy”, definiu formalmente os conjuntos fuzzy, suas propriedades e operações algébricas e, mais tarde, introduziu o conceito das variáveis lingüísticas (HAMMELL II, 1990).

4.7.2. Fundamentos básicos

Segundo Shaw e Simões (2001), a lógica fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo “enfoque fuzzy” tem um imenso valor prático, na qual se torna possível a inclusão da

experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

Informações vagas, incertas, qualitativas, comunicações verbais, capacidade de aprendizado e de formulação de estratégias de tomadas de decisão são características humanas. Portanto, a teoria fuzzy é frequentemente referida como “inteligente”, devido ao fato de simular a inteligência humana (MCNEILL e FREIBERGER, 1994).

Conforme Zadeh (1975), a teoria dos conjuntos fuzzy tem como um de seus objetivos o desenvolvimento de uma metodologia para a formulação e solução de problemas bastante complexos ou mal formulados sob o ponto de vista das técnicas convencionais.

A fuzzificação é o processo de transformação da entrada em graus de pertinência ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação ou adjetivação da entrada. Ou seja, é a transformação de um número ou conjunto da lógica tradicional em um conjunto fuzzy. Por exemplo, um questionário pode perguntar por nomes de todas as pessoas com mais de 1,80m de altura. A fuzzificação deste questionário pode produzir um conjunto fuzzy compreendendo todas as pessoas consideradas altas, ou seja, maior que 1,80m (BELLMAN e ZADEH, 1970).

Um sistema fuzzy típico consiste de uma base de regras, de funções de pertinências e de procedimentos de inferência, conforme esquematizado na Figura 13.

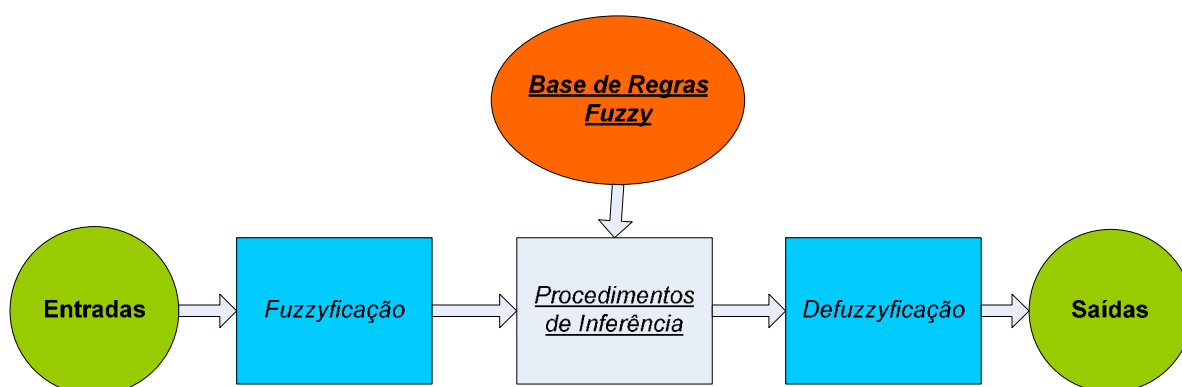


Figura 13. Estrutura geral de um sistema de inferência fuzzy (adaptado de HAMMELL II, 1990).

Os conjuntos fuzzy pertencentes à entrada compõem os antecedentes da regra. A entrada para o sistema é comparada com os antecedentes das regras fuzzy na base de regras e um grau de pertinência é obtido. Este grau de pertinência é usado no processo de inferência fuzzy para produzir um conjunto fuzzy sobre a saída, conforme a Figura 13.

Para situações que requerem uma resposta precisa, o conjunto fuzzy da saída é transformado num valor único, pelo processo de defuzzificação (BELLMAN e ZADEH, 1970). Os conceitos acima citados serão definidos e descritos a seguir.

4.7.3. Funções de pertinência

O conceito básico dos conjuntos fuzzy é relativamente fácil de ser assimilado, já que, no mundo real, as pessoas interpretam e utilizam instruções vagas e dados imprecisos todos os dias (SILVA, 2005).

Intuitivamente, um conjunto fuzzy é uma classe que admite a possibilidade de pertinência parcial. Sendo $E = \{x\}$ um conjunto de objetos, então o subconjunto (conjunto fuzzy) A , pertencente a E , é um conjunto de pares ordenados (ROSS, 1995):

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \forall x \in E. \quad (11)$$

Onde $\mu_A(x)$ é denominado de “grau de pertinência de x em A ”. Por simplicidade, será assumido que $\mu_A(x)$ é um número dentro do intervalo $[0,1]$, com os graus 1 e 0 representando, respectivamente, pertinência total e não pertinência num conjunto fuzzy.

Os graus de pertinência refletem um ordenamento de elementos num certo universo. É interessante notar que o valor do grau de pertinência $\mu_A(x)$, de um objeto x em A , pode ser interpretado como o grau de compatibilidade associado entre A e o objeto x . Por outro lado, pode-se também interpretar $\mu_A(x)$ como o grau de certeza que x assume o valor de um parâmetro fuzzy restrito por A .

Segundo Veiga (1994), o grau de pertinência é definido de forma aproximada, com base mais no pragmatismo do que na estatística. Um grau de certeza de 0,70,

por exemplo, pode ser atribuído por um especialista a um parâmetro quando ele tiver certeza que este valor não é o máximo de uma escala, mas tão somente 70% desta.

4.7.4. Operações de conjuntos fuzzy

Um subconjunto A de um conjunto E pode ser definido como um conjunto de pares ordenados, cada um com o primeiro elemento de E e o segundo elemento pertencente ao intervalo $[0,1]$, com exatamente um par ordenado apresentado para cada elemento de E (SILVA, 2005).

Isto define um arranjo entre os elementos do conjunto E e os valores do intervalo $[0,1]$. O valor zero é utilizado para representar a não pertinência total e o valor unitário para indicar a pertinência total. Já os valores intermediários são usados para representar os graus de pertinência intermediários ou os valores da participação de cada um dos elementos A no conjunto E. O conjunto E corresponde ao universo de discurso do subconjunto fuzzy A.

Exemplificando o que foi dito acima, toma-se $(E \subset A; x \in A)$:

$$\begin{aligned} E &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} \\ A &= \{x_3, x_4, x_5\} \end{aligned} \quad (12)$$

A função de pertinência $(\mu_A(x))$ para o subconjunto A com relação a cada elemento do conjunto E é:

$$\mu_A(x_1) = 0; \mu_A(x_2) = 0; \mu_A(x_3) = 1; \mu_A(x_4) = 1; \mu_A(x_5) = 1; \mu_A(x_6) = 0. \quad (13)$$

Utilizando uma convenção algébrica, o conjunto A pode ser escrito em uma forma em que cada argumento do conjunto mostra o elemento com seu respectivo valor de pertinência:

$$A = \{(x_1, 0), (x_2, 0), (x_3, 1), (x_4, 1), (x_5, 1), (x_6, 0)\}. \quad (14)$$

Do mesmo modo que a teoria clássica dos conjuntos, a teoria fuzzy também permite operações de complemento (negação), interseção e união.

Para o caso da união entre dois conjuntos fuzzy A e B, esta operação pode ser vista como o máximo dentre as funções de pertinência de A e B, tomado ponto a ponto:

$$A \cup B = \text{MAX} \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}. \quad (15)$$

Do mesmo modo, a interseção entre A e B, pode ser vista como o mínimo sobre as funções de pertinência de A e B:

$$A \cap B = \text{MIN} \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}. \quad (16)$$

4.7.5. Determinação dos conjuntos fuzzy

As funções de pertinência para a construção dos conjuntos fuzzy têm origem na opinião e no conhecimento de seres humanos, principalmente especialistas no assunto em questão (BRAGA, 1995).

Conforme Turksen (1984), na construção dos conjuntos fuzzy, os graus de pertinência são determinados por diversos métodos:

a. Avaliação e dedução subjetivas: Como os conjuntos fuzzy pretendem geralmente modelar a percepção e o conhecimento das pessoas, eles podem ser determinados por meio de procedimentos de cognição simples ou sofisticados. Num contexto simples, pessoas desenham ou especificam curvas de pertinência diferentes, apropriadas ao problema apresentado. Tais pessoas são tipicamente especialistas da área. Em casos mais complexos as pessoas podem ser submetidas a métodos psicológicos para fornecer dados para a determinação dos graus de pertinência;

b. Formas “Ad Hoc”: Enquanto existe uma infinidade de formas possíveis de funções de pertinência, as mais reais operações de controle fuzzy derivam de um pequeno conjunto de tipos de curvas, como, por exemplo, a simples forma dos conjuntos fuzzy triangulares. Isto simplifica o problema, já que neste caso basta se escolher o valor central e a inclinação das retas de ambos os lados do conjunto fuzzy; conversão de frequências ou probabilidades: Às vezes, as informações tomadas na forma de histogramas de frequências ou mesmo outras curvas de probabilidade são usadas como base para a construção da função de pertinência. Cabe destacar que funções de pertinência não são necessariamente probabilidades;

c. Mensuração física: Muitas aplicações da lógica fuzzy são mensurações físicas, mas quase nenhuma mede diretamente os graus de pertinências.

A parte mais crítica da construção de um modelo fuzzy é justamente a escolha da forma de cada conjunto fuzzy (trapezoidal ou triangular, por exemplo), visto que esta determina a correspondência entre os dados de entrada e os seus conceitos lingüísticos correspondentes. Entretanto, evidências experimentais mostram que modelos fuzzy têm um bom desempenho mesmo quando as formas de seus conjuntos fuzzy não se encontram precisamente determinados. A Figura 14 apresenta exemplos de conjuntos fuzzy trapezoidal (Alta) e triangular (Média).

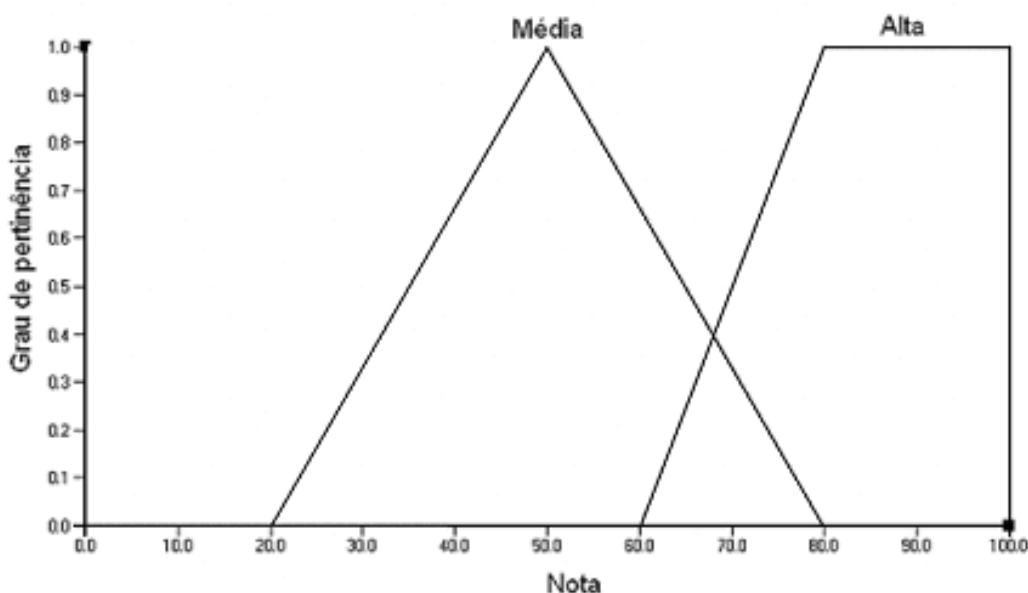


Figura 14. Formas trapezoidal e triangular dos conjuntos fuzzy.

Os conjuntos fuzzy em formas trapezoidais ou triangulares são convencionalmente utilizados em modelos de engenharia. A forma trapezoidal é utilizada para mapear funções de pertinência nos domínios extremos. Enquanto a forma triangular atua nas regiões intermediárias destes mesmos domínios. Não existe uma topologia rígida para as formas dos conjuntos fuzzy. O domínio da região fuzzy deve ser mais elástico do que restritivo, ou seja, deve se estender do zero à unidade.

4.7.6. Base de regras

Os especialistas humanos tomam decisões baseados em conhecimentos, muitas vezes armazenados na forma de regras. Inconscientemente, muitas vezes, regras do tipo SE-ENTÃO são aplicadas, como em casos de raciocínio complexo, onde há a necessidade da materialização desta espécie de regras. A criação de regras fuzzy passa obrigatoriamente pela criação dos conjuntos envolvidos (SILVA, 2005).

Ainda segundo Silva (2005), existem quatro métodos básicos de regras de controle fuzzy, o baseado na extração de conhecimento de especialistas, o baseado na observação de um operador humano, o baseado num modelo fuzzy e o baseado em aprendizado.

4.7.7. Defuzzyficação

Em algumas aplicações, uma interpretação lingüística do resultado é suficiente, por exemplo, quando o resultado é usado para fornecer uma resposta verbal ou qualitativa. Em outras aplicações, um valor numérico como variável de saída é solicitado, por exemplo, para se decidir sobre a aceitação ou rejeição de um projeto, ou mesmo para o caso de comparações ou estabelecimentos de um “ranking” ou ordem de priorização. Desta forma, nos casos em que um resultado numérico é necessário, o processo de defuzzificação deve ocorrer após a inferência fuzzy.

A relação entre o valor lingüístico e o seu correspondente valor real é sempre explicitada a partir das definições das funções de pertinência, utilizando o processo de defuzzificação. Visto que a lógica fuzzy tenta imitar as decisões humanas, um bom método de defuzzificação deve se aproximar de tal abordagem. A maioria dos sistemas fuzzy, principalmente os de priorização de projetos e de alocação de recursos financeiros, utiliza o método do Centro dos Máximos ou método de Defuzzificação pelas Alturas (SHAW e SIMÕES, 2001).

O método do Centro dos Máximos determina o valor mais típico para cada termo e então computa o valor que reflete o melhor compromisso com o resultado da inferência fuzzy. Para se obter este melhor valor de compromisso como um número real, as pertinências do resultado lingüístico da inferência fuzzy são considerados como os “pesos”

dos valores mais típicos dos termos lingüísticos. Assim, valor de melhor compromisso é aquele que equilibra os pesos, ou seja, por meio de uma média ponderada dos máximos se obtém a saída discreta (VON ALTROCK, 1995).

Na Figura 15 é apresentada uma aplicação do método de defuzzificação do Centro dos Máximos, para a obtenção de uma variável de saída hipotética x_1 .

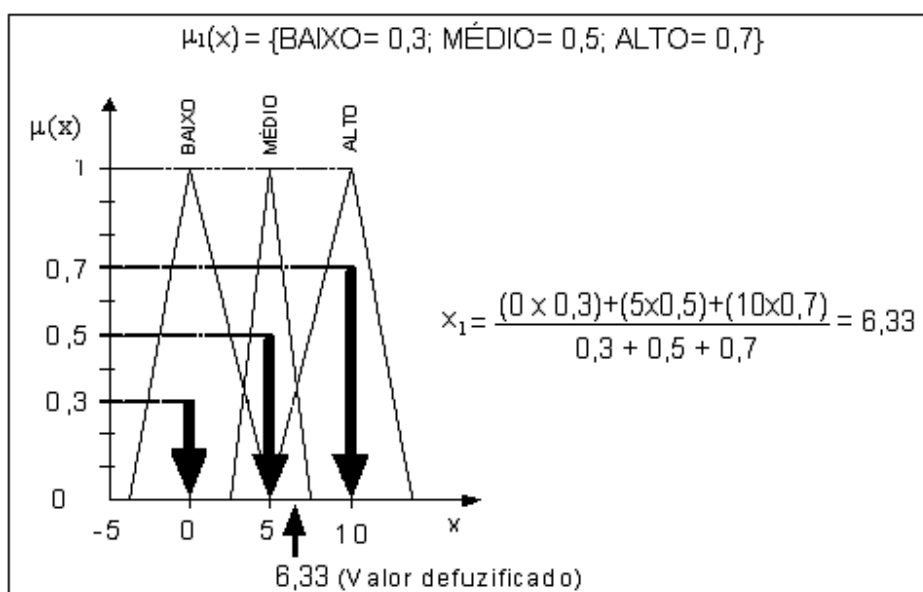


Figura 15. Aplicação do método de fuzzyficação do Centro dos Máximos (SHAW e SIMÕES, 2001).

4.7.8. Sistemas de controle fuzzy

O funcionamento de um controlador fuzzy de maneira simples e básica está esquematizado na Figura 16 (SOUZA, 2004):

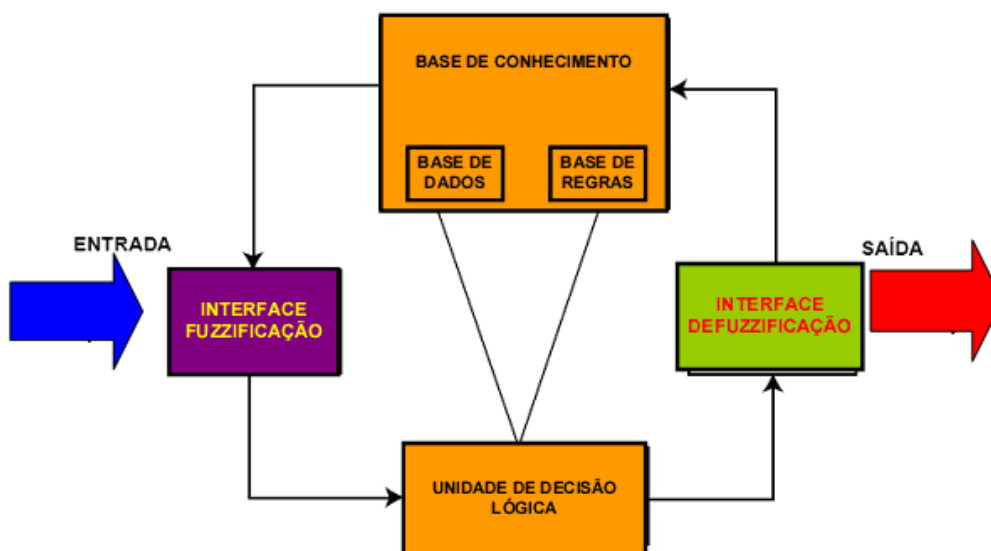


Figura 16. Esquema básico de um controlador fuzzy

As descrições das partes principais ilustradas na Figura 16 estão apresentadas, a seguir:

- a. Interface de Fuzzyficação: os valores de entradas são apresentados e escalonados tornando-se universo de discurso normalizado. Em seguida, são fuzzyficados, transformando em números do conjunto fuzzy, de modo que possam tornar-se instâncias de variáveis lingüísticas.
- b. Base de Conhecimento: um conjunto de regras caracterizada por estratégia de controle e metas.
- c. Base de Dados: armazena definições das funções de pertinência; sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, bem como a partições fuzzy de entrada e saída.
- d. Procedimento de Inferência: utiliza os dados fuzzy de entradas, e juntamente com as regras, processa-se inferindo numa resposta de controle fuzzy. Para isso, aplica-se um operador de implicação fuzzy e regras de inferência da Lógica Fuzzy.
- e. Interface de Defuzzyficação: transforma as ações de controle fuzzy inferidas em ações não-fuzzy. Em seguida, escalona-se para poder compatibilizar os

valores normalizados vindos do passo anterior com valores dos universos de discursos reais das variáveis.

4.7.9. Aplicações de sistemas de controle fuzzy

A aplicação da lógica fuzzy em sistemas de controle deve ocorrer em situações onde haja benefícios esperados por sua utilização, podendo haver situações em que seu uso não seja o mais indicado. De forma geral, a indicação de uso de lógica fuzzy ocorre quando se deseja incorporar ao sistema a experiência de operadores humanos a respeito do processo a ser controlado. (ZIMMERMANN, 1985)

Os sistemas fuzzy podem ser aplicados quando se pretende:
(TERANO et al, 1991)

- a. Expressar experiência humana, senso comum, etc., de forma utilizável por máquinas;
- b. Produzir modelos dos sentimentos ou linguagem humanos;
- c. Imitar comportamentos humanos em reconhecimento de padrões, julgamento ou compreensão geral.
- d. Converter informações para uma forma em que pessoas possam compreendê-las facilmente
- e. Comprimir grandes quantidades de informações
- f. Produzir modelos da psicologia ou comportamento humanos
- g. Produzir modelos de sistemas sociais.

Os sistemas de controle fuzzy vêm encontrando aplicações em vários campos da ciência e da técnica. Segundo TERANO et al (1991), as primeiras aplicações comerciais de sistemas de controle fuzzy ocorreram em 1980, e os produtos do campo da engenharia de controle são os que possuem maior valor de mercado. A Tabela 1 mostra uma visão geral das aplicações da teoria de sistemas fuzzy.

