

**LÓGICA FUZZY APLICADA AO
CONTROLE DE UM SISTEMA HÍBRIDO
DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:
EÓLICA, FOTOVOLTAICA E BIOGÁS.**

LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá da
Universidade Estadual Paulista, para
a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica

Orientador : Prof. Dr. Galdenoro Botura Jr.

Co-orientador : Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
- Dez. 2002 -

R375L Reis, Luiz Octávio Mattos dos
Lógica Fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás / Luiz Octávio Mattos dos Reis. – Guaratinguetá : [s.n.], 2002
181f. : il.

Bibliografia: f. 159-163
Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2002
Orientador: Prof. Dr. Galdenoro Botura Jr.

1. Energia alternativa 2. Lógica Fuzzy I. Título

CDU 621.311

DADOS CURRICULARES

LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS

NASCIMENTO	19.07.1958 – BELÉM / PA
FILIAÇÃO	Maria Nleydir Mattos dos Reis
1980/1984	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
1992/1996	Curso de pós-Graduação em Ciências Elétricas, nível de Mestrado, na Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEL.
2000/2002	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP

*Em especial à minha esposa Izabel, pelo
incentivo, compreensão amor e carinho.
À minha mãe pela sua dedicação e amor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que através de Cristo e da Luz do Espírito Santo, iluminou e guiou os meus passos na direção das pessoas que me forneceram os conhecimentos necessários e principalmente ajudaram-me a superar as angustias e os momentos difíceis.

Ao prof. Galdenoro Botura Jr. pela orientação, paciência e incentivo e amizade que fica.

Ao professor José Luz Silveira, por acolher-me e pelo incentivo constante.

Ao prof. Luiz Roberto Carrocci, pelas longas conversas e auxílio técnico.

Em especial ao prof. Ronaldo Rossi, pelos conselhos e exemplo de vida.

Aos amigos, Leonardo e Everson pelo senso de companheirismo e pela amizade.

Às secretárias da pós-graduação Regina, Elisa e Madô pela presteza e alegria no atendimento.

E a todos aqueles que embora não tenham sido citados, merecem uma justa homenagem e agradecimento.

“As escadas para Deus nem sempre são fáceis de subir. Porém, são elas que me levarão ao mirante maravilhoso da eterna paisagem!”

SUMÁRIO

1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	20
1.1 - Considerações Iniciais	20
1.2 - Objetivos	23
1.3 - Organização do Trabalho	24
2 - ENERGIA ALTERNATIVA A LÓGICA FUZZY E SISTEMAS DE SUPERVISÃO INTELIGENTE	26
2.1 - Aspectos Gerais Sobre O Sistema Alternativo de Energia	26
2.2 - Proposta de Um sistema Híbrido de Geração de Energia	27
2.2.1 - O Sistema de Geração a Biogás	28
2.2.2 - O Sistema de Geração Fotovoltaica	29
2.2.3 - O Sistema de Geração Eólico	31
2.2.4 - O Banco de Baterias do Sistema	32
2.2.5 - O Retificador Controlado	33
2.2.6 - O Sistema de Supervisão com Instrumentação Virtual	34
2.2.7 - O Sistema de Distribuição	34
2.2.8 - Os Inversores de Frequência e as Cargas	35
2.3 - Sistemas de Controle com Lógica Fuzzy	37
3 - SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	42
3.1 - Energia Solar	42
3.1.1 - Energia Solar Fototérmica	42
3.1.2 - Arquitetura Bioclimática	43
3.1.3 - Energia Solar Fotovoltaica	43
3.2 - O Efeito Fotovoltaico	43
3.3 - Características Elétricas dos Módulos	49
3.4 - Topologia dos Módulos Fotovoltaicos	51
3.4.1 - Células Fotovoltaicas Associadas em Série	52
3.4.2 - Células Fotovoltaicas Associadas em Paralelo	53
3.5 - Fatores que Afetam o Desempenho das Células Fotovoltaicas	54
3.5.1 - Influência da Intensidade Luminosa	54
3.5.2 - Influência da Temperatura	55
3.6 - Modelagem da Célula Fotovoltaica	56
4 - SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA	62
4.1 - Aspectos Gerais Sobre a Aerodinâmica da Turbina Eólica	62
4.2 - Tipos de Turbinas Eólicas e Partes Componentes	63

4.3 -	Determinação da Potência do Vento Incidente nas Pás das Turbinas	65
4.4 -	Características das Turbinas de Vento	71
4.4.1 -	Rendimento Aerodinâmico	71
4.4.2 -	Rotação, Torque e Potência nas Turbinas de Vento	73
5 -	MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO, DE CONTROLE E SUPERVISÃO	78
5.1 -	Modelagem do Sistema Fotovoltaico	78
5.1.1 -	Modelagem do conversor Elevador (“boost”) acoplado ao painel Fotovoltaico	78
5.1.2 -	Determinação do ponto de operação das células fotovoltaicas e o efeito da temperatura	83
5.1.3 -	Modelagem do Conversor Fuzzy para o Painel Fotovoltaico	87
5.2 -	Modelagem do Sistema de Geração Eólico	95
5.2.1 -	Análise e Modelagem do Conversor Retificador Trifásico Controlado	97
5.2.2 -	Modelagem do Gerador Assíncrono	101
5.2.3 -	Modelagem da Turbina Eólica	105
5.2.4 -	Modelagem do Controlador Fuzzy do SGE	108
5.3 -	Desenvolvimento e Modelagem do Sistema de Supervisão e Instrumentação Virtual	115
5.3.1 -	Fuzificação do sistema a biogás	115
5.3.2 -	O perfil da carga e a fuzificação do consumo	120
5.3.3 -	Processo de fuzificação para supervisão das fontes Fotovoltaica e Eólica	121
6 -	ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA HÍBRIDO OPERANDO ISOLADO DO SISTEMA ELÉTRICO	124
6.1 -	Considerações Iniciais	124
6.2 -	Análise Econômica para o SGF	124
6.2.1 -	Cálculo do Custo Final da Eletricidade Produzida e Receita Anual Esperada	127
6.3 -	Análise Econômica para o SGE	130
6.3.1 -	Cálculo do Custo da Eletricidade Produzida e Receita Anual Esperada	130
6.4 -	Análise Econômica para o SGB	132
6.5 -	Análise Comparativa Entre os Sistemas	134
7 -	RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES	137

7.1 - Resultados de Simulações	137
7.2 - Simulação do Sistema de Geração Fotovoltaico (SGE)	137
7.2.1 - Simulação Considerando as Alterações da Intensidade Luminosa no Painel Fotovoltaico ao Longo do Dia	139
7.2.2 - Simulações Considerando as Alterações na Temperatura do Painel Fotovoltaico ao Longo do Dia	144
7.3 - Simulação do Sistema de Geração Eólico (SGE)	146
7.3.1 - Simulação Considerando as Alterações na Velocidade do Vento na Turbina de Vento na Turbina Eólica ao Longo do Dia	148
7.4 - Resultados da Ação do Sistema Inteligente	152
7.5 - Conclusões	156
7.6 - Sugestões	158
Referências Bibliográficas	159
Anexos:	
Anexo 1: Modelo do Painel Fotovoltaico no SIMULINK	165
Modelo do Conversor elevador (boost) no SIMULINK	166
Anexo 2: Rotinas para ajustes de curvas de torque e potência e Interpolação das curvas da turbina eólica	167
Anexo 3: Rotina para determinação dos polinômios de potência Máxima das turbinas eólicas	169
Anexo 4: Catálogo do painel fotovoltaico utilizado no projeto	170
Anexo 5: Catálogo das curvas e características das células fotovoltaicas utilizadas na modelagem do sistema	171
Anexo 6: Catálogo da turbina eólica utilizada no projeto	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BB – banco de baterias;
- BC – banco de cargas;
- BCR – banco de controle de reativo;
- BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento;
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social;
- C_A – centro de área;
- CB – conversor “boost” ou elevador;
- depot* – derivada do erro de potência;
- eV – elétron volt;
- epot* – erro de potência;
- FF – fator de forma;
- GA – gerador assíncrono;
- gap – espaço existente entre as bandas de energia;
- I_{SC} – corrente de curto circuito da célula fotovoltaica;
- I_{mPP} – corrente máxima de pico da célula fotovoltaica;
- MME – Ministério das Minas e Energia;
- N_{celP} – número de células fotovoltaicas associadas em paralelo;
- N_{celSer} – número de células fotovoltaicas associadas em série;
- N – símbolo eletrônico para representar os elétrons;
- n – rotação;
- P – símbolo eletrônico para representar as lacunas;
- PHV – painel fotovoltaico;
- PID – proporcional integral derivativo;
- PLC – Programmable Logic Controller;
- PN – simbologia para junção de dois semicondutores tipo P e tipo N;
- Prodeem – Programa de Desenvolvimento energético de Estados e Municípios;
- RC – retificador controlado;
- RS232 – interface tipo serial utilizada para comunicação de dados;

SGE – sistema de geração eólico;
SGF – sistema de geração fotovoltaico;
SGB – sistema de geração a biogás;
SSCF – sistema de supervisão e controle;
s.e. – sistema elétrico;
SCR – retificador controlado de silício;
 t_s – tempo de subida;
 t_{AC} – tempo de acomodação;
 u – sobre-sinal;
 U_{oC} – tensão a circuito aberto da célula fotovoltaica;
 U_{mPP} – tensão máxima de pico da célula fotovoltaica;
 v_w – velocidade do vento;
 w – altura do sinal;
 δ – ciclo de trabalho (“duty cycle”);
 λ_S – irradiação solar;
 λ_E – “tip speed ratio”;

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema híbrido de geração de energia para comunidades isoladas.	30
Figura 2.2 – Painel frontal de supervisão do sistema de geração.	36
Figura 2.3 – Diagrama de blocos de um controlador fuzzy.	39
Figura 2.4 – Comparação entre um sistema de controle convencional e outro que utiliza lógica fuzzy.	40

Capítulo 3

Figura 3.1 – Situação do campo elétrico da junção PN onde há a formação de íons.	45
Figura 3.2 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.	46
Figura 3.3 – Faixa de Energia luminosa a ser transformada em energia elétrica em uma Célula Fotovoltaica.	47
Figura 3.4 – Aspecto geral de uma Célula Fotovoltaica, com seus componentes básicos [9].	48
Figura 3.5 – Rendimento dos materiais utilizados na confecção de Células Fotovoltaicas, (Dernik et al,1993) [12].	49
Figura 3.6 – Curvas características dos módulos fotovoltaicos apresentados em informativos técnicos.	50
Figura 3.7 – Resultante das curvas $I = f(V)$ para associação em série de duas unidades fotovoltaicas.	52
Figura 3.8 – Resultante das curvas $I = f(V)$ para associação em paralelo de duas unidades fotovoltaicas.	53
Figura 3.9 – Variação da característica $I=f(v)$ para alterações na intensidade de radiação solar – Cortesia ASE GmbH [2].	55
Figura 3.10 – Variação da característica $I = f(V)$ para alterações na temperatura e radiação solar constante.	56
Figura 3.11 – Diagrama de blocos do modelo da célula	

fotovoltaica desenvolvida no MATLAB.	59
Figura 3.12 – Curvas para validação do modelo desenvolvido.	59
Figura 3.13 – Simulação das alterações na potência em Células Fotovoltaicas, quando há variações na temperatura dos módulos.	60

Capítulo 4

Figura 4.1 – Ação das forças aerodinâmica da turbina eólica de eixo horizontal.	62
Figura 4.2 – Classificação das turbinas eólicas: (A) Eixo horizontal; (B) Eixo vertical (Savonius).	64
Figura 4.3 – Cilindro de vento fictício	65
Figura 4.4 – Perfil de velocidade da massa de vento incidindo sobre as lâminas da turbina eólica.	67
Figura 4.5 – Coeficiente de potência, C_p , em função da razão de velocidade periférica, λ .	72
Figura 4.6 – Curvas de torque contra rotação de turbinas de vento.	74
Figura 4.7 – Curvas de torque contra rotação e de potência constante para cada velocidade de vento.	76

Capítulo 5

Figura 5.1 – Circuito do conversor elevador (“boost”).	79
Figura 5.2 – Modelo do painel fotovoltaico e do conversor elevador.	81
Figura 5.3 – Variação da tensão e corrente na carga, para variação no ciclo de trabalho e da carga, respectivamente.	82
Figura 5.4 – Curvas de potência do painel fotovoltaico. (A) Curva $V_s = f(I_s)$, (B) Curva de potência do painel.	84
Figura 5.5 – Variação do ponto de máxima potência com a variação da temperatura.	86
Figura 5.6 – Diagrama de blocos da dinâmica do sistema fotovoltaico.	87

Figura 5.7 – Representação das variáveis de entrada e saída por funções de pertinência fuzzy.	90
Figura 5.8 – Modelo e teste do controlador fuzzy desenvolvido.	95
Figura 5.9 – Topologia do circuito de geração eólica.	96
Figura 5.10 – (A) Modelo da lógica de pulsos; (B) Resultado de simulação do circuito gerador de pulsos.	99
Figura 5.11 – Modelo em blocos da ponte conversora utilizando os componentes do “power system blockset” do MATLAB.	100
Figura 5.12 – Relação entre os eixos ABC e os eixos arbitrários $dq0$.	101
Figura 5.13 – Resultados da simulação do conjunto ponte conversora GA: (A) tensão na entrada do conversor; (B) rotação do GA; (C) tensão CC na saída do conversor; (D) corrente na carga na saída do conversor.	104
Figura 5.14 – Família de curvas para uma turbina de 12,5 [KW]: (A) Torque por rotação; (B) Potência por rotação.	106
Figura 5.15 – Determinação do ponto ideal de operação pelo erro e derivada do erro.	108
Figura 5.16 – Funções de pertinência fuzzy para a variável de saída do SGE.	111
Figura 5.17 – Interpretação gráfica da tabela V.	113
Figura 5.18 – Janela do programa MATLAB de interação com o usuário. Permite que as regras sejam visualizadas de acordo com os valores atribuídos às entradas.	114
Figura 5.19 – Diagrama de blocos do sistema de supervisão fuzzy.	116
Figura 5.20 – Funções de pertinência para o estado operacional do SGB , implementado no programa de simulação.	117
Figura 5.21 – Funções de pertinência para as situações operacionais do BB. (A) para a saída. (B) para a condição de carga na entrada.	119
Figura 5.22 – Perfil de consumo utilizado no controle de supervisão fuzzy.	121

Figura 5.23 – Funções de pertinência para o consumo de energia diário da comunidade.	121
Figura 5.24 – Funções de pertinência para as fontes de energia. (A) Fotovoltaico; (B) Eólica.	122
Figura 5.25 – Conjunto de regras do sistema de supervisão editadas no programa de simulação.	123

Capítulo 6

Figura 6.1 – Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGF em função dos subsídios disponíveis.	128
Figura 6.2 – Benefício anual esperado com os subsídios disponíveis.	129
Figura 6.3 – Variação da receita anual esperada contra o custo marginal de expansão do s.e.	129
Figura 6.4 - Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGE em função dos subsídios disponíveis.	131
Figura 6.5 – Variação do benefício anual esperado contra o tempo de amortização.	131
Figura 6.6 – Avaliação do benefício anual esperado para variações no custo marginal de expansão do s.e.	132
Figura 6.7 – Custo da eletricidade produzida para um sistema de geração a biogás SGB .	133
Figura 6.8 – Variação do benefício anual esperado contra o tempo de amortização para o SGB .	133
Figura 6.9 – Benefício anual esperado contra o custo marginal de expansão do setor elétrico.	134
Figura 6.10 – Comparação entre os custos de energia produzida pelas fontes de energia estudadas.	135
Figura 6.11 – Comparação do benefício anual esperado proporcionado pelas fontes alternativas em estudo.	136

Capítulo 7

Figura 7.1 – Modelo em malha fechada do Sistema Fotovoltaico.	138
Figura 7.2 – Gráficos das potências na entrada e na carga considerando as variações na intensidade luminosa, λ .	139
Figura 7.3 – Gráfico do ciclo de trabalho contra a potência de saída, para temperatura constante: $T = 25^{\circ}\text{C}$ e λ variável.	141
Figura 7.4 - Gráficos da tensão na carga, corrente na carga, impedância de entrada do conversor. Da função erro e sua derivada.	142
Figura 7.5 – Tempo de resposta do controlador fuzzy para uma transição da intensidade luminosa de 25 para 80 mW/cm ² .	143
Figura 7.6 - Gráficos das potências na entrada e na carga considerando as variações na temperatura e intensidade luminosa, λ .	145
Figura 7.7 - Gráficos da corrente, tensão e as variações no erro da potência e a derivada. para as variações na temperatura consideradas.	146
Figura 7.8 – Modelo em malha fechada do Sistema Eólico.	147
Figura 7.9 – Gráficos das potências na carga e na turbina, e da tensão e corrente para variações na velocidade do vento.	149
Figura 7.10 – Gráficos do comportamento da tensão, corrente na carga e na saída da ponte.	150
Figura 7.11 – Detalhe da variação da tensão e corrente na ponte durante a transição da velocidade do vento.	151
Figura 7.12 – Comportamento do erro e da derivada do erro de potência, rotação e frequência angular.	152
Figura 7.13 – Mapa de regras do MATLAB/Fuzzy para uma situação operacional.	154
Figura 7.14 – Resultados de simulação do Sistema de Supervisão.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados de informativos técnicos de um Módulo Fotovoltaico. Cortesia ASE GmbH [2].	50
Tabela 5.1 – Mapa de regras fuzzy.	92
Tabela 5.2 – Matriz de relações fuzzy	94
Tabela 5.3 – Resultado da operação de min entre os conjuntos da tabela 5.2.	94
Tabela 5.4 – Matriz de relações fuzzy.	112
Tabela 5.5 – Resultado da operação de <i>min</i> entre os conjuntos da tabela 5.4.	112
Tabela 6.1 – Tabela de custos para sistema fotovoltaicos apresentada em [47]	125

RESUMO

Este trabalho desenvolve o estudo de um sistema híbrido para geração de energia elétrica a ser aplicado em pequenas comunidades rurais não servidas pelo serviço de eletrificação rural. Fatores geográficos e econômicos, em muitos casos, impossibilitam as empresas de energia em construir sistemas de distribuição rurais. Mas estas pequenas comunidades rurais desenvolvem uma micro-economia, necessitando de energia elétrica. O sistema proposto produz energia a partir de fontes alternativas utilizando um sistema fotovoltaico, eólico e a biogás.

A sistemática de apresentação do trabalho tratará da operação de cada uma dos sistemas de geração de energia, discutirá os respectivos modelos e os implementará utilizando o programa MATLAB.

O sistema de controle a ser implementado utiliza a lógica fuzzy e será desenvolvido e modelado. Os procedimentos adotados na sistemática de fuzzyficação e de defuzzyficação das variáveis de entrada e saída bem como da base de regras do controlador serão apresentados.

Resultados de simulação serão obtidos e comentados. Finalmente será apresentado o sistema de supervisão que foi desenvolvido utilizando-se o LABVIEW.

ABSTRACT

This work presents the development of a hybrid system for electrical energy generation study, to be applied to small countryside communities, not yet supplied by electrical services. In general, geographics and economics factors establish and create difficulties to supply this kind of communities. Therefore, the microeconomics developed by themselves, need this energy supply. The proposed system delivery energy from alternatives sources, as photovoltaics panels, wind energy and biomass-gas systems generation.

This presentation hereby, will be dealing each one of these operation forms, modeling and so, by implementing in MATLAB software.

The control systems to be used, will support fuzzy logic and will be here developed and analysed, like as, yours fuzzyfication and defuzzyfication techniques and controllers rules, applied to input and output variables.

Results achieved, will be here analysed and commented on. Finally, will be show a supervisory system based on LABVIEW software.

Capítulo 1: ASPECTOS GERAIS SOBRE ENERGIA RENOVÁVEL E ABRANGÊNCIA DO TRABALHO.

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante toda a década dos anos sessenta até o início da década de setenta o custo da energia elétrica foi mantido praticamente constante em todo o mundo. A matriz energética era baseada em usinas termoelétricas que utilizavam o carvão ou óleo combustível como fontes primárias. Com o advento do escalonamento do preço do petróleo no início dos anos setenta o custo da energia aumentou com uma taxa média anual entre 11% a 12 % [1]. A partir de então os países importadores de petróleo iniciaram uma série de procedimentos de tal forma a mudar o panorama das respectivas matrizes energéticas. Estudos realizados naquela época mostravam que, se o consumo energético anual continuasse na mesma escala as reservas mundiais de petróleo estariam esgotadas em cinquenta anos, seguidas pelas de carvão que se esgotariam em duzentos anos [1].

Desde então as buscas por outras fontes de energia alternativas que pudessem substituir às usuais iniciaram-se. Cada país, explorando os seus recursos naturais ou mesmo buscando alternativas técnicas e econômicas mais viáveis, iniciou o processo de mudanças em suas matrizes energéticas.

Ocorre que muitas das alternativas adotadas, de certa forma, resolveram os problemas apenas de forma paliativa; e além disso, criaram novos problemas ou mesmo agravaram os já existentes. Como exemplo, cita-se a alternativa de utilização da energia nuclear, que apesar de sua eficiência, apresenta inúmeras conseqüências negativas como: os resíduos atômicos, o aquecimento dos ecossistemas vizinhos às usinas instaladas etc. Aliado a isso se tem o aumento do risco de acidentes. Já a alternativa de exploração dos recursos hídricos resulta no alagamento de grandes áreas, onde os impactos

ambientais não podem ser mensurados de imediato. Apesar do problema ter sido resolvido sob o aspecto técnico mas não o foi de forma definitiva. Assim, a maioria das alternativas adotadas na época resultou em inúmeros problemas ambientais. Os quais são agravados dia a dia nos tempos atuais. Ressalte-se ainda o fato que todas as fontes de energia utilizadas como base geradora são esgotáveis.

Em face de todos esses problemas o interesse por fontes de energia renováveis tem encontrado inúmeros adeptos. Instituições governamentais e não governamentais, e o meio acadêmico e científico tem dado importância sobre o assunto criando programas de incentivo ou mesmo promovendo simpósios e congresso para discutir o assunto.

No Brasil, onde o setor elétrico adotou o modelo baseado em recursos hídricos, promoveu por várias décadas o desenvolvimento econômico e industrial do país, favorecendo sob o aspecto social somente os grandes centros urbanos e cidades localizadas nas suas proximidades. Áreas pertencentes à Amazônia Legal, pequenas comunidades rurais e aldeias permaneceram, por questões de obstáculos naturais e barreiras logísticas, associadas às grandes extensões geográficas; sem serem atendidas pelas redes de distribuição de energia. Mas dependentes de subsídios aos combustíveis fósseis (diesel e óleo combustível) para que a geração termoelétrica descentralizada pudesse atender, com tarifas uniformizadas e compatíveis, consumidores daquelas regiões.

A busca por alternativas baseada em fontes renováveis de produção de energia elétrica abre perspectivas para uma nova filosofia de geração e comercialização de energia no país. Ainda em um estágio de mercado informal e subsidiado, porém com imenso potencial, a geração que aproveita a irradiação solar (fotovoltaica), a força dos ventos (eólica) e resíduos orgânicos (biomassa) encontra no Brasil um cenário bastante favorável para desenvolver-se [2], [3].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Ministério da Minas e Energia através de programas como o PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios), a ELETROBRAS com o Programa Nacional de Eletrificação Rural (Luz no Campo), entre outros tem promovido medidas e subsídios para estimular a utilização de fontes de energia renováveis para atender essas comunidades [3].

O quadro apresentado no Brasil revela-se bastante favorável ao crescimento da utilização de energia renovável. Assim, incentivando pesquisadores a desenvolverem estudos de novas técnicas aplicadas na otimização da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Apesar de observar-se ainda um aspecto econômico pouco favorável, haja vista o custo dos painéis fotovoltaicos e das turbinas eólicas ainda apresentarem um valor elevado, estes vêm baixando de ano para ano. Para contornar este problema recorre-se aos programas de subsídios gerenciados por órgãos governamentais. Todos estes fatores forneceram a motivação necessária ao desenvolvimento do presente trabalho.

Este trabalho está baseado na obtenção de energia elétrica tendo como fontes primárias o sol, o vento e o biogás [4]. Uma ou mais fontes associadas constituem os sistemas denominados de sistemas híbridos. Ocorre que nos sistemas convencionais, existentes no mercado, cada uma destas fontes opera de forma a carregar um banco de baterias, não considerando os aspectos de otimização, rendimento, controle, supervisão e econômicos, resultando em desperdícios de energia e em má utilização dos equipamentos. O que pode resultar no risco dos usuários ficarem sem energia em períodos de pouco sol ou pouco vento. Deve-se ainda ressaltar que estes sistemas, considerando-se as subestações de mesma potência, se bem projetados e operando nos pontos ideais de funcionamento, podem atender a um número maior de pessoas, reduzindo ainda mais os seus custos.

As técnicas aplicadas na geração também devem considerar aspectos como: dificuldade de manutenção, acesso a essas regiões e carência de

técnicos especializados nos locais. Por outro lado o sistema proposto dispensa a utilização de mão de obra especializada atuando em tempo integral junto às subestações. Todo o controle será efetuado por um computador que através de um programa de supervisão inteligente irá gerenciar todo processo. Medições e decisões serão definidas pelo programa de medição virtual e supervisão inteligente. A inteligência será atribuída ao sistema utilizando a lógica fuzzy, que permite a tomada de decisões de forma semelhante a um especialista.

As fontes serão também dotadas de um sistema de controle também baseada na lógica fuzzy, que propiciará sempre se obter ponto de máxima geração de potência, desta forma transferindo toda a energia gerada à carga. O sistema a biogás irá operar como uma fonte reserva para situações emergenciais. Também será agregado um banco de baterias de tal forma a acumular a energia excedente nos períodos de excesso sol e vento.

1.2 - OBJETIVOS

Os inúmeros sistemas de geração elétrica que utilizam como fonte primária a energia renovável apresentam alguns inconvenientes técnicos que através da aplicação das tecnologias adequadas, podem ser facilmente contornados. Um dos inconvenientes verificados é a utilização de técnicas de controle convencionais aplicadas aos sistemas de controle de velocidade da turbina, da tensão de saída e da busca do ponto de melhor potência de operação. Outro inconveniente refere-se ao sistema de medição que requerem equipamentos para serem instalados em painéis de grandes dimensões. Esta solução necessita de um aumento do espaço físico e, conseqüentemente, de uma área adequadamente construída. Voltado à solução destes problemas que serão solucionados neste trabalho, e de outros que serão discutidos em cada um dos capítulos respectivos, pretende-se:

- ⇒ Apresentar um modelo matemático para o estudo e projeto de sistemas de geração fotovoltaicos,

- ⇒ Estudar e desenvolver uma técnica de controle para que os painéis fotovoltaicos operem sempre no ponto de máximo rendimento;
- ⇒ Desenvolver uma técnica de controle para as turbinas eólicas, a partir das curvas de torque por rotação, apresentadas em informativos técnicos, que siga sempre o ponto onde o rendimento é máximo;
- ⇒ Efetuar uma análise econômica dos sistemas de geração híbridos;
- ⇒ Utilizar um sistema de supervisão e medição virtual utilizando programas aplicados na supervisão de processos;
- ⇒ Utilizar a lógica nebulosa nos sistemas de controle em substituição às técnicas convencionais.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese está estruturada em sete capítulos nos quais os assuntos pertinentes a cada um serão abordados conforme descrito a seguir.

Cabe ao capítulo 2 a guisa de apresentar o sistema de geração híbrido e através de um diagrama de blocos e definir as características de cada um dos dispositivos a serem utilizados. Efetuar uma breve apresentação sobre os conceitos gerais da lógica fuzzy e sua utilização em sistemas de controle. Apresentam-se também, neste capítulo, os programas de supervisão e medição virtuais existentes no mercado, direcionando a aplicação para aquele utilizado neste trabalho.

No capítulo 3 trata-se da energia solar e das principais formas utilizadas para o seu aproveitamento, enfatizando o aproveitamento através dos sistemas fotovoltaicos. Discute-se o funcionamento da célula fotovoltaica e dos parâmetros apresentados nos informativos técnicos pelos fabricantes desses painéis. Efetua-se uma análise das curvas características desses

dispositivos e a partir delas desenvolve-se a modelagem matemática do painel fotovoltaico.

Da mesma forma, o capítulo 4 trata da geração eólica iniciando pelos conceitos fundamentais da aerodinâmica das turbinas de vento e as classifica segundo a posição do rotor. Inicia o processo de modelagem da turbina, obtendo as equações do torque e da potência em função da velocidade do vento e do rendimento aerodinâmico estabelecido por Betz [16]. Apresenta a curva da turbina que será utilizada no sistema discutindo-se sobre a sua dinâmica. Destaca alguns aspectos importantes sobre a curva de potência que serão considerados pelo sistema de controle.

Para o capítulo 5 reserva-se uma maior atenção matemática, uma vez que, todo o processo de modelagem dos sistemas de controle para os dispositivos de geração fotovoltaica e eólica será desenvolvido. Discute-se todo o processo a ser adotado na técnica de controle fuzzy e determina-se a dinâmica de controle do sistema. São efetuados todos os passos para a fuzificação das variáveis de entrada e saída, bem com a obtenção do mapa de regras do sistema fuzzy.

No capítulo 6 apresenta-se um estudo das viabilidades técnico-econômicas sobre a instalação de sistemas híbridos, mostrando a importância de existir o subsídio financeiro por órgãos governamentais.

No capítulo 7 discute-se os resultados obtidos nas simulações para cada situação, mostrando-se as respostas do sistema de controle destacando-se os pontos objetivos do trabalho. Por fim conclui-se sobre os pontos principais sobre o trabalho e propõem-se sugestões para trabalhos de extensão.

Capítulo 2: ENERGIA ALTERNATIVA A LÓGICA FUZZY E SISTEMAS DE SUPERVISÃO INTELIGENTES

2.1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE O SISTEMA ALTERNATIVO DE ENERGIA

No país existem muitas comunidades rurais que não são servidas pelo serviço de eletrificação rural, pois as linhas de distribuição não chegam até esses pontos, sejam por dificuldades apresentadas por fatores geográficos sejam por fatores econômicos. No entanto muitas destas comunidades desenvolvem uma micro-economia e necessitam de energia, tanto para conforto de pessoas como na produção ou armazenagem de produtos. Atualmente estas pequenas comunidades obtêm energia a partir de pequenos geradores que apesar de fornecerem algumas benfeitorias, apresentam algumas desvantagens como: utilização de óleo diesel ou gasolina como combustível, possuir capacidade de potência limitada, falta de confiabilidade no sistema, dependência de um sistema de transporte para reabastecimento do combustível, não possuem nenhum programa de manutenção etc.

O projeto proposto utiliza três fontes alternativas de geração de energia cada qual operando com seu controle de forma independente. As fontes são:

- **Solar** ⇒ converte a energia através de painéis fotovoltaicos,
- **Eólica** ⇒ utiliza uma turbina eólica acoplada a um gerador de indução,
- **Biogás** ⇒ é o combustível primário que irá alimentar um motor de combustão interna acoplado a um gerador de indução.

Por outro lado, o sistema proposto para utilização, em comunidades isoladas, deve ser dotado de algumas vantagens para ser implantado, entre as quais cita-se: ser economicamente viável, utilizar como fontes primárias de

energia combustíveis não fósseis, versatilidade de manutenção e produzir energia em regime contínuo.

Fontes alternativas de energia como o sol e o vento e que estão a disposição, em abundância na natureza, apresentam-se como as soluções mais viáveis para resolver este problema. Para acumular a energia excedente instala-se um banco de baterias e para a hipótese de dias em que se tenha baixa ocorrência de luz (sol) e vento, instala-se um conjunto motor-gerador que utiliza o biogás como fonte primária de energia de tal forma a complementar a energia armazenada pelas baterias. O biogás pode ser obtido a partir de excrementos de animais, resíduos de alimentos etc, e produzido no interior de um pequeno biodigestor de confecção caseira e que será acoplado a um gasômetro. Apesar de se pensar, a primeira vista, que a construção e manutenção de biodigestores seja difícil, pesquisas mostram ao contrário, pois inúmeros programas de auxílio e instruções de construção e manutenção de biodigestores são disponibilizados por várias instituições de ensino, como é caso da UNESP [5]. Estas apresentam e discutem o problema de uma forma simples e objetiva.

2.2 - PROPOSTA DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Através de levantamentos da curva de carga, pode-se determinar o comportamento de consumo de energia diário para as comunidades e daí quantificar a potência total do sistema de geração. Definido o perfil de consumo da comunidade define-se as potências de cada uma das fontes geradoras do sistema de geração híbrido. Para o sistema em estudo adotou-se uma potência total instalada será de 40 kW, sendo estes distribuídos em: 10 kW para o sistema de geração eólica, 15 kW para o painel solar e 15 kW para o sistema a biogás. Esta distribuição pode ser modificada e adaptada para quaisquer outros valores que se necessite. Neste caso, a escolha considerou

apenas os aspectos técnicos e a curva de carga disponível e que será utilizada no sistema de supervisão.

Na figura 2.1 tem-se o diagrama de blocos do sistema híbrido de geração a partir de fontes alternativas de energia, proposto para ser utilizado por pequenas comunidades. O projeto utiliza basicamente três fontes de energia, a saber: fotovoltaica, eólica e biogás. Cada uma das fontes terá controle individual de geração de energia, que será distribuída através de uma rede em corrente contínua para os consumidores da comunidade.

2.2.1 - O sistema de geração a biogás (SGB)

O sistema de geração a biogás denominado na figura 2.1 como **SGB**, utiliza um motor de combustão interna e um gerador de indução trifásico na configuração auto-excitado e operando isoladamente de outros sistemas elétricos convencionais. Nesta condição operacional é necessário um banco de capacitores trifásicos, conectados em delta, para estabelecer a excitação do gerador de indução. Este dispositivo é identificado no diagrama de blocos por **BCR**. Em dias de pouca ocorrência de ventos e/ou pouca intensidade solar o sistema de geração a biogás em conjunto com o banco de baterias **BB** fornecerá a energia necessária às cargas instaladas. A tensão de saída do gerador será retificada através de um retificador controlado que estará sempre suprindo o banco de baterias do sistema.

O biogás é uma mistura de gases capaz de substituir o gás do petróleo. Essa mistura de gases é obtida a partir da biodigestão ou digestão anaeróbica de produtos ricos em matéria orgânica, como esterco de animais, restos de plantas, lixo e resíduos industriais. Neste processo as bactérias anaeróbicas através de fermentação, ocorrida nos biodigestores, transformam a matéria orgânica em metano e gás carbônico, que são os componentes básicos do biogás [7].

A instalação de um biodigestor em uma propriedade rural possui como vantagens não só a produção de energia elétrica, como está sendo proposto,

mas também gás para o fogão e biofertilizante. O tamanho do biodigestor a ser instalado em uma propriedade rural depende do consumo de gás da propriedade e de como será utilizado.

2.2.2 - O sistema de geração a fotovoltaico (SGF)

A energia luminosa presente nos raios solares é captada através de um conjunto de painéis solares que aproveitam o efeito fotovoltaico dos semicondutores para converter a energia luminosa em energia elétrica [8]. Os painéis fotovoltaicos existentes comercialmente permitem que se faça vários tipos de arranjo conforme a necessidade da aplicação. Para este projeto o arranjo proposto fornecerá em termos nominais uma tensão de 85 V na saída e uma corrente de 175 A. Entre os vários fabricantes de painéis fotovoltaicos a opção de escolha recaiu sob os módulos, ASE – 50 – ATF/17 da TESSAG ASE [9] solar, que individualmente fornecem uma tensão nominal de 17 V e corrente nominal de 2,65 A, isto quando submetido a uma intensidade luminosa de 1000 W/m^2 sob temperatura de trabalho de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, de acordo com os dados informados em catálogos.

Considerando-se os parâmetros nominais do sistema e os dados de catálogo o arranjo do sistema fotovoltaico será composto por 5 módulos em série e 75 módulos em paralelo resultando em uma potência nominal de 16,894 kW. Tendo em vista que na especificação do projeto definiu-se inicialmente uma potência nominal de 15 kW, opta-se por um maior valor, deixando-se uma margem para as perdas que ocorrerão nos condutores e na variação da temperatura do painel que irá operar a céu aberto, recebendo diretamente a luz solar.

Será demonstrado que o ponto de potência máxima dos painéis fotovoltaicos variara de acordo com o valor da intensidade luminosa e da temperatura das células fotovoltaicas, as alterações resultantes serão corrigidas pelo controlador fuzzy a ser utilizado.

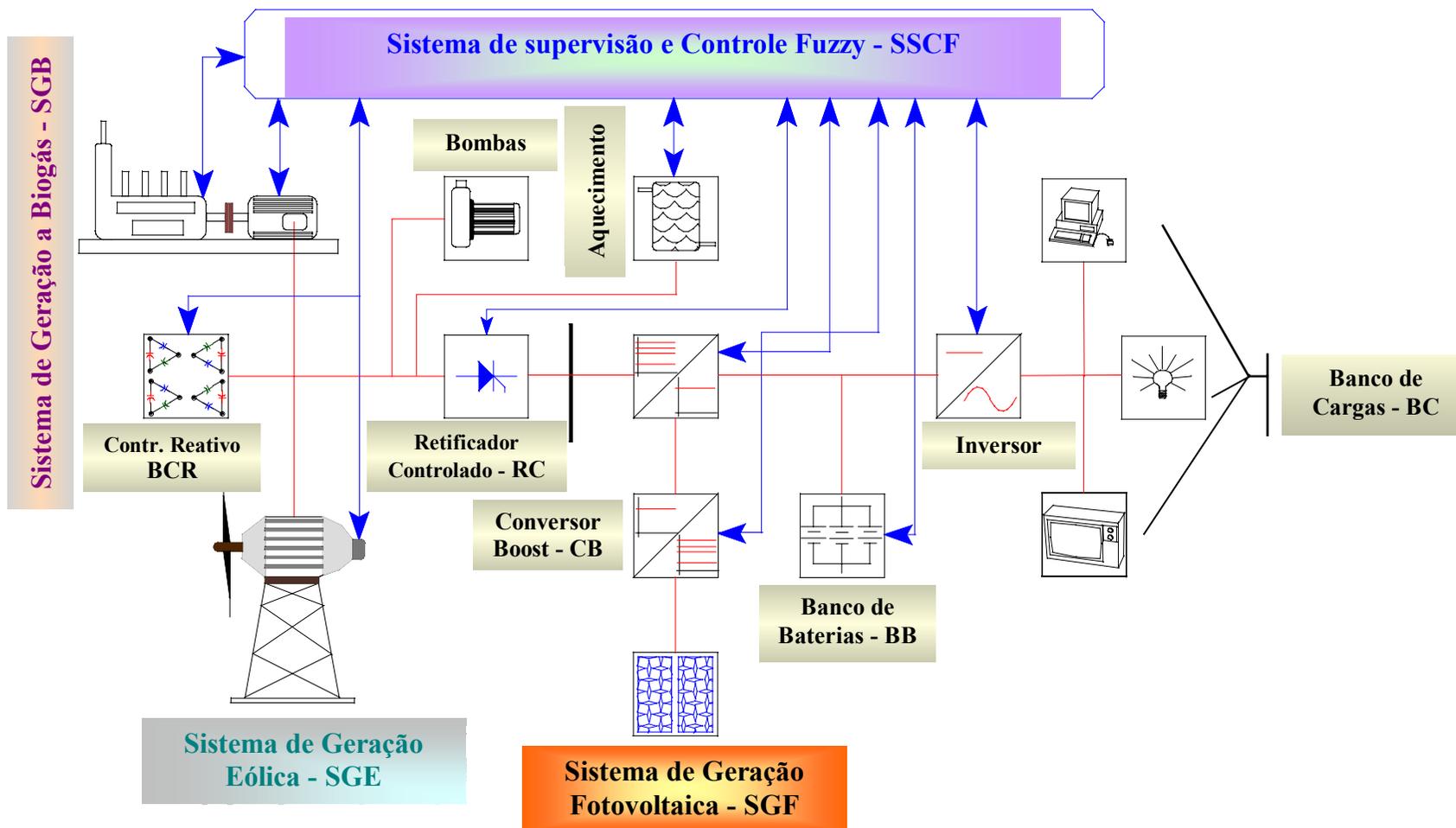


Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema híbrido de geração de energia para comunidades isoladas.

A tensão de saída do painel fotovoltaico que no projeto utiliza um nível tensão nominal de 85 V, é portanto insuficiente para operação de um sistema elétrico, pois os equipamentos disponíveis comercialmente operam em tensão nominal de 127 V ou 220 V. Um conversor do tipo boost (elevador) será acoplado à saída do painel fotovoltaico, de tal forma a se elevar a tensão até aos níveis desejados. O conversor do tipo boost denominado no diagrama de blocos por **CB**, é um conversor controlado (chopper) que converte tensão do tipo contínua, com uma determinada intensidade em outra tensão contínua de intensidade superior à da entrada. A tensão gerada pelo sistema fotovoltaico poderá ser acoplada diretamente às cargas que estiverem conectadas ao circuito ou mesmo armazená-la em um banco de baterias denominado por **BB** no diagrama da figura 2.1.

2.2.3 - O sistema de geração eólico (SGE)

No diagrama de blocos da figura 2.1 este sistema está indicado por **SGE** sendo composto por uma turbina eólica de 12 kW de potência acoplada a um gerador de indução trifásico. Este possui as seguintes especificações: potência de 10 kW, 4 pares de pólos tensão de linha 220 V.

Uma característica importante do gerador de indução é de não possuir um circuito próprio para o controle da excitação, ou seja, não há controle do fluxo no rotor. Neste tipo de máquina elétrica, controla-se o sistema de excitação na própria linha de geração de tensão, através da instalação de bancos de capacitores, indicados no diagrama de blocos por **BCR**. Em sistemas de baixa tensão a prática recomenda o fechamento das unidades capacitivas na conexão delta, conforme proposto em [10]. O controle de reativo gerado pelas unidades capacitivas pode ser controlado através de chaves estáticas (thiristores) conforme proposto em [11], ou através de chaveamento eletromecânico convencional (contatores).

Como a tensão gerada será a frequência variável, pois a velocidade do gerador dependerá da velocidade do vento, uma ponte retificadora é acoplada à saída do gerador. A ponte, indicada no diagrama por **RC**, além de retificar a tensão gerada irá controlar a intensidade da mesma através da variação do ângulo de disparo alfa (α) da ponte retificadora, de tal forma a tornar compatível com a tensão gerada com a tensão de operação do barramento DC do sistema de geração.

2.2.4 - O Banco de baterias do sistema (BB)

Durante o ano existem períodos de grande radiação solar, bem como períodos de grande incidência de vento. Nestes períodos, o sistema híbrido poderá produzir e disponibilizar uma quantidade de energia elétrica excedente disponibilizada tanto pelo sistema fotovoltaico como pelo sistema de geração eólico.

Da mesma forma haverá períodos nublados ou de chuva, onde o sistema fotovoltaico ficará praticamente inoperante; o mesmo será observado no sistema eólico nos períodos de pouco ou nenhum vento. Para contornar estes períodos um banco de baterias será instalado com o objetivo de armazenar a energia excedente nos dias em que as cargas não consumirão toda a energia gerada.

Outra função do banco de baterias é promover uma maior estabilidade ao sistema elétrico durante as transições de cargas de maior potência, atenuando as quedas de tensões bruscas ou mesmo reduzindo o efeito de cintilamento no sistema de iluminação [6].

Quanto ao banco de baterias, estudos publicados em [12] recomendam que as baterias utilizadas nesses sistemas possuam como característica principal ciclos diários rasos, ou seja, com taxas de descarga reduzidas. No entanto também devem suportar descargas profundas eventuais, para aqueles dias de ausência de geração das fontes alternativas. Outro aspecto é quanto a manutenção. Sistemas fotovoltaicos/eólicos utilizam baterias seladas de baixa

manutenção que utilizam uma liga de chumbo-cálcio nas placas positivas. Isto minimiza a taxa de gaseificação a ponto de não ser necessário completar o eletrólito regularmente com água. Desta forma, o único requisito de manutenção é que os terminais precisam ser limpos a cada 12 meses. Alguns cuidados devem ser observados como nunca posiciona-las com os pólos para baixo para evitar o derramamento do líquido, pois se isso ocorrer será impossível sua substituição.

2.2.5 - O Retificador controlado (RC)

O dispositivo retificador é uma ponte retificadora trifásica na configuração Graetz que utiliza thiristores. A ponte escolhida é do tipo totalmente controlada, no entanto, pontes semicontroladas podem ser utilizadas uma vez que não será necessário inverter o fluxo de potência.

As tensões a serem retificadas possuem frequência variável, pois são geradas pelo sistema eólico que, por não ter um controle de frequência, irá variar a frequência em uma faixa entre de 20 Hz a 300 Hz. Por outro lado, também tem que se observar o limite de frequência de operação deste tipo de ponte utilizada. Estudos publicados em [13], comprovam que até 400 Hz as pontes funcionam adequadamente. Mas em frequências superiores tem-se aumento das perdas nas pastilhas semicondutoras devido à queda de tensão nas junções das pastilhas, levando os semicondutores a um sobreaquecimento e afetando o seu desempenho. Para as situações em que a velocidade do vento atinge valores elevados, levando o gerador a operar em altas rotações o que resultaria em altas frequências, será implementado no sistema de supervisão uma proteção que retira o banco de capacitores do circuito de excitação do gerador, levando a tensão a valores próximos a zero, ao mesmo tempo em que o circuito de disparo da ponte é inibido.

2.2.6 - O Sistema de supervisão com instrumentação virtual

Os sistemas de supervisão que utilizam instrumentação virtual são uma ferramenta extremamente versátil para a criação de aplicativos de supervisão e controle de processos. Os programas utilizados permitem a troca de informações com equipamentos diversos e a criação de uma interface gráfica entre o usuário e o processo monitorado. A interface de comunicação com o usuário é através de um painel frontal onde se adicionam códigos utilizando a representação gráfica. A figura 2.2 ilustra o painel frontal para o controle desenvolvido para o sistema de geração de energia com fontes alternativas. No painel frontal podem ser instalados controladores (chaves, potenciômetros etc), mostradores numéricos de vários tipos, indicadores gráficos, além da configuração da planta do processo a ser supervisionado.

A comunicação entre o software o sistema se processa através de PLC's conectados diretamente na entrada RS232 ou mesmo através de placas de aquisição de dados.

Os PLC's e as placas de aquisição recebem as informações convertidas em sinais elétricos pelos transdutores e sensores instalados nos pontos onde se deseja monitorar as grandezas. Esses sinais devem ser tratados de tal forma a fiquem compatíveis com as entradas dos PLC's ou placas de aquisição de dados. Neste projeto utilizou-se o Labview, da National Instruments [43].

Mas a grande vantagem, das versões atuais, do programa *Labview* é que pode ser utilizado juntamente com a caixa de ferramenta fuzzy do MATLAB, o que permite a criação de sistemas de supervisão inteligentes escritos naquele ambiente.

2.2.7 - O Sistema de distribuição

A energia gerada será distribuída até aos consumidores através de uma linha de transmissão em corrente contínua. Porém, equipamentos e utensílios domésticos normalmente encontrados no mercado são projetados para o funcionamento em corrente alternada, nas tensões padronizadas de 110 V e

220 V. Apesar de existirem disponíveis equipamentos que operam em corrente contínua, em lojas especializadas. Mas dificilmente são encontrados fora dos grandes centros consumidores. Para contornar este inconveniente utilizam-se os inversores de frequência para se efetuar a conversão para corrente alternada à frequência constante de 60 Hz. Esta conversão será realizada junto às cargas consumidoras instalando-se os inversores de frequência junto às cargas. No diagrama de blocos, da figura 2.1 tem-se a ilustração de um banco de cargas BC acoplado à saída do inversor de frequência. Este tipo de topologia de conversão de tensão contínua para alternada no local, permite que o sistema adquira maior confiabilidade em relação àqueles em que utilizam apenas um inversor de grande potência. Outro aspecto refere-se a questões econômicas, pois na transmissão são utilizados apenas dois condutores em substituição dos três utilizados no sistema trifásico.

2.2.8 - Os inversores de frequência e as cargas

Os inversores de frequência operam nas tensões contínuas de entrada com valores de 12 V, 24 V, 48 V ou 120 V que são convertidas para as tensões alternadas em 120 V ou 240 V na frequência de 60 Hz ou 50 Hz, conforme ajuste no índice de modulação.

Na especificação dos inversores devem ser considerados: a tensão de entrada, a tensão de saída, à frequência de operação, a regulação de tensão, a sobretensão na entrada de tensão contínua etc. Além de tudo isto é necessário se definir previamente o ciclo de carga para verificar-se as exigências que serão solicitadas do inversor, não somente em relação à potência como também em relação à variação de tensão, frequência e forma de onda.

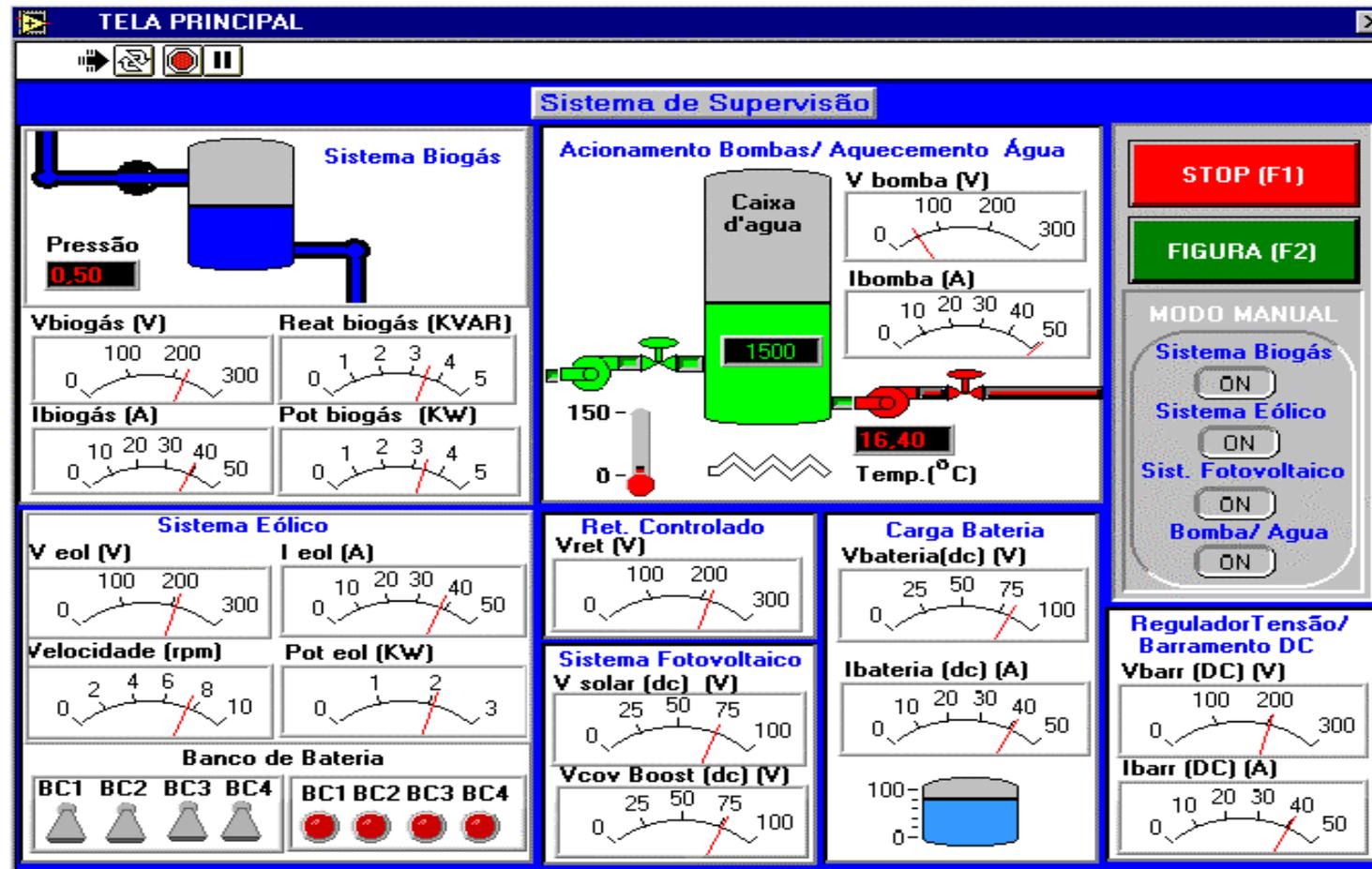


Figura 2.2 – Painel frontal de supervisão do sistema de geração.

2.3 - SISTEMAS DE CONTROLE COM LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy é uma variação da lógica booleana convencional que foi desenvolvida para expressar o conceito da verdade parcial. A forma matemática de expressar os valores entre os limites: "completamente verdadeiro" e "completamente falso", foi introduzida pelo Dr. Lotfi Zadeh da Universidade da Califórnia /Berkeley nos anos 1960 como meios de se efetuar a modelagem da incerteza natural da linguagem [26]. De acordo com as idéias de Zadeh melhor que considerar a teoria fuzzy como uma simples teoria, deve-se considerar o processo de fuzificação como uma metodologia para generalizar toda a teoria específica de uma forma discreta para uma forma "fuzzy" contínua [40]. Assim recentemente pesquisadores introduziram o cálculo fuzzy, equações diferenciais fuzzy, e assim por diante.

Um sistema inteligente fuzzy é um sistema que pode ser representado através de funções de pertinência fuzzy e de regras para raciocinar sobre os dados. As réguas em um sistema inteligente fuzzy podem ser representadas no seguinte formato:

Se x é baixo e y é elevado Então z é meio

Onde x e y são variáveis de entrada do sistema a ser controlado, e z é a variável de saída. No exemplo de representação das regras fuzzy o grau da função de pertinência fuzzy da variável de entrada x é baixo; e o grau da função de pertinência da variável y é elevado. Para estas duas condições de entrada a estado da variável de saída z assume o grau meio. Os antecedentes, ou seja, as regras de premissa definem o grau que a regra é aplicada; enquanto que a conclusão ou as regras conseqüentes atribui a função de pertinência a cada uma das variáveis de saída. Grande parte das ferramentas utilizadas para trabalhar com sistemas inteligentes fuzzy, permite mais de uma conclusão por regra. O conjunto de regras nesses sistemas que utilizam esta técnica de controle é denominado base de conhecimento.

O objetivo do controle é gerenciar o comportamento de um sistema alterando uma ou mais entradas do sistema de acordo com uma regra ou um conjunto de regras que modelam o comportamento do sistema durante a operação. O sistema que é controlado pode ser mecânico, elétrico, processo químico ou uma combinação destes.

A teoria de controle clássica usa um modelo matemático para determinar uma relação que transforme o estado desejado, de referência, e o estado observado, medido, do sistema alterando suas entradas de tal forma a modificar o estado futuro desse sistema.

O controle fuzzy substitui, o papel do modelo matemático por um conjunto de regras que descrevem o comportamento do sistema. Neste conjunto de regras são definidos os procedimentos a serem tomados diante das situações apresentadas pelas entradas.

Um controlador fuzzy possui algumas vantagens em relação aos sistemas de controle convencionais, entre elas pode-se citar: São construídos a partir da experiência humana, são facilmente aplicáveis em plantas em que os modelos são extremamente complexos; portanto não necessitam de modelos matemáticos, podem ser utilizados em conjuntos com sistemas de controle convencionais constituindo um sistema híbrido etc.

Sistemas de controle que utilizam a lógica fuzzy são compostos basicamente por três etapas: a primeira etapa efetua a conversão das variáveis de entrada e saída em uma representação conhecida como conjuntos fuzzy e denomina-se fuzificação, a segunda estabelece as regras que relacionarão as variáveis de entrada e saída. Essas regras são obtidas do conhecimento e da experiência humana e denomina-se base de regras e a terceira denominada por defuzificação efetua a conversão dos conjuntos fuzzy em um número que representa o estado da saída do sistema para uma determinada condição [29].

A figura 2.3 ilustra em forma de blocos a disposição de um controlador fuzzy. Os sinais de entrada são obtidos da planta através de sensores ou transdutores que através do tratamento adequado do sinal analógico alimentam

o bloco de fuzificação (fuzzy sets) do controlador fuzzy. Através da base de conhecimento armazenada por meio de um conjunto de regras as decisões são tomadas e devolvidas ao sistema ainda em linguagem fuzzy. O bloco de defuzificação efetua a conversão das informações para o formato analógico que é disponibilizada na saída do controlador para que seja efetuada a mudança de estado.

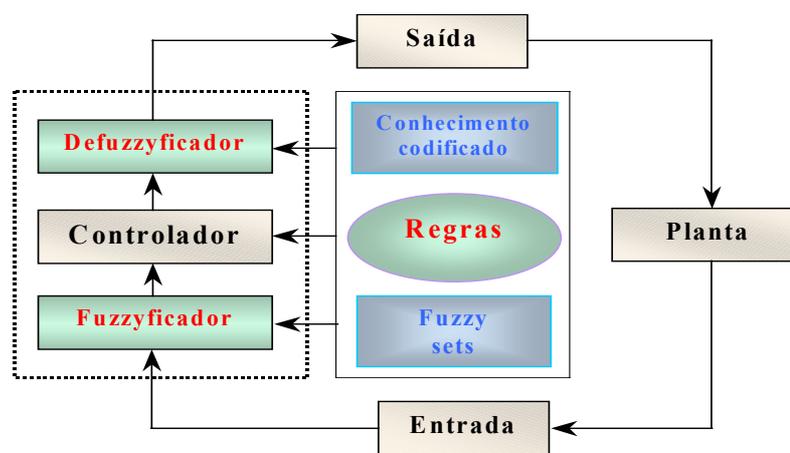


Figura 2.3 – Diagrama de blocos de um controlador fuzzy.

Um exemplo bastante elucidativo da aplicação da lógica fuzzy é para reconhecimento de padrões de cores. Sistemas convencionais poderiam ser utilizados na determinação de cores conforme o exemplo ilustrado na figura 2.4(A). As cores pré-definidas na referência do sistema são escritas segundo uma faixa de valores discretos. Isto porque os sistemas de controle convencionais baseiam a decisão em pontos discretos que são dados como referência, ou seja a entrada de controle precisa alcançar este valor para que as ações de controle sejam efetuadas. Na figura em análise fica claro que pequenas variações na tonalidade podem resultar em saídas drasticamente diferentes caso as entradas estivessem operando nas regiões próximas aos limites das faixas de cores. Pontos nessas regiões são críticos para os sistemas de controle convencionais, pois são incapazes de operar para pequenas variações do sistema sob controle.

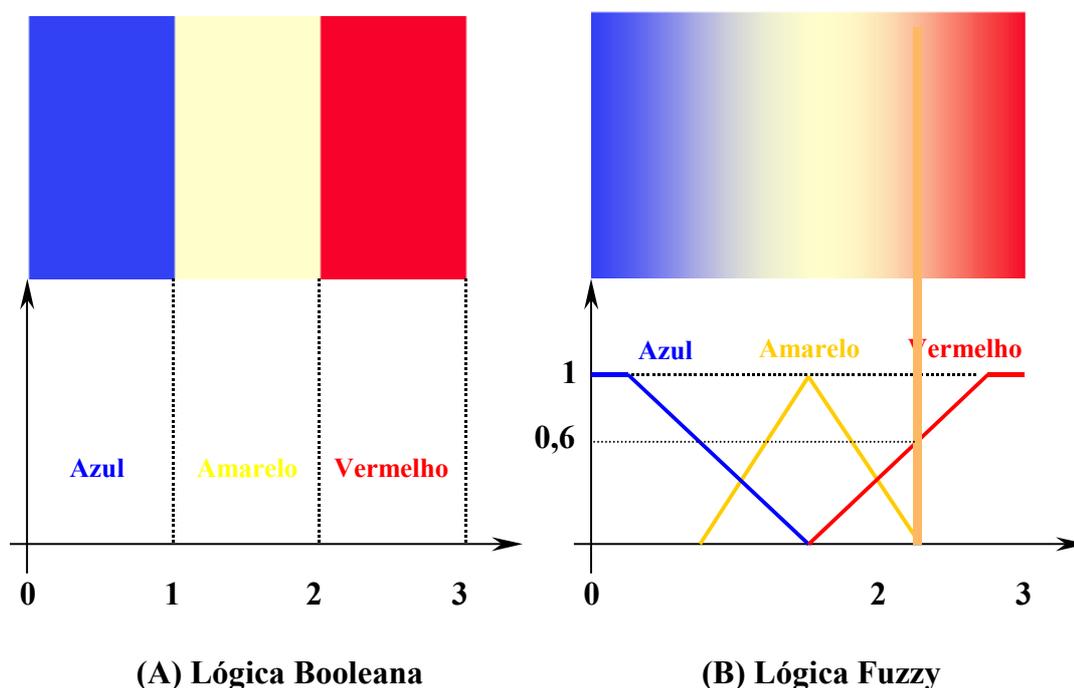


Figura 2.4 – Comparação entre um sistema de controle convencional e outro que utiliza lógica fuzzy. (A) Convencional. (B) Lógica fuzzy.

Por outro lado, a lógica fuzzy pode perceber estas pequenas variações ocorridas nesses pontos, uma vez que as faixas de cores são facilmente representáveis através da linguagem fuzzy. Exemplos da representação de conjuntos fuzzy estão ilustrados na figura 2.4(B). Neste modo de representar, o sistema pode facilmente detectar pequenas variações nas tonalidades das cores a serem reconhecidas e tomar as decisões necessárias ao reconhecimento.

Percebe-se que a lógica fuzzy se assemelha bastante a forma de pensar dos seres humanos, e neste caso podendo detectar, através do controle pequenas variações nas tonalidades, como por exemplo, a tonalidade alaranjada que possui um grau de pertinência na função que representa a cor vermelha de 0,6.

Na lógica fuzzy os termos utilizados se aproximam das condições humanas de definição das variáveis, ou seja, CLARO, ESCURO; FRIO,

MORNO, QUENTE; MUITO, POUCO. São através destes termos que são definidas as faixas de valores para cada uma das funções de pertinência. Quanto ao grau de pertinência, geralmente trabalha-se com sistemas normalizados (por unidade) e são definidos entre 0 e 1, conforme ilustrado na figura 2.4(B).

Capítulo 3: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

3.1 - ENERGIA SOLAR

Considerando as fontes de *energia renováveis* conhecidas, o sol como fonte de calor e luz, é uma das fontes de energia mais promissoras para enfrentar-se as crises energéticas deste milênio, uma vez que existem técnicas disponíveis para este fim.

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 [2]. Mas para se aproveitar tamanha energia por um processo direto tem-se algumas técnicas de utilização tais como: Energia Solar Fototérmica, Arquitetura Bioclimática e a energia fotovoltaica.

3.1.1 - 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*.

Os coletores solares podem ser classificados levando-se em consideração somente a existência ou não de dispositivos concentradores da radiação do Sol, assim tem-se os do tipo *planos* ou *concentradores*. Em ambos

os casos o fluido aquecido (líquidos, gases) e mantido em reservatórios termicamente isolados, para serem posteriormente utilizados.

Os coletores planos encontram grande utilização em sistemas de aquecimento de pequeno porte, ou seja, para aquecimento de água em residências, hotéis, hospitais etc, proporcionando uma considerável economia de energia elétrica.

Os coletores concentradores são destinados a sistemas de médio e grande porte e, atualmente, estão sendo testados para a geração de energia elétrica. Para isto o vapor gerado aciona as turbinas de geradores.

3.1.2 - 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 [12]. 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.

3.1.3 - 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 [12], 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.