Tabela 1. Aplicações da Lógica Fuzzy

<i>Classificação / Área</i>	<i>Gestão / Social</i>	<i>Inteligência Artificial / Informação</i>	<i>Engenharia de Controle</i>
Modelos Humanos	✓ Planejamento ✓ Avaliação ✓ Tomada de decisão ✓ Organização ✓ Relações Humanas		
Imitação de Potencialidades Humanas	✓ Sistemas de Apoio à Tomada de Decisão ✓ Sistemas de Apoio a Diagnósticos Médicos	✓ Sistemas Especialistas ✓ Bancos de Dados	✓ Controle de Processos ✓ Operações de Aprendizagem ✓ Robôs
Interface Homem - Máquina	✓ Avisos / Anúncios ✓ Equipamentos para Pessoas Portadoras de Dificuldades	✓ Comando de Voz ✓ Reconhecimento de Imagens e Caligrafia ✓ Saída de Voz	
Outros	✓ Análise de Risco ✓ Previsão de Falhas ✓ Previsão de Terremotos	✓ Desenvolvimento de Dispositivos de Raciocínio	

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Material

5.1.1. Localização da Área Experimental

O trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Energias Alternativas e Renováveis – NEAR do Laboratório de Energização Rural do Departamento de Engenharia Rural da UNESP, Faculdade Ciências Agrônômicas, Fazenda Experimental Lageado (Figura 17), localizada no município de Botucatu, São Paulo, com localização geográfica definida pelas coordenadas 22° 51' Latitude Sul (S) e 48° 26' Longitude Oeste (W) e altitude média de 786 metros acima do nível do mar. A velocidade média mensal do vento a 10 m de altura é 3,1 ms⁻¹ e a energia solar global média mensal diária é de 4772,13 Whm⁻² (SILVA, 2000).

Uma vista panorâmica da área experimental onde se encontram os equipamentos utilizados nos experimentos é mostrada na Figura 17.

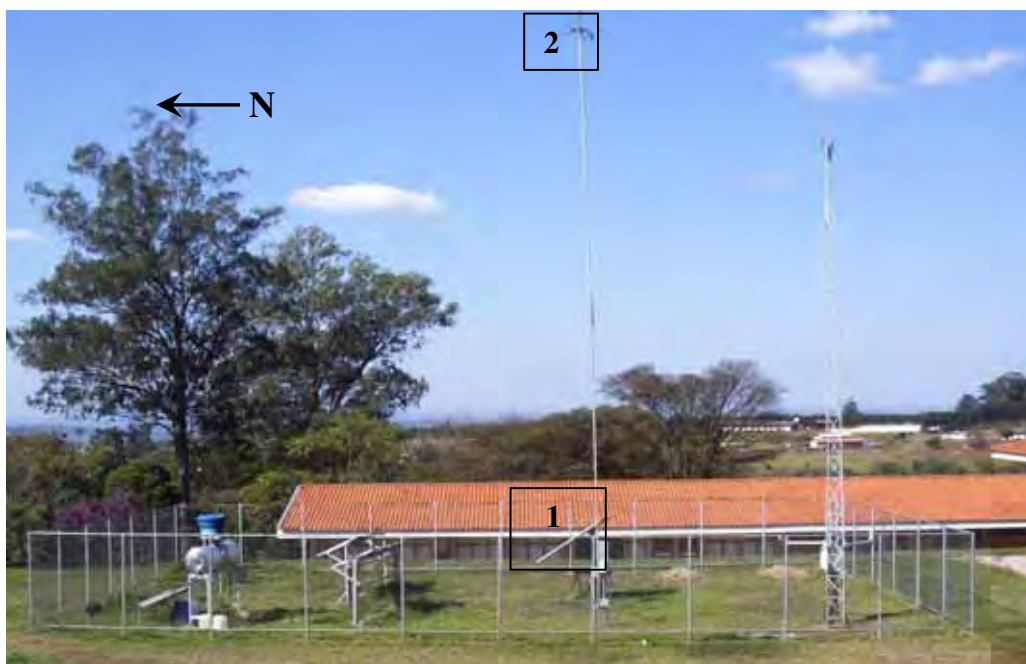


Figura 17. Vista panorâmica do NEAR e da instalação do sistema híbrido eólico fotovoltaico.
1 - Paineis fotovoltaicos do sistema; 2 - Aerogerador do sistema; N = Norte geográfico do local.

5.1.2. Equipamentos de Medições Meteorológicas e Elétricas

Os equipamentos para medição das variáveis meteorológicas e de aquisição de dados dos experimentos que são realizados no Laboratório de Energização Rural foram instalados em uma torre UT930 da CAMPBELL, conforme ilustra a Figura 18. Nesta estrutura encontra-se um datalogger CR23X da CAMPBELL (Figura19) para coletar e armazenar os dados enviados pelos sensores meteorológicos e elétricos e que posteriormente são utilizados nas pesquisas deste laboratório.

Para efeito de projeto serão utilizados dados obtidos pela estação acima mencionada. Serão utilizados também dados meteorológicos da mesma estação do período 2004 a 2005. Seguem abaixo nas Tabelas 2 e 3, exemplos de dados coletados e já integralizados de acordo com Siqueira, (2005), referentes ao período citado. Os dados completos podem ser consultados no Apêndice.



Figura 18. Torre utilizada para a instalação dos equipamentos de medição meteorológica e aquisição de dados. 1 – Anemômetro; 2 – Piranômetro; 3 - Termo higrômetro; 4 – Datalogger CR23-X.



Figura 19. Equipamento para aquisição de dados – Datalogger CR23X.

Tabela 2. Características da energia eólica, velocidade do vento no período de 01/07 a 31/07 de 2005.

<i>Dia/Mês</i>	<i>Velocidade do Vento Média Diária (ms^{-1})</i>	<i>Energia Disponível no Vento Total Diária (Wh)</i>
1/7	3,5	2,2
2/7	2,6	19,5
3/7	4,5	420,5
4/7	2,8	4,7
...	...	...
28/7	0,0	0,0
29/7	3,0	29,7
30/7	2,6	111,2
31/7	2,1	22,5

Observa-se que não há uma relação direta e proporcional da velocidade do vento com a energia disponível no vento. Este se deve à característica intermitente do vento, rajadas e outros fatores que fazem com que nem todo vento venha a gerar energia. Outra condição importante e que pode limitar a geração eólica é o fato da bateria estar carregada. Se estiver, então o aerogerador automaticamente para de funcionar. Este fato é uma das justificativas para o uso de mais baterias e o gerenciamento através de um controlador fuzzy.

Tabela 3. Características da energia solar, irradiância no período de 01/07 a 31/07 de 2005.

<i>Dia/Mês</i>	<i>Irradiância Solar Média Diária (W.m^{-2})</i>	<i>Energia Solar Global Total Diária (Wh)</i>
1/7	610,3	13.293,2
2/7	582,8	12.693,1
3/7	275,3	5.698,0
4/7	164,0	3.600,8
...	...	...
28/7	463,8	10.770,5
29/7	626,1	14.426,3
30/7	626,2	14.427,4
31/7	617,2	13.886,4

Os dados elétricos, onde se encontram os rendimentos do sistema híbrido serão do período setembro de 2004 a agosto de 2005, conforme exemplo na Tabela 4:

Tabela 4. Resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico, no período de 01/07 a 31/07 de 2005.

<i>Dia/Mês</i>	<i>Energia Solar +Eólica Disponível (Wh)</i>	<i>Energia Total Diária Gerada pelo Sistema Híbrido(Wh)</i>	<i>Rendimento do Sistema Híbrido (%)</i>
1/7	13.295,4	1.066,6	8,0
2/7	12.712,7	1.064,4	8,4
3/7	6.118,5	511,9	8,4
4/7	3.605,4	343,0	9,5
...	...		..
28/7	10.770,5	844,7	7,8
29/7	14.456,0	1.169,0	8,1
30/7	14.538,7	1.048,2	7,2
31/7	13.909,0	1.095,3	7,9

5.1.3. Simulações através de programas matemáticos

Para as simulações referentes ao uso da teoria fuzzy para controle, utilizou-se o ambiente de computação científica MATLAB e estas simulações foram realizadas junto ao Departamento de Engenharia Elétrica da FEB-UNESP e junto ao Departamento de Matemática da FC-UNESP, ambos localizados no campus da UNESP em Bauru-SP.

Diversos usos distintos podem ser feitos através do MATLAB, dentre eles o uso de vários toolbox, cada qual destinado a tratar diferentes classes de problemas científicos. Dentre estes, foi utilizado neste trabalho o Fuzzy Logical Toolbox.

5.2. Métodos

5.2.1. Dados ambientais

Em relação aos dados ambientais que serão considerados (radiação solar e velocidade do vento) vamos estabelecer os limites superior e inferior de acordo com dados obtidos da estação meteorológica do NEAR.

Analisando-se todos os dados de radiação solar e velocidade do vento no período citado e que tem potencial para geração de energia elétrica conforme Siqueira (2005), podemos então estabelecer os limites de dados que serão utilizados para o projeto do controlador fuzzy. Na Tabela 5, temos a faixa de valores estabelecidos:

Tabela 5. Limites superior e inferior para Radiação Solar Global e Velocidade do Vento

	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
Radiação Solar Global	300 W/m ²	1200 W/m ²
Velocidade do Vento	3 m/s	12 m/s

5.2.2. Dados característicos do sistema híbrido

De acordo com o estudo de Siqueira (2005), um sistema de aquisição de dados foi programado para coletar os parâmetros meteorológicos e elétricos do experimento (Figura 20) a cada 10 segundos, apresentando a média dos valores coletados a cada 5 minutos. A coleta dos dados foi realizada durante um ano, diuturnamente, para avaliar a influência das horas do dia e da sazonalidade na geração de energia elétrica pelo sistema híbrido e seus componentes. Os dados coletados foram integralizados, determinando-se desta forma os valores da energia solar, energia eólica, geração do sistema fotovoltaico, geração do sistema eólico, geração do sistema híbrido. Determinou-se, também, o rendimento dos sistemas eólico, fotovoltaico e híbrido.

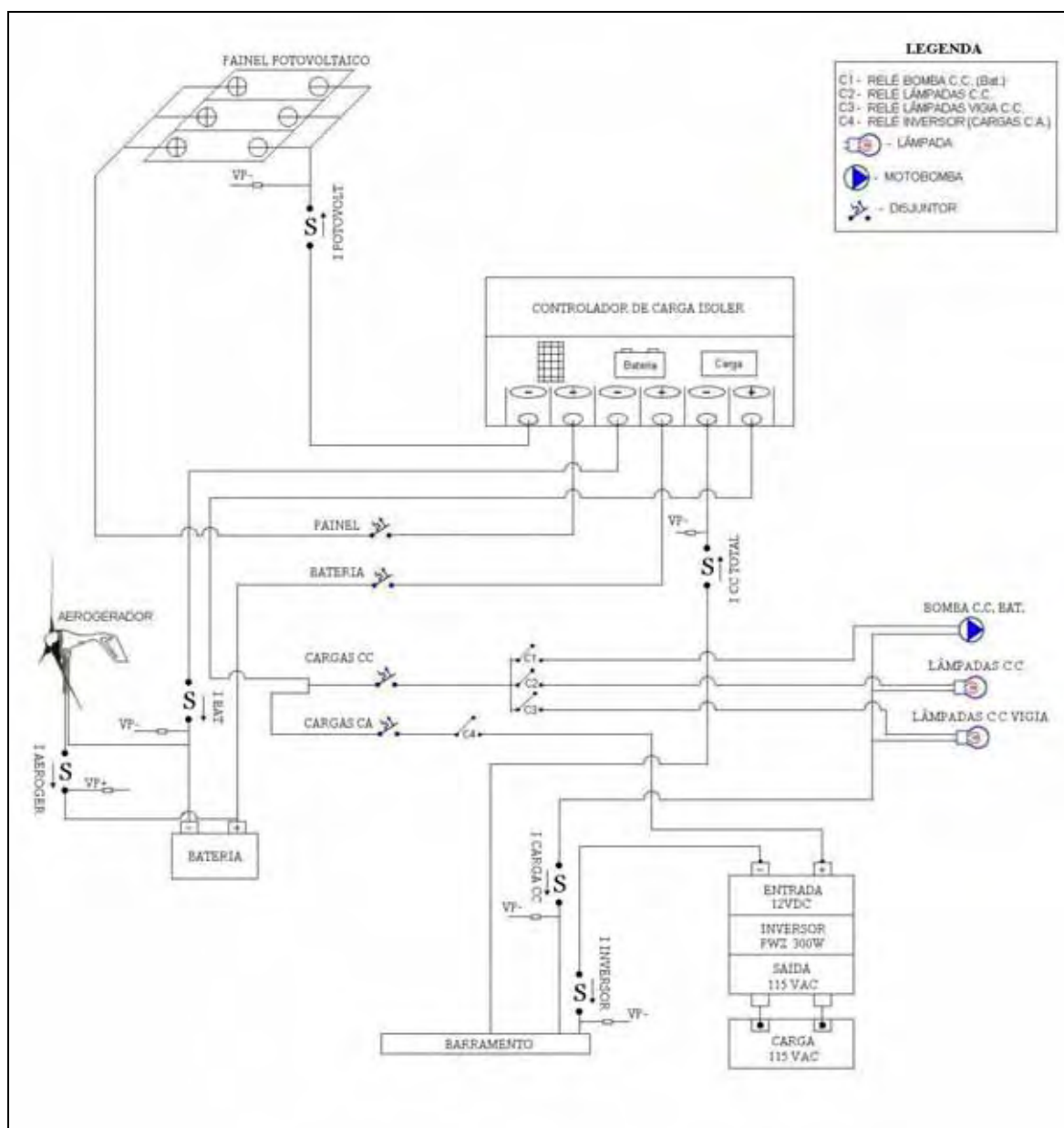


Figura 20. Diagrama esquemático das ligações elétricas do sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Desta forma, no período de setembro de 2004 a agosto de 2005, tivemos o efetivo funcionamento de um sistema híbrido de geração de energia de pequeno porte nas dependências do NEAR. Neste sistema híbrido, foram realizadas diversas coletas de dados elétricos, nos mais variados pontos.

Para simular o ganho de energia pelo sistema proposto iremos supor como condição, o maior rendimento do sistema no período de coleta de dados.

Analisando os dados do período citado chegamos ao maior valor de rendimento diário que teve o valor de 12,8 % e foi verificado no dia 08/12/2004. Todos os dados utilizados neste experimento, de setembro de 2004 a agosto de 2005, estão nos Apêndices.

Este rendimento será utilizado no cálculo do ganho de energia que pode ser gerado pelo sistema proposto. Na Tabela 6, temos um exemplo do cálculo do ganho de energia que foi obtido aplicando-se o novo rendimento a energia solar e eólica disponível a cada dia.

Tabela 6: Exemplo do cálculo da energia gerada, adotando-se novo valor para o rendimento

<i>Dia/Mês</i>	<i>Energia Solar e Eólica Disponível (Wh)</i>	<i>Rendimento do Sistema Híbrido (%)</i>	<i>Energia Gerada pelo Sistema Híbrido (Wh)</i>	<i>Rendimento do Sistema Híbrido c/ Fuzzy (%)</i>	<i>Energia Gerada pelo Sistema Híbrido considerando o rendimento c/ fuzzy (Wh)</i>
1/7	13.295,4	8,0	1.066,6	12,8	1.701,8
2/7	12.712,7	8,4	1.064,4	12,8	1.627,2
3/7	6.118,5	8,4	511,9	12,8	783,2
4/7	3.605,4	9,5	343,0	12,8	461,5
...	...	...	...	...	...
28/7	10.770,5	7,8	844,7	12,8	1.378,6
29/7	14.456,0	8,1	1.169,0	12,8	1.850,4
30/7	14.538,7	7,2	1.048,2	12,8	1.860,9
31/7	13.909,0	7,9	1.095,3	12,8	1.780,3

5.2.3. Metodologia geral de desenvolvimento fuzzy

O uso da teoria fuzzy para o controle de um sistema híbrido de geração de energia eólico-fotovoltaico de pequeno porte nos possibilitará aproveitar o máximo de energia das variáveis meteorológicas sobre a produção de energia elétrica pelo sistema.

A escolha das variáveis de entrada deve levar em consideração o fato de o controlador fuzzy estar sendo proposto para a tarefa de substituir um operador humano.

Na Figura 21, segue o diagrama em blocos de um sistema híbrido de geração de energia para uma pequena residência no meio rural. Este sistema fornecerá os dados para o desenvolvimento da metodologia que será descrita a seguir.

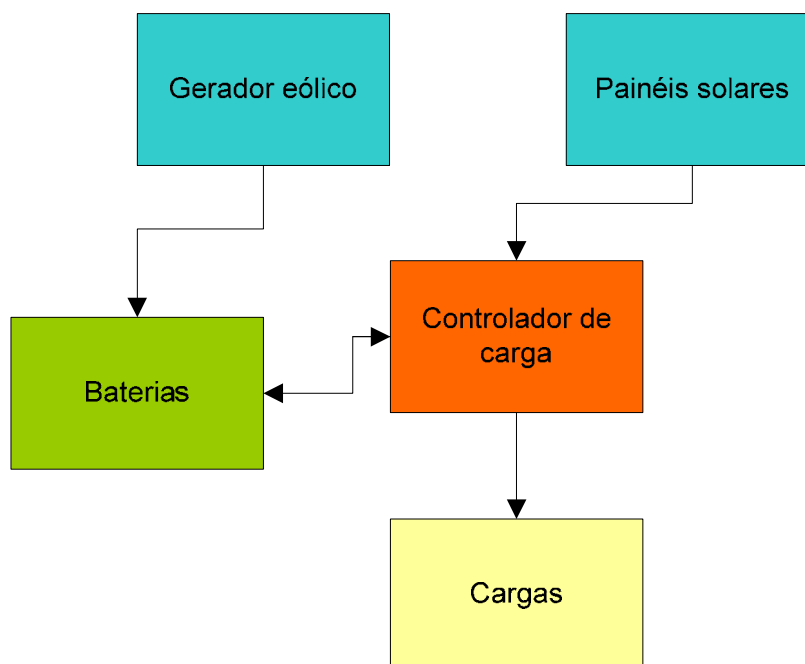


Figura 21. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural

A metodologia proposta pretende aperfeiçoar o controle de uso das fontes renováveis de energia através do uso e aplicação da teoria fuzzy.

Com base no sistema apresentado, o que se propõe é substituir o controlador de carga por um controle baseado em teoria fuzzy, para o um melhor aproveitamento das fontes alternativas de geração de energia. Na Figura 22, temos um modelo que representa a inclusão do controle fuzzy para o sistema anteriormente apresentado. É a partir deste diagrama que será feita a modelagem do controlador fuzzy atuando no sistema híbrido de geração de energia.

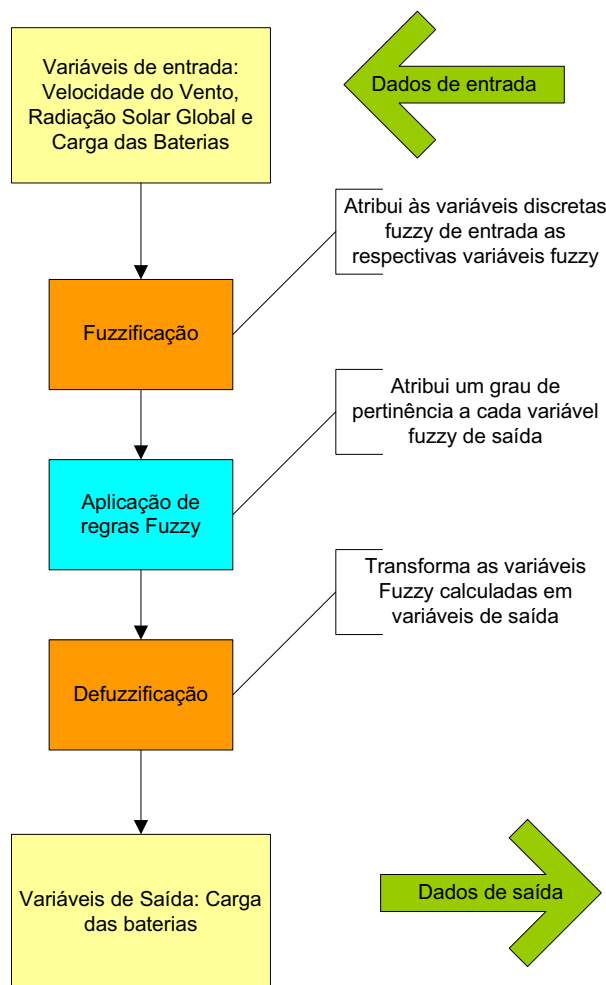


Figura 22. Modelo Fuzzy para aplicação em um sistema híbrido solar-fotovoltaico e eólico.

5.2.4. Modelagem do controlador fuzzy para o sistema híbrido

O desenvolvimento do controlador foi baseado em simulações realizadas no MATLAB, que possui várias caixas de ferramentas computacionais, entre as quais algumas para simulação de sistemas com lógica fuzzy.

Seguindo a sistemática proposta para o desenvolvimento de um controlador fuzzy, a primeira etapa a ser realizada é a conversão das variáveis de entrada e saída em uma representação conhecida como conjuntos fuzzy e denomina-se fuzzyficação.

Inúmeros são os tipos de funções de pertinência que podem ser utilizadas, mas neste trabalho optou-se por uma combinação das funções triangular e

trapezoidal devido a sua facilidade de geração e excelente precisão nos resultados além de estarem disponíveis para pronta utilização na maioria das ferramentas matemáticas computacionais. Também será ressaltado que a utilização de outra função de pertinência não resultará em grandes vantagens.

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma terna (a, b, c) , onde a , b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume. Quando utilizamos um software simulação matemática, o que o toolbox executa é a seguinte função:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases}$$

Já As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de a, b, c e d , onde a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1. Da mesma forma que as triangulares, o que o toolbox executa é a seguinte função:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases}$$

A segunda etapa 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.

A terceira etapa é denominada defuzzyficação e efetua a conversão dos conjuntos fuzzy em um número que representa o estado da saída do sistema para uma determinada condição.