3.2 - O EFEITO FOTOVOLTAICO

Os materiais semicondutores possuem algumas características próprias; sob o ponto de vista da química, são aqueles que possuem quatro elétrons na

última camada e fazem ligações covalentes. Daí possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons; porém, sob o ponto de vista da física, é que a baixas temperaturas possuem uma banda de condução totalmente vazia [15].

Considerando ainda os aspectos definidos pela física dos semicondutores, o que os diferem dos isolantes é o valor energético que separa (“gap”) as bandas de energia onde: para os semicondutores é da ordem de 1 eV e para os isolantes o “gap” é de vários eV [15], assim os semicondutores apresentam várias características interessantes. Entre as mais importantes é a possibilidade dos fótons, na faixa do visível, que possuem energia superior ao do gap do material poderem excitar elétrons da banda de condução. Outra característica é que se observa aumento da condutividade quando há aumento da temperatura. Esses fenômenos são observados em semicondutores puros denominados de intrínsecos, no entanto ainda possuem intensidade bastante reduzida, não garantindo o aproveitamento destes fenômenos para a produção de energia em grande escala [12].

Por outro lado, estes fenômenos podem ser mais acentuados desde que se disponha de uma estrutura semicondutora apropriada de tal forma a ter-se maior quantidade de elétrons excitados, gerando uma corrente útil. A estrutura cristalina do silício preenche bem estas características, onde através do processo de dopagem de impurezas pentavalentes (fósforo) ou trivalentes (boro) consegue-se aumentar os portadores na banda de condução. Estes portadores são elétrons ou lacunas respectivamente e, neste caso o semicondutor denomina-se de extrínseco.

Nesta etapa do processo, sob a temperatura ambiente, existe energia térmica suficiente para que a grandes quantidades de elétrons em excesso dos átomos de fósforo estejam livres, e neste caso o semicondutor é denominado como do tipo N. O mesmo ocorrendo para as lacunas (buracos) criados pelos átomos de boro, que são denominados como do tipo P, conforme ilustrado na figura 3.1.

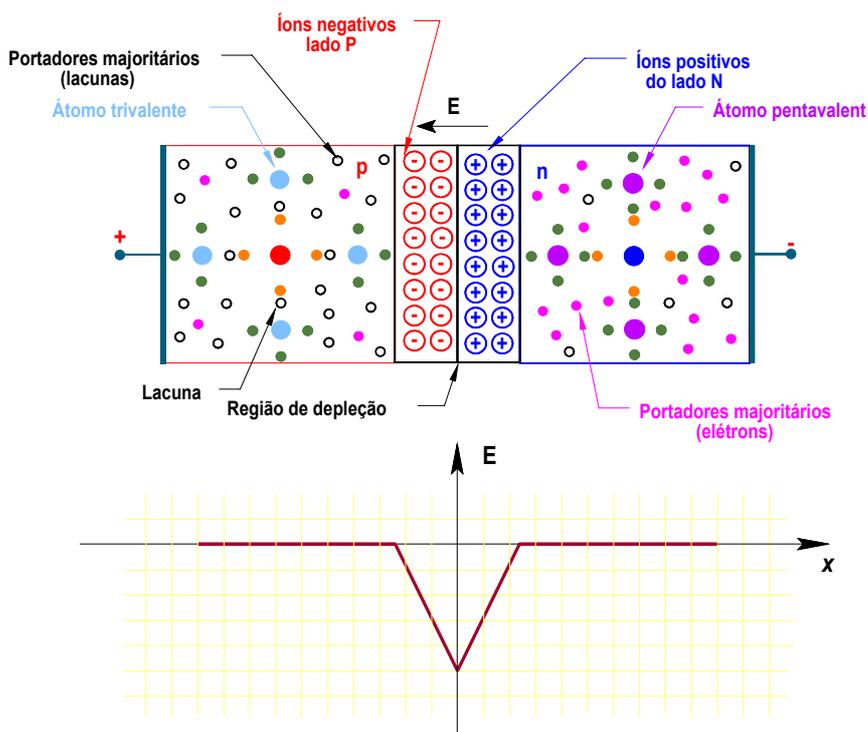


Figura 3.1 – Situação do campo elétrico da junção PN onde há a formação de íons.

Efetuada-se a união entre os dois semicondutores P e N, forma-se uma junção PN. Neste processo os elétrons livres do lado N encontram as lacunas do lado P, o mesmo ocorrendo com as lacunas no lado N. Os elétrons ao se recombinarem com as lacunas no lado P, formam íons negativos próximo à junção. Igualmente quando as lacunas recombinam-se com os elétrons do lado N, formam íons positivos. Nesta região da junção PN se estabelece um campo elétrico permanente determinado pelos íons aí estabelecidos. Este campo elétrico impede que novos elétrons e lacunas atravessem a junção, impedindo novas recombinações. Diz-se então que o processo alcançou o equilíbrio. O gráfico mostrado na figura 3.1 ilustra a situação descrita.

Se uma junção PN, semelhante à ilustrada, for submetida à luz de tal forma que fótons dotados de uma quantidade de energia superior à do intervalo da junção, ocorrerá geração de pares elétrons-lacunas; se isto ocorrer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão

aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial que é denominado *Efeito Fotovoltaico* [15]. Fechando-se o circuito dos dois semicondutores, conforme ilustrado na figura 3.2, haverá circulação de elétrons. Este fenômeno é a base do funcionamento das células fotovoltaicas.

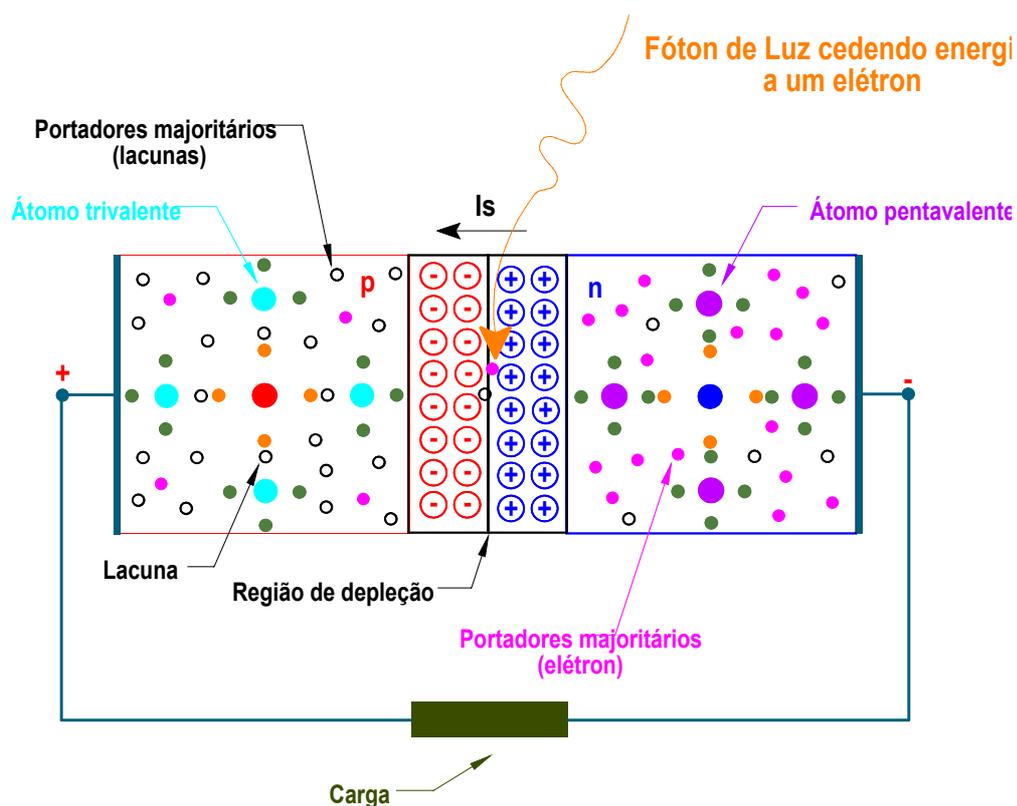
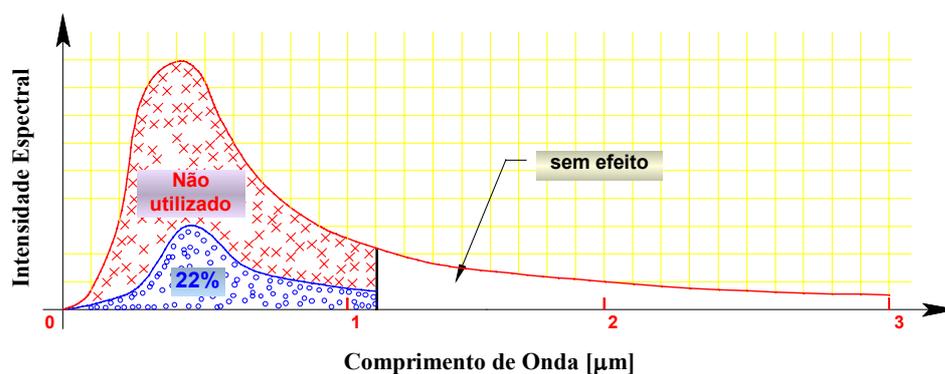


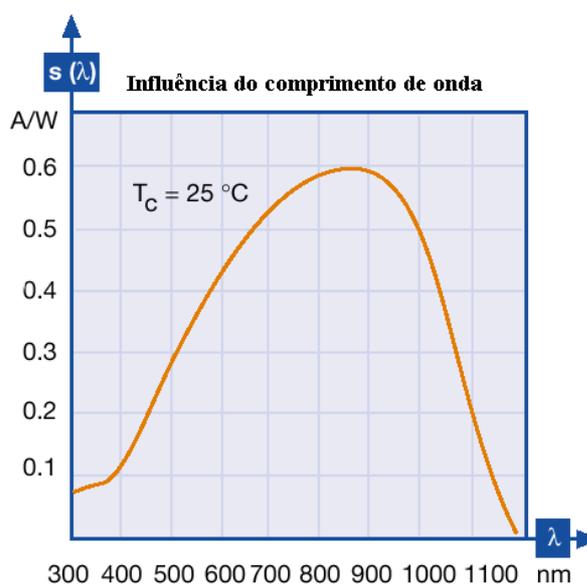
Figura 3.2 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

É importante ressaltar que existem alguns fatores que limitam este processo de conversão de energia. O primeiro deles refere-se ao espectro de radiação da luz solar, que se espalha por uma vasta faixa de comprimentos de ondas e apenas uma parcela é capaz de excitar os elétrons da célula fotovoltaica. Onda de comprimento até $1 \mu\text{m}$ é capaz de excitar os elétrons. A figura 3.3 ilustra o espectro capaz de transformar energia luminosa em eletricidade.

O outro fator limitante refere-se ao fato que cada fóton só consegue excitar apenas um elétron. Assim ao efetuar-se o balanço energético, para os fótons dotados de energia superior à energia do intervalo da junção, haverá um excesso de energia a qual será convertida em calor. Existe ainda possibilidade de que apesar de um determinado elétron ser excitado, o mesmo pode não participar do fluxo de corrente efetivo.



(A)



(B)

Figura 3.3 – Faixa de Energia luminosa a ser transformada em energia elétrica em uma Célula Fotovoltaica. (A) Curva teórica. (B) Curva típica para uma célula de silício multicristalino – Cortesia ASE GmbH [2].

As tecnologias atuais de fabricação de Células Fotovoltaicas têm por objetivo reduzir ao máximo estes efeitos; para células de silício o limite teórico de conversão de energia de radiação em eletricidade chega a atingir 27%.

Na figura 3.4 está mostrado o aspecto geral de uma junção PN utilizada na confecção de Células Fotovoltaicas, indicando seus principais componentes. Quanto à geometria, a regra é que devem ocupar o máximo de área possível; existem células no formato circular e quadrado, com as quadradas ocupando um melhor espaço nos módulos; em contrapartida, as redondas não sofrem perdas de material, uma vez que o crescimento do silício assume a forma cilíndrica [8].

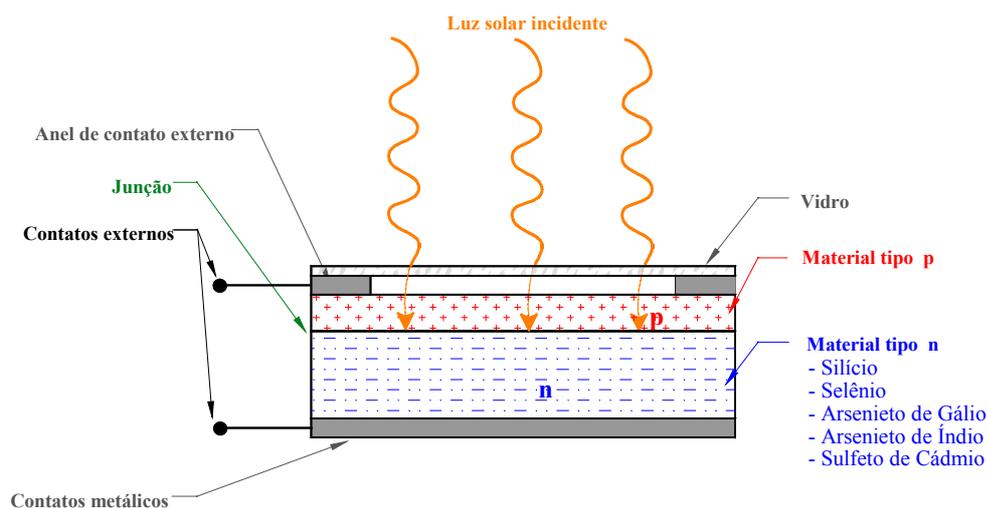


Figura 3.4 – Aspecto geral de uma Célula Fotovoltaica, com seus componentes básicos [9].

As conexões através de duas tiras em cada célula, denominadas como conexão redundante, tem por função aumentar a segurança em caso de interrupção da corrente em uma delas. Para o encapsulamento os materiais mais utilizados são o E.V.A e o Tedlar que fornecem proteção permanente. O lado frontal, exposto à radiação solar, é recoberto com vidro temperado, plástico ou resina de silicone efetuando a proteção e dando rigidez mecânica ao módulo.

Um gráfico ilustrando uma comparação entre as eficiências atingidas em laboratório e comercialmente para diferentes materiais utilizados nas tecnologias de fabricação de Células Fotovoltaicas [12] é apresentado na figura 3.5.

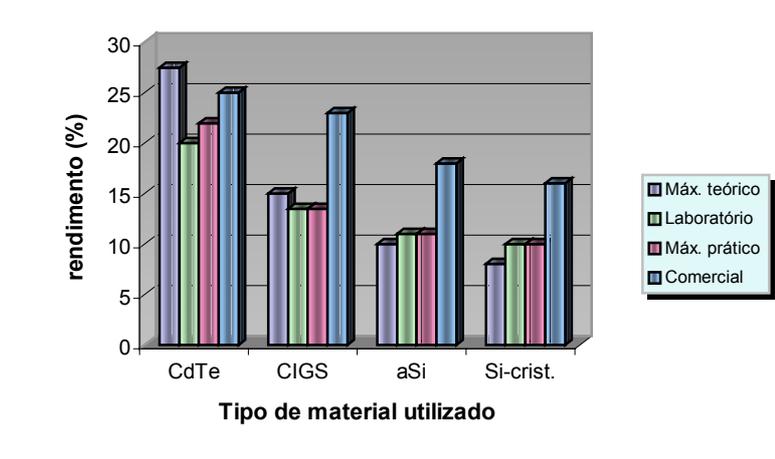


Figura 3.5 – Rendimento dos materiais utilizados na confecção de Células Fotovoltaicas, (Dernik et al,1993) [12].

Dentre os materiais mais utilizados tem-se o telureto de cádmio (CdTe), cobre (índio, gálio).(enxofre, selênio) – grupo de células CIGS, silício amorfo (aSi) e cristais de silício (Si-crist).

3.3 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS

Informativos técnicos especializados de módulos fotovoltaicos [9] apresentam os dados em termos do ponto de máxima potência, conforme ilustrado na tabela 3.1, onde se têm as características elétricas para um módulo ASE – 50 – ATF/17 que é fabricado pela Angewandte Solarenergie – ASE GmbH [2], considerando uma intensidade de radiação luminosa (λ_s) de 1000 W/m² a temperatura de 25°C.

Tabela 3.1 – Dados de informativos técnicos de um Módulo Fotovoltaico.

Cortesia ASE GmbH [2].

Potência (Max.)	P_{mpp}	50 [Wp]	45 [Wp]
Tensão no ponto de potência máxima	U_{mpp}	17,2 [V]	17[V]
Corrente no ponto de potência máxima	I_{mpp}	2,9 [A]	2,65 [A]
Tensão a circuito aberto	U_{oc}	20 [V]	20 [V]
Corrente em curto-circuito	I_{sc}	3,2 [A]	2,9[A]

Curvas típicas dos módulos fotovoltaicos estão ilustradas na figura 3.6. Essas curvas da corrente em função da tensão são parametrizadas para a intensidade de radiação luminosa (λ_s) e a temperatura de operação do módulo. Lembrando sempre que temperaturas elevadas afetam o desempenho destes dispositivos eletrônicos resultando em menores rendimentos para os módulos.

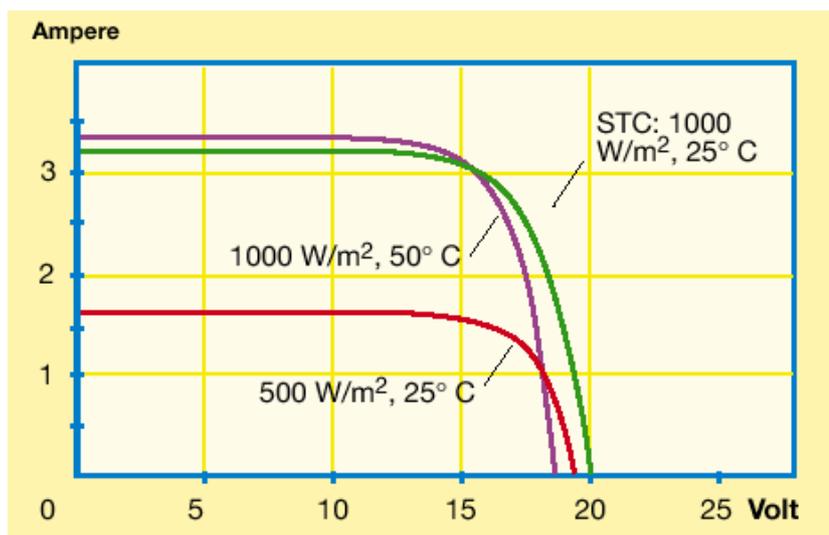


Figura 3.6 – Curvas características dos módulos fotovoltaicos apresentados em informativos técnicos – Cortesia ASE GmbH [2].

A curva ilustrada na figura 3.6 contém dados importantes a serem considerados durante o projeto de um sistema fotovoltaico, o que também justifica os valores contidos na tabela 3.1. Percebe-se claramente que nos pontos de curto circuito (I_{SC}) e no ponto de circuito aberto (U_{oc}) a potência extraída do módulo é nula uma vez que nestes pontos a tensão e a corrente respectivamente valem zero.

Existe somente um ponto onde a potência é máxima (P_{mpp}) e este ponto é o ponto de operação do módulo fotovoltaico. Para este ponto estão associadas a corrente máxima (I_{mpp}) e a tensão máxima (U_{mpp}). Este ponto será importante na busca do ponto de operação quando for implantado o controle inteligente.

Outro importante parâmetro a ser considerado para sistemas fotovoltaicos é o fator de forma (FF), definido em [12], que expressa o quanto a característica $I = f(U)$ se aproxima do formato de um retângulo. Na prática o significado deste fator determina a qualidade da célula dentro do módulo; em outras palavras quanto mais próxima de um retângulo a curva (corrente x tensão) se aproximar melhor será o desempenho da célula no módulo. Matematicamente o fator de forma pode ser calculado através da expressão (3.1).

$$\mathbf{FF} = \frac{\mathbf{I}_{mpp} \mathbf{U}_{mpp}}{\mathbf{I}_{SC} \mathbf{U}_{oc}} \quad (3.1)$$

3.4 - TOPOLOGIA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

As células fotovoltaicas dentro de um módulo (painel) podem ser associadas em série, paralelo ou em uma associação mista (série/paralelo) conforme as necessidades dos valores de tensão e corrente desejadas na saída

do módulo. Esta combinação obedece às mesmas condições de associação de fontes de tensão ou corrente.

3.4.1 - Células fotovoltaicas associadas em série

Seguindo as mesmas regras de associação em série de fontes de tensão, as células fotovoltaicas produzem na saída um valor que é igual à somatória dos valores individuais de cada unidade; matematicamente tem-se:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (3.2)$$

Para a corrente a relação é dada por:

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (3.3)$$

Utilizando-se a característica corrente x tensão apresentada nos informativos técnicos das unidades fotovoltaicas, o resultado para a associação de duas unidades em série é o ilustrado na figura 3.7.

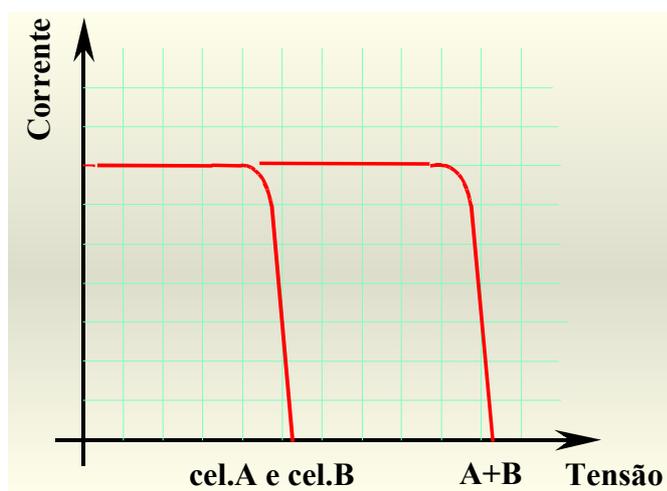


Figura 3.7 – Resultante das curvas $I = f(V)$ para associação em série de duas unidades fotovoltaicas.

Quando no projeto é definido que um mesmo valor de corrente fluirá em cada uma das unidades, isto é, se considera que todas as células que participam da associação no módulo são idênticas. Isto implica que devem possuir o mesmo desempenho sob as mesmas condições de radiação solar e temperatura.

3.4.2 - Células fotovoltaicas associadas em paralelo

Segue-se a mesma sistemática para associação de fontes de corrente em paralelo. Neste tipo de associação as correntes são adicionadas, resultando a mesma tensão nos terminais do conjunto. Matematicamente tem-se a expressão (3.4) que determina a corrente resultante na saída do módulo. E na figura 3.8 o resultado em forma gráfica.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (3.4)$$

Neste caso a tensão nos terminais da associação permanece a mesma.

Ou seja:

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (3.5)$$

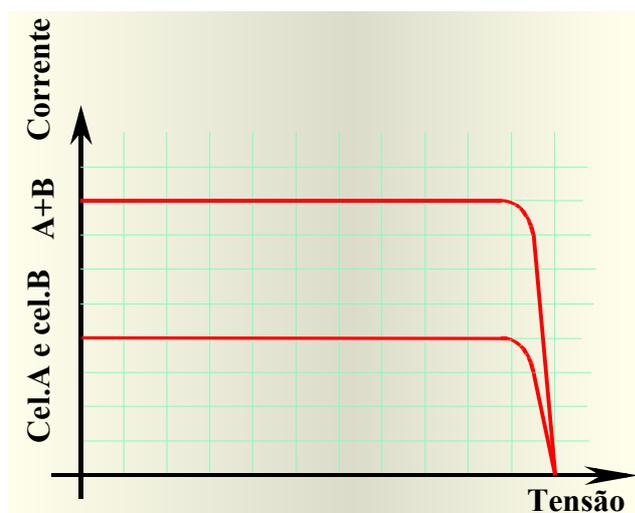


Figura 3.8 – Resultante das curvas $I = f(V)$ para associação em paralelo de duas unidades fotovoltaicas.

O resultado apresentado na figura 3.8 é obtido quando se dispõe da característica corrente x tensão obtida dos informativos técnicos de unidades fotovoltaicas. Onde o resultado da associação paralela para duas unidades é o ilustrado na figura 3.8. Deve-se considerar as mesmas condições de radiação solar e temperatura efetuada para a associação em série.

3.5 - 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. Para mostrar as variações e concluir-se a respeito de como e quanto estes fatores afetam o desempenho, curvas apresentadas em catálogo serão apresentadas e discutidas. Cabe ressaltar que o modelo das células fotovoltaicas será obtido a partir dos dados de catálogos e os resultados discutidos posteriormente no item referente à modelagem do Sistema Fotovoltaico.

3.5.1 - Influência da Radiação Luminosa (Solar)

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. O gráfico, ilustrado na figura 3.9, ilustra o comportamento de uma Célula Fotovoltaica quando é excitada por várias radiação solar, mantendo-se a temperatura constante em torno de 25°C e para uma umidade relativa $\leq 55\%$.

A análise do gráfico da figura 3.9 mostra que a corrente da célula é o parâmetro mais afetado pela diminuição da radiação solar, o que vem a

comprovar os resultados das pesquisas apresentadas anteriormente: são os fótons que liberam os elétrons que contribuem para o efeito fotovoltaico.

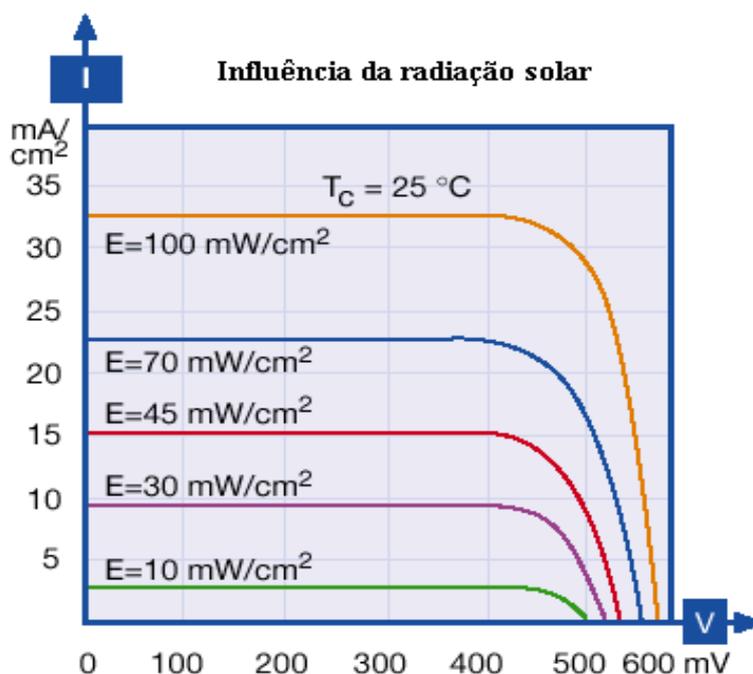


Figura 3.9 – Variação da característica $I=f(v)$ para alterações na intensidade de radiação solar – Cortesia ASE GmbH [2].

3.5.2 - Influência da Temperatura

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 10 ilustra a variação da curva $I = f(V)$ para variações de temperatura, porém considerando-se o mesmo valor de radiação solar, neste caso $1[\text{KW}/\text{m}^2]$ e para umidade relativa do ar $\leq 55\%$. Os catálogos informam ainda a faixa de variação de temperatura de operação das unidades fotovoltaicas, que estão na faixa de -50°C a $+80^{\circ}\text{C}$.

Da análise da figura 3.10, percebe-se que a temperatura exerce maior influência sobre a tensão do que a corrente que quase não é afetada, uma vez que as cargas (elétrons) estão diretamente ligadas aos fótons que incidem na junção do semiconductor.

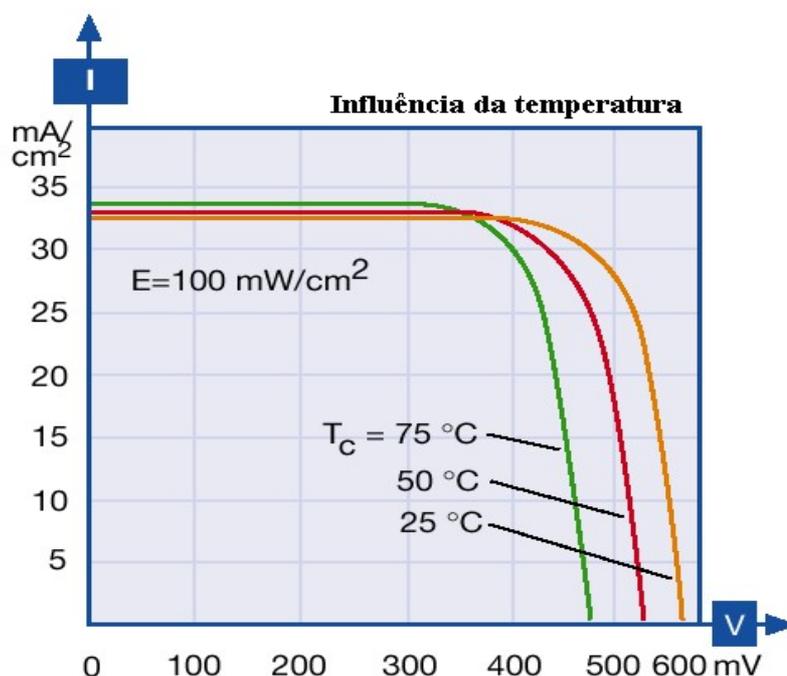


Figura 3.10 – Variação da característica $I = f(V)$ para alterações na temperatura e radiação solar constante – Cortesia ASE GmbH [2].

3.6 – MODELAGEM DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

As curvas ilustradas nas figuras 3.9 e 3.10 mostram o comportamento das células fotovoltaicas com a variação da intensidade luminosa λ_S e com a temperatura. As curvas típicas que retratam o comportamento das células fotovoltaicas são do tipo volt-ampère. Células fotovoltaicas sendo uma junção de semicondutores dopados com impurezas tipo P e tipo N podem ser modeladas como um diodo a partir das equações obtidas da física dos semicondutores. De acordo com o modelo proposto em [14] tem-se as equações:

$$I = I_{LG} - I_o \left\{ e^{\left[\frac{q}{AKT} (V + R_S I_A) \right]} - 1 \right\} \quad (3.6)$$

Onde I_o é a corrente de saturação da célula fotovoltaica e pode ser calculada por (7) e I_{LG} é a corrente produzida pelas cargas geradas pela luz e calculada por (8).

$$I_o = I_{or} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 e^{\left[\frac{qE_{GO}}{BK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3.7)$$

$$I_{LG} = \left[I_{SCR} + K_t (T_C - 28) \right] \frac{\lambda_S}{100} \quad (3.8)$$

Onde os parâmetros das equações de (3.6) a (3.8) são identificados conforme segue:

- I - corrente na saída da célula fotovoltaica em Ampère;
- V - tensão disponível na saída da célula fotovoltaica em Volt;
- I_o - corrente de saturação em Ampère;
- T - temperatura da unidade fotovoltaica medida em Kelvin;
- T_c - temperatura da unidade fotovoltaica medida em Celsius;
- $\frac{K}{T} = 8,62 \times 10^{-5} \left[\frac{eV}{K} \right]$ - razão entre a constante de Boltzmann e a carga do elétron;

$K_t = 0,0017 \left[\frac{A}{^\circ C} \right]$	- coeficiente de temperatura para corrente de curto circuito I_{SCR} ;
λ_S	- radiação solar incidente em $\frac{mW}{cm^2}$;
$I_{SCR} = 3,32 [A]$	- corrente de curto circuito da célula a $28[^\circ C]$ e a $100[mW/cm^2]$;
I_{LG}	- corrente gerada na junção pelo efeito da luz em Ampère;
$E_{GO} = 1,11 [eV]$	- banda de energia para o Silício;
$B=A=1,92$	- fator de idealidade adimensional;
$T_r = 301,18 [K]$	- temperatura de referência em Kelvin;
I_{or}	- corrente de saturação a temperatura de referência $T_r = 19,9693 \times 10^{-6} [K]$ em Ampère;
R_S	- resistência elétrica da célula fotovoltaica em Ω ;

As equações (3.6), (3.7) e (3.8) definem o modelo das células fotovoltaicas. Para o estudo do comportamento do modelo a partir de dados retirados de catálogo, utiliza-se um pacote de programas adequado a simulações em computador, ou se desenvolve um programa específico utilizando-se uma rotina de programação adequada. Neste trabalho será utilizado o Simulink que é uma caixa de ferramentas do programa de simulações MATLAB [39]. O Simulink possui a vantagem de poder se escrever as equações na forma de diagrama de blocos, conforme ilustrado na figura 3.11.