5.2.5. Variáveis para aplicação do modelo fuzzy no sistema híbrido

A revisão de literatura e o estado da arte no que diz respeito aos modelos e metodologias existentes para projetos de sistemas híbridos de energia, eólico e fotovoltaico, leva a escolha das seguintes variáveis que serão “fuzzificadas”:

- a. Para energia solar fotovoltaica, será considerada a radiação solar direta, em watts por metro quadrado [W.m^{-2}].
- b. Para energia eólica, será considerada a velocidade do vento, em metros por segundo [m.s^{-1}].
- c. Para as baterias, a tensão em circuito aberto das mesmas, em volts [V]. (Garcia, 2004)

Com essas variáveis, o sistema fuzzy proposto interpretará, de acordo com as regras a serem descritas, qual será a fonte de alimentação do sistema, qual terá prioridade e que forma serão carregadas as baterias.

5.2.6. Determinação dos conjuntos fuzzy

Para a obtenção dos conjuntos fuzzy que representam o comportamento da variação da radiação solar (RS), da velocidade do vento (VV) e da carga das baterias (CB) é necessário, inicialmente, definir os limites inferior e superior de (RS), de (VV) e de (CB), bem como a amplitude dos intervalos de variação destas duas grandezas. Na Tabela 7 são mostrados estes limites e intervalos. Eles são obtidos em função do conhecimento prévio do comportamento das grandezas, os quais dependem da região onde está instalada o sistema híbrido solar-eólico de geração de energia e também dos equipamentos usados para a montagem desta estação.

Tabela 7. Resumo dos valores adotados para a simulação do controlador fuzzy.

<i>Variável</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Quartis</i>
Radiação Solar (RS)	300 W.m ⁻²	1200 W.m ⁻²	300 W.m ⁻²
Velocidade do Vento (VV)	3 m.s ⁻¹	12 m.s ⁻¹	3 m.s ⁻¹
Carga das Baterias (CB)	11 V	13 V	1 V

Para a variação da intensidade de radiação solar (RS), os limites inferior e superior são 300 W.m⁻² e 1200 W.m⁻², que divididos em intervalos de 300 W.m⁻², para efeito de projeto e simulação no modelo fuzzy proposto.

Para a variação da velocidade do vento (VV), os limites inferior e superior são de 3 m.s⁻¹ e 12 m.s⁻¹, divididos em intervalos de 3 m.s⁻¹. Para as duas variáveis acima, foram consideradas leituras de velocidade de vento e radiação solar no período de janeiro de 2004 a janeiro de 2006 da mesma estação. Para a extração e tratamento destes dados utilizou-se o software PC208W da Campbell Científicos.

Para a variação da carga das baterias (CB), os limites superior e inferior são 11 V e 13 V. Estes dados foram obtidos a partir de literatura específica para baterias e da especificação técnica de uma bateria Tudor de 150 Ah.

Serão considerados para efeito de uso nas regras Fuzzy as seguintes nomenclaturas (linguagem própria da lógica fuzzy) de característica da radiação solar, velocidade do vento e carga das baterias, conforme descritos nas Tabelas 8 e 9:

Tabela 8. Nomenclatura para os conjuntos fuzzy de entrada (RS), (VV)

	<i>baixa</i>	<i>boa</i>	<i>ótima</i>
Sol (RS)	X	X	X
Vento (VV)	X	X	X

Tabela 9. Nomenclatura para os conjuntos fuzzy de entrada (CB)

	<i>descarregada</i>	<i>média</i>	<i>carregada</i>
Carga das baterias (CB)	X	X	X

Para a determinação da variável de saída os dados são escolhidos de acordo com o conhecimento prévio do comportamento das grandezas de entrada, levando-se em conta os valores que foram determinados de acordo com a Tabela 7.

Para a saída do controlador, teremos a seguinte nomenclatura, conforme mostra a Tabela 10:

Tabela 10. Nomenclatura para os conjuntos fuzzy de saída (CBB)

	<i>Carrega Bateria A</i>	<i>Carrega Bateria B</i>	<i>Carrega Bateria C</i>
Carga do Banco de Baterias (CBB)	X	X	X

Inicialmente este projeto utiliza 3 baterias, podendo ser ampliado se necessário. A prioridade de carga é para a bateria A, em seguida a bateria B e assim por diante.

O número de conjuntos define a precisão dos resultados, mas por outro lado requer maior solicitação computacional.

5.2.7. Grau de pertinência

De acordo com a teoria Fuzzy, cada elemento do conjunto fuzzy possui um grau de pertinência (μ), o qual representa o valor verdade (pertinência) do elemento dentro do conjunto, mostrando o comportamento relativo da grandeza em cada intervalo de variação. O grau de pertinência tem variação no intervalo fechado de números reais [0,1].

Pela construção das figuras (RS), de (VV) e de (CB), cada elemento de (RS), de (VV) e de (CB) pertence a dois ou mais conjuntos fuzzy distintos e possui um grau de pertinência relativamente a cada um desses conjuntos.

A metodologia de aplicação e simulação deste trabalho será implementada através do software MATLAB. A escolha pelo referido software se deve a uma ferramenta chamada Fuzzy Logical Toolbox, que contém tudo que é necessário para projeto, implementação e simulação do sistema aqui proposto.

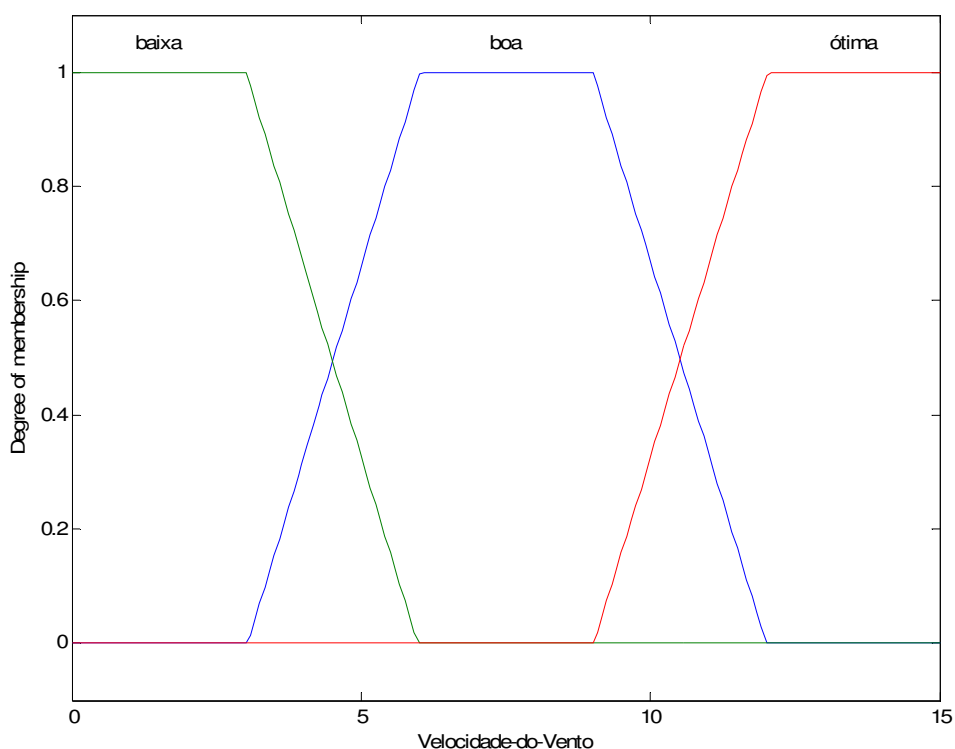


Figura 23. Função de pertinências associada a variável de entrada “Velocidade do Vento”

Inserindo os dados dos conjuntos fuzzy no MATLAB, através da ferramenta Fuzzy Logical Toolbox, teremos as funções de pertinência fuzzy com seus respectivos rótulos lingüísticos e suas extremidades determinando os limites de atuação de cada uma das funções de pertinência.

Nas Figuras 23 e 24, estão ilustradas as funções de pertinência associadas às variáveis de entrada (Velocidade do Vento e Radiação Solar) do controlador proposto.

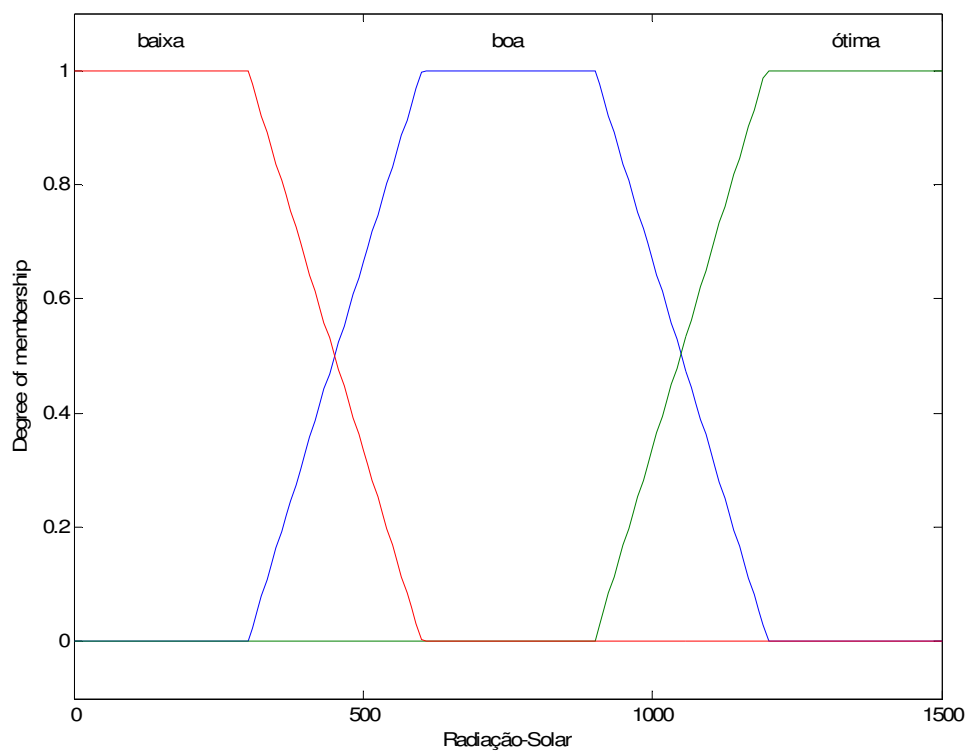


Figura 24. Função de pertinências associada a variável de entrada “Radiação Solar”

As funções de pertinência associadas as variáveis de entrada (Carga das Baterias – A, B e C) do controlador proposto, conforme pode-se observar na Figura 25:

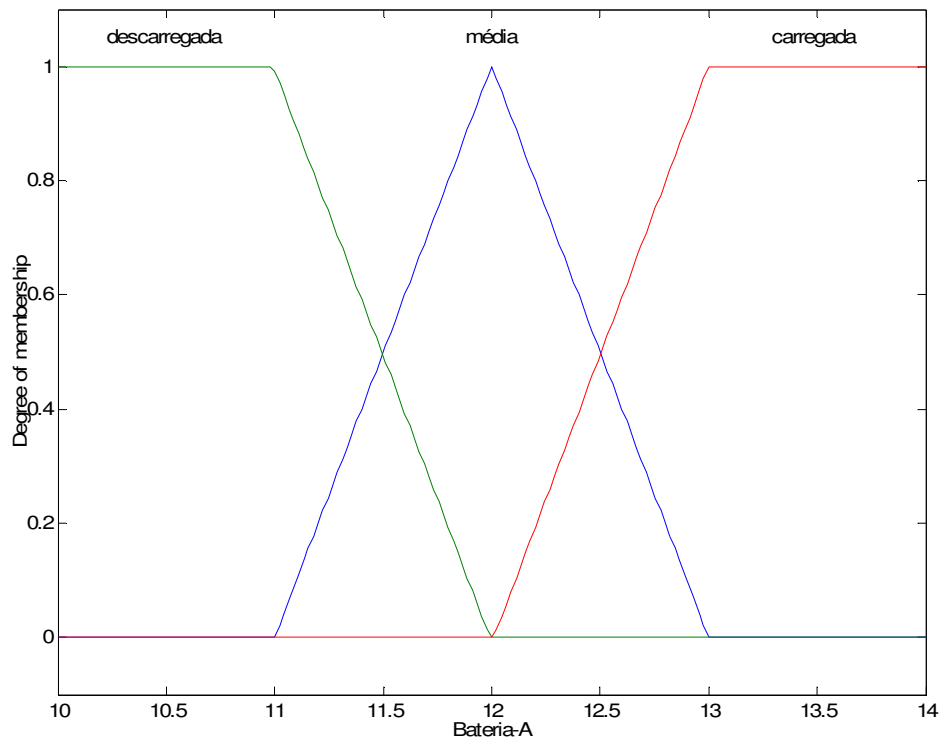


Figura 25. Função de pertinências associada a variável de entrada “Carga da Bateria - A”

Para as outras variáveis de entrada, “Cargas da Bateria – B e Carga da Bateria – C”, temos a mesmas funções de pertinências mostradas na Figura 22.

Na Figura 26, temos as funções de pertinência relativas variável de saída (Carga do Banco de Baterias) do controlador fuzzy:

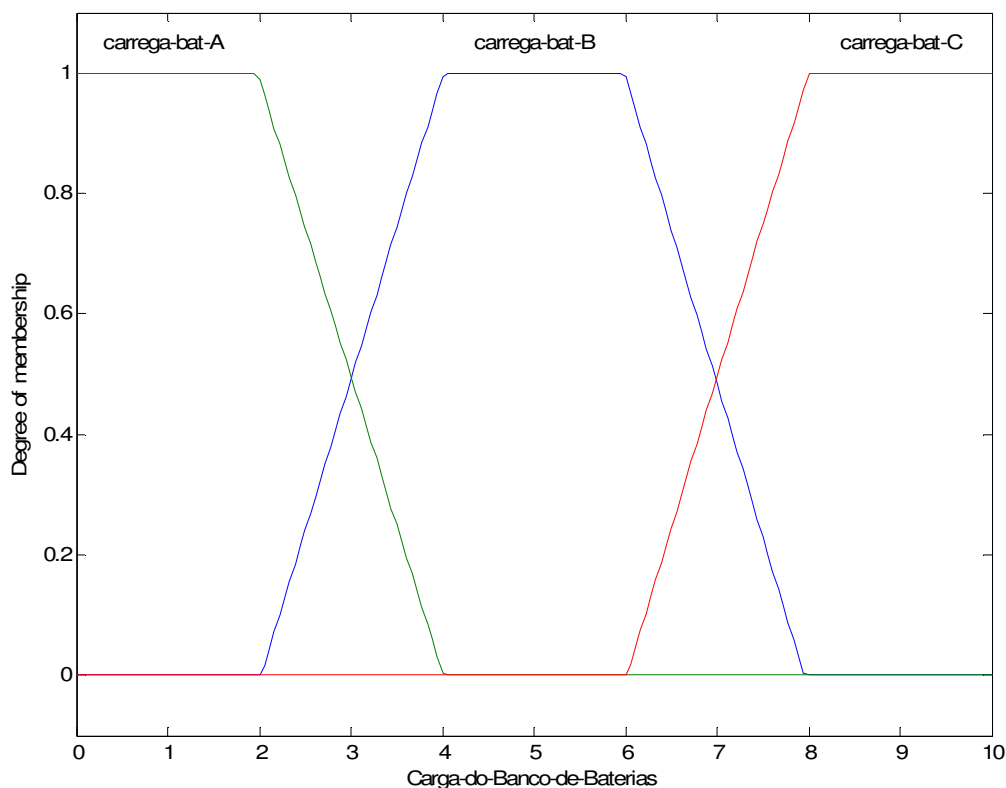


Figura 26. Função de pertinências associada a variável de saída “Carga do Banco de Baterias”

5.2.8. Regras Fuzzy

Uma vez definidos as funções de pertinência das variáveis de entrada (RS), de (VV) e de (CB), e também da saída (CBB), é necessário determinar as regras do sistema fuzzy, também conhecidas como base de conhecimento ou inteligência do sistema.

O mapa de regras é elaborado durante o projeto do sistema em si, identificado todas suas características e detalhes e, irá auxiliar na identificação das decisões a serem tomadas durante a operação do processo. Ele é preenchido com o auxílio de um especialista, ou seja, um operador humano do sistema a ser controlado.

Utilizando as teorias da lógica fuzzy, este mapa de regras pode ser gerado utilizando linguagem computacional do tipo: SE (Condição) ENTÃO (Consequência).

Elas são escritas no editor de regra do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB que disponibiliza vários tipos de operações entre as funções de pertinência fuzzy e ainda permite que sejam criados novos tipos de funções de pertinência. Este procedimento é representado na Figura 27:

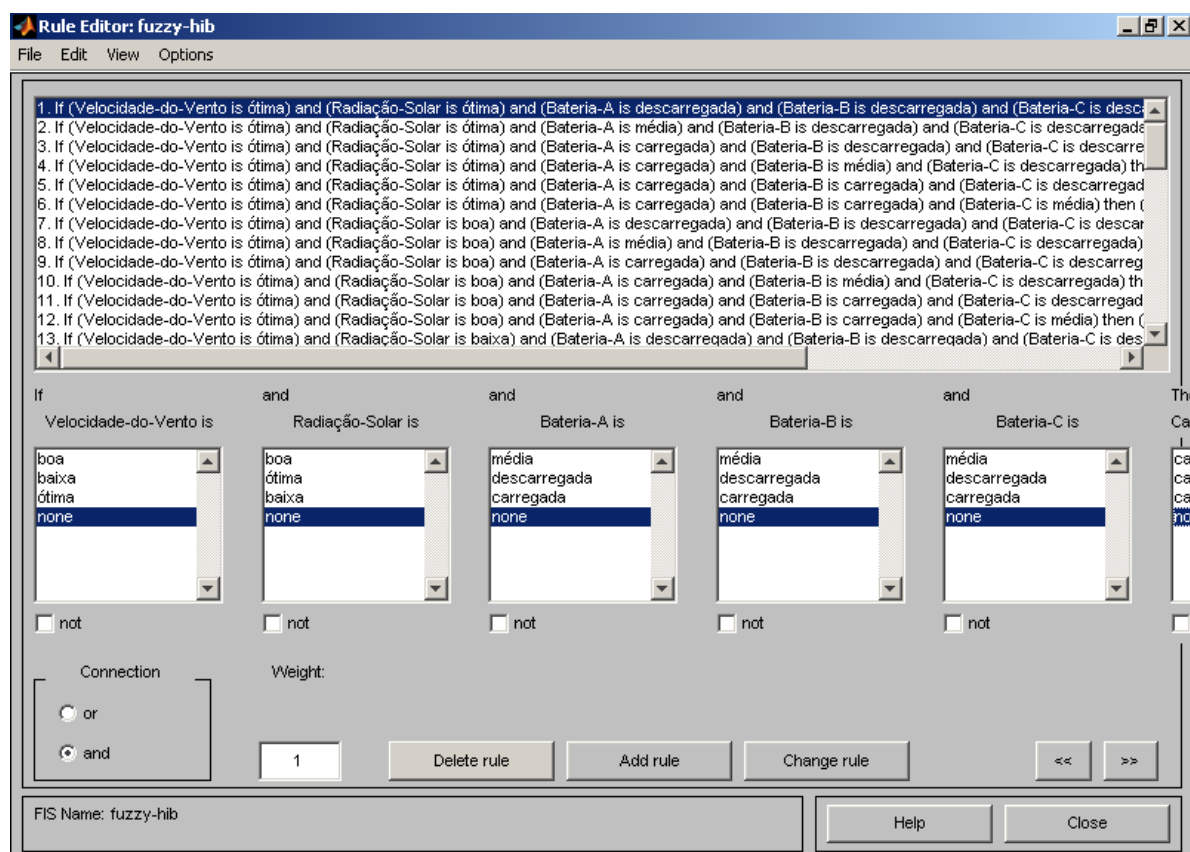


Figura 27. Determinação e inserção das Regras Fuzzy para o sistema de controle

À partir de uma regra estabelecida, vão se repetindo os procedimentos de acordo com a entrevista ao especialista, colocando-se todas as situações que as variáveis podem apresentar e como o controlador dará a resposta de acordo com as entradas.

Uma vez determinadas e inseridas as regras, podemos visualizá-las através do software citado para possíveis ajustes e correções, conforme ilustrado na Figura 28

Verifica-se que é através das regras que as funções de pertinência são ativadas considerando seu grau em relação a cada conjunto fuzzy. Outra característica é que as regras fuzzy são agrupadas em blocos. Os chamados blocos de regras são parte fundamental

da base de conhecimento dos controladores fuzzy. O controlador fuzzy recorre à verificação das regras para a tomada de decisão.