O bloco denominado por I_{LG} , na figura 3.11, representa a equação (3.6) no formato em blocos, ou seja dentro do bloco existe uma série de rotinas computacionais que expressam a equação matemática desejada. Para o bloco indicado por I_o , tem-se a representação da equação (3.7). As operações referentes à equação (3.8) completam o diagrama de blocos mostrado na figura em análise.

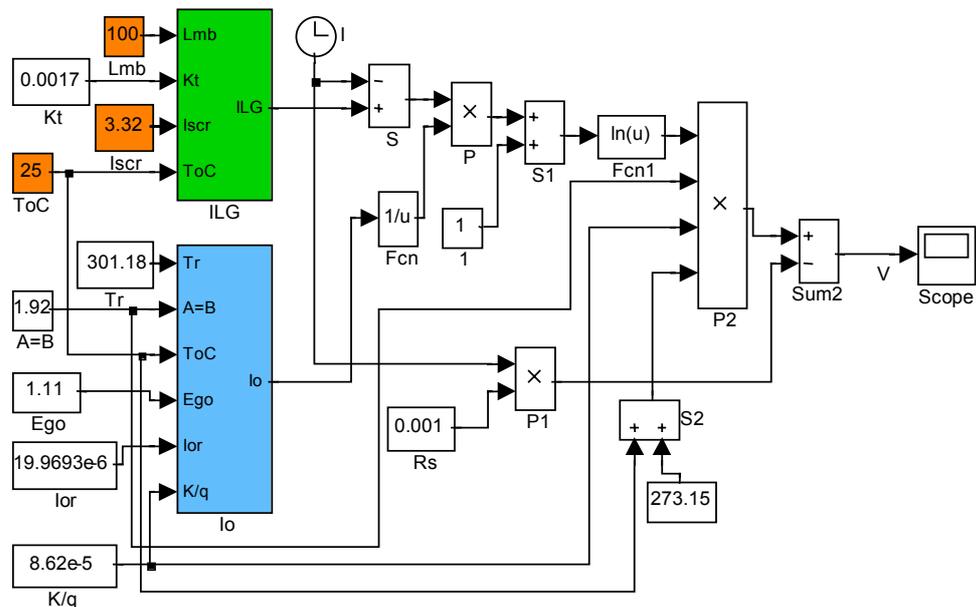


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do modelo da célula fotovoltaica desenvolvida no MATLAB.

A partir do modelo obtido efetua-se a validação dos resultados. O método consiste em obter uma quantidade de pontos suficientes das curvas ilustradas na figura 3.10. Estes serão inseridos em um gráfico juntamente com as curvas obtidas pelo modelo, considerando as mesmas condições de temperatura das curvas em análise. A figura 3.12 ilustra a situação proposta.

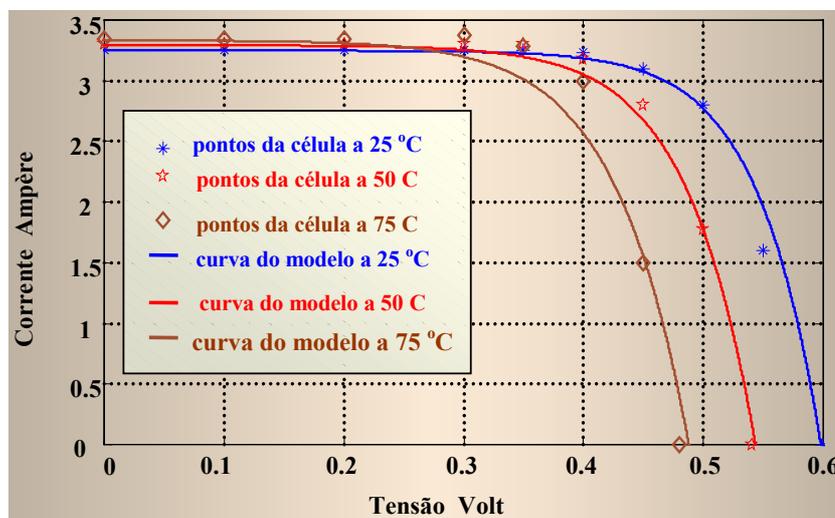


Figura 3.12 – Curvas para validação do modelo desenvolvido.

Analisando-se a figura 3.12, verifica-se que as curvas do modelo se aproximam bastante dos pontos obtidos das curvas de uma célula fotovoltaica real. Desta forma os erros serão mínimos e dentro dos valores permitidos estatisticamente.

Por outro lado o que realmente interessa neste estudo é como a temperatura afeta o rendimento de um sistema fotovoltaico. Para efetuar-se tal análise efetua-se a simulação da curvas de potência desenvolvida por uma célula fotovoltaica. O comportamento da potência está ilustrado na figura 3.13 onde as curvas de potência estão plotadas para cada uma das temperaturas consideradas na análise das curvas $I = f(V)$ ilustradas na figura 3.10, e foram obtidas através de simulações utilizando o modelo desenvolvido. Os resultados obtidos consideraram o mesmo nível de radiação solar, ou seja, 1000 W/m^2 .

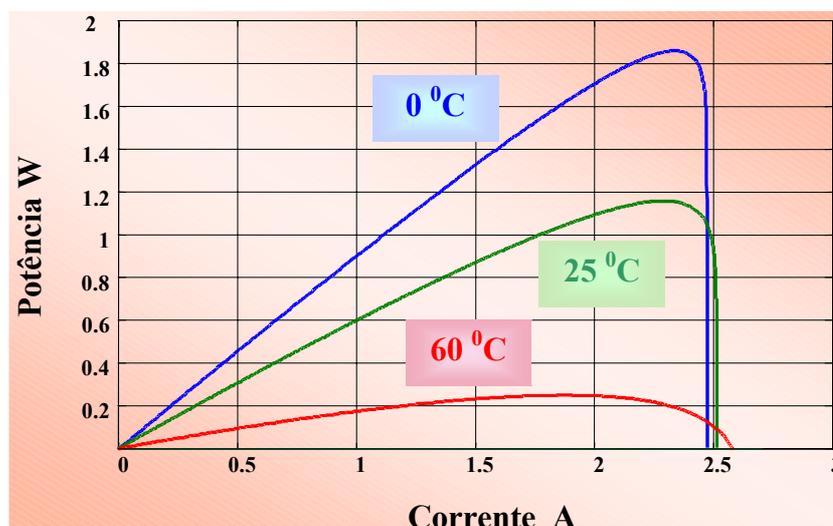


Figura 3.13 – Simulação das alterações na potência em Células Fotovoltaicas, quando há variações na temperatura dos módulos.

A análise efetuada nos resultados de simulações ilustrado no gráfico da figura 3.13 mostra que a temperatura afeta de forma excessiva a potência gerada por uma célula fotovoltaica, o que resulta em grandes variações no seu rendimento [3]. Portanto, o fator temperatura deve ser considerado nos modelos utilizados em pesquisas que pretendam representar o desempenho dos

painéis fotovoltaicos. Aliando-se a este aspecto, em sistemas que utilizam malha fechada para o controle, o efeito da temperatura deve, também, ser considerado para que os dispositivos de controle efetuem as devidas correções.

Capítulo 4: Sistema de Geração Eólica

4.1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE A AERODINÂMICA DA TURBINA EÓLICA

Os princípios básicos da operação de uma turbina eólica de eixo horizontal podem ser entendidos partindo-se da análise da figura 4.1.

A massa de ar atravessa ambas as superfícies das lâminas que compõem o rotor da turbina. Devido a geometria da lâmina, a porção de massa de ar que escoar pela superfície frontal atinge velocidades maiores que as da superfície posterior, resultando em uma região de alta pressão na sua superfície frontal. Essa diferença de pressão resulta em um sistema de duas forças aerodinâmicas ortogonais: uma denominada por força de *sustentação* e outra denominada por força de *arraste*.

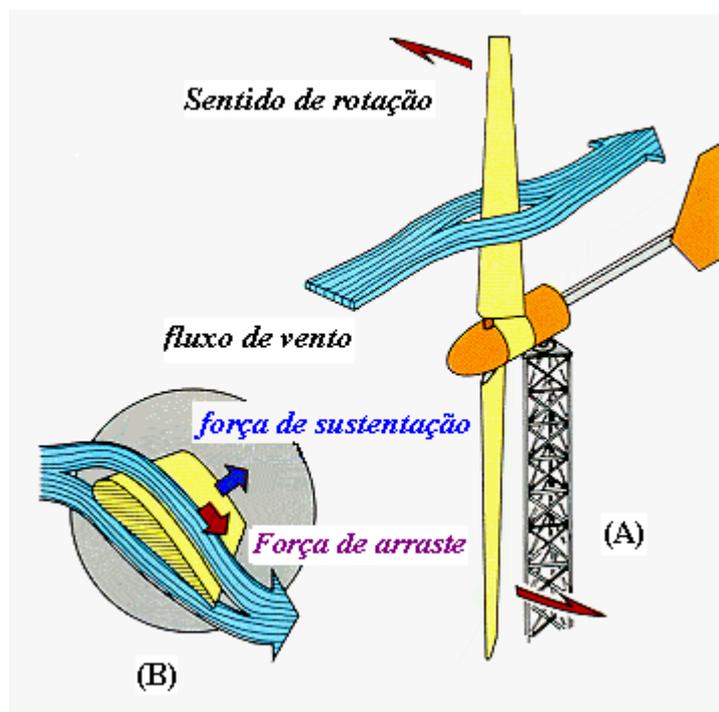


Figura 4.1 – Ação das forças aerodinâmicas da turbina eólica de eixo horizontal.

Este conjunto de forças age nas lâminas de forma que a primeira, a força de sustentação, desenvolve o torque na lâmina, pois possui direção perpendicular ao vento. Uma vez que as lâminas movem-se em um plano onde o centro está fixo a um eixo, tem-se um movimento giratório como resultado. A força de arraste, que está à 90° da primeira, tende a impedir o movimento (força de atrito). Na figura 4.1(B), tem-se o detalhe da ação das duas forças na superfície da lâmina. Pode-se também estabelecer uma analogia entre a lâmina de uma hélice e as asas de uma aeronave uma vez que as geometrias são semelhantes. Nas asas das aeronaves, a ação da força de sustentação é de promover a sustentação e elevação nas asas.

Estudos aerodinâmicos [16] comprovam que as melhores geometrias (perfis) de lâminas utilizadas em rotores de turbinas eólicas são as que produzem a melhor razão entre as forças sustentação/arraste. Esta razão pode ser variada ao longo da superfície da lâmina, no sentido radial, de tal forma a otimizar a energia produzida pelas turbinas, considerando as variações na velocidade do vento.

4.2 - TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS E PARTES COMPONENTES

As turbinas eólicas podem ser classificadas a partir de vários fatores, tais como potência, números de lâminas no rotor das turbinas, rotação etc. Basicamente essas turbinas podem ser classificadas em turbinas horizontais e turbinas verticais. A primeira tem o eixo do rotor orientado segundo a direção do vento. Dessa forma elas só funcionam quando o vento flui nessa direção. Como exemplos de turbinas horizontais tem-se: Rotor hélice ilustrada na figura 4.1, rotor multipá, rotor holandês etc. As de eixo vertical independem da direção que o vento flui, ou seja, podem funcionar com o vento fluindo em qualquer direção. A figura 4.2 mostra o aspecto desses dois tipos de turbina eólica.

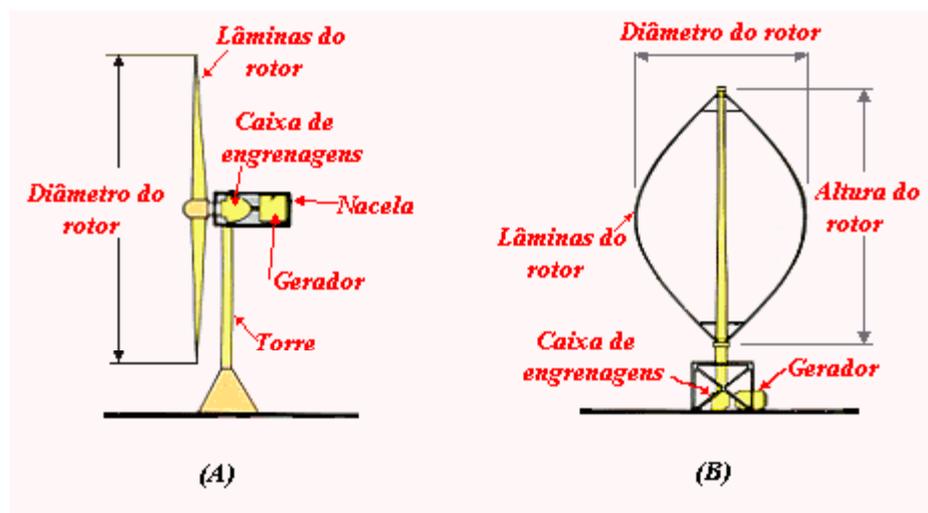


Figura 4.2 – Classificação das turbinas eólicas: (A) Eixo horizontal; (B) Eixo vertical (Savonius). – Cortesia AWEA pagina internet.

As turbinas ilustradas na figura 4.2 são tipicamente utilizadas em sistemas de geração de energia elétrica. Em cada conjunto de máquinas tem-se como componentes: A hélice ou rotor onde é desenvolvida a conversão de energia contida na massa de ar para energia cinética no eixo da turbina. O sistema de acionamento é composto por uma caixa de engrenagens que tem por finalidade aumentar a rotação do eixo da turbina. A relação deve ser adequada à rotação do gerador elétrico. Também faz parte do sistema de acionamento o gerador elétrico (GA), responsável pela conversão da energia cinética disponível no eixo para energia elétrica. Como outros acessórios, tem-se a torre que sustenta o conjunto de acionamento, cabos etc.[16].

Com referência às vantagens entre os dois tipos de turbinas, a vertical, além de ser omnidirecional, permite a instalação da caixa de engrenagens e do gerador na sua base, facilitando as operações e as manutenções periódicas. Acrescenta-se também a vantagem de dispensar as pesadas estruturas como as observadas nas turbinas de eixo horizontal.

Por outro lado, apesar de todas as vantagens apresentadas, as turbinas de eixo vertical, tipos Darrieus e Savonius, possuem a grande desvantagem de ficarem submetidas a tensões mecânicas alternadas nas pás, resultando em

torques pulsantes e instabilidades dinâmicas no sistema de controle [17]. Outra desvantagem é que a turbina necessita de sistemas auxiliares de partida para levar a turbina até a velocidade adequada para iniciar o processo de geração de energia elétrica.

Apesar das vantagens apresentadas pelas turbinas de eixo vertical, as desvantagens apresentadas têm desencorajado a utilização dessas turbinas em grande escala para geração de energia elétrica [17].

4.3 - DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO VENTO INCIDENTE NAS PÁS DAS TURBINAS

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

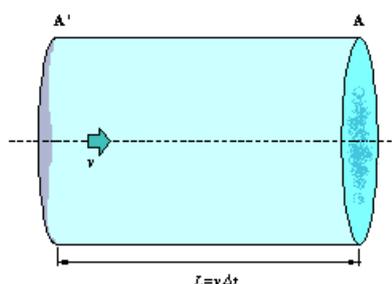


Figura 4.3 – Cilindro de vento fictício

No cilindro as duas bases A' e A possuem áreas iguais e denominada por A . A primeira A' está em movimento, deslocando-se com o vento que flui pela superfície considerada com mesmo módulo de velocidade v . O tempo necessário para o deslocamento da seção A' , ao longo do comprimento L é definido como Δt . Portanto, a massa de fluido m de massa específica ρ , contida no volume do cilindro fictício é calculada por (4.1).

$$m = \rho A v \Delta t \quad (4.1)$$

A energia cinética, W , desenvolvida pela massa de ar durante o percurso é calculada pela expressão (4.2).

$$W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.2)$$

Substituindo-se a expressão (4.1) em (4.2) e manipulando-se os membros da equação, obtem-se a potência, P_w , contida na massa de ar:

$$\frac{W}{\Delta t} = P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.3)$$

Apesar da massa de ar conter uma grande quantidade de energia esta não é totalmente transferida ao eixo da turbina. O montante de energia transferida às pás da turbina foi estabelecido por Betz [16], que definiu o coeficiente de potência, C_p , calculado por (4.4). Este coeficiente é obtido pela relação entre a potência captada pelas pás da turbina, P_{Cap} , e a potência disponível na massa de ar e expressa o rendimento aerodinâmico da máquina.

$$C_p = \frac{P_{Cap}}{P_w} \quad (4)$$

Betz, recorrendo à teoria da quantidade de movimento, determinou os limites deste coeficiente que pode ser determinado analiticamente, a partir da análise da figura 4.4, e ainda admitindo-se que:

- O ar pode ser considerado um fluido ideal, sem viscosidade, em todo o volume considerado, com exceção nas proximidades ao plano do rotor;

- O movimento em todo volume de fluido é subsônico, com números de Mach muito baixos, portanto pode ser considerado um fluido incompressível;
- O movimento do fluido é considerado em regime permanente;
- Não considera a turbulência provocada pela rotação do rotor;
- Considera o rotor um disco poroso, com hélices extremamente finas;

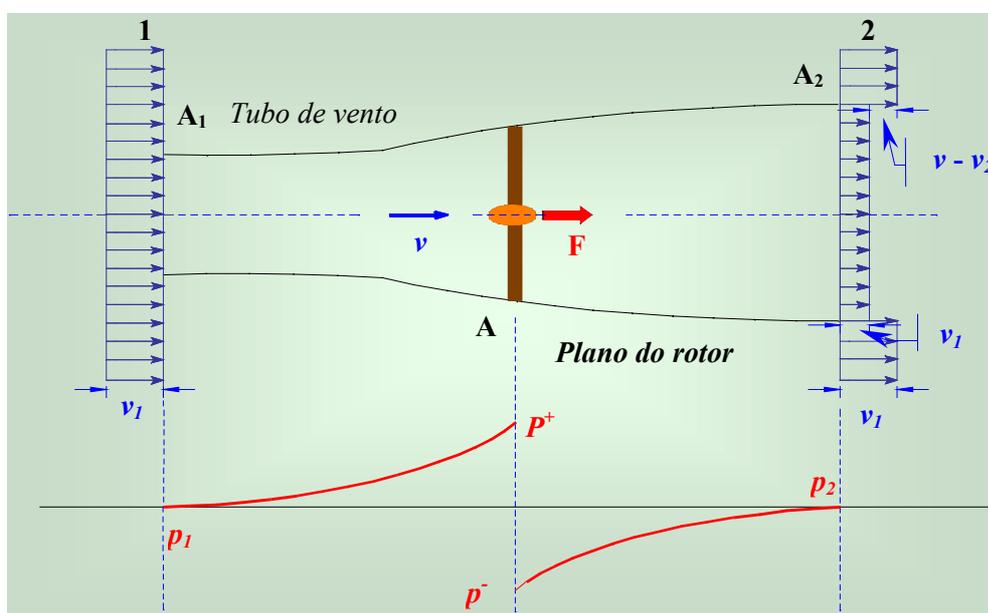


Figura 4.4 – Perfil de velocidade da massa de vento incidindo sobre as lâminas (rotor) da turbina eólica.

As grandezas definidas na figura são:

- $v_1 \Rightarrow$ velocidade do vento a montante do rotor;
- $v_2 \Rightarrow$ velocidade do vento a jusante do rotor;
- $v \Rightarrow$ velocidade incidente no plano do rotor da turbina;
- $F \Rightarrow$ força devido a corrente de ar sobre o plano do rotor;
- $p_1 \Rightarrow$ pressão a montante do rotor ($p_1 = p_2 = p_{atm}$);
- $p^+, p^- \Rightarrow$ pressão no plano do rotor na tomada de ar e na saída de ar respectivamente.

Aplicando-se o teorema da conservação da quantidade de movimento ao modelo, e sabendo-se que a massa específica do ar é ρ , tem-se (4.5).

$$SF = \rho Q \Delta v \Rightarrow F = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (4.5)$$

A força exercida pela massa de ar nas lâminas do rotor da turbina pode ser calculada por (4.6).

$$F = A(p^+ - p^-) \quad (4.6)$$

O sistema proposto na figura 4.4 é conservativo. Aplicando-se a equação da continuidade entre os pontos 1 referente à seção A_1 e 2 referente à seção A_2 , obtêm-se as equações (4.7) e (4.8).

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p^+ + \frac{\rho}{2} v^2 \quad (4.7)$$

$$p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p^- + \frac{\rho}{2} v^2 \quad (4.8)$$

Sabendo-se que $p_1 = p_2 = p$ e comparando-se as equações (4.6), (4.7) e (4.8), obtêm-se o valor da força exercida sobre o rotor da turbina.

$$F = A(p^+ - p^-) = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) \quad (4.9)$$

Admitindo-se que o valor da velocidade incidente no plano do rotor seja uma média entre a velocidade na entrada da seção A_1 e na saída da seção A_2 , tem-se:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2}{2} \quad (4.10)$$

Na condição proposta, a velocidade da massa de ar incidente na turbina, \mathbf{v} , em relação à velocidade, \mathbf{v}_1 , em um ponto infinito a montante da turbina, é menor. Pode-se dizer que a velocidade ficou reduzida de um fator, a , que será denominado de coeficiente de velocidade induzida. Matematicamente tem-se:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 - a\mathbf{v}_1 \Leftrightarrow \mathbf{v} = \mathbf{v}_1(1 - a) \quad (4.11)$$

Para a velocidade, \mathbf{v}_2 a jusante da turbina, a velocidade será:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_1(1 - 2a) \quad (4.12)$$

Definida a velocidade no rotor da turbina, pode-se calcular o valor da potência captada pelo rotor da turbina (\mathbf{P}_{cap}), conforme equação (4.13).

$$\mathbf{P}_{cap} = \mathbf{F}\mathbf{v} \Leftrightarrow \mathbf{P}_{cap} = \rho A \mathbf{v}(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) \mathbf{v} \quad (4.13)$$

Substituindo-se as equações (4.11) e (4.12) em (4.13) e reagrupando os termos, obtem-se a expressão (4.14).

$$\mathbf{P}_{cap} = 2\rho A \mathbf{v}_1^3 a(1 - a)^2$$

$$\mathbf{P}_{cap} = \underbrace{\left(\rho A \frac{\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2}{2} \right)}_I \underbrace{\left(\frac{\mathbf{v}_1^2}{2} - \frac{\mathbf{v}_2^2}{2} \right)}_{II} \quad (4.14)$$

Verifica-se através da expressão matemática que a potência captada pela turbina possui dois termos distintos, definidos em (4.14) por I e II. O primeiro refere-se ao fluxo da massa de ar incidente na turbina; e o segundo termo retrata a variação da energia cinética da massa de ar incidente. Portanto, fica comprovado que a potência desenvolvida por uma turbina eólica é igual ao produto do fluxo da massa de ar que atravessa o rotor da turbina, pela variação da energia cinética da corrente de ar.

É fato que a condição ideal para que toda a energia existente na massa de ar seja transferida à turbina é que a velocidade, v_2 , seja igual a zero. Mas esta condição é fictícia, assim deve-se determinar o valor ideal da velocidade v_2 para que se obtenha a potência máxima de transferência. Esta questão reside em determinar-se o valor da constante da equação de Betz definida em (4.11).

Como discutido nas seções anteriores, verificou-se que a potência captada pela turbina depende do coeficiente de potência denominado por C_p e que este coeficiente é obtido a partir da razão entre a potência captada, P_{cap} , e a potência da massa de ar, P_w . Como são conhecidas as equações que definem ambas as potências, pode-se então calcular o valor ideal do coeficiente de potência, obtendo-se a equação indicada em (4.16) e a solução conduz ao valor de C_p procurado.

$$C_p = \frac{P_{cap}}{P_w} = \frac{2\rho A v_1^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3}$$

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (4.15)$$

O valor máximo do coeficiente de potência é obtido derivando-se a equação (4.15) e igualando-se a zero, resultando na expressão:

$$\frac{dC_p}{da} = 3a^2 - 4a + 1 = 0 \quad (4.16)$$

O máximo valor para o qual ocorre a maior transferência de potência é:

$$a = \frac{1}{3}.$$

Assim, o valor de C_p para a máxima potência que pode ser retirada da massa de ar é: $C_p = 0,5926$.

4.4 - CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS DE VENTO

4.4.1 - Rendimento aerodinâmico

Em (4.14) e (4.15) determinou-se a equação da potência transferida a uma turbina de vento. Esta é a potência disponível no rotor da turbina, uma vez que o rendimento aerodinâmico já foi considerado nas equações pelo fator de Betz (coeficiente de potência) definido por C_p . Este fator é afetado principalmente pelo tipo de geometria das pás da turbina, que é projetado em função do perfil de velocidade do vento na região, e também pelo número de pás instaladas na turbina, considerando o aspecto prático que se aumentado o número de pás reduz-se a rotação da turbina. Assim C_p é um coeficiente que varia em função da rotação da turbina e da velocidade do vento. Uma grandeza adimensional que define esta relação é a razão entre a velocidade periférica das pás pela velocidade do vento incidente na turbina, conhecida como razão de velocidade periférica e representada em algumas literaturas por (λ_E) e em outras, pela sigla em inglês **TSR** (“tip-speed-ratio”). Matematicamente esta razão é representada por (4.17).

$$\lambda_E = \frac{\omega R}{V_W} \quad (4.17)$$

Onde

- $\lambda_E \Rightarrow$ é a razão de velocidade periférica (“tip-speed-ratio”);
- $\omega \Rightarrow$ é a rotação da turbina em rd/s;
- $v_w \Rightarrow$ é a velocidade do vento em m/s.
- $R \Rightarrow$ é o raio da turbina em m.

Portanto, C_p está relacionado com λ_E por uma relação obtida através de medições efetuadas em ensaios em túneis de vento. Através de ajustes dos pontos da curva, pode-se representar $C_p = f(\lambda_E)$ como funções polinomiais. Uma curva típica para turbinas horizontais está ilustrada na figura 4.5 onde o ajuste pelo método das interpolações dos pontos obteve-se a curva ajustada.

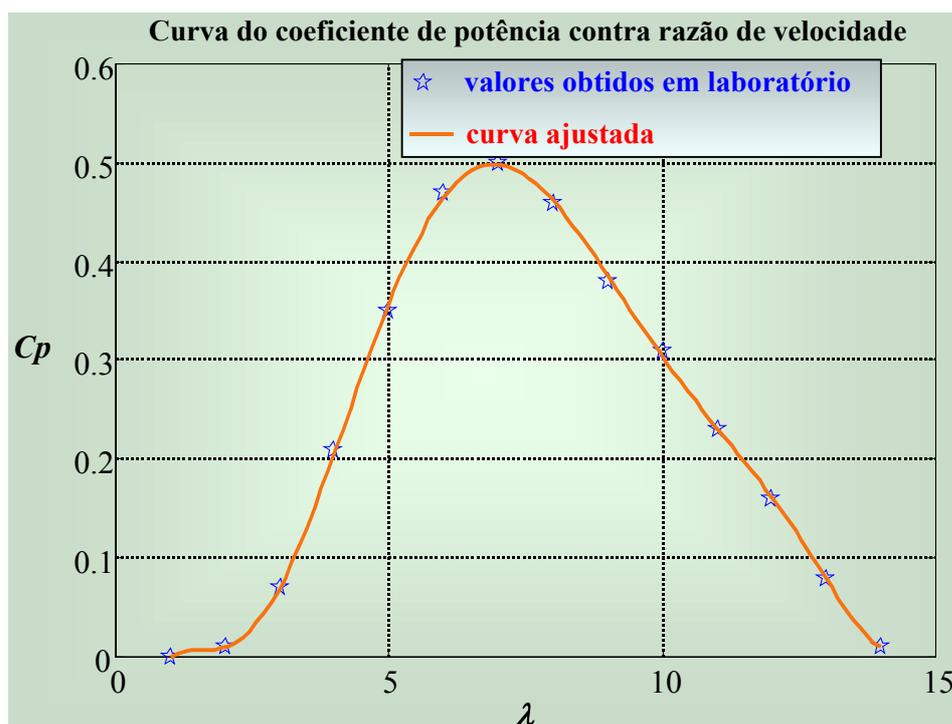


Figura 4.5 – Coeficiente de potência, C_p , em função da razão de velocidade periférica, λ_E .

A curva em questão retrata a variação do rendimento aerodinâmico nas turbinas de vento. Portanto nos projetos de sistemas de geração de energia

eólica, é importante que as mesmas operem próximo ao ponto máximo da curva de rendimento aerodinâmico.

4.4.2 - Rotação, torque e potência nas turbinas de vento

Turbinas de vento operam com velocidades periféricas variando entre 60 m/s a 100 m/s, sendo estas velocidades pouco afetadas pelo diâmetro da turbina. Estas velocidades periféricas correspondem a baixas rotações entre 15 rpm a 200 rpm. Na geração de energia elétrica, sistemas de multiplicação de velocidades devem ser utilizados, uma vez que os geradores elétricos utilizam rotações da ordem de 1500 rpm em 50 Hz e 1800 rpm em 60 Hz. A transmissão mais utilizada nestes casos é a transmissão por engrenagens devido à simplicidade e rendimentos elevados apresentados. A relação é especificada por $1:n_g$, onde n_g representa o fator de amplificação de rotação.

O torque aerodinâmico das turbinas eólicas pode ser obtido do desenvolvimento matemático da expressão (4.5), resultando na equação (4.18), definindo-se que o torque obtido é o disponível no eixo da turbina para sua respectiva rotação.

$$T_{ae} = C_p(\lambda_E) \frac{1}{2} [\rho \pi r^2 v_w^2] r \quad (4.18)$$

Onde,

- $T_{ae} \Rightarrow$ torque aerodinâmico da turbina em N.m.

O torque transmitido ao gerador será aquele disponível na saída da caixa de engrenagens multiplicadora de rotação. Para aumentos na rotação tem-se diminuição no valor do torque. A relação de rotação é definida pelo fator de amplificação, n_g , assim o torque ficará diminuído proporcionalmente a este valor. A equação (4.19) determina o valor do torque transferido ao gerador elétrico.

$$T_t = C_p(\lambda_E) \frac{1}{2} \left[\frac{\rho \pi r^3}{n_g} \right] v_w^2 \quad (4.19)$$

Onde,

- $T_t \Rightarrow$ é o torque efetivo da turbina transmitido ao gerador em N.m.

Fabricantes de turbinas disponibilizam em seus informativos técnicos as curvas de torque de seus produtos [20], [21]. Através de ensaios em túneis de vento, os valores de torque e rotação são obtidos para cada projeto de turbina, considerando diversas faixas de velocidades de vento em que as turbinas estarão submetidas quando estiverem em operação. A figura 4.6 ilustra os valores obtidos para uma turbina de potência nominal de 12,5 kW e rotação nominal de 205 rpm acoplada a uma caixa de engrenagens. A velocidade nominal do vento em que a turbina fornecerá potência nominal é de 12 m/s.

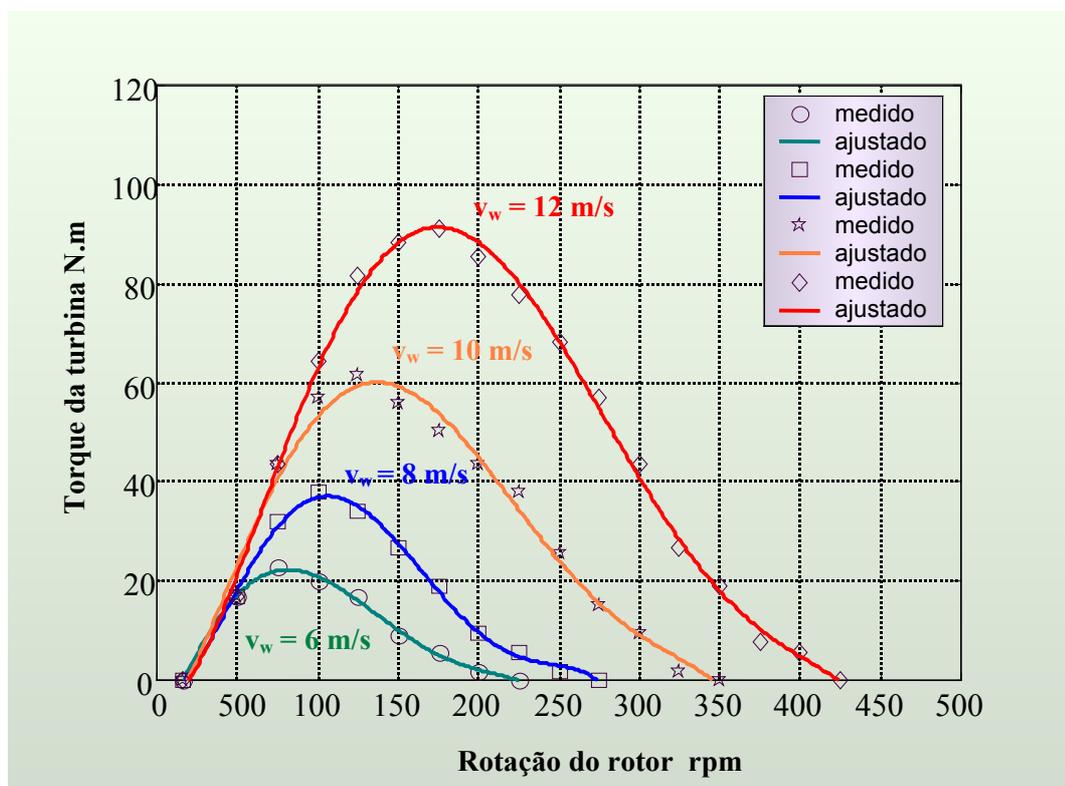


Figura 4.6 – Curvas de torque contra rotação de turbinas de vento.

A potência das turbinas de vento pode ser obtida da equação (4.19). Assim a potência que será transmitida ao eixo do gerador será:

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \left[\frac{\rho r \pi r^3}{n_g} \right] v_w^3 \quad (4.20)$$

Onde:

- $P_t \Rightarrow$ é a potência da turbina transmitida ao gerador.

E a potência elétrica disponível na saída do gerador considerando os rendimentos do gerador de indução como sendo η_{GI} e o rendimento do acoplamento entre a turbina e o gerador, que é através da caixa de engrenagens amplificadora de rotação, como η_g , a potência útil será calculada pela expressão (4.20A).

$$P_{el} = \eta_{GI} \eta_g C_p \frac{1}{2} \left[\frac{\rho r \pi r^3}{n_g} \right] v_w^3 \quad (4.20A)$$

Onde,

- $P_{el} \Rightarrow$ é a potência elétrica do gerador.

Curvas de potências em turbinas de vento podem ser obtidas a partir das curvas de torque por rotação apresentada na figura 4.6. Porém uma característica importante que deve ser observada é que o ponto de máximo torque nas turbinas de vento não coincide com o ponto de máxima potência.

Sob o ponto de vista da engenharia de controle, essas turbinas apresentam dois pontos a serem considerados: O primeiro diz respeito às largas faixas de variação da rotação que são definidas pelas velocidades do vento, resultando em frequências variáveis, dificultando o ajuste dos

controladores. O outro é uma busca do ponto de máxima potência que não coincide com o ponto de máximo torque [22]. Esta situação pode ser observada nas curvas apresentadas na figura 4.7, onde estão plotadas as curvas de torque com as curvas de potência constante da turbina.

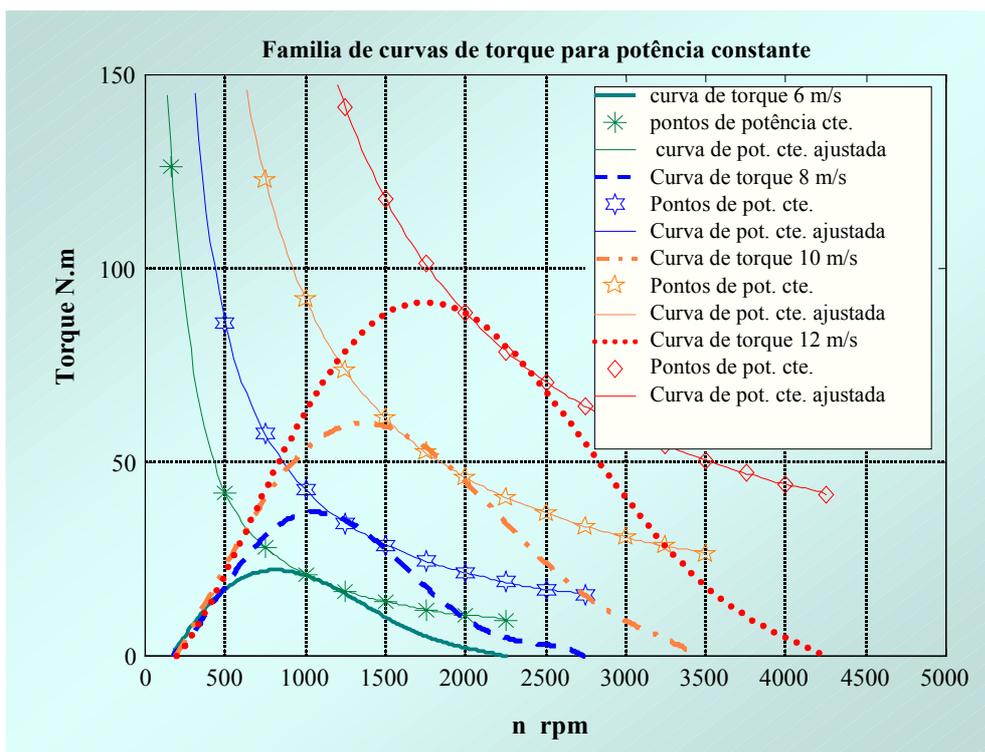


Figura 4.7 – Curvas de torque contra rotação e de potência constante para cada velocidade de vento.

Analisando-se as curvas da figura 4.7, o ponto de máxima potência fica definido pelo ponto em que as curvas de potência constante interceptam as curvas de torque. Fica evidente que o ponto de potência máxima fica deslocado em relação ao ponto máximo da curva de torque [2]. Sob o ponto de vista operacional das turbinas de vento, caso o ponto de operação fique localizado à direita do ponto de máxima potência, a turbina estará cedendo maior potência que a permitida, o que resultará em perda de rotação (stall), pois a equação do balanço dos torques dinâmicos, (4.21), resultará em um torque desacelerante, ou seja, a parcela à direita da equação será negativa.

$$T_t - T_g = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.21)$$

Onde:

- $T_g \Rightarrow$ torque do gerador elétrico,
- $J \Rightarrow$ é o momento de inércia da turbina e gerador,
- $\omega \Rightarrow$ é a velocidade angular do conjunto turbina-gerador.

Por outro lado, se o ponto de operação ficar à esquerda, abaixo do ponto de potência máxima, a turbina estará fornecendo uma potência em que boa parte não estará sendo transformada em energia elétrica. Nesta situação, haverá um torque acelerante levando a turbina a velocidades maiores, assim ficando a potência excedente disponibilizada como energia cinética no eixo da turbina.

A operação no ponto de potência máxima é o ideal, pois para esta situação os torques envolvidos se anulam, sendo toda a potência produzida pela turbina entregue ao gerador.

De uma forma geral pode-se definir o torque nas turbinas por (4.22), determinando um aspecto importante dos pontos de torque máximo, ou seja, esses pontos seguem uma lei quadrática que pode ser representada por um polinômio de segunda ordem.

$$T_t = k\omega_t^2 \quad (4.22)$$

A equação (4.20) mostra que os pontos de potência máxima seguem a lei do cubo da rotação, sendo esses pontos alinhados segundo um polinômio de terceira ordem. No capítulo seguinte, esse polinômio será determinado de tal modo a poder a ser utilizado no controlador fuzzy.

Capítulo 5: Modelagem do Sistema de Geração, de Controle e Supervisão

5.1 - MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

5.1.1 - Modelagem do conversor elevador (“boost”) acoplado ao painel fotovoltaico

Nos capítulos anteriores foram obtidas as equações (3.6), (3.7) e (3.8) que estabelecem o comportamento de uma célula fotovoltaica. Estes modelos matemáticos foram implementados em um diagrama de blocos da caixa de ferramentas do Simulink, conforme ilustrado na figura 3.11 naquele capítulo. O modelo desenvolvido refere-se a apenas uma célula fotovoltaica, do painel que possui várias células na configuração série e paralelo de tal forma a obter-se a tensão de trabalho e a potência desejada. Os painéis especificados foram os módulos ASE – 50 – ATF/17 da TESSAG ASE, dos quais serão utilizadas 5 unidades em série e 75 unidades em paralelo, resultando em uma potência nominal de 15 kW de pico, sob tensão de 120 V, quando a radiação luminosa (λ_s) for de 100 mW/cm².

Uma vez que no projeto a tensão nominal de saída será de 220 V, em tensão contínua. Para obter-se este nível de tensão a partir da tensão nominal do painel fotovoltaico que é de 120 V, será necessário a utilização de um conversor eletrônico tipo elevador (“boost”) na saída do painel fotovoltaico. A topologia básica do circuito eletrônico está ilustrada na figura 5.1. Controla-se o valor da tensão na saída do conversor efetuando-se a variação do ciclo de trabalho, δ , que é uma grandeza que varia entre zero e a unidade. Esta grandeza determina o tempo em que o semicondutor de potência do circuito (transistor) permanece ligado. Durante o processo de modelagem do conversor elevador esta grandeza será definida sob o aspecto matemático.

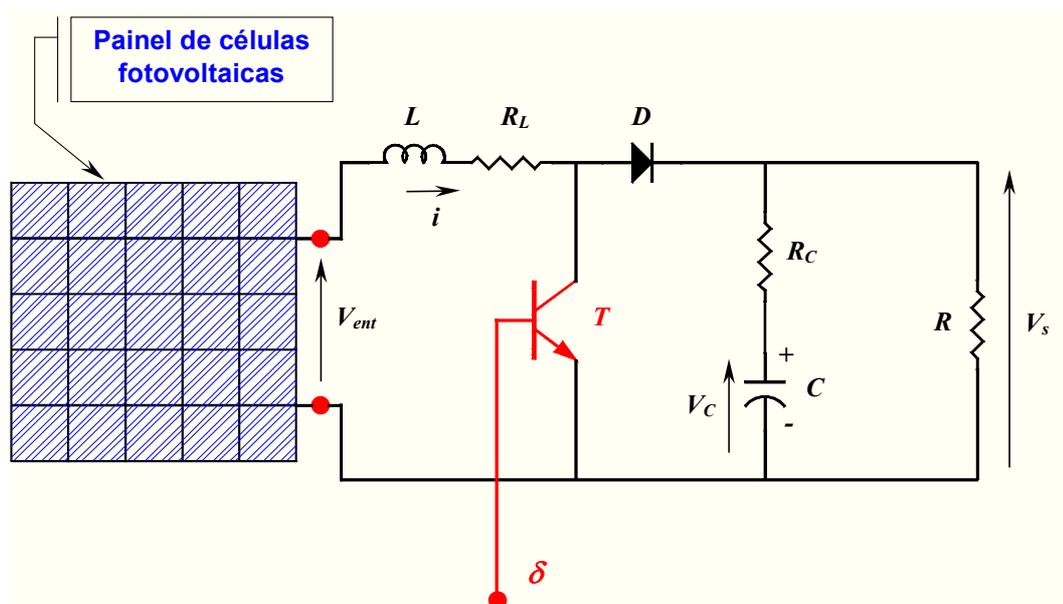


Figura 5.1 – Circuito do conversor elevador (“boost”).

A modelagem do conversor inicia-se pela solução do circuito mostrado na figura 5.1, onde as expressões serão obtidas em função do ciclo de trabalho δ . As equações (5.1) a (5.4) determinam o funcionamento do conversor.

$$\frac{di}{dt} = - \left[\frac{R_L + (1 - \delta)(R // R_C)}{L} \right] i - \left[\frac{(1 - \delta)R}{L(R + R_C)} \right] V_{ent} + \frac{V_S}{L} \quad (5.1)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \left[\frac{R}{(R + R_C)C} \right] i - \frac{V_C}{(R + R_C)C} \quad (5.2)$$

$$V_s = (R // R_C) i + \left[\frac{R}{R + R_C} \right] V_C \quad (5.3)$$

$$i_{ent} = i \quad (5.4)$$

Onde:

- L \Rightarrow é a indutância do conversor elevador mH;
- R_L \Rightarrow resistência efetiva do indutor L em Ohm;
- D \Rightarrow diodo de bloqueio;
- R_C \Rightarrow resistência efetiva do capacitor Ohm;
- C \Rightarrow capacitância do conversor μF ;
- R \Rightarrow resistência da carga em Ohm;
- V_{ent} \Rightarrow tensão fornecida pelo painel fotovoltaico em Volt;
- V_S \Rightarrow tensão na saída do conversor em Volt;
- V_C \Rightarrow tensão no capacitor em Volt;
- i \Rightarrow corrente total do circuito em Ampère;
- i_S \Rightarrow corrente fornecida pelo painel fotovoltaico em Ampère;
- T \Rightarrow transistor de potência do conversor.

A grandeza delta (δ) é definida como o ciclo de trabalho do conversor, sendo:

$$\delta = \frac{t_{lig}}{T} \quad (5.5)$$

Onde:

- t_{lig} \Rightarrow é o tempo em que o transistor T do conversor permanece em estado ligado;
- T \Rightarrow é o período de trabalho do conversor.

As equações (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4) serão solucionadas através do programa MATLAB e seguindo o mesmo procedimento adotado para o equacionamento da célula fotovoltaica. O resultado final está ilustrado na figura 5.2 onde o bloco indicado por “Modelo cel. PHV” corresponde ao

modelo da célula fotovoltaica apresentada no capítulo III, com a diferença que foram adicionadas as entradas dos números de células a serem colocadas em paralelo (N_{celp}) e em série (N_{celsr}). As duas outras entradas são a radiação luminosa e a temperatura de operação do painel.

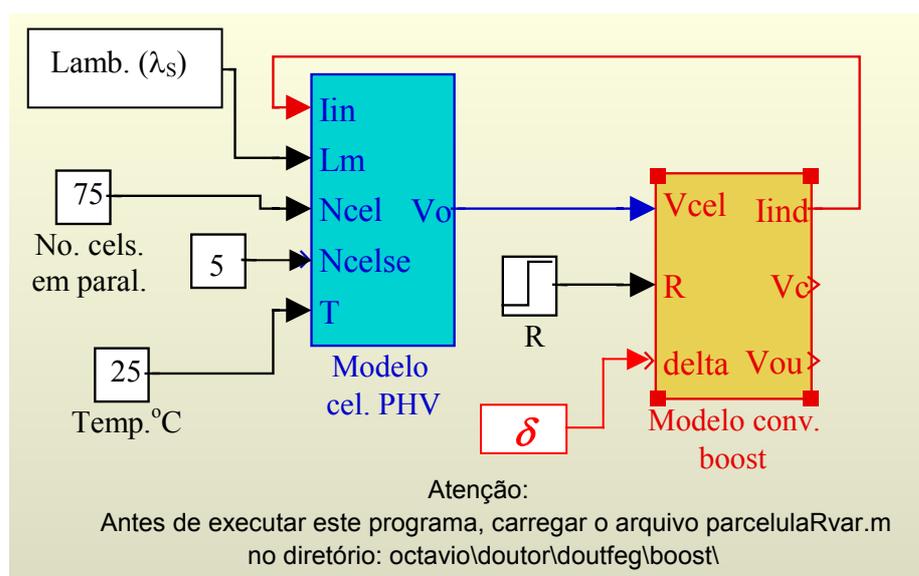


Figura 5.2 – Modelo do painel fotovoltaico e do conversor elevador.

O segundo bloco indicado por “Modelo conv. boost” é o modelo do circuito apresentado na figura 5.1 em formato de blocos do Simulink do MATLAB. Os valores dos parâmetros do circuito são carregados a partir de um arquivo, típico do programa utilizado (extensão .m), e os respectivos valores são: $L = 20$ mH, $R_L = 0,08 \Omega$, $C = 100 \mu\text{F}$, $R_C = 0,015 \Omega$ e R é a resistência da carga. As entradas do circuito são: tensão de entrada que é representado por V_{cel} , a resistência de carga, R , e o ciclo de trabalho, δ . As saídas são: a corrente fornecida pela célula, indicada por I_{ind} , a tensão no capacitor, V_C , e a tensão na saída, V_{out} .

O controle da tensão na saída será efetuado pela variação do ciclo de trabalho, δ . Aumentando-se o ciclo de trabalho, a tensão na saída aumentará; diminuindo-se o valor do ciclo de trabalho, a tensão na saída diminuirá. Este parâmetro varia dentro da faixa compreendida entre zero e a unidade. A figura

5.3 ilustra resultados da simulação em malha aberta para a situação de variação no ciclo de trabalho mantendo-se a carga constante em $R = 10 \Omega$. Na situação apresentada no gráfico da figura 5.3(A), para um valor de $\delta = 0,5$, no intervalo de 0 a 1,5 segundo, a tensão na saída ficou em torno de 230 V. Elevando-se o ciclo de trabalho para $\delta = 0,8$ no intervalo de 1,5 a 3,5 segundos, a tensão elevou para um valor em torno de 350 V. E para uma diminuição do ciclo de trabalho para $\delta = 0,2$ no intervalo compreendido entre 3,5 segundos a 5 segundos, a tensão reduziu para um valor em torno de 170 V.

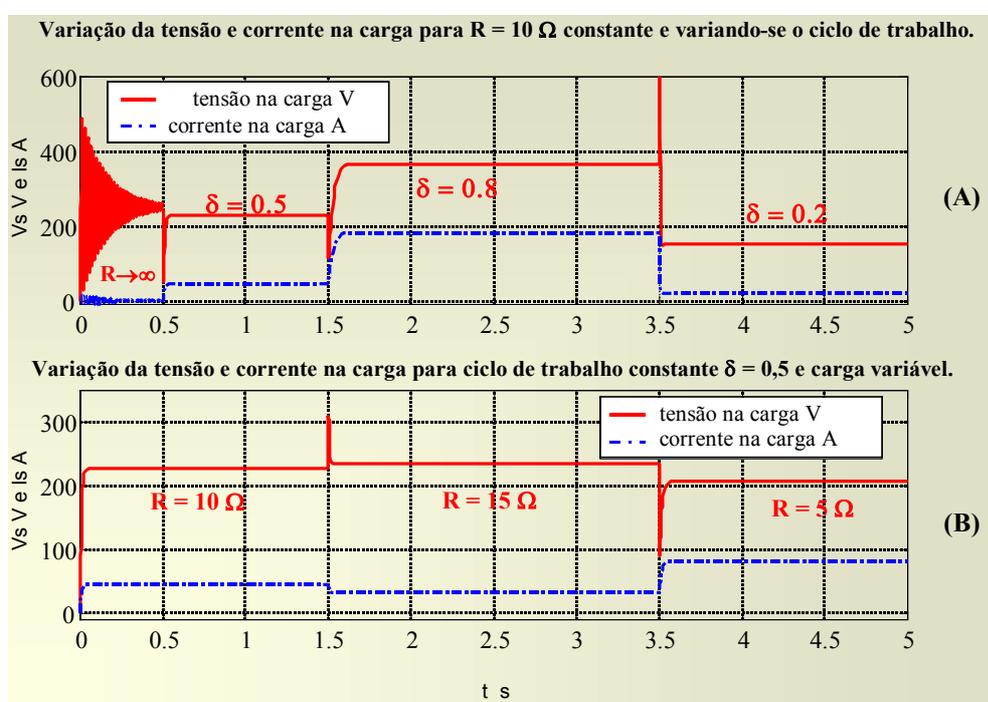


Figura 5.3 – Variação da tensão e corrente na carga, para variação no ciclo de trabalho e da carga, respectivamente.

Na situação apresentada no gráfico da figura 5.3(B) o ciclo de trabalho foi fixado em um valor de $\delta = 0,5$ e os valores da carga foram variados nos respectivos intervalos. Nesta condição os resultados foram: entre 0 e 1,5 segundo a situação foi a mesma apresentada no gráfico da figura 5.3(A). No intervalo de 1,5 a 3,5 segundos, um aumento no valor da carga resultou em

pequena elevação na tensão. No intervalo entre 3,5 a 5 segundos houve uma diminuição maior na tensão devido à diminuição da resistência de carga.

Estas situações serão importantes de serem consideradas quando for efetuado o fechamento da malha de controle. Pois na implementação do controle fuzzy as regras definidas por um especialista deverão ser obtidas para definir o valor em que o ciclo de trabalho deverá operar de forma a transferir a máxima potência à carga.

5.1.2 - Determinação do ponto de operação das células fotovoltaicas e o efeito da temperatura

Na modelagem do controlador fuzzy é necessário se conhecer os pontos de potência máxima do painel fotovoltaico, considerando os aspectos radiação luminosa λ_s e temperatura T . Esses pontos podem ser levantados a partir de dados de catálogos dos fabricantes de painéis solares, ou mesmo definindo-se os pontos utilizando o modelo proposto neste trabalho. Para o painel a ser utilizado no projeto, as curvas estão ilustradas na figura 5.4.

No gráfico da figura 5.4(A) estão ilustradas as curvas típicas da corrente de saída em função da tensão de saída ($I_s=f(V_s)$) considerando três situações para radiação luminosa. Essas curvas foram obtidas a partir de simulações utilizando o modelo desenvolvido. As curvas tracejadas são as respectivas curvas para potência constante do painel. As referidas curvas se interceptam no ponto de máxima potência, que é o ponto de operação ideal do painel fotovoltaico; neste ponto, ocorre a máxima transferência de potência do painel fotovoltaico para a carga.

Pode-se também obter os pontos de máxima potência através do traçado das curvas de potência do painel fotovoltaico, utilizando-se também o modelo desenvolvido, conforme pode ser observado no gráfico 5.4(B). Cada uma das curvas de potência está associada ao gráfico da figura 5.4(A) com as respectivas radiações luminosas. O ponto de potência máxima das curvas corresponde ao produto da tensão pela corrente no ponto em que as curvas da

figura 5.4(A) se interceptam. Para as três situações obtem-se os pontos onde as respectivas potências são máximas, estes pontos estão indicados na matriz de potência máxima (P_{max}) a seguir:

$$P_{max} = [16,87 \quad 9,567 \quad 5,5] kW$$

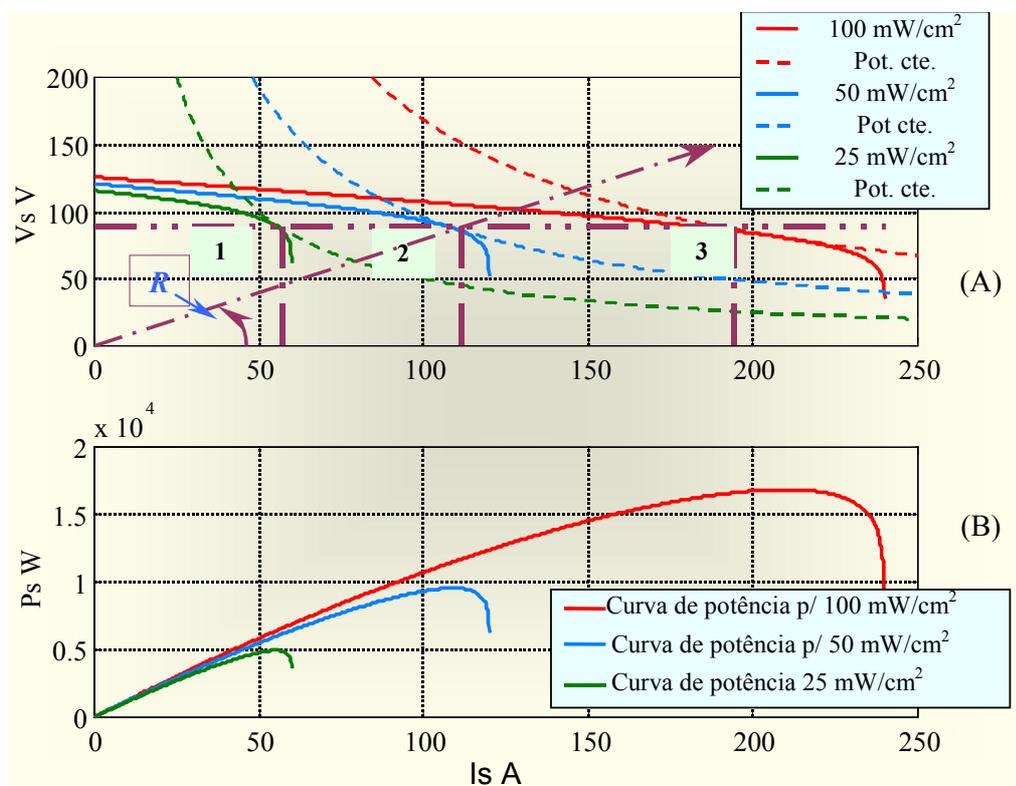


Figura 5.4 – Curvas de potência do painel fotovoltaico. (A) Curva $V_s = f(I_s)$,
(B) Curva de potência do painel.

Cada um dos pontos determinados anteriormente e que definem a potência máxima, foram determinados sobre a respectiva curva definida por um valor de radiação luminosa; seguindo o estabelecido pelas curvas da figura 5.4 obtem-se os seguintes valores para radiação luminosa correspondentes aos pontos de potência máxima, ordenados na matriz radiação luminosa (λ_s):

$$\lambda_s = [100 \ 50 \ 25] \frac{mW}{cm^2}$$

Estes conjuntos de pontos determinam o lugar geométrico das potências máximas do painel fotovoltaico que será buscado pelo dispositivo de controle. Através de uma interpolação, obtém-se a equação da curva característica que definem os pontos de potência máxima que será representada de forma analítica através de uma função polinomial do tipo $P_{max} = f(\lambda_s^2)$; esta função é que definirá o valor de referência em uma das entradas do controlador fuzzy. Lembrando que ficou estabelecido que a temperatura desloca o ponto de máxima potência, e também que as simulações efetuadas anteriormente definiram as curvas plotadas para a temperatura de 25 °C.

Conforme mostrado nas curvas apresentadas em catálogos, a temperatura afeta o desempenho dos painéis fotovoltaicos resultando em variações na potência destes dispositivos. Quando ocorrem aumentos na temperatura tem-se como consequência diminuição da potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos. Para verificar a relação entre a temperatura e a potência será variada a temperatura no modelo, mantendo-se constante a radiação luminosa. As curvas mostradas na figura 5.5 são resultados de simulações e retratam o desempenho do painel fotovoltaico quando submetido a grandes variações de temperatura. Na situação em análise a radiação luminosa foi mantida constante em 100 mW/cm² e as temperaturas foram aumentadas de 25 °C para 40 °C e a seguir diminuídas para 5 °C.

Analisando-se a figura 5.5, percebe-se nas curvas do gráfico 5.5(A) que para as condições de 5 °C e 40 °C houve um deslocamento do ponto de potência máxima. Isto significa que, ao se projetar o sistema de controle, dispositivos de correção da temperatura deverão ser introduzidos de tal forma a permitir que o novo ponto de potência máxima seja seguido pela malha de

controle. Deve-se também notar que aumentos na temperatura diminuem a potência na saída do painel, ocorrendo o inverso quando a temperatura é diminuída.

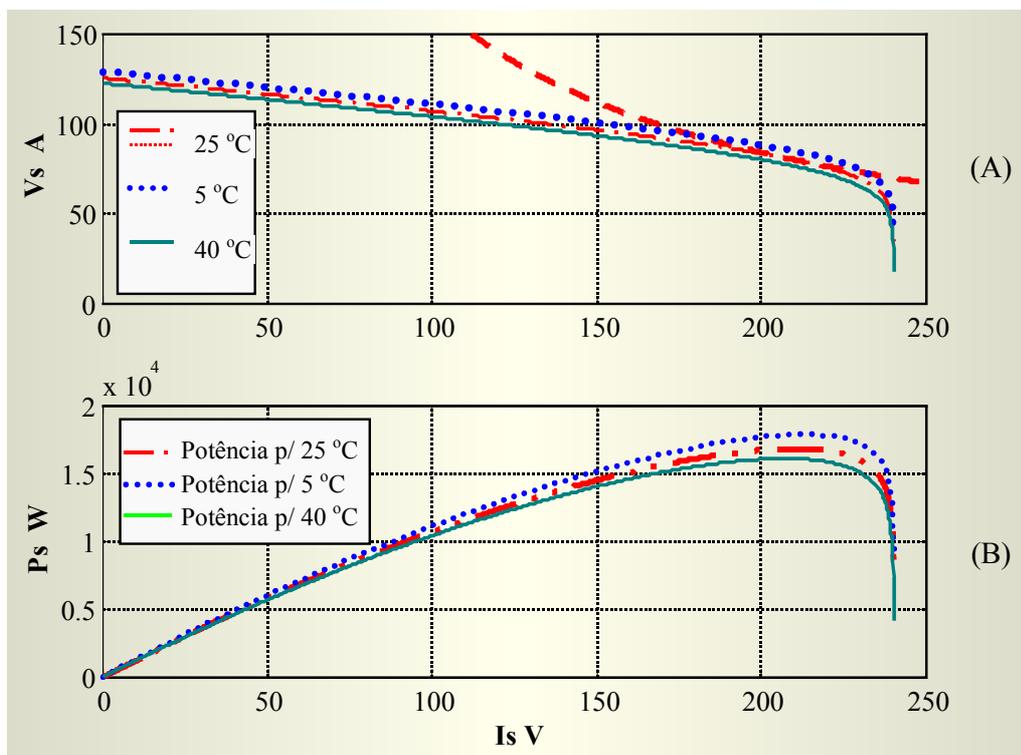


Figura 5.5 – Variação do ponto de máxima potência com a variação da temperatura.

Para a correção do deslocamento do ponto de potência máxima, devido ao efeito da temperatura, será utilizado um polinômio de primeira ordem na forma normalizada (pu). Justifica-se a utilização deste polinômio, através da análise da figura 5.5 onde é verificado que o deslocamento dos pontos a serem determinados, estão deslocando-se sobre uma reta. Portanto os pontos que definem a reta procurada estão indicados nas matrizes temperatura T e fator de correção da potência máxima $f_c P_{max}$.

$$T = [5 \ 25 \ 40] ^\circ C$$

$$fcP_{max} = [1,0595 \quad 1 \quad 0,9549]$$

Onde:

$Fc.P_{Max}$ \Rightarrow é o fator de correção da potência devido à variação da temperatura.

Utilizando-se as matrizes determinadas anteriormente (P_{max} , λ_s , T , fcP_{Max}), definem-se os polinômios procurados. Estes estão escritos no diagrama de blocos da figura 5.6, que ilustra a lógica de controle a ser utilizada.

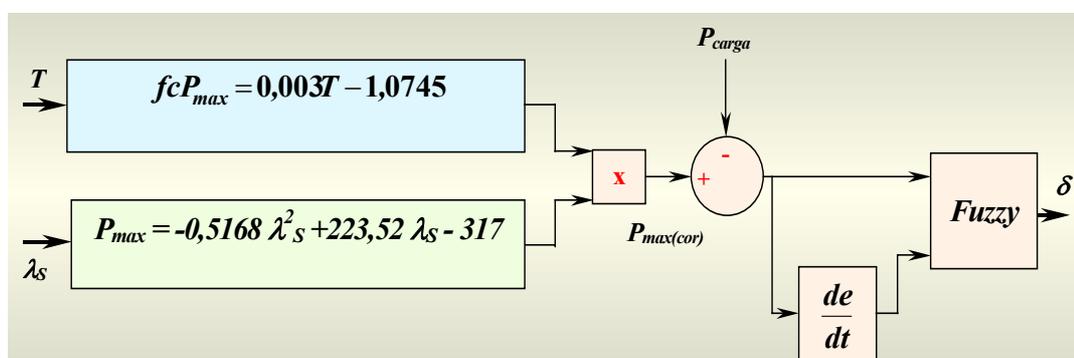


Figura 5.6 – Diagrama de blocos da dinâmica do sistema fotovoltaico.