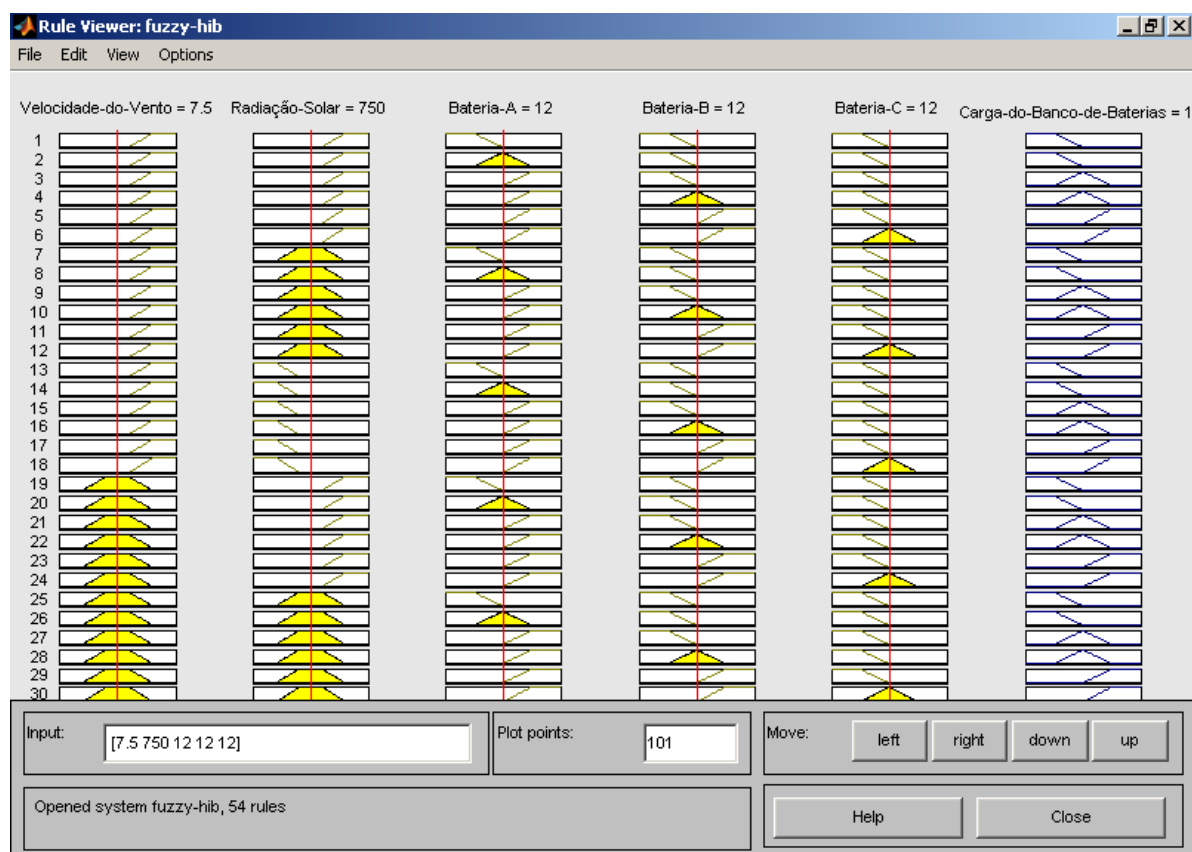


Figura 28 Visualização gráfica das regras fuzzy

Construído o sistema de controle fuzzy pode-se arbitrar valores numéricos para as variáveis de entrada, simulando cenários factíveis, do ponto de vista do especialista, para observar e analisar os valores obtidos para cada variável de saída, tudo isso dentro do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB.

5.2.9. Defuzzificação

O passo final consiste em se efetuar a defuzzificação que será traduzir para um valor discreto o resultado da variável lingüística de saída do controlador que foi inferida pelas regras fuzzy. De uma forma genérica este processo nada mais é que uma

transformação inversa que traduz a saída do domínio fuzzy para o domínio discreto. Alguns métodos de defuzzificação são utilizados, entre eles cita-se: o centro da área, centro do máximo e a média do máximo. O processo mais utilizado é o primeiro, frequentemente chamado de centro de gravidade, pois ele calcula o centróide da área que é composta pelo resultado das operações entre os conjuntos fuzzy.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultados do sistema de controle fuzzy proposto temos, primeiramente, o ganho de energia gerada com uso de um controle inteligente que possibilita utilizar de modo eficiente as fontes alternativas de energia (solar fotovoltaica e eólica) e também gerenciar o armazenamento de energia não utilizada pelas cargas, utilizando um banco de baterias. Ao mesmo tempo, temos o desenvolvimento de uma metodologia de projeto de um controlador baseado em teoria fuzzy para gerenciar um sistema híbrido de geração de energia.

6.1. Ganho de energia

Considerando os vários fatores que influenciam na eficiência da geração híbrida, gerenciar as fontes renováveis e usar baterias adicionais, representa aumento significativo do aproveitamento da energia renovável, utilizando os mesmos equipamentos e aplicando controle baseado em teoria fuzzy.

Dessa forma, se considerarmos como rendimento do sistema, o maior rendimento obtido no período de análise de seus dados elétricos (12,8 %), verificamos na Tabela 11, o resultado da nova geração de energia para o mês de julho de 2005 e podemos comparar a geração de energia com e sem o uso da teoria de controle fuzzy.

Tabela 11. Energia disponível, Energia gerada sem e com controle Fuzzy, Ganho de energia e Porcentagem de Ganho para o mês de julho de 2005

<i>Dia</i>	<i>Energia Solar e Eólica Disponível (Wh)</i>	<i>Energia Gerada pelo Sistema Híbrido (Wh)</i>	<i>Energia Gerada pelo Sistema Híbrido c/ Fuzzy(Wh)</i>	<i>Ganho de Energia (Wh)</i>	<i>Porcentagem de Ganho (%)</i>
1	13.295,4	1.066,6	1.701,8	635,2	37,3
2	12.712,7	1.064,4	1.627,2	562,9	34,6
3	6.118,5	511,9	783,2	271,3	34,6
4	3.605,4	343,0	461,5	118,5	25,7
5	8.697,8	873,7	1.113,3	239,7	21,5
6	10.859,1	1.085,2	1.390,0	304,7	21,9
7	10.886,4	1.087,8	1.393,5	305,7	21,9
8	11.068,2	957,6	1.416,7	459,1	32,4
9	8.595,7	821,5	1.100,3	278,8	25,3
10	3.737,1	342,6	478,3	135,8	28,4
11	13.823,0	1.430,0	1.769,3	339,3	19,2
12	14.094,5	1.261,7	1.804,1	542,4	30,1
13	6.909,1	700,8	884,4	183,5	20,8
14	13.274,2	1.058,9	1.699,1	640,2	37,7
15	12.173,5	1.040,4	1.558,2	517,8	33,2
16	13.780,1	1.081,4	1.763,8	682,5	38,7
17	13.857,7	1.006,8	1.773,8	767,0	43,2
18	13.690,4	1.095,5	1.752,4	656,9	37,5
19	13.772,4	1.021,5	1.762,9	741,3	42,1
20	13.868,2	1.117,1	1.775,1	658,0	37,1
21	14.224,4	1.069,3	1.820,7	751,4	41,3
22	13.684,9	1.048,5	1.751,7	703,2	40,1
23	13.518,3	1.015,1	1.730,3	715,3	41,3
24	13.601,4	1.077,9	1.741,0	663,1	38,1
25	11.781,4	1.076,2	1.508,0	431,8	28,6
26	8.337,0	891,3	1.067,1	175,9	16,5
27	11.963,6	1.087,7	1.531,3	443,6	29,0
28	10.770,5	844,7	1.378,6	533,9	38,7
29	14.456,0	1.169,0	1.850,4	681,3	36,8
30	14.538,7	1.048,2	1.860,9	812,8	43,7
31	13.909,0	1.095,3	1.780,3	685,1	38,5
<i>Total</i>	<i>359.604,5</i>	<i>30.391,5</i>	<i>46.029,4</i>	<i>15.637,9</i>	<i>34,0</i>

De acordo com a Tabela 11 e conforme ilustra a Figura 29, considerando o maior rendimento do período, teremos a energia total gerada no período passando 30,9 KWh para 46 KWh, algo em torno de 15,6 KWh de ganho de energia gerada no período, o que representa 34 % de ganho. As simulações para os demais meses estão nos Apêndices.

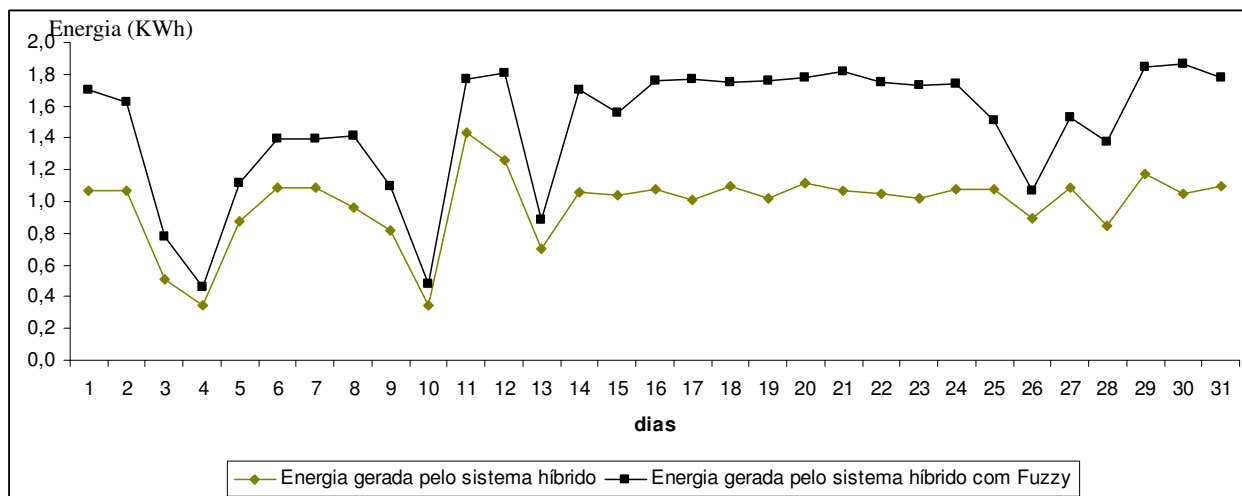


Figura 29. Energia gerada sem Fuzzy e Energia gerada com controle Fuzzy em julho de 2005

De forma análoga, podemos comparar para o período de estudo de 1 ano, os ganhos mês a mês e o total, conforme a Tabela 12.

Tabela 12. Energia disponível, Energia gerada sem e com controle Fuzzy, Ganho de energia e Porcentagem de Ganho para o período de setembro de 2004 a agosto de 2005.

Mês	Energia Solar e Eólica Disponível (Wh)	Energia Gerada pelo Sistema Híbrido (Wh)	Energia Gerada pelo Sistema Híbrido c/ Fuzzy (Wh)	Ganho de Energia (Wh)	Porcentagem de Ganho (%)
set/04	298.362,3	25.533,3	38.190,4	12.657,1	33,1
out/04	327.871,2	27.884,1	41.967,5	14.083,4	33,6
nov/04	313.970,4	27.369,9	40.188,2	12.818,3	31,9
dez/04	323.072,3	27.249,4	41.353,3	14.103,9	34,1
jan/05	287.035,1	26.440,8	36.740,5	10.299,7	28,0
fev/05	325.607,8	27.540,7	41.677,8	14.137,1	33,9
mar/05	336.955,6	27.814,9	43.130,3	15.315,4	35,5
abr/05	346.265,0	29.901,2	44.321,9	14.420,7	32,5
mai/05	321.879,3	30.275,7	41.200,6	10.924,9	26,5
jun/05	310.038,5	29.598,1	39.684,9	10.086,8	25,4
jul/05	359.604,5	30.391,5	46.029,4	15.637,9	34,0
ago/05	342.006,6	30.731,7	43.776,8	13.045,2	29,8
Total	3.892.668,7	340.731,2	498.261,6	157.530,4	31,6

E de acordo com a Tabela 12 e conforme ilustra a Figura 30, considerando o maior rendimento do período, teremos a energia total gerada no período

passando 340,7 KWh para 498,3 KWh, algo em torno de 157,5 KWh de ganho de energia gerada no período, o que representa 31,6 % de ganho.

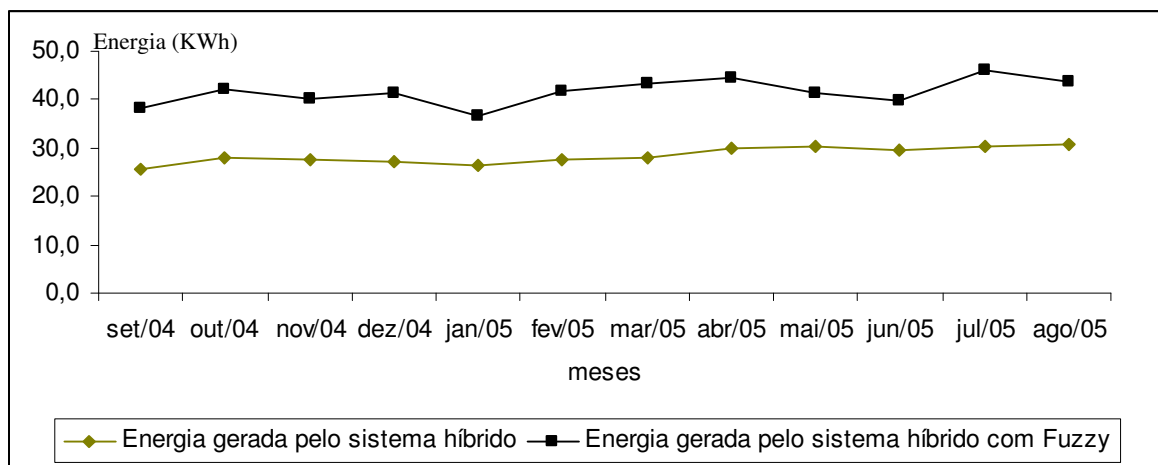


Figura 30. Energia gerada sem Fuzzy e Energia gerada com controle Fuzzy mensal

6.2. Metodologia de projeto do controlador fuzzy

O controlador proposto deve possuir um comportamento o mais semelhante possível ao de um controlador humano. Dessa forma a teoria fuzzy demonstrou ser útil na elaboração de um modelo de um sistema de controle para geração híbrida de energia.

Segundo Shaw e Simões (2001), o poder associado à utilização de teoria fuzzy é servir de ponte entre o conhecimento empírico e uma implementação computacional.

Desta forma, após as pesquisas, estudos e simulações, além de levar em consideração o estado da arte dos sistemas que utilizam teoria fuzzy para controle, chegamos ao controlador como ilustrado da Figura 31. Esta figura é gerada automaticamente pelo MATLAB.

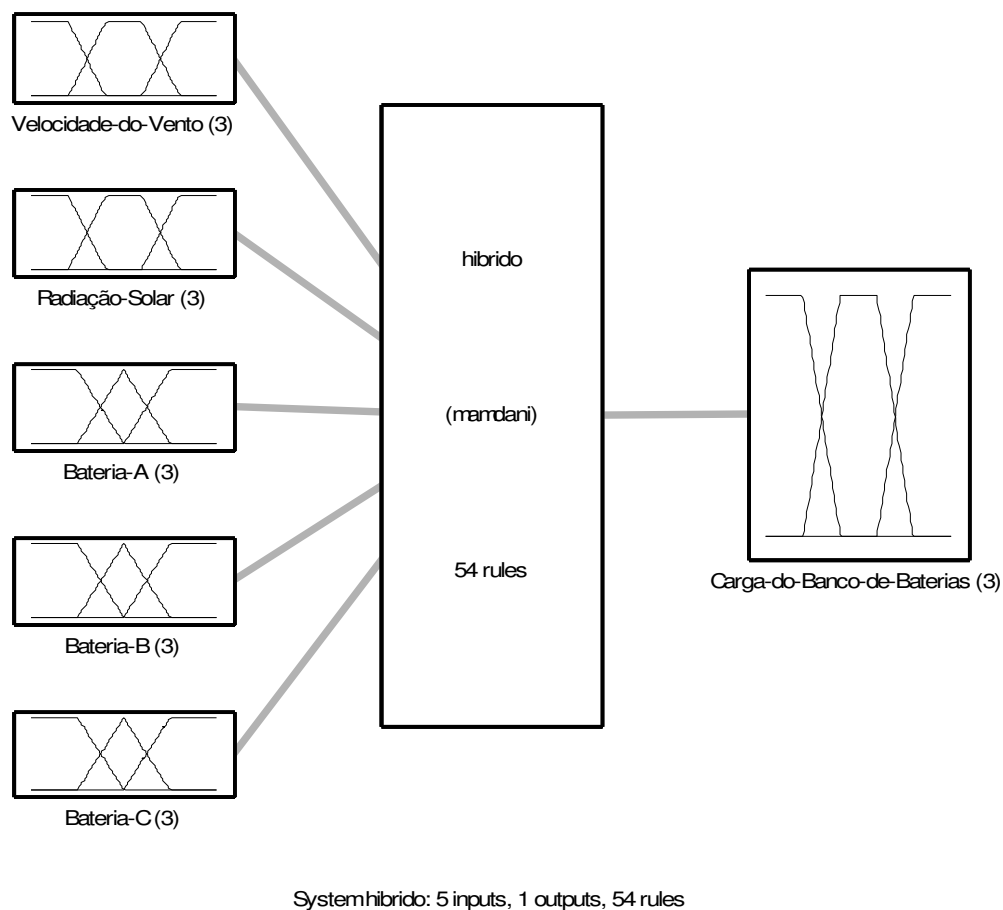


Figura 31. Resumo do sistema de controle fuzzy para um sistema híbrido de geração de energia (solar-fotovoltaica e eólica)

Conforme descrito anteriormente, temos então o sistema de controle proposto já em funcionamento no MATLAB. De acordo com a Figura 31, o sistema tem 5 entradas, 1 saída e 54 regras que determinam seu comportamento.

A Figura 32, mostra a tela de configuração, edição e inserção de dados do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB para o sistema ilustrado na Figura 31.

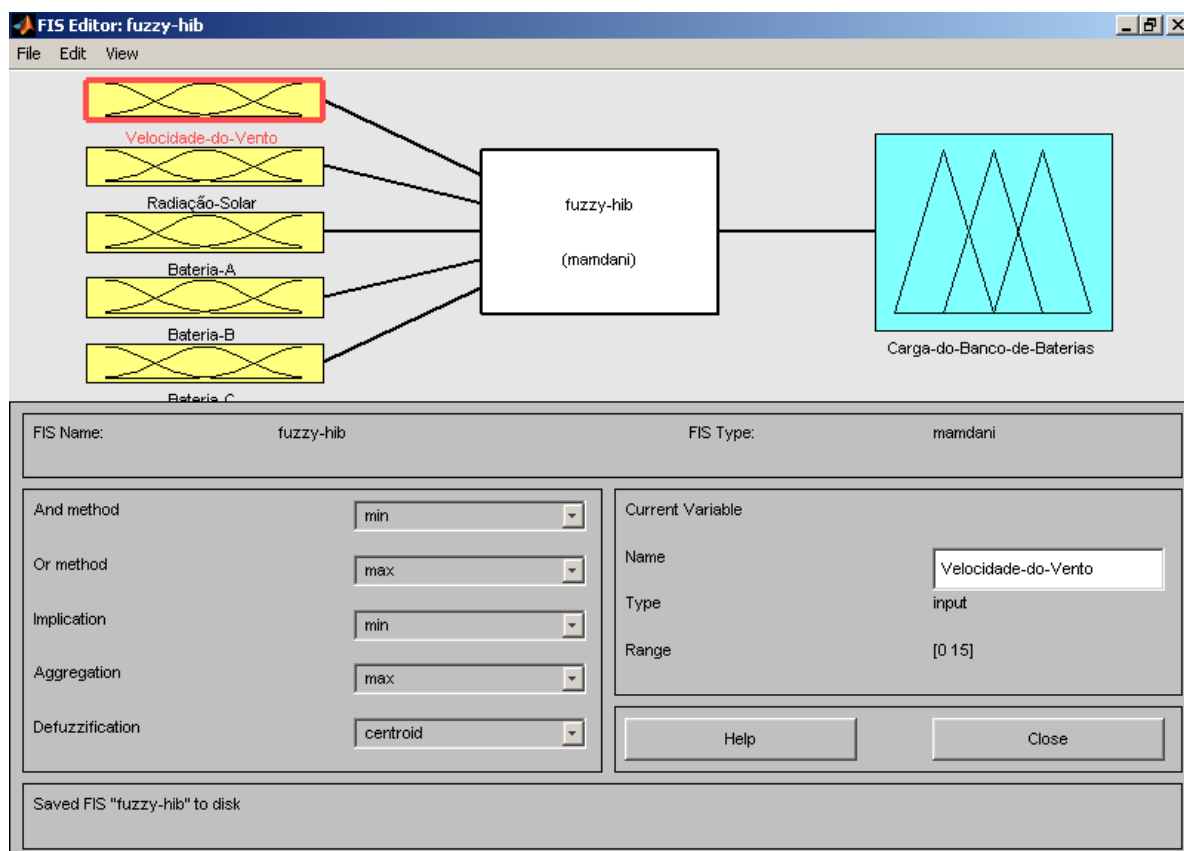


Figura 32. Tela inicial e de configuração básica do Fuzzy Logical Toolbox do MATLAB

Nas Figuras 33 e 34, temos o exemplo da tela onde se pode definir o domínio e a escolha do formato e número de funções de pertinência das variáveis de entrada e/ou saída.

A base de conhecimento do Controlador Fuzzy é composta por funções de pertinência, que compõem sua base dados, e por implicações verbais que compõem sua base de regras.