5.1.3 - Modelagem do controlador fuzzy para o painel fotovoltaico

O desenvolvimento do controlador utilizará o programa MATLAB com as suas várias caixas de ferramentas computacionais, entre as quais possui a da lógica fuzzy que também se apresenta no formato gráfico [24]. Os comandos e funções disponíveis por esta caixa de ferramenta são integrados e podem ser implementadas no ambiente do simulink do MATLAB.

Conforme ficou estabelecido na seção anterior, vide figura 5.6, as variáveis de entrada do sistema fotovoltaico são a radiação luminosa λ_s e a temperatura T . E as variáveis de entrada do controlador fuzzy serão o erro resultante da comparação entre potência máxima do sistema fotovoltaico e a potência da carga e a derivada do erro. Baseado nas tendências da função erro

e sua derivada serão elaboradas regras que definirão os valores da variável de saída que é o ciclo de trabalho do conversor elevador. O valor do ciclo será aquele em que a máxima potência seja transferida à carga. No gráfico da figura 5.4(A), tem-se três situações indicadas pelos números 1, 2 e 3, que retratam o ponto de funcionamento ideal para três situações operacionais. Se o sistema estiver operando na condição de radiação luminosa indicada pelo ponto 2 a reta de carga do painel possui uma inclinação definida por R que naquele instante define o ponto de operação que transfere a máxima potência à carga. Se houver um aumento ou diminuição da radiação luminosa uma nova inclinação deverá ser buscada, pela alteração do ciclo de trabalho, de tal forma que a máxima potência continue sendo entregue a carga. Um controlador convencional do tipo PID poderia ser implementado para seguir o ponto de potência máxima extraindo a máxima energia. Mas, controladores PID apesar de automáticos, trabalham bem se o processo for linear, onde uma mudança na entrada gera uma mudança proporcional na saída. Se esta relação for levemente não linear, ajustes periódicos nos seus parâmetros são necessários. Mas nos casos de não linearidade ou quando a modelagem matemática é complexa, os controladores PID têm desempenho pobre.

Seguindo a sistemática proposta para o desenvolvimento de um controlador fuzzy, o primeiro passo a ser realizado é a fuzificação das variáveis de entrada e saída. Inúmeros são os tipos de funções de pertinência que podem ser utilizadas [3], mas neste trabalho optou-se por uma combinação das funções do tipo triangular e trapezoidal devido a sua facilidade de geração e excelente precisão nos resultados além de estarem disponíveis para pronta utilização no ambiente do MATLAB, ferramenta em uso neste trabalho. Ressaltando que a utilização de uma outra função de pertinência não resultará em grandes vantagens.

Definidas como as variáveis de entrada e saída do sistema a variável erro da potência ($epot$), a derivada do erro ($depot$) e o ciclo de trabalho (δ) respectivamente, inicia-se o processo de fuzificação. Utilizando-se de uma

linguagem própria da lógica fuzzy, são estabelecidos os conjuntos fuzzy para cada variável de entrada e saída. Escolheu-se sete conjuntos fuzzy rotulados conforme indicado a seguir.

- NA (negativo alto);
- NM (negativo médio);
- NB (negativo baixo);
- ZZ (zero e zero);
- PB (positivo baixo);
- PM (positivo médio);
- PA (positivo alto).

O número de conjuntos define a precisão dos resultados, mas por outro lado requer maior solicitação computacional. Estudos comprovam [2] que aumentando os conjuntos triangulares de cinco para sete resulta em um ganho de 15% na precisão; acima destes números as melhorias são bastante insignificantes. Outro fator que afeta a precisão é o grau de superposição entre as funções, valores situados entre 25% e 75% foram determinados experimentalmente como ideais.

Na figura 5.7 estão ilustradas as funções de pertinência fuzzy com os seus respectivos rótulos lingüísticos e suas extremidades determinando os limites de atuação cada uma das funções de pertinência. A função zero está situada na posição central de equilíbrio; para esta função, definiu-se um limite menor ao passo que as que ocupam as posições laterais ficaram um pouco mais espaçadas. Para as duas funções da extremidade definiu-se uma função de pertinência do tipo trapezoidal o que resultará um ajuste mais grosseiro. Estes procedimentos em nada afetarão o bom desempenho do sistema de controle fuzzy, pois é esperado que os pontos de operação em condições normais situem-se próximos à região central.

A representação gráfica da função de pertinência indicada na figura 5.7(A) refere-se ao erro da potência (*epot*). Os limites de erro estabelecidos em termos de grandezas em por unidade (pu) estão situados entre $-1,5$ a $+1,5$.

Para o gráfico da figura 5.7(B) tem-se as funções de pertinência para a derivada do erro (*depot*) que informará ao sistema se o ponto de operação está localizado à direita ou à esquerda do ponto máximo, dependendo do valor relativo da derivada no ponto. Naturalmente o ponto conveniente para operação corresponde ao ponto onde a derivada é igual a zero. Gráficamente a derivada da função erro representa uma inclinação da reta (coeficiente angular) em um determinado ponto, assim os limites a serem escolhidos deverão ser os maiores possíveis, idealmente no intervalo de $-\infty$ a $+\infty$.

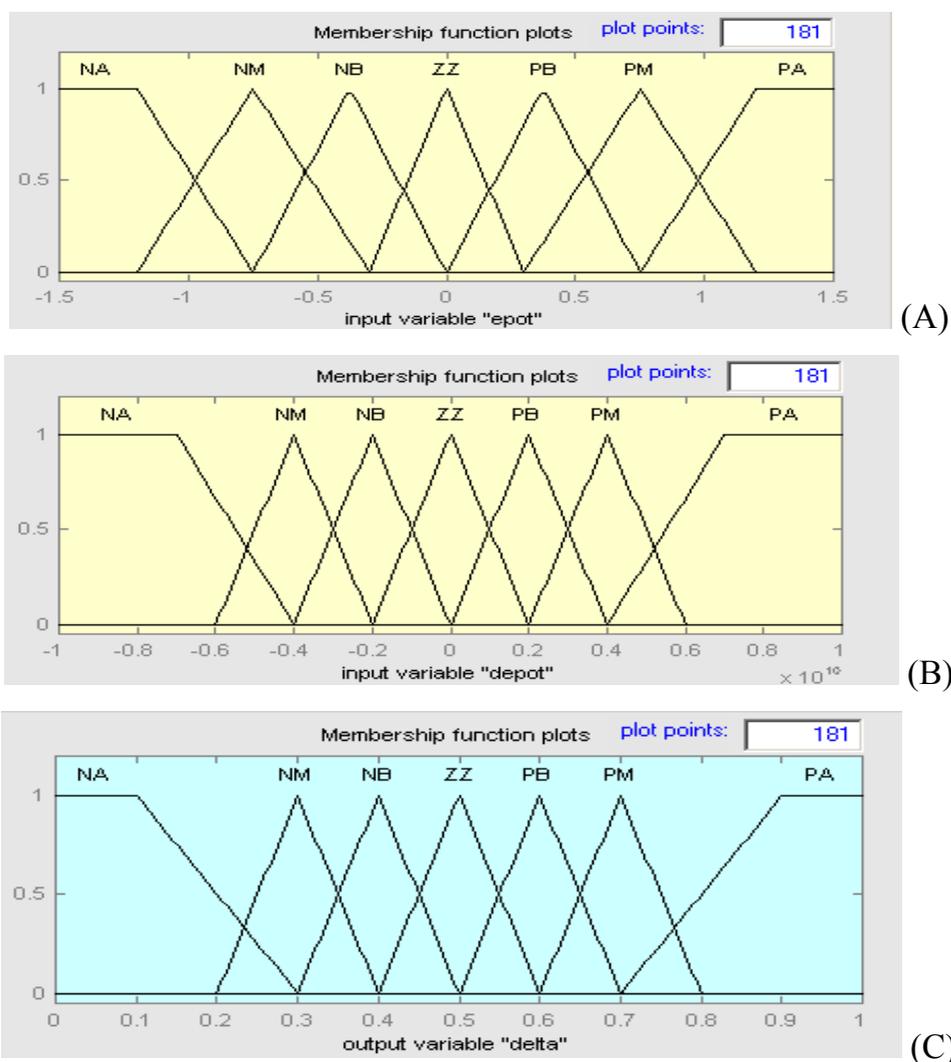


Figura 5.7 – Representação das variáveis de entrada e saída por funções de pertinência fuzzy.

O gráfico indicado na figura 5.7(C) mostra as funções de pertinência correspondente ao conjunto fuzzy da variável de saída, ou seja, o ciclo de trabalho (δ). Valores típicos para o ciclo de trabalho estão localizados entre zero e a unidade. Em condições normais, os valores esperados para o ciclo de trabalho estão localizados próximo ao ponto central da função de pertinência. Valores abaixo de 0,15 e acima de 0,85 retratam condições de funcionamentos especiais como partida de máquinas, frenagem etc. em que os tempos de operação nestas regiões são da ordem de alguns segundos. Cabe informar que estes limites são obtidos a partir de experiências práticas, podendo variar de sistema para sistema.

Após a definição das funções de pertinência o próximo passo será determinar as regras do sistema fuzzy, a base de conhecimento ou o depósito de inteligência do sistema. O mapa de regras, ou matriz Mac Vicar-Whelam como é conhecida em algumas publicações [27], deve ser preenchida durante a identificação do sistema, quando se dispõe do auxílio de um especialista, ou seja, um operador humano do sistema a ser controlado. Ele irá auxiliar na identificação das decisões a serem tomadas durante a operação do processo. A tabela 5.1 ilustra as situações operativas do sistema fotovoltaico propondo ações de controle definidas para um determinado valor do erro (*epot*) e de sua taxa de variação (*depot*). Para sete funções de pertinência obteve-se quarenta e nove regras, ou seja uma matriz 7×7 .

Utilizando-se as teorias da lógica fuzzy [26] a matriz será convertida em linguagem computacional do tipo *se então*. Estas estabelecerão a relação entre os conjuntos fuzzy de entrada e os se saída do sistema. Na composição dos vários conjuntos fuzzy de entrada, podem ser combinados utilizando várias operações entre elas, as mais utilizadas são as operações de *min* e *produto*. Para a composição das saídas fuzzy de cada regra a operação utilizada mais comumente é a de *max*. A operação de *min* é uma operação de intersecção entre conjuntos e resulta em um conectivo (E). O produto que pode ser algébrico ou drástico também resulta em conectivo (E).

Tabela 5.1 – Mapa de regras fuzzy.

		Derivada do erro <i>depot</i>						
		NA	NM	NB	ZZ	PB	PM	PA
Erro <i>epot</i>	NA	NA ₁	NA ₂	NA ₃	NA ₄	NM ₅	NB ₆	ZZ ₇
	NM	NA ₈	NA ₉	NM ₁₀	NM ₁₁	NB ₁₂	ZZ ₁₃	PB ₁₄
	NB	NA ₁₅	NM ₁₆	NB ₁₇	NB ₁₈	ZZ ₁₉	PB ₂₀	PM ₂₁
	ZZ	NM ₂₂	NM ₂₃	NB ₂₄	ZZ ₂₅	PB ₂₆	PM ₂₇	PM ₂₈
	PB	NM ₂₉	NB ₃₀	ZZ ₃₁	PB ₃₂	PB ₃₃	PM ₃₄	PA ₃₅
	PM	NB ₃₆	ZZ ₃₇	PB ₃₈	PM ₃₉	PM ₄₀	PA ₄₁	PA ₄₂
	PA	ZZ ₄₃	PB ₄₄	PM ₄₅	PA ₄₆	PA ₄₇	PA ₄₈	PA ₄₉

As operações entre conjuntos fuzzy do controlador proposto podem ser exemplificadas utilizando a regra 16 indicada na tabela 5.1.

Regra 16: Se *epot* é NB e *depot* é NM então a saída do controlador será NM.

Este procedimento será repetido para as quarenta e nove regras do controlador. Elas são escritas no editor de regra da caixa de ferramentas fuzzy set do MATLAB que disponibilizará os vários tipos de operações entre funções de pertinência fuzzy e ainda permite que sejam criados novos tipos de funções de pertinência.

O passo final deste processo consiste em se efetuar a defuzificação 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 [14]. Alguns métodos de defuzificação 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 freqüentemente chamado de centro de gravidade, pois ele calcula o centróide da área que é composta

pelo resultado das operações entre os conjuntos fuzzy. O cálculo do centróide é efetuado pela equação (5.6).

$$C_A = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (5.6)$$

Onde,

$\mu_{out}(u_i)$ \Rightarrow é a área de uma função de pertinência modificada pelo processo de inferência fuzzy,

u_i \Rightarrow é a posição do centróide da função de pertinência individual.

Para demonstrar a ação do controlador fuzzy, considera-se uma situação operativa em que para a regra 16 as entradas encontram-se na condição em que $epot = -0,5$ e $depot = -0,5 \cdot 10^{10}$. Utilizando-se as funções de pertinência estabelecidas na figura 5.7 para as entradas e saída do controlador, pode-se escrever o conjunto fuzzy para de entrada:

$$epot : \{(NA\ 0) (NM\ 0,25) (NB\ 0,75) (ZZ\ 0) (PB\ 0) (PM\ 0) (PA\ 0)\}$$

$$depot : \{(NA\ 0,25) (NM\ 0,5) (NB\ 0) (ZZ\ 0) (PB\ 0) (PM\ 0) (PA\ 0)\}$$

Onde os números correspondem ao grau de pertinência das funções de pertinência de um determinado rótulo. Aplicando-se a operação de mínimo aos dois conjuntos fuzzy, conforme indicado pela relação (5.7), obtem-se a tabela 5.2 em que é o resultado da operação *min* entre os dois conjuntos de entrada resulta em par de valores referentes às condições de entrada para a situação da regra 16.

$$\mu(x_n) = \mu(\text{'epot é rotulo' e depot é rotulo})$$

$$\mu(x_n) = \min(\mu(\text{'epot é rotulo'}) \mu(\text{'depot é rotulo'})) = \min(1 \ 0) = 0 \quad (5.7)$$

Tabela 5.2 – Matriz de relações fuzzy

		Derivada do erro <i>depot</i>						
		NA	NM	NB	ZZ	PB	PM	PA
Erro <i>epot</i>	NA	(0 0,25)	(0 0,5)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)
	NM	(0,25 0,25)	(0,25 0,5)	(0,25 0)	(0,25 0)	(0,25 0)	(0,25 0)	(0,25 0)
	NB	(0,75 0,25)	(0,75 0,5)	(0,75 0)	(0,75 0)	(0,75 0)	(0,75 0)	(0,75 0)
	ZZ	(0 0,25)	(0 0,5)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)
	PB	(0 0,25)	(0 0,5)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)
	PM	(0 0,25)	(0 0,5)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)
	PA	(0 0,25)	(0 0,5)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)

Aplicando-se a operação de *mín* aos valores da tabela 5.2, obtém-se o resultado apresentado na tabela 5.3, que é a condição ainda expressa no domínio fuzzy da variável de saída que é o ciclo de trabalho (δ). Aplicando-se o cálculo do centróide às áreas resultantes obtem-se o valor discreto do ciclo de trabalho. O valor obtido será levado ao conversor elevador para definir o estado operacional da potência da saída.

Tabela 5.3 – Resultado da operação de min entre os conjuntos da tabela 5.2.

Variável de saída	Rotulo da variável de saída (δ)			
	NA	NA	NA	NM
δ_{fuzzy}	0,25	0,25	0,25	0,25
$\delta_{discreto}$	0,37			

Implementando-se o controlador no software de simulação utilizado, obtem-se o diagrama de blocos indicado na figura 5.8. Efetuando-se a simulação para a situação discutida, onde são aplicados dois sinais, o de erro de potência, no valor de $-0,5$ e o da derivada do erro da potência no valor de $-0,5 \cdot 10^9$, obtem-se o resultado indicado no bloco “display” da figura 5.8.

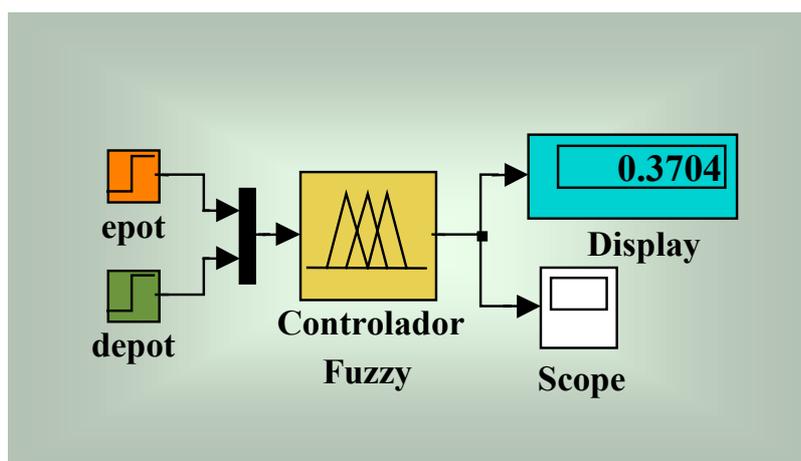


Figura 5.8 – Modelo e teste do controlador fuzzy desenvolvido.

5.2 - MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICO

Sistemas de geração de energia elétrica a partir do vento (SGE) apresentam alguns inconvenientes como frequências e tensões variáveis e alterações na potência gerada devido as constantes alterações na velocidade do vento local. Uma das técnicas mais empregadas na solução destes problemas é utilizar dispositivos de eletrônica de potência como os conversores e inversores de frequência. Vários estudos publicados [25],[22],[23],[30] apresentam novas e diferentes topologias de circuitos e novas técnicas de controle visando solucionar tais inconvenientes. Neste trabalho, será desenvolvido um sistema eólico economicamente viável, para geração de energia elétrica em baixas potências, para ser utilizado em comunidades rurais de demanda reduzida.

O sistema a ser desenvolvido utiliza a máquina assíncrona como gerador operando no modo isolado da rede e auto-excitado [33]. O gerador assíncrono (GA) tem sido muito utilizado em sistemas de geração eólica [31],[32] devido à robustez, ao baixo custo e a facilidade de manutenção. Apesar destas vantagens, as técnicas utilizadas para o controle da potência gerada podem encarecer o sistema de geração. Topologias semelhantes à apresentada em [34], ainda que se tratem de técnicas de vanguarda, podem encarecer demasiadamente o projeto de um SGE, tornando-o inviável nas aplicações a que se propõe este trabalho.

Na figura 5.9 tem-se a ilustração da topologia proposta para o SGE. A análise dos circuitos será dividida em duas etapas: a primeira tratando do acoplamento em corrente contínua (CC) da fonte de energia primária, da turbina eólica e gerador, finalizando com o retificador controlado; a segunda, tratando do barramento CC, inversores e cargas.

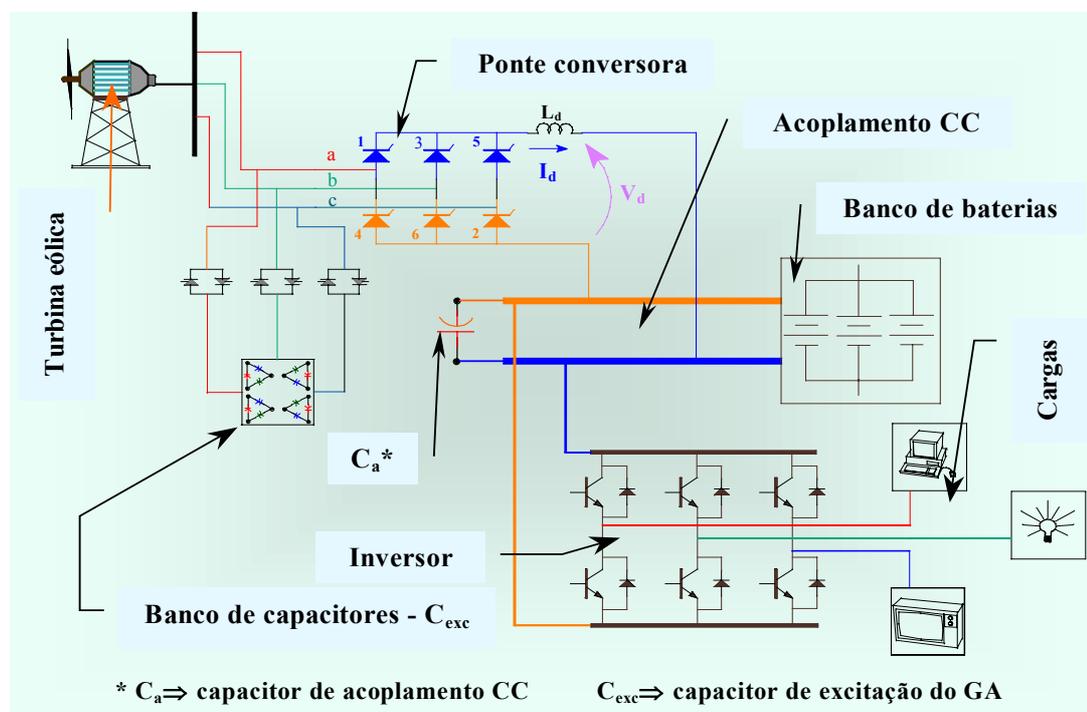


Figura 5.9 – Topologia do circuito de geração eólica.

5.2.1 - Análise e modelagem do conversor retificador trifásico controlado

Para solução dos problemas advindos do modo operacional do GA referentes à auto-excitação e a larga faixa de variação de velocidade, que impõe variações de frequências e no módulo da tensão gerada, utiliza-se um conversor trifásico controlado em ponte Graetz para retificar a tensão gerada. Conversores a tiristores utilizam uma técnica de funcionamento bastante difundida, desta forma pode ser facilmente construído, pois os componentes são de uso geral e encontrados em lojas especializadas podendo ser obtidos a custos reduzidos. Outro aspecto é que não necessitam de maiores cuidados em sua manufatura, sendo de fácil montagem e os ajustes e ensaios não necessitam de equipamentos especiais.

O controle da tensão contínua na saída do conversor é realizado pela variação no ângulo de disparo dos tiristores. Alterações adequadas no ângulo de disparo permitem que se obtenha a tensão desejada na saída da ponte. Este procedimento também ajustará a tensão na carga, quando houver variações na velocidade do vento que resultem em aumento na rotação da turbina eólica, variando a tensão gerada. A retificação do sinal gerado resolve o problema das variações de frequência neles ocorrida. Ocorre que a tensão alternada, imposta pelo GA, na entrada da ponte conversora poderá atingir frequências que comprometem a operação dos semicondutores de potência (tiristores). Estudos realizados por Pelly em [19] comprovam que conversores a tiristores apresentam bom desempenho sob frequências até 400 Hz. Considerando que as turbinas eólicas operam a baixas velocidades a escolha adequada da relação da caixa de engrenagem combinada com a especificação adequada do GA solucionam este problema de tal forma que não haja a ocorrência de frequências acima dos valores desejados.

É importante lembrar que o estudo das turbinas eólicas, desenvolvido no capítulo 4, mostrou que existe um ponto na curva de potência em que a turbina transfere a máxima potência às cargas. A busca por este ponto será realizada através de um controlador baseado na lógica fuzzy, semelhante ao

empregado no sistema fotovoltaico. Portanto a utilização do conversor controlado não só solucionará os problemas discutidos anteriormente, mas também irá definir o ponto ótimo de trabalho pela ação do ângulo de disparo dos semicondutores.

Existem inúmeras publicações entre as quais cita-se [35], [38] que tratam da modelagem de pontes conversoras controladas trifásicas, em que inúmeros modelos foram estudados e apresentaram excelentes desempenhos. As versões mais atuais de alguns programas de simulação já incorporam em seus arquivos demonstrativas modelagens de vários dispositivos de eletrônica de potência entre esses programas têm-se o MATLAB que em suas últimas versões apresenta uma caixa de ferramentas dedicado aos dispositivos de sistemas de potência e eletrônica de potência, denominado por “toolbox Power System blockset”. Este ferramental é compatível com a linguagem gráfica de blocos do Simulink do MATLAB, que tem sido utilizado nas simulações neste trabalho.

Apesar de disponibilizados os modelos de tiristores e diodos de potência [36] [37], bem como o modelo da lógica de geração dos pulsos de disparo para os tiristores da ponte, o modelo do controle e da ponte apresentado no MATLAB não poderá ser utilizado neste trabalho uma vez que eles são desenvolvidos para uma frequência base de 50 Hz ou 60 Hz que é o padrão gerado e transmitido pelas redes de alimentação das empresas de energia elétrica. O conversor do circuito de geração irá trabalhar com tensões em sua entrada que apresentarão variação no módulo da tensão e no valor da frequência, portanto torna-se necessário o desenvolvimento de uma lógica de geração de pulsos específica para esta condição de operação do conversor. A figura 5.10(A) ilustra o modelo do circuito da lógica de disparo que será utilizado. O modelo irá controlar os tiristores conectados à fase A do GA e será repetido para as fases B e C. Na figura 5.10(B) tem-se os resultados da simulação do circuito para uma determinada condição.

O teste do circuito de pulsos foi realizado para a fase A do GA. Foi variada a frequência da tensão gerada em três intervalos distintos, conforme pode ser observado pelas ondas de tensão do sistema trifásico e pela onda da tensão de controle da fase A, que aparece juntamente com os pulsos gerados pelo circuito. O pulso indicado por G_1 será levado ao tiristor 1, e o G_4 ao tiristor 4 da ponte conversora, então cada um dos circuitos irá controlar os tiristores de suas fases respectivas. Observa-se também que os pulsos gerados acompanham os intervalos de acordo com as variações na frequência. Nas menores frequências, os pulsos ficam mais espaçados, e nas de maior, eles ficam mais juntos, resultado que atende as premissas estabelecidas.

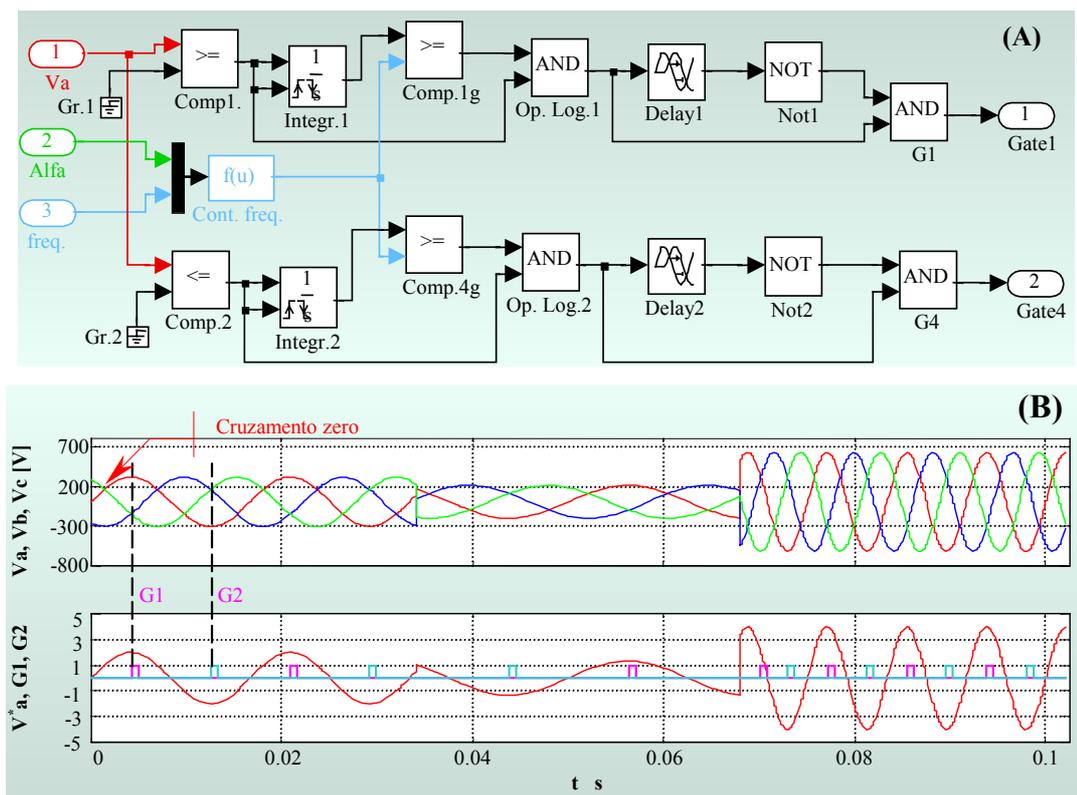


Figura 5.10 – (A) Modelo da lógica de pulsos; (B) Resultado de simulação do circuito gerador de pulsos.

Também estão ilustradas na figura 5.10(A) as entradas do circuito de controle que são a tensão, neste caso V_a por ter-se o circuito apresentado

somente para a fase A, o ângulo de disparo α que irá controlar a tensão na saída e a frequência pois a lógica de disparo deve ser sincronizada a cada mudança do valor da frequência imposta pelas características de geração do sistema eólico.

O circuito de potência da ponte está ilustrado na figura 5.11, onde os dispositivos aparecem no mesmo formato em que são disponibilizados pela caixa de ferramentas do “power system blockset”. Os parâmetros de cada componente podem ser ajustados conforme o desejado bastando que sejam marcados e que se dê um duplo “click” sobre eles.

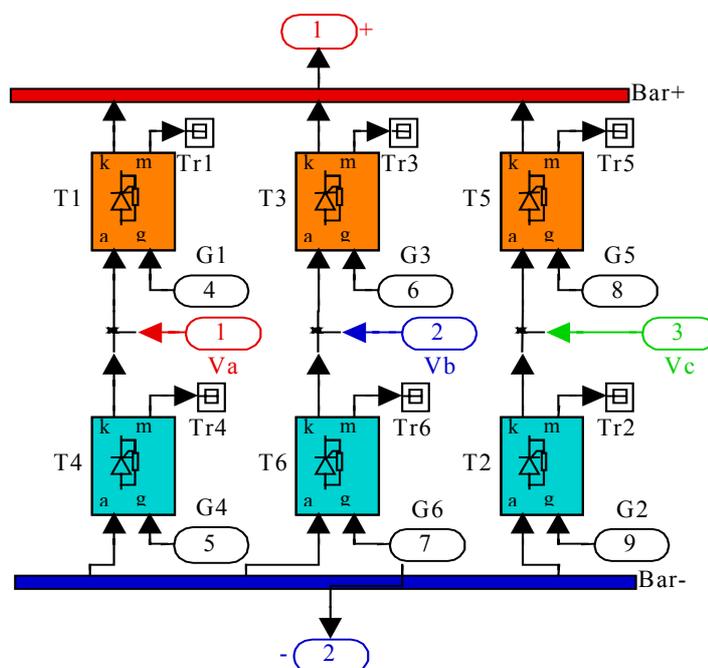


Figura 5.11 – Modelo em blocos da ponte conversora utilizando os componentes do “power system blockset” do MATLAB.

No modelo apresentado na figura 5.11, os blocos indicados por V_a , V_b e V_c são as entradas das ondas de tensão geradas pelo GA. As entradas indicadas por G_1 a G_6 são para receber os sinais elétricos do circuito de controle para disparo dos tiristores. A tensão retificada é obtida nos barramentos positivo (+) e negativo (-) numerados por 1 e 2 respectivamente. Os modelos dos

semicondutores ainda disponibilizam uma saída, indicada por m , para que sejam obtidas as medições da corrente e da tensão reversa no tiristor. Como estas saídas não serão utilizadas, elas são conectadas a um bloco que inibe as informações disponíveis.

5.2.2 - Modelagem do gerador assíncrono

Várias técnicas podem ser utilizadas na modelagem do gerador assíncrono. As principais utilizam as equações de Kirchhoff aplicadas ao seu circuito onde um sistema de equações diferenciais é solucionado através de métodos numéricos. Outra técnica é mais clássica e por isso é adotada em inúmeros trabalhos publicados [25],[30],[39]. Nesta última modelagem é iniciada por um processo de decomposição do circuito do gerador em componentes projetadas nos eixos d , q e $zero$, utiliza-se esta notação para representar os nomes dos eixos *direto* (d) em *quadratura* (q) e *zero*. Efetuando-se duas transformações sucessivas, utilizando uma matriz transformação denominada por transformada de Park [39] obtém-se os parâmetros da máquina.

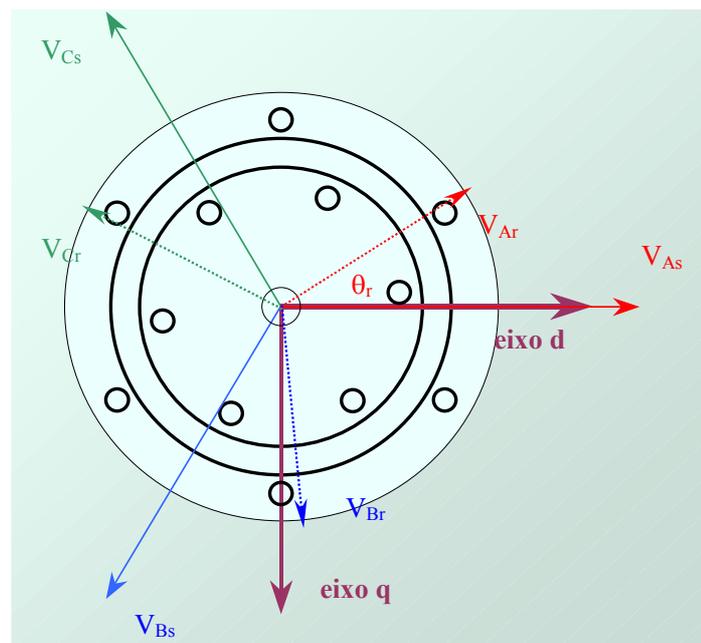


Figura 5.12 – Relação entre os eixos ABC e os eixos arbitrários $dq0$.

Partido-se da teoria de máquinas elétricas desenvolvidas em [39], obtem-se as equações (5.8), (5.9), (5.10), (5.11), (5.12) e (5.13) que determinam o comportamento operacional do GA. No equacionamento será assumido que o eixo de rotação síncrona d está alinhado com o fasor de tensão da fase A do estator e o eixo q está em atraso, conforme ilustra a figura 5.12.

$$p\mathbf{i}_{qs} = -K_1 r_1 \mathbf{i}_{qs} - \frac{\mathbf{i}_{qs}}{C v_{ds}} + K_2 L_m \omega_m \mathbf{i}_{ds} + K_2 r_2 \mathbf{i}_{qr} - K_1 L_m \omega_m \mathbf{i}_{dr} \quad (5.8)$$

$$p\mathbf{i}_{ds} = \left(\frac{\mathbf{i}_{qs}}{C v_{ds}} + K_2 L_m \omega_m \right) \mathbf{i}_{qs} - K_1 r_1 v_{ds} + K_1 L_m \omega_m \mathbf{i}_{qr} + K_2 r_2 \mathbf{i}_{dr} - K_1 v_{ds} \quad (5.9)$$

$$p\mathbf{i}_{qr} = K_2 r_1 \mathbf{i}_{qs} + L_1 K_2 \omega_m \mathbf{i}_{ds} - (r_2 + K_2 L_m r_2) L_2 \mathbf{i}_{qr} + \left(L_1 K_1 \omega_m - \frac{\mathbf{i}_{qs}}{C v_{ds}} \right) \mathbf{i}_{dr} \quad (5.10)$$

$$p\mathbf{i}_{dr} = -L_1 K_2 \omega_m \mathbf{i}_{qs} + K_2 r_1 \mathbf{i}_{ds} - \left(L_1 K_1 \omega_m - \frac{\mathbf{i}_{qs}}{C v_{ds}} \right) \mathbf{i}_{qr} + (r_2 + K_2 L_m r_2) L_2 \mathbf{i}_{dr} + K_2 v_{ds} \quad (5.11)$$

$$p v_{ds} = \left(\frac{1}{C} \right) \left(\mathbf{i}_{ds} - \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) \mathbf{i}_{DC} \right) \quad (5.12)$$

$$p \omega_m = - \left(\frac{B}{J} \right) \omega_m - \left(\frac{3 P_o^2 L_m}{8 J} \right) (\mathbf{i}_{qs} \mathbf{i}_{dr} - \mathbf{i}_{ds} \mathbf{i}_{qr}) + \left(\frac{P_o}{2 J} \right) T_m \quad (5.13)$$

Onde:

- $K_1 = \frac{L_2}{(L_1 L_2 - L_m^2)}$;
- $K_2 = \frac{L_m}{(L_1 L_2 - L_m^2)}$;
- $p = \frac{d}{dt}$ \Rightarrow operador diferencial;
- r_1 e r_2 \Rightarrow resistência do estator e do rotor respectivamente em Ω ;
- L_1 e L_2 \Rightarrow indutância própria do estator e do rotor em mH;
- L_m \Rightarrow indutância de magnetização mH;
- C \Rightarrow capacitância do banco de capacitores em uF;
- ω_m \Rightarrow velocidade do rotor do GA em rd/s;
- ω_s \Rightarrow velocidade síncrona em rd/s;
- i_{ds} , i_{dr} \Rightarrow componente da corrente do estator e do rotor no eixo d respectivamente em Ampère;
- i_{qs} , i_{qr} \Rightarrow componente da corrente do estator e rotor no eixo q respectivamente, em Ampère;
- v_{ds} \Rightarrow componente da tensão do estator no eixo d, em Volt;
- P_o \Rightarrow potência na saída do retificador em W;
- T_m \Rightarrow torque no eixo do GA em N.m;
- J \Rightarrow momento de inércia do conjunto turbina gerador referido ao eixo do gerador em kG.m^2 ;
- B \Rightarrow coeficiente de atrito mecânico, pode ser desprezado.

Seguindo-se os mesmos procedimentos anteriores as equações obtidas serão escritas no programa de simulação utilizado a sistemática adotada nos casos anteriores. O estudo do desempenho do modelo do conjunto GA, acoplado ao retificador será realizado aplicando-se uma excitação com a função degrau unitário e observando as variáveis na saída. Para a simulação foram combinadas três intensidades, na função degrau unitário, simulando a

variação da rotação do conjunto turbina eólica e gerador. Mantendo-se o ângulo de disparo constante ($\alpha = 60^\circ$) e o primeiro degrau ocorre no intervalo de 0 a 0,034 s correspondendo à intensidade de 1200 rpm. Para a segunda situação intervalo de 0,034 s até 0,068 s a intensidade diminuiu para 800 rpm, e por fim no intervalo de 0,068 s a 0,102 s a intensidade aumentou para 2400 rpm. É importante notar que cada uma das situações descritas está associada a um valor de frequência elétrica dos sinais, que são 60 Hz, 40 Hz e 120 Hz. Os resultados obtidos neste procedimento estão ilustrados na figura 5.13.

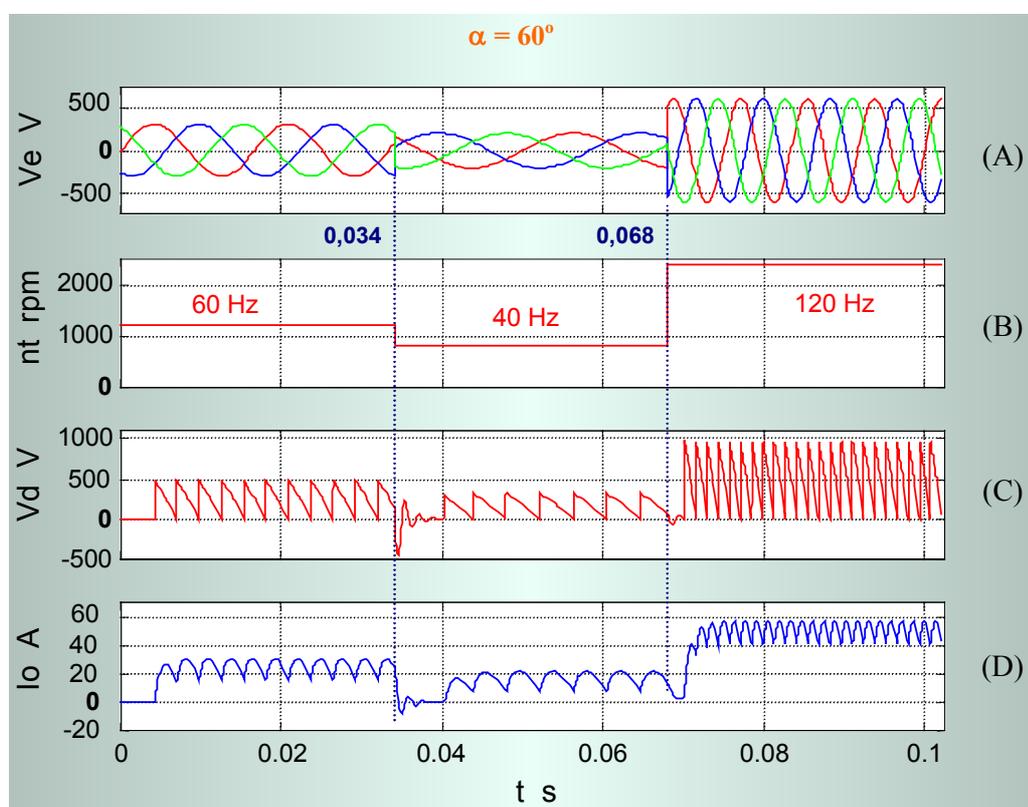


Figura 5.13 – Resultados da simulação do conjunto ponte conversora GA: (A) tensão na entrada do conversor; (B) rotação do GA; (C) tensão CC na saída do conversor; (D) corrente na carga na saída do conversor.

Na situação apresentada percebe-se que quando ocorreram variações na velocidade da turbina o gerador foi afetado pelas mesmas, essas variações ocorrem por que os fluxos de vento não são contínuos, o que resulta em

variações na energia cinética nas pás turbina. Essas variações de energia manifestam-se no sistema elétrico pela ocorrência de alterações na frequência e no módulo da tensão resultando também em um fluxo de energia elétrica variável. Essas alterações na energia que ocorrem no lado de tensão alternada (AC) devem ser controladas de tal forma que a energia a ser transmitida à carga do lado DC seja com tensão constante. O controle será através da variação do ângulo de disparo da ponte.

Observa-se na figura 5.13(C) que no intervalo onde a frequência foi reduzida a tensão V_d na saída da ponte, também reduziu, pois o ângulo de disparo permaneceu constante (60°). Se a malha de controle fosse fechada a estratégia de máxima transferência de potência iria interagir de tal forma a buscar um novo valor para o ângulo de disparo de modo que toda a potência gerada pelo conjunto, turbina e gerador, fosse transferido à carga. Para esta situação seria esperada uma diminuição do ângulo de modo que a tensão média nos terminais da carga fosse aumentada.

Por outro lado no intervalo onde ocorreu aumento da rotação é porque houve aumento na energia cinética e conseqüente aumento da frequência, neste caso deverá ocorrer aumento do ângulo de disparo.

5.2.3 - Modelagem da turbina eólica

As equações desenvolvidas, juntamente com as curvas da turbina obtidas no capítulo 4, serão utilizadas para o desenvolvimento do modelo da turbina eólica. Ficou demonstrado que o torque da turbina varia de acordo com a variação quadrática da velocidade do vento e que a potência é afetada pela variação cúbica da velocidade do vento. Outro aspecto definido é que os pontos de máxima potência não são os mesmos para o máximo torque, quando há variação na velocidade do vento nas pás da turbina.

A figura 5.14 apresenta as curvas de torque e potência pela rotação para a turbina que foi analisada em capítulo anterior. As linhas onde a potência permanece constante interceptam a curva de torque por rotação da turbina no

ponto onde a potência é máxima. Isto pode ser comprovado pela simples comparação entre os dois gráficos ilustrados na figura 5.14.

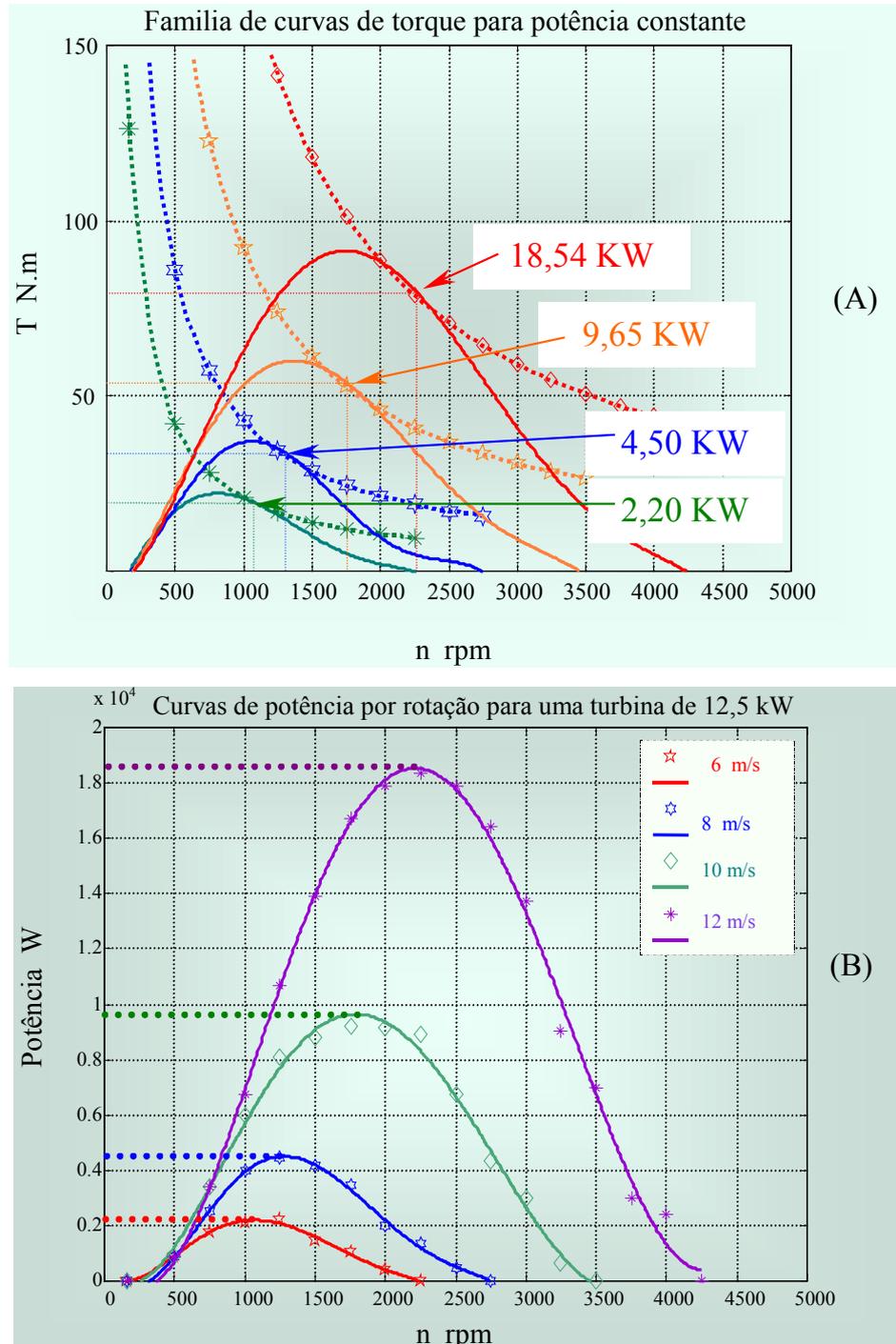


Figura 5.14 – Família de curvas para uma turbina de 12,5 [KW]: (A) Torque por rotação; (B) Potência por rotação.

Portanto no gráfico da figura 5.14(A) os pontos indicados pelas setas correspondem aos pontos de potência máxima nessas curvas de torque, e que correspondem ao ponto máximo das curvas de potência no gráfico da figura 5.14(B). Percebe-se que as linhas cheias nessas curvas de potência foram representadas através de polinômios que foram obtidos por interpolações. Assim foi dada maior precisão para estas curvas de potência na região de máxima potência que é a região localizada nas proximidades dos pontos de potência máxima e que representam as regiões de interesse para o sistema de controle. Os intervalos nas extremidades das curvas não apresentam boa precisão pois no caso em estudo não serão utilizados.

Seguindo este conceito sabe-se que estes pontos de potência máxima, indicados na matriz P_{max} , são distribuídos de acordo com a lei cúbica da velocidade do vento, através de processos de interpolação pode-se determinar o polinômio que define todos os pontos máximos das infinitas curvas de potência para cada valor de rotação e velocidade do vento. Correspondente aos pontos de potência máxima, tem-se as matrizes rotação n e velocidade do vento v_w .

$$n = [1075 \ 1285 \ 1790 \ 2210] \text{ rpm}$$

$$v_w = [6 \ 8 \ 10 \ 12] \frac{m}{s}$$

$$P_{max} = [2,20 \ 4,50 \ 9,65 \ 18,54] \text{ kW}$$

O polinômio resultante do processo de interpolação que definem os pontos de potência máxima para a turbina em análise é o representado na equação (5.14). Este polinômio determina a potência disponível no eixo da

turbina para qualquer velocidade de vento incidente, desde que estejam dentro da faixa operacional da turbina que é obtida nos informativos técnicos [20].

$$P_{max} = 1,8541667 \times 10^{-2} v_w^3 - 8,875 \times 10^{-2} v_w^2 - 0,351666666 v_w + 3,5 \quad (5.14)$$

5.2.4 - Modelagem do controlador fuzzy do SGE

A teoria referente a sistemas que utilizam lógica fuzzy, aplicada para o desenvolvimento do controlador do sistema fotovoltaico, será também adotada para definir a estratégia de atuação do controlador fuzzy a ser empregado no SGE. A idéia básica do controle é buscar o ponto de máxima potência da turbina quando este ponto de potência é deslocado para outra curva devido às variações na velocidade do vento conforme o caso ilustrado na figura 5.15.

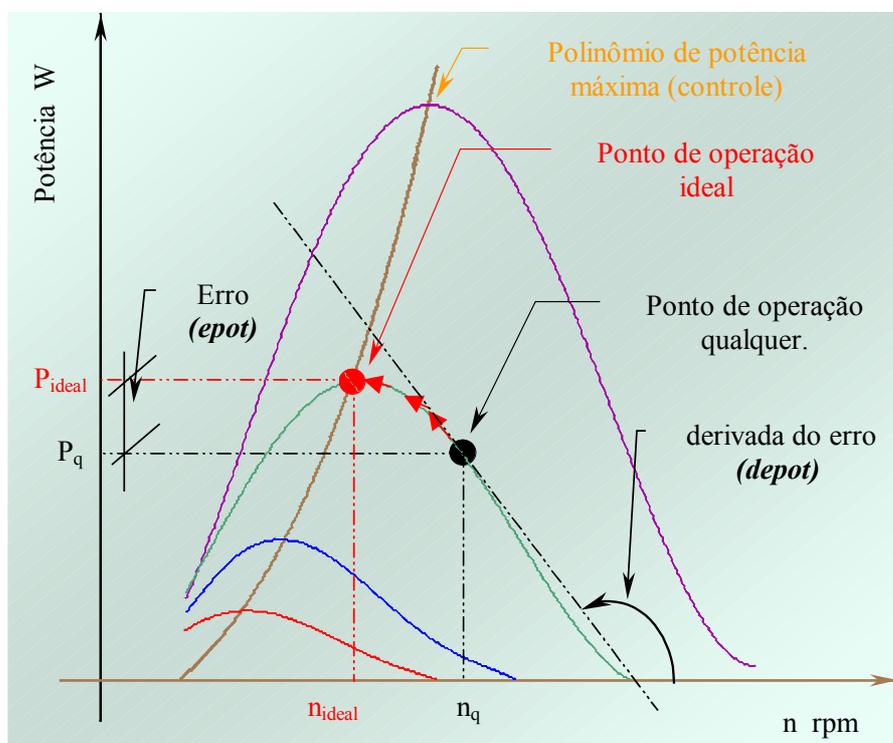


Figura 5.15 – Determinação do ponto ideal de operação pelo erro e derivada do erro.

Na figura 5.15 tem-se a ilustração das curvas de potência da turbina as quais representam quatro situações para a velocidade do vento. Os pontos onde a potência é máxima pertencem a curva definida pelo polinômio apresentado em (5.14). O conjunto GA e turbina eólica podem estar operando em qualquer ponto das infinitas curvas possíveis definidas para as várias situações de velocidades do vento. Um dos blocos de entrada do controlador fuzzy será a referência de potência máxima que é obtida através da equação (5.14), tendo a velocidade do vento como entrada. Comparado-se a potência máxima de referência com a potência atual que está sendo transferida à carga, haverá um erro de potência (*epot*) na saída do comparador. Este erro de potência pode ser negativo ou positivo situação que definirá a posição do ponto de operação qualquer na curva. Mas este não é o ponto ideal de operação pois não transfere a potência máxima para a carga. Lembrando também, que o controlador não sabe qual a posição do ponto na curva. Os procedimentos a serem tomados pelo controlador fuzzy serão definidos pela derivada do erro (*depot*). Para derivada negativa significa que o ponto atual está à direita do desejado; para um valor positivo a esquerda. Cada uma destas situações resultará em uma decisão diferente, ou seja, valores de ângulo de disparo da ponte diferentes. Alterações no valor do ângulo de disparo do conversor serão efetuados sucessivamente até que o erro seja nulo. Este ponto localiza-se na interseção entre as curvas de potência e a curva definida pelo polinômio de potência máxima.

Para o desempenho das funções desejadas o controlador fuzzy para este sistema possui duas entradas: o erro de potência e a derivada do erro. Seguindo a sistemática de projeto de um controlador fuzzy, serão estabelecidos sete conjuntos fuzzy e rotulados de forma semelhante à adotada para o controlador fotovoltaico.

- NA (negativo alto);
- NM (negativo médio);

- NB (negativo baixo);
- ZZ (zero e zero);
- PB (positivo baixo);
- PM (positivo médio);
- PA (positivo alto).

Os rótulos lingüísticos nos intervalos pré-determinados definirão as respectivas funções de pertinência fuzzy. Novamente a função zero ficará situada na posição central de equilíbrio. Em relação ao controlador empregado no sistema fotovoltaico a diferença reside na variável de saída que neste caso é um ângulo e as respectivas funções de pertinência, em cada intervalo, foram definidas conforme indicado na figura 5.16.

Os limites das funções de pertinência para o ângulo de disparo foram definidos seguindo a sistemática de operação de um conversor. Teoricamente o limite de operação de um conversor no modo retificador está entre 90° e 0° ; na prática costuma-se utilizar os limites operacionais entre 30° e 70° , esta prática é adotada devido aos erros de fase e desbalanços nas tensões do sistema elétrico e atrasos no sistema eletrônico de geração de pulsos. Na posição central um limite reduzido para aquela função foi adotado e um limite maior para as funções laterais. Para os limites direito e esquerdo escolhem-se funções de pertinência do tipo trapezoidal uma vez que operações nestes intervalos não ocorrerão e assim não será necessário maior precisão.

Um mapa de regras conforme estabelecido na tabela 5.1 é implementado, e para este caso também se obtém quarenta e nove (49) regras. Discutindo-se a ação do controlador fuzzy para uma determinada situação como, por exemplo, para a condição operativa onde se tem a atuação da regra 40 e as entradas encontram-se na situação em que $epot = 0,6$ e $depot = 0,3 \cdot 10^{10}$; utilizando-se as funções de pertinência estabelecidas na figura 5.16 obtem-se o seguinte conjunto fuzzy para as entradas:

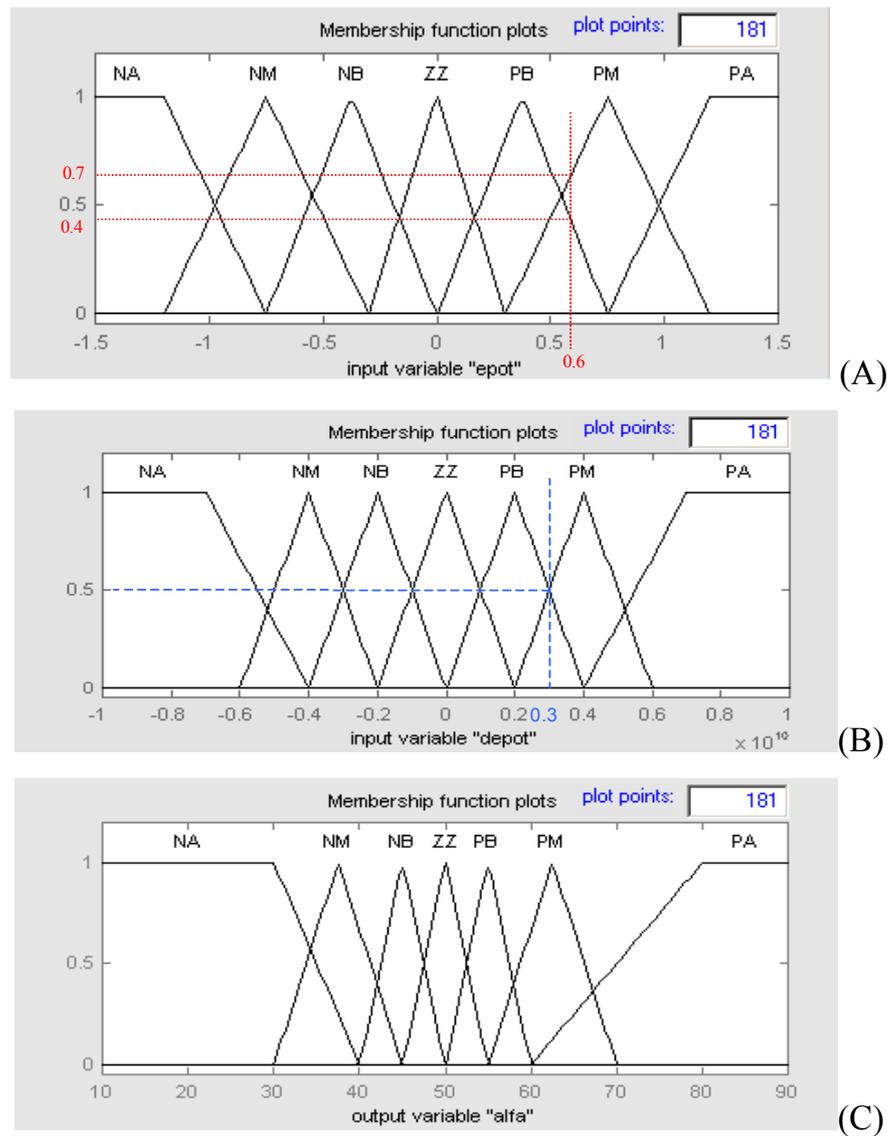


Figura 5.16 – Funções de pertinência fuzzy para a variável de saída do SGE.

$$epot : \{(NA\ 0)\ (NM\ 0)\ (NB\ 0)\ (ZZ\ 0)\ (PB\ 0,4)\ (PM\ 0,7)\ (PA\ 0)\}$$

$$depot : \{(NA\ 0)\ (NM\ 0)\ (NB\ 0)\ (ZZ\ 0)\ (PB\ 0,5)\ (PM\ 0,5)\ (PA\ 0)\}$$

Aplicando-se a operação de *mín* aos dois conjuntos fuzzy, conforme indicado na equação (5.7) obtém-se a tabela 5.4, como resultado.

Tabela 5.4 – Matriz de relações fuzzy.

		Derivada do erro (<i>depot</i>)						
		NA	NM	NB	ZZ	PB	PM	PA
Erro (<i>epot</i>)	NA	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0,5)	(0 0,5)	(0 0)
	NM	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0,5)	(0 0,5)	(0 0)
	NB	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0,5)	(0 0,5)	(0 0)
	ZZ	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0,5)	(0 0,5)	(0 0)
	PB	(0,4 0)	(0,4 0)	(0,4 0)	(0,4 0)	(0,4 0,5)	(0,4 0,5)	(0,4 0)
	PM	(0,7 0)	(0,7 0)	(0,7 0)	(0,7 0)	(0,7 0,5)	(0,7 0,5)	(0,7 0)
	PA	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0)	(0 0,5)	(0 0,5)	(0 0)

Aplicando-se a operação de *mín* aos valores da tabela 5.4 conforme indicado na operação abaixo, obtem-se o resultado apresentado na tabela 5.5 que é a condição de saída expressa no domínio fuzzy para a variável de saída que é o ângulo de disparo (α).

$$\begin{aligned} \mu(x_{40}) &= \mu('epot_n \acute{e} PM' \ E \ 'depot_n \acute{e} PB') = \\ &= \min(\mu('epot_n \acute{e} PM') \ \mu('depot_n \acute{e} PB')) \end{aligned}$$

Tabela 5.5 – Resultado da operação de *mín* entre os conjuntos da tabela 5.4.

		Rotulo da variável de saída (α)			
Variável de saída		PB	PM	PM	PA
α_{fuzzy}		0,4	0,4	0,5	0,5
$\alpha_{discreto}$		71.4°			

Para o melhor entendimento da interpretação gráfica dos resultados apresentados na tabela 5.5, processo de defuzificação, recorre-se à figura 5.17 para efetuar uma análise. Observa-se que cada uma das funções de pertinência fuzzy da variável de saída envolvida no controle, para situação solicitada pelas

variáveis de entrada, estão representadas com os seus respectivos pesos. Os valores representativos do peso das funções foram obtidos nos quadros da tabela 5.5. O resultado final é uma figura geométrica que é composta pela soma lógica das formas geométricas envolvidas que são as indicadas pelos números de 1 a 4 na figura 5.17.

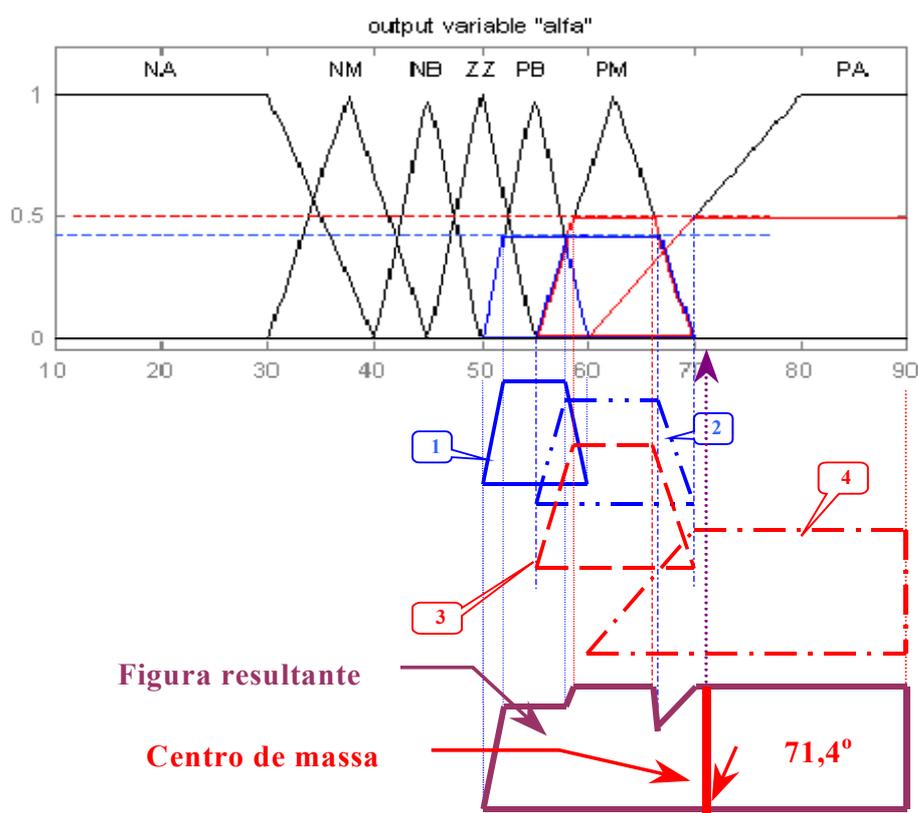


Figura 5.17 – Interpretação gráfica da tabela 5.5.