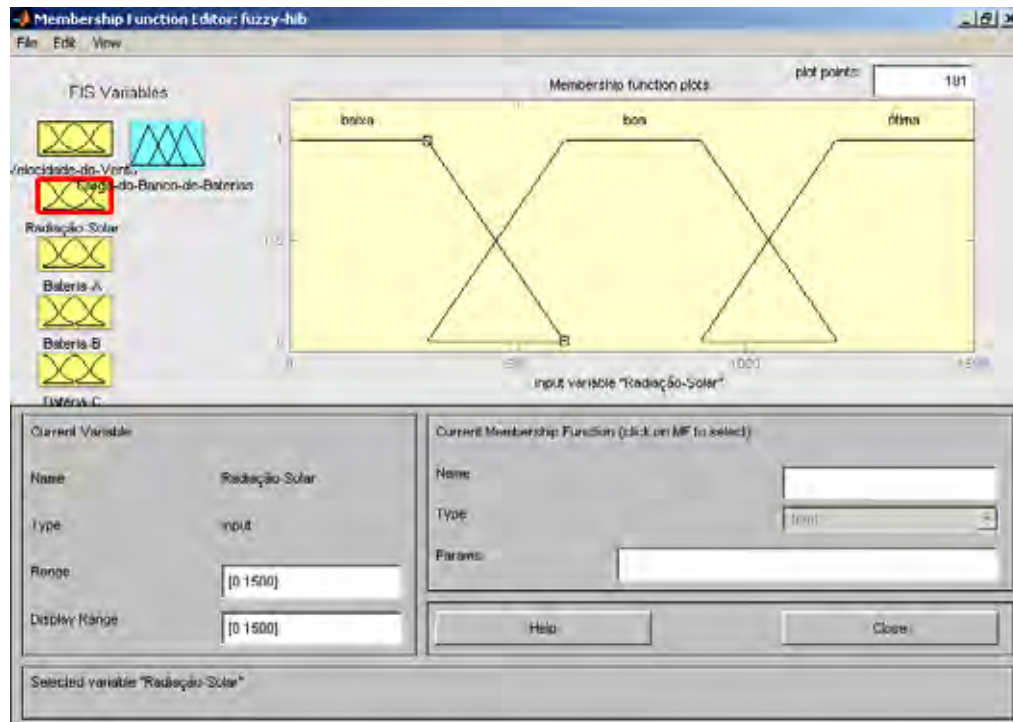


Figura 33. Definição do domínio e escolha das funções de pertinência das variáveis de entrada.

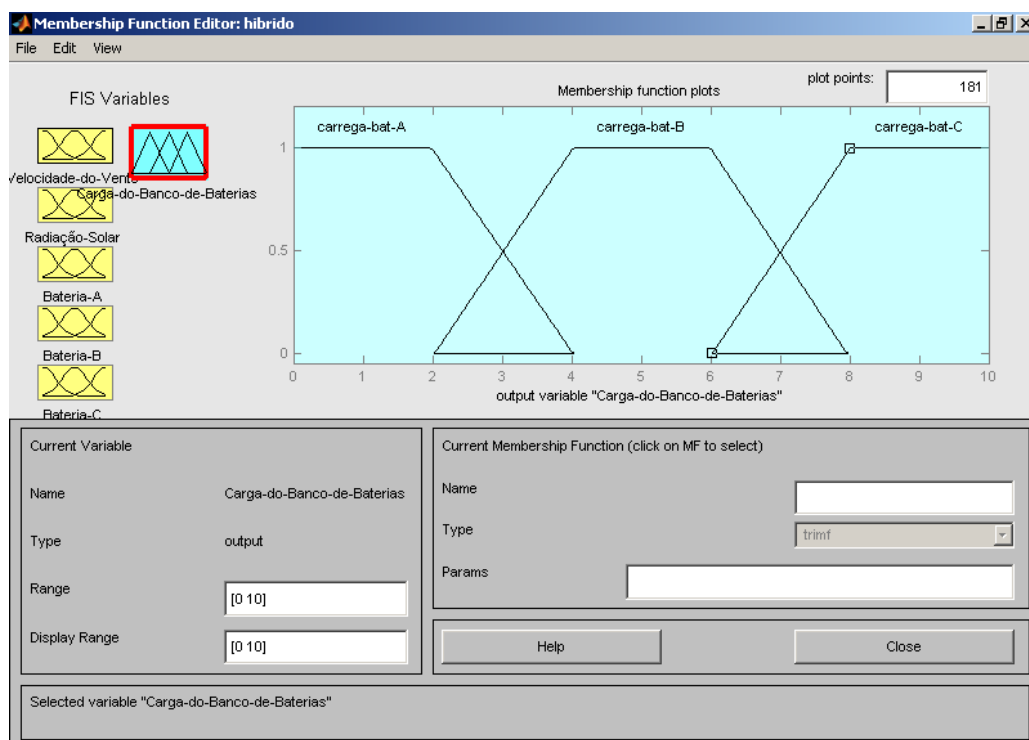


Figura 34. Definição do domínio e escolha das funções de pertinência das variáveis de saída.

Em um sistema de controle baseado na teoria fuzzy determinamos as regras de acordo com o número de variáveis de entrada e de saída. Inúmeras regras podem ser estabelecidas para se controlar o sistema e sua inserção no sistema proposto está ilustrado na Figura 35.

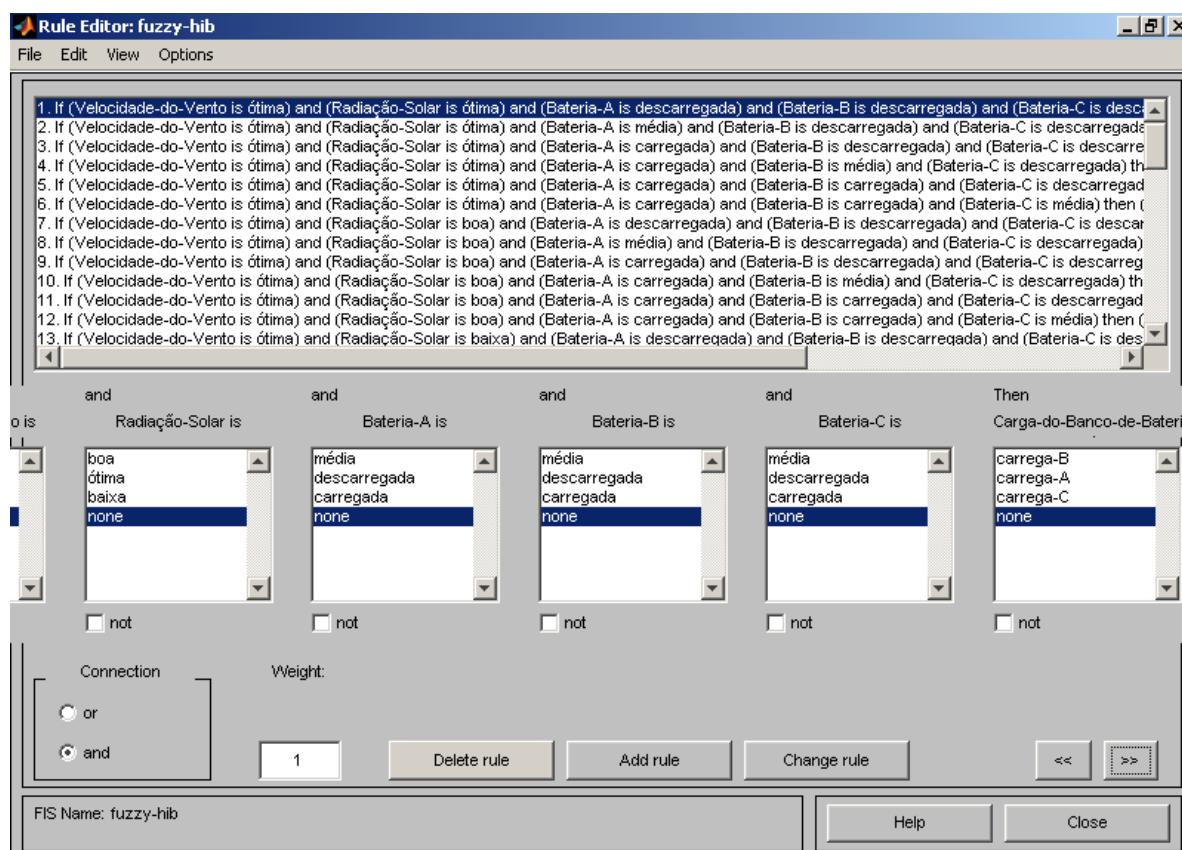


Figura 35. Base de regras

Na construção de cada regra deve-se definir a conexão entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída, através dos operadores lógicos. Após a inserção de todas as regras tem-se a formação do sistema de controle fuzzy.

Como exemplo de funcionamento do controlador, podemos atribuir para o sistema proposto, os seguintes valores as variáveis de entrada do sistema:

- a. Velocidade do vento: 10 m/s
- b. Radiação solar: 1000 W/m²
- c. Carga da Bateria A: 13 V
- d. Carga da Bateria B: 13 V

e. Carga da Bateria C: 10,5 V

Na Figura 36 temos os valores inseridos no controlador conforme o exemplo e a sua resposta através da variável de saída:

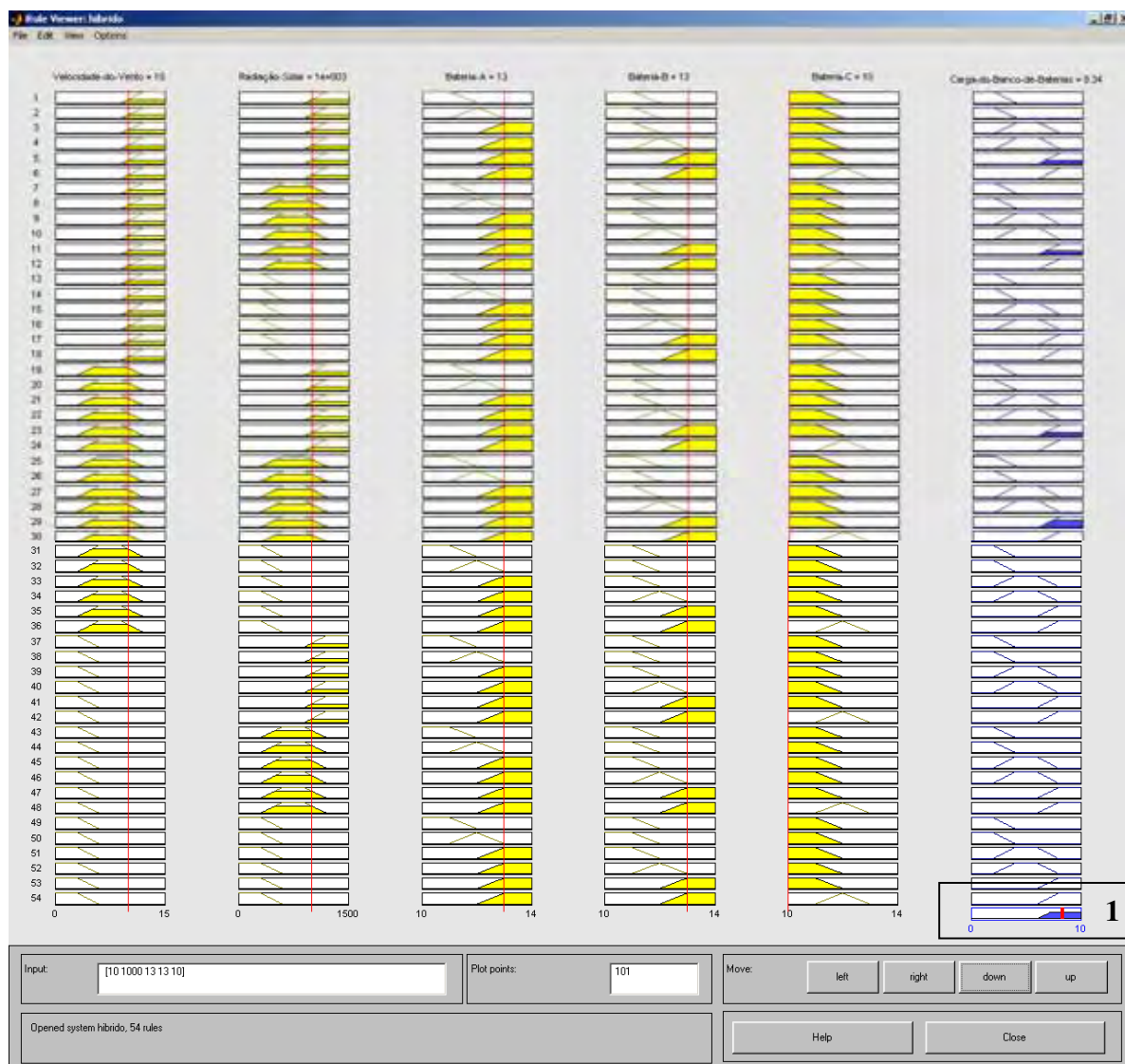


Figura 36. Exemplo de simulação do controlador. Variáveis de entrada e de saída. 1 - Valor numérico de saída (8,34)

A verdadeira saída defuzzyficada do controlador fuzzy pode ser considerada como passível de assumir somente dois valores: SIM ou NÃO, pois o sistema está sendo proposto para auxiliar em uma tomada de decisão.

Dessa maneira, de acordo com a Figura 30, aplicando-se o método do centro de gravidade, conforme anteriormente citado, temos um valor numérico de saída (8,34), que nada mais é que a variável ainda no domínio Fuzzy. Se observarmos novamente a Figura 23, podemos fazer a “tradução” dessa variável de saída do domínio fuzzy para o domínio. O resultado será a ordem do controle para que se inicie a Carga da Bateria C e assim se completa a defuzzificação e conseqüente tomada de decisão.

Este valor fica mais evidente e claro quando analisamos a Figura 37, que trata da carga do banco de baterias.

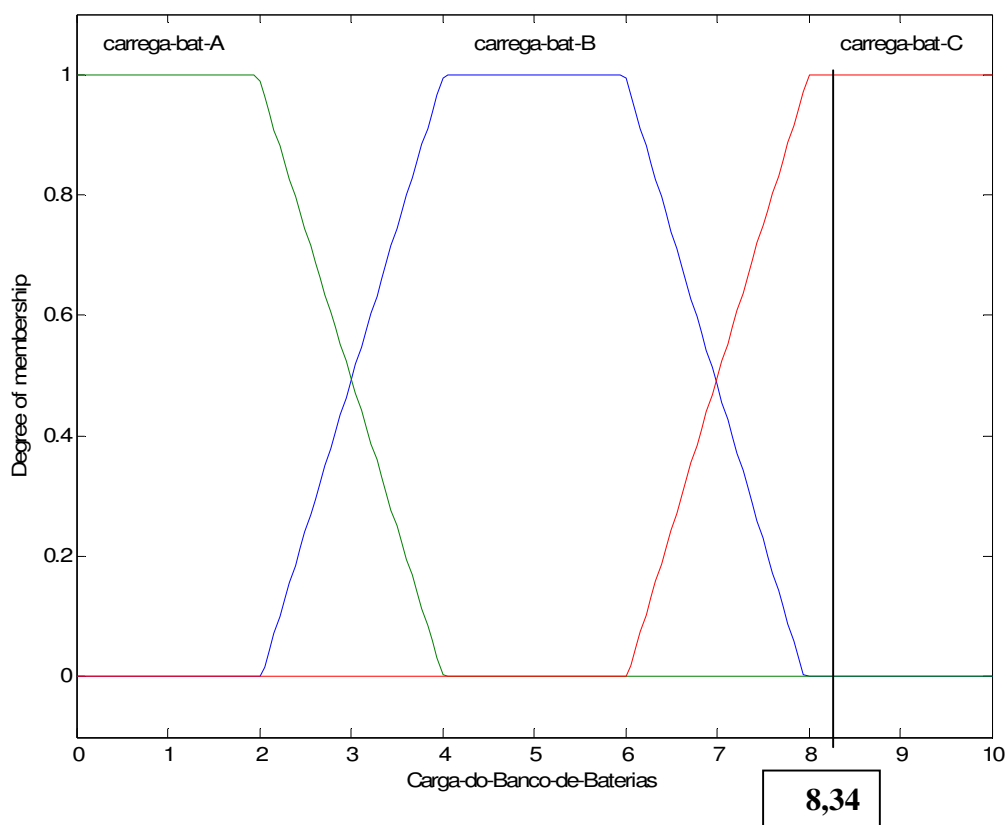


Figura 37. Exemplo de simulação do controlador. Variável de saída e significado do valor numérico de saída (8,34)

Este valor significa que o sistema irá direcionar a energia produzida para a carga da bateria C.

7. CONCLUSÕES

Considerando os vários fatores que influenciam na eficiência da geração híbrida (solar-fotovoltaica e eólica), gerenciar as fontes renováveis e usar baterias adicionais controlando-as através do uso de teoria fuzzy, representa aumento significativo do aproveitamento da energia renovável, utilizando os mesmos equipamentos e aplicando-se este novo controle.

Com os estudos, modelagens e simulações do sistema proposto, verificou-se que os resultados foram muito satisfatórios, tanto no uso de controle fuzzy, quanto na economia de energia.

A utilização da Teoria Fuzzy permite identificar e implementar em um Controlador Fuzzy a experiência do operador e sua forma de decidir sobre o problema em questão. Verifica-se a capacidade de operadores de processos de naturezas diversas realizarem com sucesso inferências sobre o mesmo de forma intuitiva, sem que seja necessário conhecer os valores numéricos das variáveis envolvidas. Um operador considerado experiente acumula um maior número de observações anteriores que utiliza na formulação de previsões sobre o processo.

Desta forma, a grande vantagem da utilização da teoria fuzzy é a possibilidade de modelar e manipular matematicamente informações vagas, imprecisas e intermitentes, naturais da linguagem humana, e que são fornecidas pelos especialistas, não matemáticos, para caracterizar os processos estudados.

Esta manipulação pode ser facilmente feita a partir da junção das variáveis escolhidas para modelar matematicamente o sistema proposto, quando a implicação das variáveis independentes nas dependentes é estabelecida por um conjunto de regras lingüísticas baseadas no conhecimento de especialistas.

A intenção de obter do controlador fuzzy um comportamento semelhante ao do ser humano foi atingida, visto que ele dá as respostas esperadas, considerando válidas as características das funções de pertinência e regras que lhe foram atribuídas. O que se pode constatar é que o controle fuzzy, que é uma das partes mais aprofundadas da teoria de conjuntos fuzzy, possibilita-nos controlar e gerenciar um sistema híbrido de geração de energia.

Um ganho na geração de energia estimado em 31,6 % no período analisado, nos leva a crer que além de simplesmente utilizar as fontes alternativas de energia, podemos também otimizar o seu aproveitamento, extraindo o máximo da energia disponível.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se realizar a montagem do controlador fuzzy e aplicá-lo a sistema híbrido de geração de energia e, desta forma, obter resultados práticos e comparar com os resultados desta simulação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Mais Energia Elétrica - Fontes Renováveis**. Biblioteca Virtual. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=63>. Acesso em: 04 abr. 2007..

BAGUL, A. D., Sizing of a stand-alone hybrid wind-photovoltaic system using a three-event probability density approximation. **Solar Energy**, v4, n.56, p.323-35, 1996.

BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., SILVA, E. J. P., GALHARDO, M. A. B., VALE, S. B., MARANHÃO, W. M. A. Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica. In: AGRENER 2004 - ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5, 2004, Campinas. **Anais...** Campinas: NIPE/UNICAMP, 2004. 10p. CD-ROM.

BASTIANON, R. A., La energía del viento: pasado, presente y futuro cercano. **Petrotecnia**, n.4, p.74-80, 2003.

BELLARMINE, T. G., Wind energy for the 1990s and beyond. **Energy Conversion and Management**, v.12, n.37, p.1741-52, 1996.

BELLMAN, R. E., ZADEH, L. A., 1970, "Decision-Making in a Fuzzy Environment", Management Science, USA, vol. 17, n. 4 (Dec).

BEYER, H.G., DEGNER, T., GABLER, H., Operational behaviour of wind diesel systems incorporating short-term storage: an analysis via simulation calculations. **Solar Energy**, v.6, n.54, 429-39, 1995.

BHATTI, T.S., AL-ADEMI, A.A.F., BANSAL, N.K., Load frequency control of isolated wind diesel hybrid power systems. **Energy Conversion and Management**. v.9, n.38, p.829-837, 1997.

BRAGA, M. J. F., BARRETO, J. M., MACHADO, M. A. S., 1995, Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Risco, Rio de Janeiro, Artes & Rabiscus.

CAMARGO, J.C., SILVA, E.P., APOLINÁRIO, F.R. Potencial fotovoltaico no uso rural para o estado de São Paulo. In: AGRENER 2000 - ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **Anais...** Campinas: NIPE/UNICAMP, 2000. 5p. CD-ROM.

CASTRO, R. M. G., **Energias renováveis e produção descentralizadas – introdução à energia eólica**. Portugal: IST, 2004. 82p.

CEPEL/CRESESB - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: 1999. 204p.

CEPEL/CRESESB. **Tutorial - Energia Solar**. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.htm>. Acesso em: 12 out. 2007.

CIEMAT, 2000. **"Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica"**. Editorial CIEMAT, Madrid, España.

COPETTI, J.B., LORENZO, E., CHENLO, F., A general battery model for PV system simulation. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, n.1, p.283-92, 1993.

COSTA, H.S. A qualidade de energia de sistemas fotovoltaicos domésticos em áreas rurais. **Energia Rural**, São Paulo, v.31, n. 5, p.172-81, 2001.

CRUZ, L. F. **MODELO FUZZY PARA OBTENÇÃO DO TEMPO DE AERAÇÃO EM SILOS VERTICAIS VISANDO REDUZIR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2001. 102 f. Tese (Doutorado) - Unesp - Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

DWIA - DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, **21 Frequently Asked questions about Wind Energy**. Disponível em: <<http://www.windpower.dk/faqs.htm>>. Acesso em: 16 dez. 2006.

DWIA - DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, **Where does Wind Energy come From?** Disponível em: <<http://www.windpower.org/en/tour/wres/index.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2007a.

DWIA - DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, **Betz' Law: The Ideal Braking of the Wind**. Disponível em: <<http://www.windpower.org/en/tour/wres/betz.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2007b.

DWIA - DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, **Wind Speed Measurement: Anemometers**. Disponível em: <<http://www.windpower.org/en/tour/wres/wndspeed.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2007c.

ECDGE - EUROPEAN COMMISSION'S DIRECTORATE GENERAL FOR ENERGY, **Wind Energy - The Facts**. Disponível em: <<http://www.agores.org/publications/Wind-Energy.htm>>. Acesso em: 25 fev. 2007.

ELHADIDY, M.A., SHAAHID, S.M., Parametric study of hybrid (wind + solar + diesel) power generating systems. **Renewable Energy**, n.21, p.129-39, 2000.

FRAIDENRAICH, Naum & LYRA, Francisco. “**Energia Solar - Fundamentos e Tecnologias de Conversão heliotermoeletrica e fotovoltaica**”. Editora Universitária da UFPE, Recife/PE, 471p, 1995.

GARCÍA, F. H., Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos. Porto Alegre, 2004.185p. Tese (doutorado em Engenharia). UFRGS.

GIACOMINI, A. T., Desenvolvimento de Programa Computacional para Simulação de Sistemas Híbridos, Utilizados em Energização Rural. Botucatu, 2002. 112p. Tese (doutorado em Agronomia). UNESP/FCA.

GREEN, M. A.; K. EMERY; D. L. KING; S. IGARI; W. WARTA; Solar Cell Efficiency Tables (Version 16). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, n.8, p.377-84, 2000.

GWEA - GERMAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 25 Fakten zur Windkraftnutzung in Deutschland. Disponível em: <<http://www.wind-energie.de/info/25fakten.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2007.

HABIB, M.A., SAID, S.A.M. EL-HADIDY, M. A., AL-ZAHARNA, I. Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system. **Energy**, v.24, n.11, p.919-29, 1999.

HAMMEL II, R. J., 1990, Fuzzy Logic. In: www.arl.mil. Acesso em 18/08/2006.

HANSEN, J.C. Keys to success for wind power in isolated power systems. In: 1999 EWEC - European Wind Energy Conference, 1999, França. **Proceedings**...New Delhi: Allied Publishers Ltd., 1999, 6p.

HANSEN, U., Technological options for power generation. **The Energy Journal**. v.2, n.19, p.63-87, 1998.

HULSCHER, W., FRANKEL, P. **The Power Guide**. Holanda: 1994. 240p.

JOHANSSON, T., KELLY, H., REDDY, A. K., WILLIAMS, R. H. **Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity**. Inglaterra: Earthscan, 1993. 1160p.

LACERA, L. N., XIBERTA, B. J. Estudio de viabilidad para la implantación de un parque eólico en la sierra de bodenaya, salas (asturias). In: CIES - XII CONGRESO IBÉRICO Y VII CONGRESO IBERO AMERICANO DE ENERGIA SOLAR, 2004, Vigo. **Anais...** Vigo: Área de Máquinas e Motores Térmicos – Universidad de Vigo, 2004. CD-ROM.

LORENZO E., “**Electricidad Solar: Ingeniería de Los Sistemas Fotovoltaicos**”, Espanha, Artes Gráficas Gala, S.L., 1994.

MACÊDO, W. N., Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica. Belém, 2002, 154p. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará.

MAHMOUD, M., Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan. **IEE Proceedings**, v.137, n.6, p.391-4, 1990.

MCGOWAN, J.G., MANWELL, J.F., Hybrid wind/pv/diesel system experiences. **Renewable Energy**, n.16, p.928-33, 1999.

MCGOWAN, J.G., MANWELL, J.F., AVELAR, C., Hybrid wind/pv/diesel hybrid power systems modeling and South American applications. **Renewable Energy**, v.1, p.836-847, 1996.

MCNEILL, D., FREIBERGER, P, 1994, Fuzzy Logic. 1 ed. New York, EUA, Touchstone and Colophon.

MESQUITA, R. P., SOUZA, T. M., GASTALDI, A. F. Comparativo entre energia solar fotovoltaica versus extensão de rede, aplicado em caso concreto de uma comunidade carente e remota In: AGRENER 2004 - ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5, 2004, Campinas. **Anais...** Campinas: NIPE/UNICAMP, 2004. 6p. CD-ROM.

MONTENEGRO, A. A., **Fontes não Convencionais de Energia**. Florianópolis: Ed. UFSC, 2000. 208p.

MORAGUES, J., RAPALLINI, A., **Energia Eólica**. Disponível em:
<http://www.iae.org.ar/renovables/ren_eolica.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2007.

MORGAN, T.R., MARSHALL, R.H., BRINKWORTH, B.J., ARES – A refined simulation program for the sizing and optimization of autonomous hybrid energy systems. **Solar Energy**, v.59, n.4, p205-15, 1997.

MOURA, J.F.C, 1996. "Caracterização de baterias automotivas para uso solar fotovoltaico". **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

POWELL, W.R., An analytical expression for the average output power of a wind machine. **Solar Energy**, v.26, p.77-80, 1981.

PROTOGEROPOULOS, C., MARSHALL, R.H., BRINKWORTH, B.J., Sizing scenarios for stand alone hybrid photovoltaic/wind power systems and the effects on system autonomy with battery storage. In: 1993 ISES - Solar World Congress, 1993, Budapest. **Proceedings...**Budapest: ISES, 1993. 6p.

ROSAS, P. A. C., ESTANQUEIRO, A. I., **Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas**. Recife: CBEE, 2003. 62p.

ROSS, T. J., 1995, Fuzzy Logic with Engineering Applications. 1 ed. McGraw-Hill, USA.

SERPA, P. M. N. Eletrificação fotovoltaica em comunidades caiçaras e seus impactos socioculturais. São Paulo, 2001. 252p. Tese (doutorado em Energia). USP.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G., 2001, Controle e Modelagem Fuzzy. 2 ed. São Paulo.

SILVA, C.D. “**Avaliação do Potencial das Energias Solar e Eólica para Acionamento de Pequenos Sistemas de Bombeamento na Fazenda Lageado**”, Botucatu, 2000. 98p. Dissertação (mestrado em Agronomia) – UNESP.

SILVA, Marco Antonio Batista Da. **Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas**. 2005. 221 f. Tese (Doutorado) - Ufrj - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SIQUEIRA, Jair Antonio Cruz. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. 2005. 176 f. Tese (Doutorado) - Unesp - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

SOUZA, Orlando Tadeu Lima De. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para determinação do calor latente com alicação em sistemas de irrigação**. 2004. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia (energia Na Agricultura), Unesp - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.

TERANO, T., ASAI, K., SUGENO, M., 1991, Fuzzy Systems Theory and Its Applications, U.S.A., Academic Press Inc.

TERCIOTE, R., Análise da Eficiência de um Sistema Eólico Isolado. Campinas, 2002. 129p. Dissertação (mestrado em Planejamento Energético). FEM/UNICAMP.

TOMALSQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, 515p.

TURKSEN, I. B., 1984, “Measurement of Fuzziness: Interpretation of The Axioms of Measure”, Conference on Fuzzy Information and Knowledge Representation for Decision Analysis, IFAC, Oxford, pp. 97-102.

VEIGA, M. M., 1994, A Heuristic System for Environmental Risk Assessment of Mercury from Gold Mining Operations. Ph.D. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canadá.

VON ALTROCK, C., 1995, Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Applications Explained, USA, Prentice Hall.

ZADEH, L. A., 1975, Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes, New York, Academic Press.

ZIMMERMANN, H. J., 1985, Fuzzy Set Theory and Its Applications, U.S.A, Kluwer Nijhoff Publishing

ZUMARÄN, D.R., “**Avaliação Econômica da Geração de Energia Conectada à Rede em Mercado Elétrico Desregulado**”, Dissertação de Mestrado, EP/FEA/IEE/IF/USP, São Paulo, 2000.

APÊNDICE

Legenda para as tabelas 13 a 24:

- VVMD: Velocidade do Vento Média Diária (m.s-1)
- EDVTD: Energia Disponível no Vento Total Diária (Wh)
- EGATD: Energia Gerada pelo Aerogerador Total Diária (Wh)
- ISATD: Irradiância Solar Média Diária (W.m⁻²)
- ESGTD: Energia Solar Global Total Diária (Wh)
- EGPFTD: Energia Gerada pelo Pannel Fotovoltaico Total Diária (Wh)
- ESED: Energia Solar + Eólica Disponível (Wh)
- ETDGSH: Energia Total Diária Gerada pelo Sistema Híbrido (Wh)
- RSH: Rendimento do Sistema Híbrido (%)
- RSHF: Rendimento do Sistema Híbrido com Fuzzy (%)
- ETDGSHF: Energia Total Diária Gerada pelo Sistema Híbrido com Fuzzy (Wh)

Legenda para a tabela 25:

- VVMM: Velocidade do Vento Média Mensal (m.s-1)
- EDVTM: Energia Disponível no Vento Total Mensal (Wh)
- EGATM: Energia Gerada pelo Aerogerador Total Mensal (Wh)
- ISATM: Irradiância Solar Média Mensal (W.m⁻²)
- ESGTM: Energia Solar Global Total Mensal (Wh)
- EGPFTM: Energia Gerada pelo Pannel Fotovoltaico Total Mensal (Wh)
- ESED: Energia Solar + Eólica Disponível (Wh)
- ETMGSH: Energia Total Mensal Gerada pelo Sistema Híbrido (Wh)
- RSH: Rendimento do Sistema Híbrido (%)
- RSHF: Rendimento do Sistema Híbrido com Fuzzy (%)
- ETMGSHF: Energia Total Mensal Gerada pelo Sistema Híbrido com Fuzzy (Wh)

Tabela 13. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de setembro de 2004.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m ⁻²)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSB (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSF (Wh)
1/set	2,7	8,0	0,8	416,5	10.121,7	931,5	10.129,7	932,3	9,2	12,8	1.296,6
2/set	3,0	47,3	5,6	365,4	8.617,0	797,5	8.664,3	803,0	9,3	12,8	1.109,0
3/set	3,3	148,4	28,0	155,1	1.200,5	99,0	1.349,0	126,9	9,4	12,8	172,7
4/set	4,4	254,5	14,8	371,1	8.682,7	788,3	8.937,2	803,1	9,0	12,8	1.144,0
5/set	2,8	5,9	0,5	484,7	11.865,1	1.059,1	11.871,0	1.059,6	8,9	12,8	1.519,5
6/set	2,9	9,7	1,0	543,5	12.423,6	943,0	12.433,3	944,0	7,6	12,8	1.591,5
7/set	3,2	53,3	8,9	542,2	12.786,0	989,0	12.839,3	997,8	7,8	12,8	1.643,4
8/set	2,7	11,8	1,2	537,4	12.961,7	1.030,4	12.973,4	1.031,6	8,0	12,8	1.660,6
9/set	3,1	60,1	6,0	514,8	12.417,1	969,2	12.477,2	975,3	7,8	12,8	1.597,1
10/set	2,9	30,9	5,0	512,3	11.987,2	972,4	12.018,1	977,3	8,1	12,8	1.538,3
11/set	3,4	367,8	86,5	507,6	12.152,1	1.023,0	12.520,0	1.109,5	8,9	12,8	1.602,6
12/set	3,5	177,4	50,5	503,0	12.131,8	1.021,1	12.309,1	1.071,6	8,7	12,8	1.575,6
13/set	3,3	150,1	32,7	512,5	11.992,1	953,3	12.142,2	986,0	8,1	12,8	1.554,2
14/set	3,4	123,8	25,7	515,6	12.250,6	959,8	12.374,4	985,5	8,0	12,8	1.583,9
15/set	3,5	189,2	42,9	152,3	3.617,6	344,9	3.806,9	387,8	10,2	12,8	487,3
16/set	4,6	1.444,4	242,6	471,0	11.953,3	1.019,7	13.397,7	1.262,3	9,4	12,8	1.714,9
17/set	3,8	451,5	122,3	126,8	3.081,2	281,8	3.532,7	404,0	11,4	12,8	452,2
18/set	0,0	0,0	0,0	102,2	2.428,3	230,9	2.428,3	230,9	9,5	12,8	310,8
19/set	3,3	11,7	0,7	88,6	2.024,9	182,1	2.036,6	182,8	9,0	12,8	260,7
20/set	3,0	117,9	14,7	524,5	13.217,1	1.138,6	13.335,0	1.153,3	8,7	12,8	1.706,9
21/set	3,6	269,7	59,2	546,8	13.483,5	1.103,1	13.753,2	1.162,3	8,5	12,8	1.760,4
22/set	3,7	601,3	140,1	498,6	12.206,0	956,1	12.807,3	1.096,2	8,6	12,8	1.639,3
23/set	3,8	717,3	163,2	624,0	15.163,0	1.174,9	15.880,3	1.338,1	8,4	12,8	2.032,7
24/set	4,5	734,3	169,1	626,6	15.114,1	987,9	15.848,4	1.157,0	7,3	12,8	2.028,6
25/set	3,2	27,9	5,7	569,4	14.246,5	990,7	14.274,3	996,4	7,0	12,8	1.827,1
26/set	3,5	199,5	40,7	273,9	6.261,9	618,7	6.461,4	659,4	10,2	12,8	827,1
27/set	3,2	31,8	5,9	273,1	6.537,4	674,8	6.569,2	680,7	10,4	12,8	840,9
28/set	3,2	108,8	11,5	275,8	7.048,4	615,7	7.157,2	627,2	8,8	12,8	916,1
29/set	4,1	272,0	60,0	338,1	7.119,3	650,2	7.391,3	710,2	9,6	12,8	946,1
30/set	3,5	124,7	30,6	292,1	6.519,9	650,7	6.644,6	681,3	10,3	12,8	850,5
total	3,3	6.750,8	1.376,3	408,8	291.611,6	24.157,0	298.362,3	25.533,3	8,6	12,8	38.190,4

Tabela 14. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de outubro de 2004.

DIA / MÊS	VVMD (m.s-1)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSH (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSHF (Wh)
1/out	3,6	1.237,8	142,1	119,4	2.751,7	252,2	3.989,5	394,4	9,9	12,8	510,7
2/out	3,1	57,5	3,6	426,6	10.750,8	1.071,7	10.808,2	1.075,3	10,0	12,8	1.383,5
3/out	4,9	960,6	96,7	208,6	4.243,1	413,9	5.203,6	510,6	9,8	12,8	666,1
4/out	3,4	380,3	33,6	354,6	8.553,3	835,0	8.933,5	868,5	9,7	12,8	1.143,5
5/out	3,7	563,5	77,2	210,2	5.334,4	528,0	5.897,9	605,2	10,3	12,8	754,9
6/out	4,1	1.827,5	216,8	536,0	13.698,9	1.121,2	15.526,4	1.338,0	8,6	12,8	1.987,4
7/out	4,3	2.175,8	271,2	573,8	14.871,9	1.119,6	17.047,7	1.390,8	8,2	12,8	2.182,1
8/out	3,7	722,2	83,4	396,1	10.339,1	975,6	11.061,3	1.059,0	9,6	12,8	1.415,8
9/out	3,1	6,5	0,4	164,6	4.295,4	428,2	4.301,9	428,6	10,0	12,8	550,6
10/out	4,9	653,8	65,5	137,1	3.331,5	318,7	3.985,3	384,2	9,6	12,8	510,1
11/out	4,4	707,4	30,2	125,3	2.887,1	267,6	3.594,5	297,8	8,3	12,8	460,1
12/out	3,2	53,5	3,6	359,1	9.501,5	968,4	9.554,9	971,9	10,2	12,8	1.223,0
13/out	4,0	426,1	58,3	460,5	11.936,8	1.086,0	12.362,9	1.144,4	9,3	12,8	1.582,4
14/out	4,1	1.851,9	232,1	573,4	14.758,6	1.088,1	16.610,5	1.320,2	8,0	12,8	2.126,1
15/out	4,1	1.417,6	186,9	531,5	13.967,7	946,4	15.385,3	1.133,3	7,4	12,8	1.969,3
16/out	3,2	86,3	8,0	496,8	13.054,7	1.055,8	13.141,0	1.063,8	8,1	12,8	1.682,0
17/out	3,8	499,5	55,7	429,8	10.831,0	953,9	11.330,4	1.009,6	8,9	12,8	1.450,3
18/out	3,5	889,4	89,0	434,7	11.580,1	942,1	12.469,5	1.031,1	8,3	12,8	1.596,1
19/out	3,4	658,9	69,9	476,7	12.786,2	1.094,3	13.445,1	1.164,2	8,7	12,8	1.721,0
20/out	2,4	16,2	0,4	487,1	12.887,8	1.064,3	12.904,0	1.064,8	8,3	12,8	1.651,7
21/out	4,4	608,8	68,0	254,6	6.232,2	655,6	6.841,0	723,7	10,6	12,8	875,7
22/out	4,1	95,4	8,9	238,2	6.346,3	619,1	6.441,7	628,0	9,8	12,8	824,5
23/out	3,2	207,1	18,1	323,9	8.221,2	788,7	8.428,3	806,8	9,6	12,8	1.078,8
24/out	4,3	1.972,0	208,3	393,1	10.473,0	795,6	12.445,0	1.003,8	8,1	12,8	1.593,0
25/out	3,9	1.449,5	154,1	511,9	13.638,0	827,9	15.087,5	982,0	6,5	12,8	1.931,2
26/out	4,0	1.083,7	114,4	481,6	12.397,2	873,7	13.480,9	988,1	7,3	12,8	1.725,6
27/out	3,2	179,2	15,1	347,6	8.446,5	706,0	8.625,7	721,1	8,4	12,8	1.104,1
28/out	3,2	421,7	38,7	171,5	4.197,9	394,6	4.619,5	433,3	9,4	12,8	591,3
29/out	4,2	1.511,8	134,2	537,1	13.922,5	1.106,1	15.434,3	1.240,3	8,0	12,8	1.975,6
30/out	3,5	614,5	71,6	515,6	13.550,0	964,7	14.164,5	1.036,3	7,3	12,8	1.813,1
31/out	3,7	1.053,4	118,2	539,6	13.695,9	947,2	14.749,4	1.065,4	7,2	12,8	1.887,9
total	3,8	24.389,1	2.674,1	381,2	303.482,1	25.210,0	327.871,2	27.884,1	8,5	12,8	41.967,5

Tabela 15. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de novembro de 2004.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m ⁻²)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSH (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSHF (Wh)
1/nov	3,3	145,3	27,3	272,4	7.011,3	577,1	7.156,6	604,4	8,5	12,8	916,0
2/nov	0,0	0,0	0,0	108,9	2.567,7	235,5	2.567,7	235,5	9,2	12,8	328,7
3/nov	1,9	0,4	0,0	208,9	5.527,1	546,0	5.527,4	546,0	9,9	12,8	707,5
4/nov	3,2	18,3	2,4	243,9	6.102,5	606,5	6.120,8	608,9	10,0	12,8	783,5
5/nov	3,1	13,3	1,2	319,8	8.634,5	806,9	8.647,8	808,1	9,3	12,8	1.106,9
6/nov	3,4	381,2	79,9	463,1	12.504,2	1.084,0	12.885,4	1.163,9	9,0	12,8	1.649,3
7/nov	3,6	539,6	126,7	495,7	13.474,0	1.286,8	14.013,6	1.413,5	10,1	12,8	1.793,7
8/nov	3,8	472,8	119,3	512,4	13.649,1	1.165,3	14.121,9	1.284,5	9,1	12,8	1.807,6
9/nov	3,8	388,5	105,7	489,6	13.044,0	1.115,6	13.432,4	1.221,3	9,1	12,8	1.719,3
10/nov	3,2	104,9	19,3	473,1	12.006,0	1.037,3	12.110,9	1.056,6	8,7	12,8	1.550,2
11/nov	3,0	8,4	0,9	450,5	12.487,3	1.001,7	12.495,6	1.002,6	8,0	12,8	1.599,4
12/nov	2,6	9,4	0,6	417,9	11.132,3	881,7	11.141,7	882,3	7,9	12,8	1.426,1
13/nov	3,5	90,5	12,0	414,5	10.296,6	866,3	10.387,1	878,3	8,5	12,8	1.329,6
14/nov	4,2	176,9	20,7	286,5	6.652,9	687,1	6.829,8	707,8	10,4	12,8	874,2
15/nov	3,4	200,9	50,9	413,2	11.006,2	842,3	11.207,1	893,3	8,0	12,8	1.434,5
16/nov	3,4	470,7	96,9	510,8	13.514,6	981,2	13.985,3	1.078,1	7,7	12,8	1.790,1
17/nov	3,5	416,1	101,1	521,7	14.180,9	962,7	14.597,0	1.063,8	7,3	12,8	1.868,4
18/nov	3,7	593,5	153,0	431,4	11.726,3	929,9	12.319,8	1.083,0	8,8	12,8	1.576,9
19/nov	3,2	178,9	28,1	304,4	7.834,3	755,1	8.013,2	783,2	9,8	12,8	1.025,7
20/nov	3,3	21,6	3,3	423,8	11.670,2	840,7	11.691,8	844,0	7,2	12,8	1.496,6
21/nov	2,9	29,9	4,1	414,7	10.749,5	944,8	10.779,4	948,9	8,8	12,8	1.379,8
22/nov	3,9	107,6	21,0	360,1	9.851,7	830,5	9.959,3	851,5	8,6	12,8	1.274,8
23/nov	4,8	183,2	44,3	378,8	10.021,8	938,8	10.205,0	983,1	9,6	12,8	1.306,2
24/nov	3,0	28,1	1,3	313,4	7.955,2	713,0	7.983,3	714,3	9,0	12,8	1.021,9
25/nov	3,9	123,0	24,1	219,1	5.559,7	555,6	5.682,7	579,7	10,2	12,8	727,4
26/nov	3,1	87,3	14,3	322,1	8.753,4	853,4	8.840,7	867,8	9,8	12,8	1.131,6
27/nov	3,3	352,2	52,0	480,3	13.054,2	1.108,5	13.406,4	1.160,4	8,7	12,8	1.716,0
28/nov	3,3	269,3	46,3	417,7	11.353,2	966,2	11.622,6	1.012,5	8,7	12,8	1.487,7
29/nov	2,8	20,1	1,7	463,7	12.103,6	955,1	12.123,6	956,8	7,9	12,8	1.551,8
30/nov	3,2	213,2	35,6	529,0	13.901,5	1.100,5	14.114,7	1.136,2	8,1	12,8	1.806,7
total	3,3	5.644,6	1.193,7	388,7	308.325,8	26.176,2	313.970,4	27.369,9	8,7	12,8	40.188,2

Tabela 16. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de dezembro de 2004.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGS (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSF (Wh)
1/dez	3,7	259,4	73,0	539,0	14.358,8	1.067,8	14.618,2	1.140,8	7,8	12,8	1.871,1
2/dez	3,3	72,7	5,6	498,9	13.740,7	1.050,9	13.813,4	1.056,5	7,7	12,8	1.768,1
3/dez	3,9	196,7	42,0	392,0	9.173,1	764,0	9.369,9	806,1	8,6	12,8	1.199,3
4/dez	3,3	204,4	35,7	367,3	10.180,8	861,1	10.385,2	896,7	8,6	12,8	1.329,3
5/dez	3,3	76,5	16,1	403,6	10.750,9	942,9	10.827,4	959,0	8,9	12,8	1.385,9
6/dez	3,8	52,5	11,3	470,5	12.279,5	995,5	12.331,9	1.006,8	8,2	12,8	1.578,5
7/dez	3,5	566,0	154,1	170,6	4.483,0	408,7	5.049,0	562,8	11,2	12,8	646,3
8/dez	4,7	1.625,8	417,1	259,7	5.843,8	539,2	7.469,6	956,3	12,8	12,8	956,1
9/dez	3,6	428,8	113,3	208,8	5.449,4	509,8	5.878,2	623,0	10,6	12,8	752,4
10/dez	3,1	29,7	4,0	397,9	10.815,4	956,4	10.845,2	960,4	8,9	12,8	1.388,2
11/dez	3,3	79,9	13,8	474,6	13.069,9	968,3	13.149,8	982,1	7,5	12,8	1.683,2
12/dez	4,2	281,4	63,0	180,8	4.459,3	403,3	4.740,7	466,3	9,8	12,8	606,8
13/dez	3,0	28,8	1,7	361,0	9.746,4	907,5	9.775,2	909,2	9,3	12,8	1.251,2
14/dez	3,2	77,2	13,5	499,8	12.684,7	954,7	12.761,9	968,2	7,6	12,8	1.633,5
15/dez	3,1	154,2	25,5	526,3	14.115,0	1.039,0	14.269,3	1.064,5	7,5	12,8	1.826,5
16/dez	3,2	29,5	4,1	532,9	14.389,2	1.051,9	14.418,7	1.056,0	7,3	12,8	1.845,6
17/dez	3,8	102,9	7,1	501,1	12.898,3	1.014,3	13.001,2	1.021,3	7,9	12,8	1.664,2
18/dez	3,1	110,4	18,9	467,1	12.444,3	921,9	12.554,7	940,9	7,5	12,8	1.607,0
19/dez	3,1	117,5	20,2	527,8	14.535,8	1.075,8	14.653,3	1.096,0	7,5	12,8	1.875,6
20/dez	2,8	9,6	1,1	301,9	7.826,4	698,7	7.836,0	699,8	8,9	12,8	1.003,0
21/dez	2,8	7,7	0,5	172,7	4.321,7	401,4	4.329,4	401,9	9,3	12,8	554,2
22/dez	2,6	8,1	0,6	275,1	7.379,4	684,8	7.387,5	685,4	9,3	12,8	945,6
23/dez	0,0	0,0	0,0	233,8	6.271,6	576,9	6.271,6	576,9	9,2	12,8	802,8
24/dez	2,7	10,2	2,3	402,1	11.289,8	976,9	11.299,9	979,2	8,7	12,8	1.446,4
25/dez	2,9	3,6	0,6	417,0	11.409,0	908,6	11.412,6	909,2	8,0	12,8	1.460,8
26/dez	0,0	0,0	0,0	367,6	9.991,0	895,7	9.991,0	895,7	9,0	12,8	1.278,9
27/dez	2,6	10,6	1,2	438,2	11.516,7	1.003,2	11.527,3	1.004,3	8,7	12,8	1.475,5
28/dez	3,2	32,0	6,5	210,4	5.188,0	487,4	5.220,0	493,9	9,5	12,8	668,2
29/dez	3,1	313,3	55,5	390,1	10.392,1	959,3	10.705,5	1.014,8	9,5	12,8	1.370,3
30/dez	3,3	205,6	47,9	507,8	13.253,0	1.001,9	13.458,6	1.049,7	7,8	12,8	1.722,7
31/dez	3,5	296,8	63,8	528,9	13.423,5	1.001,8	13.720,3	1.065,7	7,8	12,8	1.756,2
total	3,1	5.391,7	1.219,9	387,9	317.680,7	26.029,4	323.072,3	27.249,4	8,4	12,8	41.353,3

Tabela 17. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de janeiro de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m ⁻²)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSB (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSBF (Wh)
1/jan	2,7	33,1	2,8	451,6	11.949,0	1.048,7	11.982,1	1.051,5	8,8	12,8	1.533,7
2/jan	3,3	103,0	23,4	332,1	6.694,7	698,8	6.797,7	722,2	10,6	12,8	870,1
3/jan	3,6	467,3	111,5	287,4	7.551,9	730,8	8.019,3	842,4	10,5	12,8	1.026,5
4/jan	3,2	102,0	19,7	199,1	4.695,2	452,3	4.797,2	472,0	9,8	12,8	614,0
5/jan	3,1	51,4	6,8	197,5	4.870,8	481,1	4.922,1	487,9	9,9	12,8	630,0
6/jan	2,4	10,8	0,8	112,7	2.798,6	264,0	2.809,4	264,8	9,4	12,8	359,6
7/jan	2,9	6,7	1,2	261,6	6.403,2	647,2	6.409,9	648,4	10,1	12,8	820,5
8/jan	3,6	53,6	7,6	239,3	6.460,0	641,8	6.513,6	649,4	10,0	12,8	833,7
9/jan	3,6	75,3	16,0	303,2	8.295,2	781,4	8.370,5	797,4	9,5	12,8	1.071,4
10/jan	2,6	2,8	0,2	405,8	10.882,3	1.036,7	10.885,1	1.036,9	9,5	12,8	1.393,3
11/jan	3,2	104,5	21,2	204,4	4.782,9	478,3	4.887,4	499,5	10,2	12,8	625,6
12/jan	4,6	1.343,6	266,9	303,6	7.487,5	739,6	8.831,1	1.006,5	11,4	12,8	1.130,4
13/jan	4,0	1.023,3	213,7	117,8	2.820,6	259,7	3.844,0	473,4	12,3	12,8	492,0
14/jan	3,3	161,3	31,1	136,7	2.706,3	255,6	2.867,5	286,7	10,0	12,8	367,0
15/jan	2,9	15,6	2,0	138,5	3.339,6	315,2	3.355,1	317,2	9,5	12,8	429,5
16/jan	3,0	85,6	15,0	353,2	9.346,4	929,3	9.432,0	944,2	10,0	12,8	1.207,3
17/jan	3,3	401,4	82,0	529,8	13.828,6	1.179,4	14.230,0	1.261,4	8,9	12,8	1.821,4
18/jan	3,9	732,2	147,6	409,8	11.137,0	918,0	11.869,2	1.065,6	9,0	12,8	1.519,3
19/jan	3,0	130,3	19,8	270,5	6.961,9	680,5	7.092,2	700,3	9,9	12,8	907,8
20/jan	3,0	281,8	50,2	371,8	9.837,9	921,4	10.119,7	971,6	9,6	12,8	1.295,3
21/jan	3,4	471,9	101,2	430,0	11.300,9	880,4	11.772,8	981,6	8,3	12,8	1.506,9
22/jan	3,5	616,0	140,1	483,5	12.358,5	1.064,8	12.974,5	1.204,8	9,3	12,8	1.660,7
23/jan	3,7	710,9	170,9	440,6	11.736,4	1.066,5	12.447,3	1.237,3	9,9	12,8	1.593,3
24/jan	3,9	875,2	229,8	568,2	14.420,0	1.102,8	15.295,2	1.332,7	8,7	12,8	1.957,8
25/jan	3,6	485,2	105,8	537,4	14.121,5	1.090,5	14.606,7	1.196,2	8,2	12,8	1.869,7
26/jan	3,3	241,4	43,6	511,2	13.065,1	1.044,2	13.306,4	1.087,8	8,2	12,8	1.703,2
27/jan	3,0	51,1	6,9	511,2	12.882,7	1.048,9	12.933,8	1.055,7	8,2	12,8	1.655,5
28/jan	2,4	22,9	3,3	467,7	12.206,3	1.013,0	12.229,3	1.016,3	8,3	12,8	1.565,3
29/jan	3,4	246,8	33,2	529,1	13.713,7	1.033,9	13.960,5	1.067,1	7,6	12,8	1.786,9
30/jan	3,1	21,7	3,1	353,8	9.423,8	836,3	9.445,4	839,4	8,9	12,8	1.209,0
31/jan	3,1	85,1	12,1	412,2	9.943,0	910,2	10.028,1	922,3	9,2	12,8	1.283,6
total	3,3	9.013,7	1.889,5	350,7	278.021,4	24.551,3	287.035,1	26.440,8	9,2	12,8	36.740,5

Tabela 18. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de fevereiro de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGS (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSF (Wh)
1/fev	3,1	174,5	30,4	495,6	12.757,6	957,7	12.932,1	988,1	7,6	12,8	1.655,3
2/fev	3,5	247,7	46,4	476,9	11.330,9	972,8	11.578,6	1.019,2	8,8	12,8	1.482,1
3/fev	3,3	88,3	10,6	524,1	13.491,3	1.037,7	13.579,6	1.048,3	7,7	12,8	1.738,2
4/fev	3,1	68,9	13,5	520,6	13.494,6	1.128,3	13.563,5	1.141,8	8,4	12,8	1.736,1
5/fev	3,5	123,1	30,1	430,0	11.300,4	1.045,1	11.423,4	1.075,2	9,4	12,8	1.462,2
6/fev	3,3	202,6	47,1	473,5	12.103,0	988,8	12.305,7	1.035,9	8,4	12,8	1.575,1
7/fev	3,3	219,2	36,6	586,3	14.985,5	1.212,4	15.204,7	1.249,0	8,2	12,8	1.946,2
8/fev	3,0	7,3	0,9	557,2	14.142,8	1.120,5	14.150,1	1.121,4	7,9	12,8	1.811,2
9/fev	2,1	1,0	0,0	522,0	13.154,5	1.055,4	13.155,4	1.055,4	8,0	12,8	1.683,9
10/fev	3,4	52,9	9,4	406,5	9.438,0	824,1	9.490,9	833,6	8,8	12,8	1.214,8
11/fev	4,8	166,5	32,4	328,5	8.397,5	823,7	8.563,9	856,0	10,0	12,8	1.096,2
12/fev	2,2	5,5	0,9	296,4	7.576,6	716,8	7.582,1	717,8	9,5	12,8	970,5
13/fev	4,0	11,0	2,0	229,3	4.952,9	494,3	4.963,9	496,3	10,0	12,8	635,4
14/fev	2,8	13,7	1,5	515,2	13.446,8	1.130,8	13.460,5	1.132,3	8,4	12,8	1.722,9
15/fev	3,4	349,8	81,3	559,5	13.797,0	1.080,0	14.146,9	1.161,3	8,2	12,8	1.810,8
16/fev	3,8	715,0	174,5	460,2	11.597,9	995,5	12.312,9	1.170,1	9,5	12,8	1.576,0
17/fev	3,8	781,4	203,7	366,8	9.242,9	860,6	10.024,3	1.064,3	10,6	12,8	1.283,1
18/fev	3,5	384,6	94,1	445,7	11.231,7	938,0	11.616,3	1.032,2	8,9	12,8	1.486,9
19/fev	3,3	346,6	63,3	536,9	13.432,4	1.044,6	13.779,0	1.107,8	8,0	12,8	1.763,7
20/fev	3,4	328,8	51,3	515,8	12.626,5	942,0	12.955,3	993,3	7,7	12,8	1.658,3
21/fev	3,4	278,7	55,1	564,6	13.923,5	1.006,2	14.202,2	1.061,3	7,5	12,8	1.817,9
22/fev	3,3	152,7	27,8	545,4	13.644,8	1.026,0	13.797,4	1.053,7	7,6	12,8	1.766,1
23/fev	3,0	17,4	2,7	456,1	11.247,1	857,9	11.264,5	860,6	7,6	12,8	1.441,9
24/fev	3,1	105,0	19,5	549,7	13.655,6	1.011,7	13.760,5	1.031,2	7,5	12,8	1.761,3
25/fev	2,7	10,5	1,5	468,7	11.474,1	870,8	11.484,6	872,3	7,6	12,8	1.470,0
26/fev	3,0	18,5	2,4	166,2	4.099,5	392,8	4.118,0	395,2	9,6	12,8	527,1
27/fev	3,5	74,2	15,7	500,1	12.332,6	1.176,3	12.406,8	1.192,0	9,6	12,8	1.588,1
28/fev	2,5	7,0	0,4	322,5	7.777,7	774,9	7.784,7	775,3	10,0	12,8	996,4
total	3,3	4.952,3	1.055,2	457,9	320.655,5	26.485,5	325.607,8	27.540,7	8,5	12,8	41.677,8

Tabela 19. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de março de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m ⁻²)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGS (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSF (Wh)
1/mar	4,3	134,8	20,4	167,3	3.674,3	359,0	3.809,1	379,4	10,0	12,8	487,6
2/mar	0,0	0,0	0,0	195,1	4.775,8	463,9	4.775,8	463,9	9,7	12,8	611,3
3/mar	3,3	3,8	0,8	278,0	6.706,2	655,7	6.709,9	656,5	9,8	12,8	858,9
4/mar	3,0	24,5	1,5	437,0	10.541,3	961,8	10.565,8	963,3	9,1	12,8	1.352,4
5/mar	2,8	28,1	2,6	417,9	10.155,8	863,6	10.183,9	866,2	8,5	12,8	1.303,5
6/mar	2,9	8,7	1,3	475,9	10.964,5	972,1	10.973,1	973,4	8,9	12,8	1.404,6
7/mar	2,4	1,6	0,1	227,1	5.273,9	537,4	5.275,5	537,5	10,2	12,8	675,3
8/mar	2,4	0,7	0,0	227,6	5.612,5	557,2	5.613,2	557,2	9,9	12,8	718,5
9/mar	3,6	43,6	9,7	352,6	7.806,9	780,6	7.850,5	790,2	10,1	12,8	1.004,9
10/mar	3,2	161,9	32,5	170,8	4.119,6	394,9	4.281,4	427,4	10,0	12,8	548,0
11/mar	3,3	449,5	84,4	470,9	11.272,3	1.018,6	11.721,8	1.103,0	9,4	12,8	1.500,4
12/mar	3,5	438,2	106,3	609,6	14.044,8	974,0	14.483,0	1.080,2	7,5	12,8	1.853,8
13/mar	3,3	295,3	62,6	515,4	12.432,1	1.057,9	12.727,4	1.120,5	8,8	12,8	1.629,1
14/mar	3,5	441,1	102,4	554,5	13.174,4	955,1	13.615,5	1.057,4	7,8	12,8	1.742,8
15/mar	3,4	176,9	39,5	560,8	13.424,4	1.007,9	13.601,2	1.047,4	7,7	12,8	1.741,0
16/mar	3,1	49,0	9,6	469,8	10.992,7	860,6	11.041,7	870,3	7,9	12,8	1.413,3
17/mar	3,0	158,8	22,6	573,0	13.305,8	1.036,2	13.464,6	1.058,7	7,9	12,8	1.723,5
18/mar	3,1	102,8	13,5	514,7	12.506,1	985,9	12.608,8	999,4	7,9	12,8	1.613,9
19/mar	2,5	7,5	0,6	470,8	11.185,2	969,8	11.192,8	970,4	8,7	12,8	1.432,7
20/mar	3,6	4,9	0,9	510,6	12.222,5	954,2	12.227,4	955,2	7,8	12,8	1.565,1
21/mar	3,3	125,5	31,0	387,3	7.041,3	637,5	7.166,8	668,5	9,3	12,8	917,4
22/mar	3,5	535,6	116,4	476,2	10.971,4	931,8	11.507,0	1.048,3	9,1	12,8	1.472,9
23/mar	3,6	319,0	77,7	594,7	13.915,3	1.031,9	14.234,3	1.109,6	7,8	12,8	1.822,0
24/mar	2,9	45,1	4,8	541,1	12.760,0	967,0	12.805,1	971,8	7,6	12,8	1.639,1
25/mar	3,4	50,9	5,1	521,6	12.018,0	952,1	12.068,9	957,1	7,9	12,8	1.544,8
26/mar	3,1	212,5	37,4	599,3	13.591,9	1.007,0	13.804,3	1.044,4	7,6	12,8	1.767,0
27/mar	3,5	218,2	51,2	561,3	13.034,1	1.016,6	13.252,3	1.067,8	8,1	12,8	1.696,3
28/mar	2,4	4,0	0,4	584,6	13.363,4	947,0	13.367,4	947,4	7,1	12,8	1.711,0
29/mar	0,0	0,0	0,0	618,9	14.037,5	960,9	14.037,5	960,9	6,8	12,8	1.796,8
30/mar	3,4	278,5	51,2	608,1	14.228,4	1.097,7	14.506,9	1.149,0	7,9	12,8	1.856,9
31/mar	3,3	159,5	32,0	601,8	13.323,2	980,8	13.482,7	1.012,8	7,5	12,8	1.725,8
total	3,0	4.480,4	918,6	461,1	332.475,2	26.896,3	336.955,6	27.814,9	8,3	12,8	43.130,3

Tabela 20. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de abril de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s ⁻¹)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSB (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSBF (Wh)
1/abr	0,0	0,0	0,0	599,8	13.278,5	944,9	13.278,5	944,9	7,1	12,8	1.699,7
2/abr	3,4	45,4	9,8	459,6	9.679,1	836,1	9.724,4	845,9	8,7	12,8	1.244,7
3/abr	3,4	193,2	36,0	589,4	13.049,6	1.011,3	13.242,9	1.047,3	7,9	12,8	1.695,1
4/abr	3,4	173,6	37,4	466,5	11.166,8	898,9	11.340,4	936,2	8,3	12,8	1.451,6
5/abr	0,0	0,0	0,0	556,3	12.717,3	982,8	12.717,3	982,8	7,7	12,8	1.627,8
6/abr	3,7	6,1	1,3	574,4	12.924,5	1.043,3	12.930,5	1.044,6	8,1	12,8	1.655,1
7/abr	3,0	27,7	3,6	586,9	13.521,7	1.054,2	13.549,4	1.057,8	7,8	12,8	1.734,3
8/abr	3,1	147,3	23,0	595,0	13.279,6	976,8	13.426,9	999,9	7,5	12,8	1.718,6
9/abr	3,5	146,9	17,3	467,0	10.507,5	924,3	10.654,4	941,5	8,8	12,8	1.363,8
10/abr	3,2	12,8	0,6	589,7	13.481,2	1.114,9	13.494,0	1.115,5	8,3	12,8	1.727,2
11/abr	3,5	135,6	27,2	171,8	3.772,0	370,4	3.907,6	397,6	10,2	12,8	500,2
12/abr	3,6	703,7	187,0	227,2	4.703,5	444,8	5.407,2	631,7	11,7	12,8	692,1
13/abr	3,8	630,8	144,5	455,4	10.247,2	1.024,4	10.877,9	1.168,9	10,8	12,8	1.392,4
14/abr	3,2	90,0	17,2	87,8	1.817,7	154,6	1.907,7	171,8	9,0	12,8	244,2
15/abr	3,1	6,4	0,4	458,8	9.745,1	898,9	9.751,4	899,2	9,2	12,8	1.248,2
16/abr	3,0	99,8	14,0	618,8	13.477,5	1.163,1	13.577,2	1.177,1	8,7	12,8	1.737,9
17/abr	3,3	430,5	75,6	553,6	12.654,8	1.118,9	13.085,3	1.194,4	9,1	12,8	1.674,9
18/abr	3,4	399,2	84,8	500,1	11.522,6	1.038,6	11.921,8	1.123,4	9,4	12,8	1.526,0
19/abr	3,7	443,8	106,0	659,1	14.948,7	1.183,3	15.392,6	1.289,3	8,4	12,8	1.970,3
20/abr	3,4	249,4	50,1	653,7	14.826,9	1.175,9	15.076,3	1.226,0	8,1	12,8	1.929,8
21/abr	3,3	17,1	1,8	637,0	14.447,3	1.208,7	14.464,4	1.210,5	8,4	12,8	1.851,4
22/abr	0,0	0,0	0,0	555,8	12.806,3	1.179,2	12.806,3	1.179,2	9,2	12,8	1.639,2
23/abr	0,0	0,0	0,0	550,6	12.091,0	1.113,7	12.091,0	1.113,7	9,2	12,8	1.547,6
24/abr	3,2	92,3	17,3	570,0	12.516,9	1.078,8	12.609,2	1.096,1	8,7	12,8	1.614,0
25/abr	3,3	183,3	42,8	309,6	7.022,4	708,6	7.205,7	751,4	10,4	12,8	922,3
26/abr	0,0	0,0	0,0	463,1	9.836,6	997,6	9.836,6	997,6	10,1	12,8	1.259,1
27/abr	0,0	0,0	0,0	605,9	13.523,6	1.113,9	13.523,6	1.113,9	8,2	12,8	1.731,0
28/abr	2,7	2,1	0,1	603,6	13.581,2	1.097,1	13.583,2	1.097,2	8,1	12,8	1.738,7
29/abr	2,7	2,0	0,1	520,7	11.433,4	1.032,8	11.435,4	1.032,8	9,0	12,8	1.463,7
30/abr	2,6	1,9	0,1	612,2	13.444,1	1.113,1	13.445,9	1.113,2	8,3	12,8	1.721,1
total	2,6	4.240,7	897,7	510,0	342.024,3	29.003,5	346.265,0	29.901,2	8,6	12,8	44.321,9

Tabela 21. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de maio de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s-1)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSH (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSHF (Wh)
1/mai	0,0	0,0	0,0	542,9	11.824,9	1.011,4	11.824,9	1.011,4	8,6	12,8	1.513,6
2/mai	2,7	3,0	0,2	536,0	11.385,3	970,1	11.388,3	970,3	8,5	12,8	1.457,7
3/mai	3,1	1,5	0,1	435,5	9.876,4	978,4	9.877,9	978,5	9,9	12,8	1.264,4
4/mai	2,4	0,7	0,0	528,6	11.702,3	1.034,9	11.703,0	1.034,9	8,8	12,8	1.498,0
5/mai	2,2	0,5	0,0	532,4	11.882,0	1.054,8	11.882,5	1.054,8	8,9	12,8	1.521,0
6/mai	0,0	0,0	0,0	463,0	10.001,7	895,3	10.001,7	895,3	9,0	12,8	1.280,2
7/mai	4,3	474,9	78,6	151,9	3.007,4	277,7	3.482,3	356,3	10,2	12,8	445,7
8/mai	3,1	28,6	4,2	74,0	1.478,1	120,0	1.506,7	124,2	8,2	12,8	192,9
9/mai	3,1	142,4	20,3	392,5	8.336,8	838,3	8.479,2	858,6	10,1	12,8	1.085,3
10/mai	4,0	148,9	17,7	108,3	1.520,0	134,5	1.668,9	152,1	9,1	12,8	213,6
11/mai	4,3	308,1	59,8	142,9	2.957,3	283,4	3.265,4	343,2	10,5	12,8	418,0
12/mai	3,3	51,6	6,2	631,3	13.295,0	1.308,7	13.346,6	1.314,8	9,9	12,8	1.708,4
13/mai	3,2	45,3	5,4	627,6	13.669,9	1.094,9	13.715,2	1.100,3	8,0	12,8	1.755,5
14/mai	3,2	57,5	4,8	640,4	13.832,0	1.140,1	13.889,5	1.145,0	8,2	12,8	1.777,9
15/mai	0,0	0,0	0,0	626,2	13.525,5	1.153,5	13.525,5	1.153,5	8,5	12,8	1.731,3
16/mai	3,4	17,6	2,0	245,2	5.075,7	510,5	5.093,2	512,4	10,1	12,8	651,9
17/mai	3,1	43,8	4,9	531,7	11.771,9	1.208,3	11.815,8	1.213,2	10,3	12,8	1.512,4
18/mai	3,4	135,9	21,7	295,3	6.325,9	627,3	6.461,8	649,0	10,0	12,8	827,1
19/mai	3,5	35,7	9,0	489,5	10.748,9	1.109,3	10.784,6	1.118,3	10,4	12,8	1.380,4
20/mai	0,0	0,0	0,0	604,3	13.161,1	1.299,6	13.161,1	1.299,6	9,9	12,8	1.684,6
21/mai	3,3	24,6	2,2	600,5	13.078,4	1.327,2	13.103,0	1.329,3	10,2	12,8	1.677,2
22/mai	3,1	18,6	1,7	601,2	13.093,2	1.288,0	13.111,8	1.289,7	9,8	12,8	1.678,3
23/mai	3,2	23,9	2,6	609,7	13.168,7	1.270,1	13.192,6	1.272,7	9,7	12,8	1.688,7
24/mai	3,2	18,2	1,7	604,5	12.948,2	1.241,1	12.966,4	1.242,8	9,6	12,8	1.659,7
25/mai	2,8	1,1	0,1	531,9	11.488,1	1.140,2	11.489,2	1.140,3	9,9	12,8	1.470,6
26/mai	0,0	0,0	0,0	589,6	12.310,9	1.170,8	12.310,9	1.170,8	9,5	12,8	1.575,8
27/mai	3,8	2,8	0,3	487,5	10.354,1	1.031,8	10.356,8	1.032,0	10,0	12,8	1.325,7
28/mai	0,0	0,0	0,0	581,8	12.461,1	1.152,0	12.461,1	1.152,0	9,2	12,8	1.595,0
29/mai	0,0	0,0	0,0	582,0	12.361,7	1.144,2	12.361,7	1.144,2	9,3	12,8	1.582,3
30/mai	2,6	2,8	0,1	549,2	11.862,0	1.107,7	11.864,9	1.107,8	9,3	12,8	1.518,7
31/mai	0,0	0,0	0,0	550,3	11.787,0	1.108,1	11.787,0	1.108,1	9,4	12,8	1.508,7
total	2,4	1.588,0	243,5	480,2	320.291,3	30.032,2	321.879,3	30.275,7	9,4	12,8	41.200,6

Tabela 22. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de junho de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s-1)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGS (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSF (Wh)
1/jun	3,0	1,5	0,0	549,1	11.861,2	1.117,1	11.862,7	1.117,1	9,4	12,8	1.518,4
2/jun	0,0	0,0	0,0	552,3	11.829,7	1.087,1	11.829,7	1.087,1	9,2	12,8	1.514,2
3/jun	0,0	0,0	0,0	559,5	11.983,9	1.220,5	11.983,9	1.220,5	10,2	12,8	1.533,9
4/jun	4,7	287,7	49,4	224,4	4.806,7	466,0	5.094,4	515,5	10,1	12,8	652,1
5/jun	0,0	0,0	0,0	258,4	5.628,0	552,4	5.628,0	552,4	9,8	12,8	720,4
6/jun	3,3	19,1	6,3	145,6	2.803,7	261,6	2.822,8	267,9	9,5	12,8	361,3
7/jun	3,9	785,8	193,7	197,9	4.024,8	378,7	4.810,6	572,4	11,9	12,8	615,8
8/jun	3,8	727,1	175,9	479,8	10.276,4	1.057,8	11.003,4	1.233,7	11,2	12,8	1.408,4
9/jun	3,5	244,7	45,6	612,7	13.014,5	1.235,4	13.259,2	1.280,9	9,7	12,8	1.697,2
10/jun	2,8	3,7	0,3	427,0	9.145,7	937,2	9.149,3	937,5	10,3	12,8	1.171,1
11/jun	3,3	53,0	7,8	535,5	11.567,5	1.152,9	11.620,5	1.160,7	10,0	12,8	1.487,4
12/jun	0,0	0,0	0,0	590,0	12.744,9	1.129,9	12.744,9	1.129,9	8,9	12,8	1.631,3
13/jun	0,0	0,0	0,0	467,1	10.173,3	1.013,5	10.173,3	1.013,5	10,0	12,8	1.302,2
14/jun	0,0	0,0	0,0	125,0	2.565,2	235,8	2.565,2	235,8	9,2	12,8	328,3
15/jun	5,8	183,0	38,6	402,3	8.327,5	837,9	8.510,5	876,5	10,3	12,8	1.089,3
16/jun	2,8	1,2	0,1	529,4	11.436,0	1.150,4	11.437,2	1.150,4	10,1	12,8	1.464,0
17/jun	3,0	17,3	2,2	612,5	13.120,2	1.254,2	13.137,4	1.256,4	9,6	12,8	1.681,6
18/jun	2,3	0,6	0,0	589,4	12.625,5	1.138,5	12.626,1	1.138,6	9,0	12,8	1.616,1
19/jun	2,4	0,7	0,0	589,9	12.636,1	1.101,9	12.636,9	1.102,0	8,7	12,8	1.617,5
20/jun	3,6	2,5	0,3	574,0	12.294,9	1.046,9	12.297,4	1.047,2	8,5	12,8	1.574,1
21/jun	3,2	86,4	14,7	176,9	3.566,5	334,0	3.652,9	348,7	9,5	12,8	467,6
22/jun	3,4	343,1	64,2	375,8	7.913,8	780,7	8.256,9	844,9	10,2	12,8	1.056,9
23/jun	4,1	853,3	224,0	545,0	11.184,0	1.175,0	12.037,3	1.399,0	11,6	12,8	1.540,8
24/jun	4,5	1.115,7	245,6	564,6	12.094,3	1.136,6	13.210,0	1.382,2	10,5	12,8	1.690,9
25/jun	4,0	595,0	126,2	647,0	14.208,0	1.214,2	14.803,0	1.340,4	9,1	12,8	1.894,8
26/jun	3,0	43,4	4,7	478,1	10.585,0	1.033,2	10.628,3	1.037,9	9,8	12,8	1.360,4
27/jun	3,5	58,9	9,5	500,6	10.812,6	1.017,1	10.871,4	1.026,6	9,4	12,8	1.391,5
28/jun	2,7	17,9	1,7	617,3	13.445,7	1.129,4	13.463,6	1.131,2	8,4	12,8	1.723,3
29/jun	3,1	118,4	15,7	635,5	13.840,6	1.072,6	13.958,9	1.088,3	7,8	12,8	1.786,7
30/jun	3,3	82,9	13,3	632,0	13.879,7	1.066,9	13.962,6	1.080,1	7,7	12,8	1.787,2
total	2,8	5.642,7	1.239,8	473,2	304.395,8	28.335,5	310.038,5	29.598,1	9,5	12,8	39.684,9

Tabela 23. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de julho de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s-1)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGS (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSF (Wh)
1/jul	3,5	2,2	0,0	610,3	13.293,2	1.066,6	13.295,4	1.066,6	8,0	12,8	1.701,8
2/jul	2,6	19,5	3,3	582,8	12.693,1	1.061,1	12.712,7	1.064,4	8,4	12,8	1.627,2
3/jul	4,5	420,5	40,3	275,3	5.698,0	471,6	6.118,5	511,9	8,4	12,8	783,2
4/jul	2,8	4,7	0,4	164,0	3.600,8	342,5	3.605,4	343,0	9,5	12,8	461,5
5/jul	3,1	103,6	13,9	391,4	8.594,2	859,8	8.697,8	873,7	10,0	12,8	1.113,3
6/jul	3,8	674,4	119,4	463,8	10.184,7	965,8	10.859,1	1.085,2	10,0	12,8	1.390,0
7/jul	3,8	466,8	102,3	482,4	10.419,6	985,5	10.886,4	1.087,8	10,0	12,8	1.393,5
8/jul	2,8	13,1	1,4	499,3	11.055,1	956,3	11.068,2	957,6	8,7	12,8	1.416,7
9/jul	3,2	71,4	10,6	391,4	8.524,3	810,9	8.595,7	821,5	9,6	12,8	1.100,3
10/jul	3,1	48,6	5,2	178,2	3.688,5	337,3	3.737,1	342,6	9,2	12,8	478,3
11/jul	4,1	373,0	55,7	627,9	13.450,0	1.374,3	13.823,0	1.430,0	10,4	12,8	1.769,3
12/jul	2,7	5,6	0,5	626,2	14.088,9	1.261,2	14.094,5	1.261,7	9,0	12,8	1.804,1
13/jul	3,1	120,2	18,4	309,2	6.788,8	682,4	6.909,1	700,8	10,1	12,8	884,4
14/jul	3,1	1,6	0,1	589,9	13.272,5	1.058,8	13.274,2	1.058,9	8,0	12,8	1.699,1
15/jul	2,9	4,0	0,3	554,2	12.169,5	1.040,1	12.173,5	1.040,4	8,6	12,8	1.558,2
16/jul	2,8	12,8	1,2	626,9	13.767,3	1.080,2	13.780,1	1.081,4	7,9	12,8	1.763,8
17/jul	2,9	2,5	0,1	615,8	13.855,2	1.006,7	13.857,7	1.006,8	7,3	12,8	1.773,8
18/jul	2,7	4,2	0,3	613,2	13.686,3	1.095,1	13.690,4	1.095,5	8,0	12,8	1.752,4
19/jul	2,2	0,6	0,0	622,0	13.771,8	1.021,5	13.772,4	1.021,5	7,4	12,8	1.762,9
20/jul	3,0	1,4	0,0	616,3	13.866,8	1.117,1	13.868,2	1.117,1	8,1	12,8	1.775,1
21/jul	0,0	0,0	0,0	632,2	14.224,4	1.069,3	14.224,4	1.069,3	7,5	12,8	1.820,7
22/jul	0,0	0,0	0,0	613,1	13.684,9	1.048,5	13.684,9	1.048,5	7,7	12,8	1.751,7
23/jul	2,5	0,8	0,0	600,8	13.517,5	1.015,1	13.518,3	1.015,1	7,5	12,8	1.730,3
24/jul	3,3	107,5	16,7	604,6	13.493,9	1.061,3	13.601,4	1.077,9	7,9	12,8	1.741,0
25/jul	3,7	464,4	108,4	511,2	11.317,0	967,8	11.781,4	1.076,2	9,1	12,8	1.508,0
26/jul	4,7	1.015,7	168,1	330,7	7.321,4	723,1	8.337,0	891,3	10,7	12,8	1.067,1
27/jul	5,8	722,7	94,1	491,7	11.240,9	993,7	11.963,6	1.087,7	9,1	12,8	1.531,3
28/jul	0,0	0,0	0,0	463,8	10.770,5	844,7	10.770,5	844,7	7,8	12,8	1.378,6
29/jul	3,0	29,7	3,0	626,1	14.426,3	1.166,0	14.456,0	1.169,0	8,1	12,8	1.850,4
30/jul	2,6	111,2	23,4	626,2	14.427,4	1.024,8	14.538,7	1.048,2	7,2	12,8	1.860,9
31/jul	2,1	22,5	4,9	617,2	13.886,4	1.090,3	13.909,0	1.095,3	7,9	12,8	1.780,3
total	2,9	4.825,3	792,1	514,8	354.779,2	29.599,4	359.604,5	30.391,5	8,5	12,8	46.029,4

Tabela 24. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de agosto de 2005.

DIA / MÊS	VVMD (m.s-1)	EDVTD (Wh)	EGATD (Wh)	ISATD (W.m- 2)	ESGTD (Wh)	EGPFTD (Wh)	ESED (Wh)	ETDGSH (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETDGSHF (Wh)
1/ago	2,0	24,5	8,9	559,6	12.793,5	1.063,8	12.817,9	1.072,6	8,4	12,8	1.640,7
2/ago	3,3	66,2	11,7	535,7	11.957,3	1.008,3	12.023,5	1.020,0	8,5	12,8	1.539,0
3/ago	2,6	4,6	0,3	594,2	13.262,6	1.052,2	13.267,2	1.052,4	7,9	12,8	1.698,2
4/ago	3,3	110,1	17,3	368,2	8.417,8	843,6	8.527,9	861,0	10,1	12,8	1.091,6
5/ago	3,8	430,5	104,1	560,8	12.617,7	985,4	13.048,2	1.089,5	8,4	12,8	1.670,2
6/ago	3,4	255,9	55,8	554,4	12.774,3	1.138,9	13.030,2	1.194,6	9,2	12,8	1.667,9
7/ago	3,6	283,7	71,0	586,7	13.623,7	1.017,3	13.907,3	1.088,3	7,8	12,8	1.780,1
8/ago	2,8	32,9	4,5	581,0	13.071,3	1.009,2	13.104,2	1.013,8	7,7	12,8	1.677,3
9/ago	2,7	19,4	2,3	595,1	13.604,0	1.038,3	13.623,4	1.040,6	7,6	12,8	1.743,8
10/ago	4,1	365,8	73,6	303,0	5.725,8	531,3	6.091,6	604,9	9,9	12,8	779,7
11/ago	3,4	135,2	26,4	537,2	12.571,5	1.262,5	12.706,7	1.289,0	10,1	12,8	1.626,5
12/ago	3,3	244,2	47,4	532,0	12.257,8	1.135,2	12.502,0	1.182,6	9,5	12,8	1.600,3
13/ago	3,0	26,8	4,6	426,3	8.286,8	862,2	8.313,6	866,8	10,4	12,8	1.064,1
14/ago	2,4	7,5	0,5	563,5	12.577,5	1.032,0	12.585,0	1.032,4	8,2	12,8	1.610,9
15/ago	2,8	32,1	3,0	520,6	11.901,0	999,1	11.933,0	1.002,1	8,4	12,8	1.527,4
16/ago	3,6	119,0	12,0	328,4	7.271,3	674,5	7.390,3	686,4	9,3	12,8	946,0
17/ago	3,5	135,3	27,9	315,0	7.143,6	684,9	7.278,9	712,8	9,8	12,8	931,7
18/ago	6,8	1.966,5	231,0	443,1	9.890,8	969,4	11.857,3	1.200,4	10,1	12,8	1.517,7
19/ago	4,1	395,8	6,5	595,7	13.510,8	1.217,8	13.906,6	1.224,3	8,8	12,8	1.780,0
20/ago	3,4	128,5	26,5	595,8	14.262,2	1.185,9	14.390,6	1.212,3	8,4	12,8	1.842,0
21/ago	3,7	155,8	38,1	388,9	9.240,7	889,2	9.396,6	927,3	9,9	12,8	1.202,8
22/ago	4,9	131,4	26,0	454,4	10.468,9	1.013,1	10.600,3	1.039,1	9,8	12,8	1.356,8
23/ago	3,4	148,4	35,4	472,6	11.144,9	983,8	11.293,3	1.019,2	9,0	12,8	1.445,5
24/ago	3,5	496,7	115,1	533,5	12.773,0	1.043,5	13.269,8	1.158,6	8,7	12,8	1.698,5
25/ago	3,8	670,5	174,3	531,0	12.617,0	925,0	13.287,5	1.099,3	8,3	12,8	1.700,8
26/ago	3,1	208,2	34,4	531,2	12.526,7	1.004,1	12.734,9	1.038,5	8,2	12,8	1.630,1
27/ago	3,0	49,4	6,9	494,2	11.296,3	910,5	11.345,7	917,4	8,1	12,8	1.452,2
28/ago	3,9	261,5	63,1	415,4	9.569,8	815,6	9.831,2	878,7	8,9	12,8	1.258,4
29/ago	3,9	518,0	126,4	272,2	5.830,5	559,5	6.348,6	685,8	10,8	12,8	812,6
30/ago	4,2	1.180,5	378,7	187,6	4.119,1	365,1	5.299,6	743,8	14,0	12,8	678,3
31/ago	4,1	1.071,0	299,5	232,1	5.222,9	477,4	6.293,9	776,9	12,3	12,8	805,6
total	3,5	9.675,8	2.033,3	471,3	332.330,8	28.698,4	342.006,6	30.731,7	9,0	12,8	43.776,8

Tabela 25. Características da energia eólica e da energia solar, resumo da geração de energia elétrica pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico e geração com controle fuzzy para o mês de setembro de 2004 a agosto de 2005.

DIA / MÊS	VVMM (m.s-1)	EDVTM (Wh)	EGATM (Wh)	ISATM (W.m- 2)	ESGTM (Wh)	EGPFTM (Wh)	ESED (Wh)	ETMGSH (Wh)	RSH (%)	RSHF (%)	ETMGSHF (Wh)
set/04	3,3	6.750,8	1.376,3	408,8	291.611,6	24.157,0	298.362,3	25.533,3	8,6	12,8	38.190,4
out/04	3,8	24.389,1	2.674,1	381,2	303.482,1	25.210,0	327.871,2	27.884,1	8,5	12,8	41.967,5
nov/04	3,3	5.644,6	1.193,7	388,7	308.325,8	26.176,2	313.970,4	27.369,9	8,7	12,8	40.188,2
dez/04	3,1	5.391,7	1.219,9	387,9	317.680,7	26.029,4	323.072,3	27.249,4	8,4	12,8	41.353,3
jan/05	3,3	9.013,7	1.889,5	350,7	278.021,4	24.551,3	287.035,1	26.440,8	9,2	12,8	36.740,5
fev/05	3,3	4.952,3	1.055,2	457,9	320.655,5	26.485,5	325.607,8	27.540,7	8,5	12,8	41.677,8
mar/05	3,0	4.480,4	918,6	461,1	332.475,2	26.896,3	336.955,6	27.814,9	8,3	12,8	43.130,3
abr/05	2,6	4.240,7	897,7	510,0	342.024,3	29.003,5	346.265,0	29.901,2	8,6	12,8	44.321,9
mai/05	2,4	1.588,0	243,5	480,2	320.291,3	30.032,2	321.879,3	30.275,7	9,4	12,8	41.200,6
jun/05	2,8	5.642,7	1.239,8	473,2	304.395,8	28.335,5	310.038,5	29.598,1	9,5	12,8	39.684,9
jul/05	2,9	4.825,3	792,1	514,8	354.779,2	29.599,4	359.604,5	30.391,5	8,5	12,8	46.029,4
ago/05	3,5	9.675,8	2.033,3	471,3	332.330,8	28.698,4	342.006,6	30.731,7	9,0	12,8	43.776,8
total	3,1	86.595,1	15.533,7	440,5	3.806.073,7	325.174,7	3.892.668,7	340.731,2	8,8	12,8	498.261,6