Conhecidas às dimensões necessárias das figuras geométricas, através da equação (5.6) calcula-se o centro de massa da figura resultante. O valor final obtido é o valor discreto procurado para as condições estabelecidas previamente.

A figura 5.18 ilustra o aspecto gráfico as 49 regras estabelecidas exibidas pelo programa utilizado. Verifica-se que é através das regras que as funções de pertinência são ativadas considerando o grau de ativação de cada conjunto fuzzy.

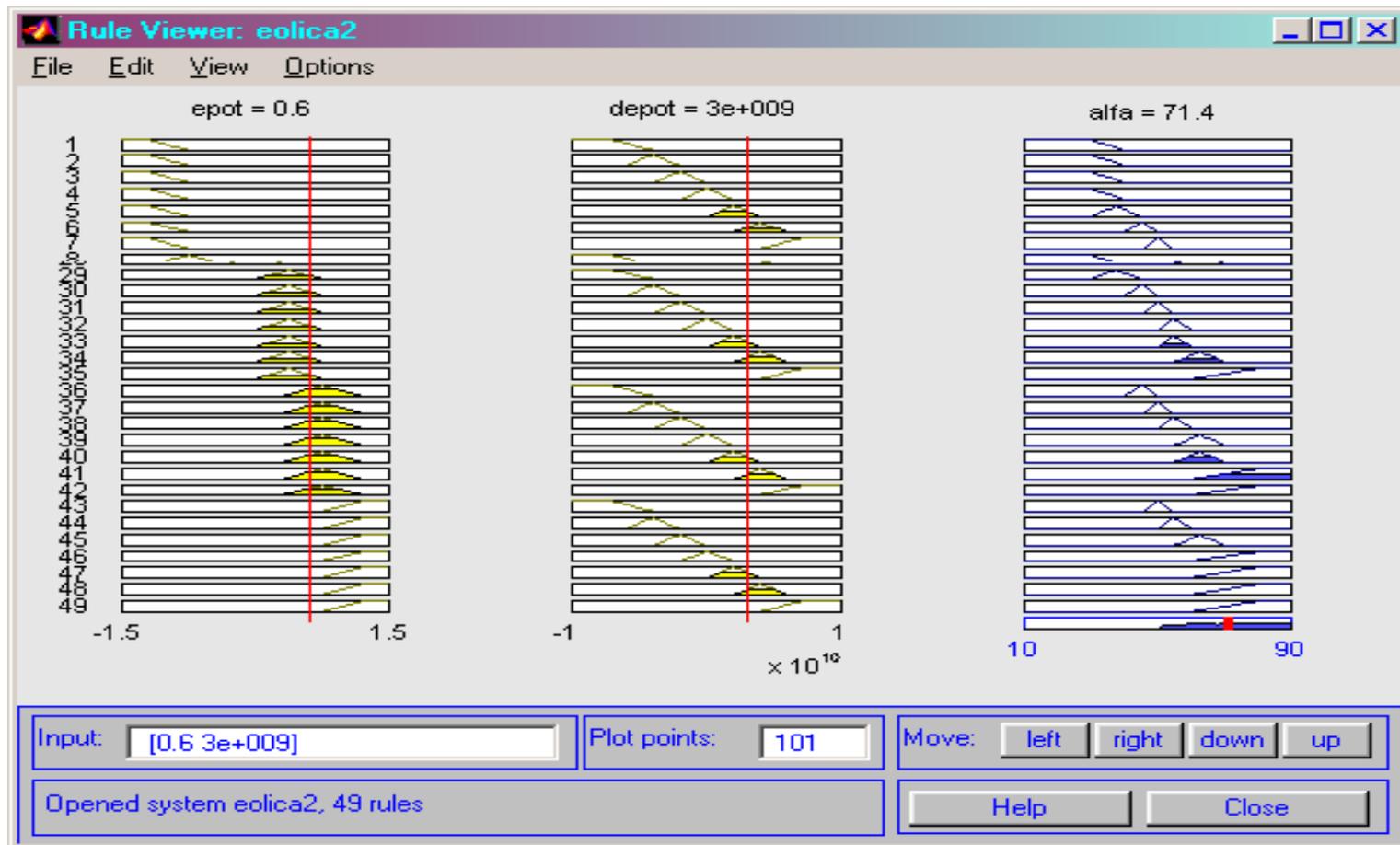


Figura 5.18 – Janela do programa MATLAB de interação com o usuário. Permite que as regras sejam visualizadas de acordo com os valores atribuídos às entradas.

5.3 - DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DO SISTEMA DE SUPERVISÃO E INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

O sistema a ser desenvolvido, além de efetuar o processo de supervisão do sistema, ainda permitirá que comandos do tipo: entrada e saída de operação equipamentos, controle do fluxo de carga, seleção das fontes de energia que estão habilitadas ao fornecimento de energia, definirá quando o banco de baterias será carregado e quando fornecerá a energia acumulada etc. Todas essas ações serão definidas por um controle fuzzy inteligente, que baseado em regras próprias irá tomar as decisões mais convenientes à operação do sistema. A figura 5.19 ilustra a situação a ser obtida para o sistema de controle e supervisão fuzzy. As entradas do sistema de supervisão fuzzy são as potências geradas e consumidas. Na figura 5.19 as entradas do sistema de supervisão são as potências geradas representadas pelo sistema fotovoltaico (SGFV), pelo sistema eólico (SGE) e pelo banco de baterias. As potências consumidas são representadas pelas cargas que também constitui uma das entradas.

Cabe informar que os sinais de controle de cada um dos sistemas estão disponíveis na entrada dos controles individuais de cada uma das fontes de geração (seguidores de potência máxima). E o sinal de controle da potência consumida (cargas) é obtido pelo produto da tensão pela corrente na saída do sistema de geração, conforme indicado na figura 5.19. Estes sinais de controle serão fuzificados, conforme ilustrado na mesma figura, atribuindo-lhes os rótulos que caracterizam os estados de geração e consumo.

5.3.1 - Fuzzyficação do sistema a biogás

O sistema de geração a biogás possui como característica a independência de eventos naturais como o sol e o vento para iniciar o processo de geração.

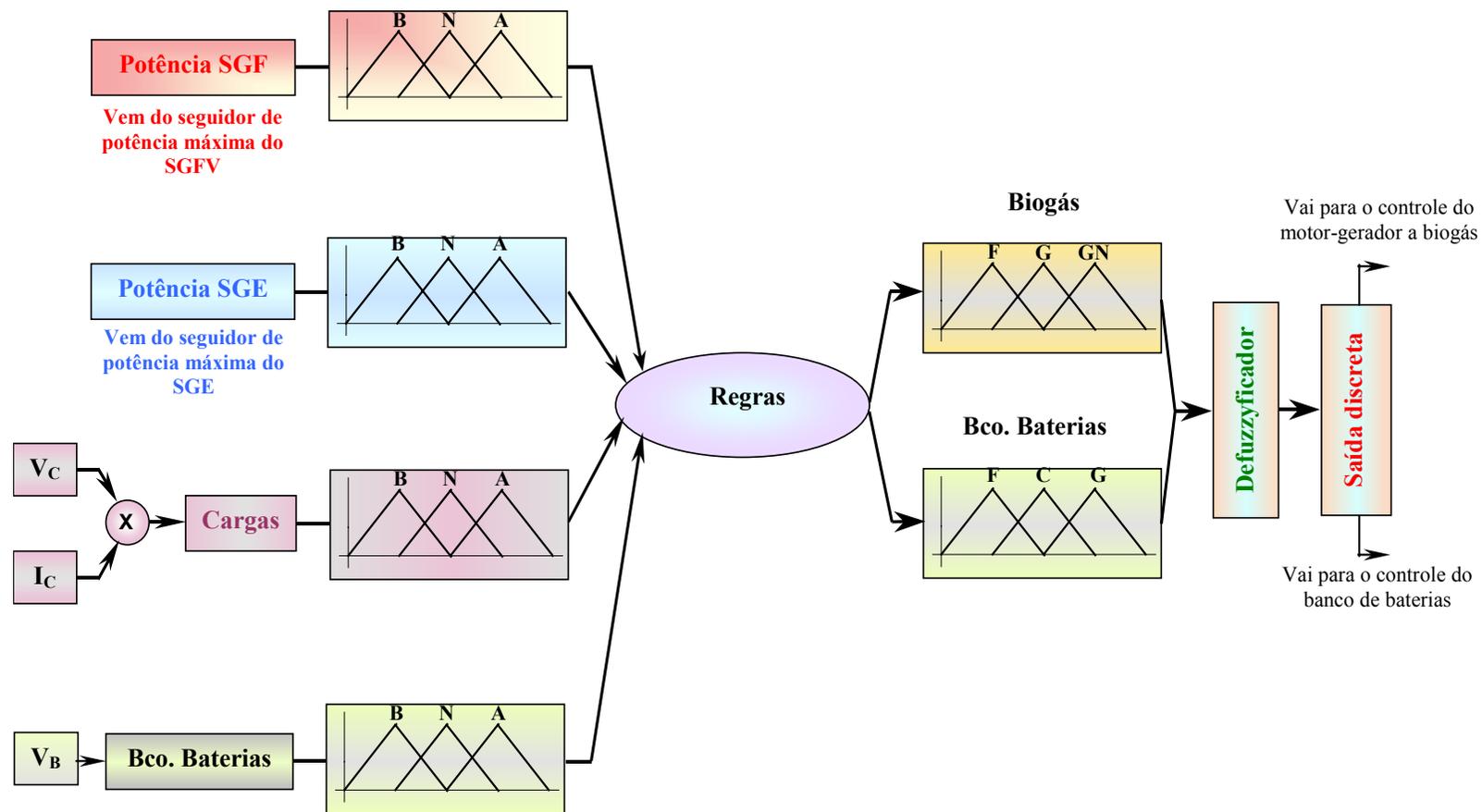


Figura 5.19 – Diagrama de blocos do sistema de supervisão fuzzy.

A única preocupação será manter o nível necessário do biogás produzido pelo gasômetro. Na tela do sistema de supervisão está inserido um conjunto de indicadores que controlam a produção e o nível do biogás.

O **SGB** não é afetado pelas situações pouco sol e pouco vento e além disso, quando ocorrerem programações de manutenções corretivas preditivas e preventivas das fontes de geração, o sistema de geração a biogás poderá operar completando a energia necessária ao consumo da comunidade, ou ainda em situações extremas alimentando as cargas essenciais.

Observando as condições operacionais do controle do sistema a biogás três situações poderão ocorrer: o estado desligado é assumido na abundância de energia nas fontes solar e eólica, o de flutuação quando houver necessidade de uma entrada emergencial do gerador, e o estado de geração onde o gerador assume a alimentação de parte das cargas ou de cargas essenciais. Estas três condições são representadas pelos rótulos:

- **D** ⇒ estado desligado para limites de potência da carga entre (0 e 0,75);
- **F** ⇒ estado de flutuação para os limites de potência da carga entre (0,375 e 1,13);
- **G** ⇒ estado de geração para os limites entre (0,75 e 1,5).

Recorrendo-se a teoria da lógica fuzzy as três funções de pertinência triangulares podem ser escritas conforme ilustrado na figura 5.20.

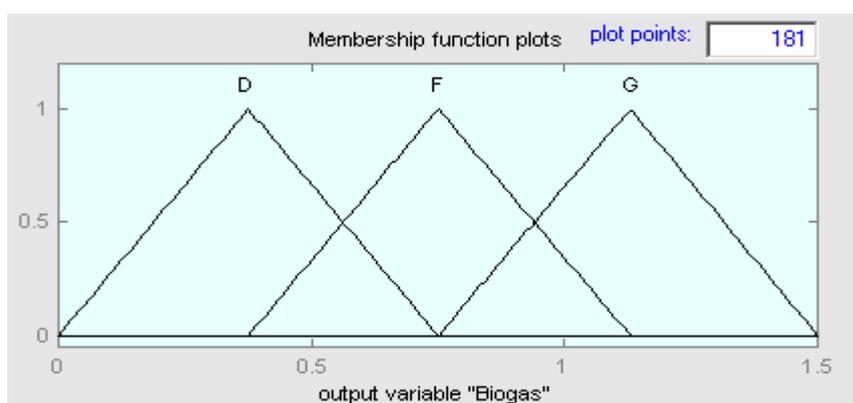


Figura 5.20 – Funções de pertinência para o estado operacional do **SGB**.

O caso do banco de baterias (**BB**) deve ser analisado sob duas perspectivas: a primeira como carga e a segunda como fonte. Devido a essa versatilidade deste dispositivo é necessário determinar-se os limites operacionais entre os dois estados, para que sejam criadas as regras convenientemente de tal forma obter-se a estratégia de controle adequada do sistema. Um bom indicador das condições em que o banco de baterias se encontra em relação à quantidade de cargas é a tensão nos terminais, uma vez que muitos controladores de carga existentes no mercado adotam, este tipo de estratégia. Caso sejam utilizadas na composição do BB baterias do tipo chumbo-ácido, os fabricantes informam que para a temperatura de 25 °C tem-se uma variação de tensão no limite superior de 2,3 V a 2,5 V por célula. Quando o valor da tensão nominal do banco flutuar em torno desses valores assume-se a condição de carga total e o banco estará liberado para operar como fonte. Os limites inferiores estão em torno de 1,9 V a 2,1 V por célula. Quando a tensão nominal nos terminais descer para a proximidade destes valores, consideram-se as baterias descarregadas ao máximo. Nesta situação o banco deve operar como carga recebendo potência para ser novamente recarregada.

Iniciando-se a análise para os estados operacionais que podem ocorrer para o BB tem-se para a saída três possibilidades de operação: em geração, flutuando no sistema e carregando. Para cada uma dessas situações atribuem-se funções de pertinência que podem ser rotuladas conforme os estados operacionais.

- **BBC** ⇒ banco carregando (0 a 0,75);
- **BBF** ⇒ estado de flutuação, com carga disponível e na iminência de entrar em operação (0,5 a 1).
- **BBG** ⇒ estado de geração, alimentando uma parcela das cargas (0,75 a 1,5).

No formato gráfico o processo de fuzificação efetuado no ambiente MATLAB/Fuzzy está ilustrado na figura 5.21(A).

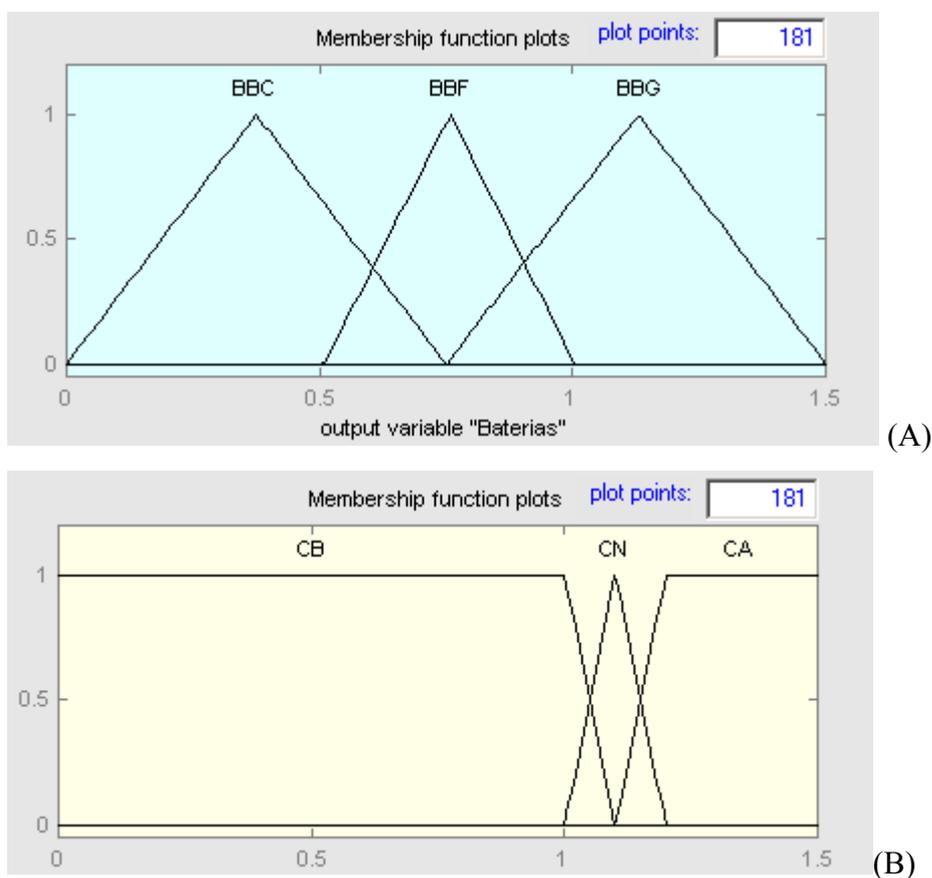


Figura 5.21 – Funções de pertinência para as situações operacionais do BB.
(A) para a saída. (B) para a condição de carga na entrada.

Os sinais de controle da variável de entrada do **BB** podem ser obtidos partindo-se de dois aspectos: o primeiro observando-se as condições operacionais e retirando as informações necessárias para o comportamento do mesmo no sistema durante os ciclos operacionais; o segundo considerando as informações dos fabricantes para os níveis de tensão que relacionam os seus estados de carga. Esses dois aspectos conduzem as seguintes situações: 1 pu para condição de tensão nominal, desta forma quando o **BB** estiver carregado irá flutuar com uma tensão em torno de 1,2 pu e quando estiver com carga

baixa a tensão nos terminais atingirá valores em torno de 0,8 pu. Associando estes valores aos rótulos das funções de pertinência obtém-se:

- **CB** \Rightarrow estado de baixa carga, banco carregando (0 a 1.1);
- **CN** \Rightarrow estado normal de carga (1 a 1,2);
- **CA** \Rightarrow estado de alta carga, com carga disponível (1.1 a 1.5);

A figura 5.21(B) representa ilustra as funções de pertinência para as situações apresentadas pelo banco de baterias.

5.3.2 - O perfil de carga e a fuzificação do consumo

A curva de carga a ser utilizada foi obtida a partir do consumo mensal de algumas residências de padrão médio. Considerando o valor dos kWh resultantes dos cálculos das médias mensais de consumo registradas nas contas de energia. Uma vez que em pequenas comunidades as cargas elétricas serão compostas basicamente por utensílios domésticos é de se esperar que o perfil da curva de carga seja bastante similar àqueles levantados para as comunidades urbanas. Tipicamente as curvas para as regiões urbanas possuem o aspecto apresentado na figura 5.22, onde estão indicados os pontos obtidos através de medições e a curva ajustada, conforme indicado na legenda.

Mas é importante comentar que apesar de não se dispor do perfil da curva do consumo efetivo da comunidade onde o sistema será instalado, isto não se constitui em uma impossibilidade para elaboração do projeto, uma vez que alterações no sistema e adequações podem ser realizadas a qualquer instante adicionando ou retirando regras da base de conhecimento do sistema de supervisão.

O processo de fuzificação a ser desenvolvido tem como ponto de partida o consumo apresentado pela curva da figura 5.22 e será obtido pela definição de três condições de consumo: Baixo, Médio e Alto. Essas três

situações serão os rótulos das funções de pertinência de cada um dos estados operativos.

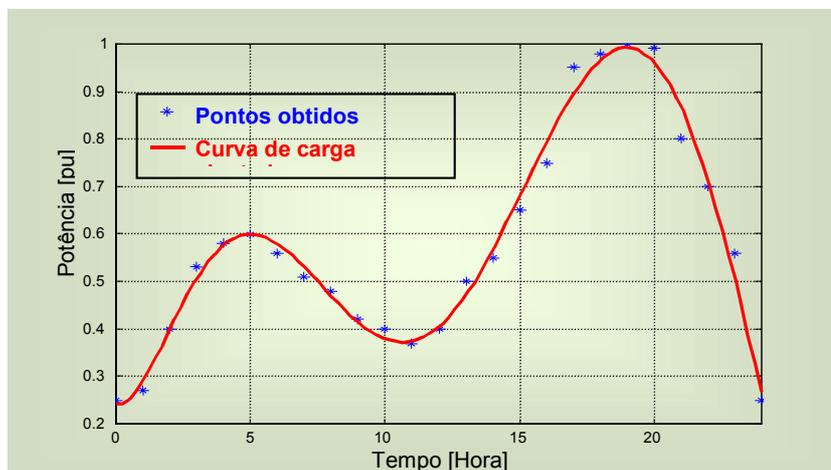


Figura 5.22 – Perfil de consumo utilizado no controle de supervisão fuzzy.

A figura 5.23 ilustra as funções de pertinência para o perfil de carga em linguagem fuzificada.

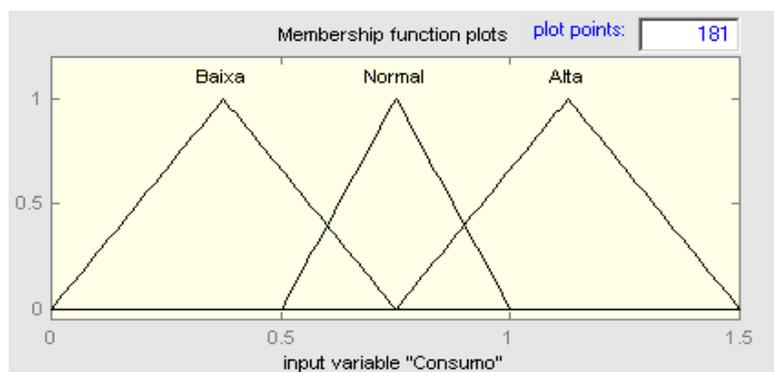


Figura 5.23 – Funções de pertinência para o consumo de energia diário da comunidade.

5.3.3 - Processo de fuzificação para supervisão das fontes fotovoltaica e eólica

Seguindo o mesmo processo adotado para a fuzificação da curva de carga para o consumo diário da comunidade, serão atribuídas três funções de

pertinência para as fontes de energia alternativa. Os rótulos serão para geração de energia serão: Baixo, Normal e Alto. As funções estão ilustradas na figura 5.24, para o sistema fotovoltaico e eólico respectivamente.

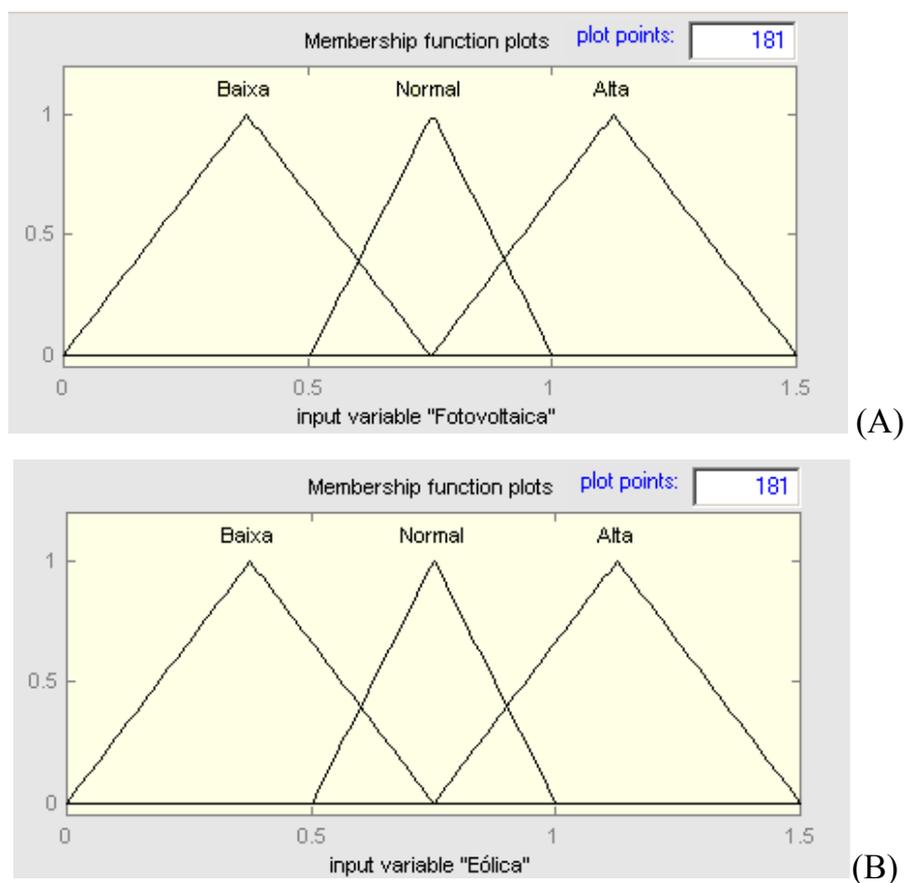


Figura 5.24 – Funções de pertinência para as fontes de energia. (A) Fotovoltaico; (B) Eólica.

Obtidas as funções de pertinência é necessário se estabelecer as regras para o sistema de supervisão. Essas regras são obtidas observando-se o comportamento de funcionamento do processo. Considerou-se para fins de simulação um conjunto de dez regras que definem a operação do sistema durante um ciclo para um dia normal. Ressalte-se que para situações fora da normalidade deve-se elaborar regras que definam o comportamento do sistema de supervisão para essas situações. As regras utilizadas no processo de simulação estão ilustradas na figura 5.25.

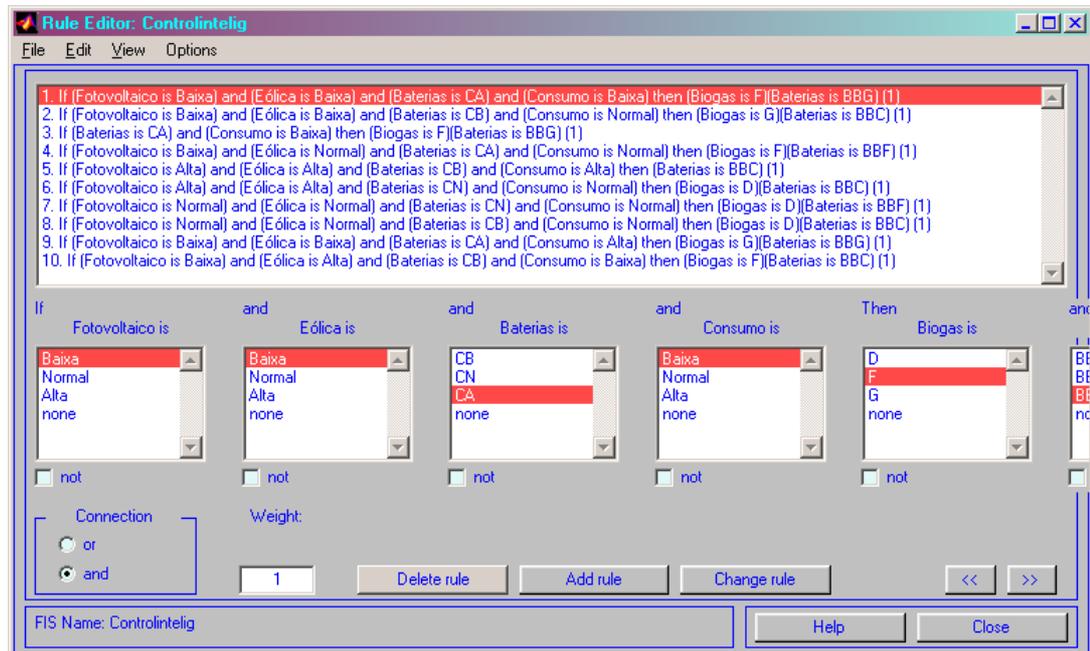


Figura 5.25 – Conjunto de regras do sistema de supervisão editadas no programa de simulação.

Capítulo 6: Análise Econômica do Sistema Híbrido Operando Isolado do Sistema Elétrico.

6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A viabilidade econômica da instalação de um sistema é dependente dos custos envolvidos na produção de energia elétrica cobrirem os custos suplementares em relação ao sistema de atendimento das empresas de geração de eletricidade. Para o caso de um sistema híbrido de geração de energia elétrica, tendo como fontes primárias o sol, o vento e o biogás, o benefício anual esperado referente ao custo de produção de energia elétrica, deverá cobrir os custos relacionados à implantação de uma rede no local, proveniente de um sistema elétrico existente nas proximidades.

Existem várias metodologias que efetuam a análise de viabilidades econômicas. Neste trabalho será adotada a metodologia desenvolvida por Silveira em [45],[46] uma vez que tem sido aplicada em inúmeros estudos práticos, tendo-se obtido excelentes resultados. E devido a sua versatilidade permite que através de algumas adaptações seja aplicada no estudo de viabilidades econômicas de vários sistemas.

6.2 - ANÁLISE ECONÔMICA PARA O SGF

Fica estabelecido na análise, que o custo da eletricidade em um sistema fotovoltaico considera os investimentos necessários na aquisição, instalação, operação e manutenção do sistema fotovoltaico. Para o caso do **SGF** que foi projetado para 15 kW, o investimento necessário para aquisição dos painéis fotovoltaicos é da ordem de US\$ 3,50/Wp a US\$ 8/Wp, conforme tabela 6.1. Será adotado um custo médio de US\$4,00/Wp para os painéis utilizados neste sistema.

Devido à necessidade da utilização de inversores para o acionamento de algumas cargas elétricas, o custo do sistema deve ser aumentado em torno de 25%. Deve-se também considerar que o local onde o sistema será instalado, é uma comunidade isolada, distante do sistema de distribuição de energia elétrica. Apesar do sistema dispor de outras fontes de energia como a eólica e o biogás, há a necessidade da instalação de um banco de baterias para acumular a energia excedente. Sob o aspecto técnico, esta alternativa permite que o sistema seja mais eficiente. Por outro lado, sob o ponto de vista econômico o sistema fica mais caro em cerca de 20%.

Tabela 6.1 – Tabela de custos para sistema fotovoltaicos apresentada em [47]

Valores levantados para o ano 2000	
Itens	Custo
Módulos fotovoltaicos	3,50 – 8,00 US\$ por Watt de pico (Wp)
Inversores de frequência	0,75 – 1,30 US\$/Wp
Instalação e comissionamento	0,20 – 4 US\$/Wp
Operação	0,50 – 2,00 US\$/Wp
Manutenção	0,01 – 0,20 US\$/Wp

Para o período de funcionamento de um sistema fotovoltaico, pode-se estimar entre de 8 a 10 horas dia, quando opera agregado a bancos de baterias. E durante um período de um ano, 360 dias, apresenta um tempo de operação de 3600 horas/ano. Lembrando que do período considerado, 6 horas refere-se ao horário em que a oferta de energia solar está disponível diretamente do painel fotovoltaico, e as restantes se referem à energia acumulada nos bancos de baterias.

Considerando todos estes fatores o custo de produção de eletricidade para sistemas fotovoltaicos pode ser calculado em US\$/kWh, através da equação (6.1).

$$C_{el(SGF)} = \left(\frac{I_{SGF} \cdot f}{H \cdot E} \right) + C_{op} + C_{man} \quad (6.1)$$

Onde:

$C_{el(SGF)}$ \Rightarrow custo da eletricidade produzida em US\$/kWh;

I_{SGF} \Rightarrow é o investimento total necessário em US\$;

H \Rightarrow número de horas de operação por ano, h/ano;

C_{op} \Rightarrow é o custo da operação em US\$/kWh;

C_{man} \Rightarrow é o custo de manutenção do sistema em US\$/kWh;

f \Rightarrow fator de anuidade dado em 1/ano;

E \Rightarrow energia elétrica gerada em kW.

O fator de anuidade pode ser obtido através da equação 6.2.

$$f = \frac{q^k (q - 1)}{q^k - 1} \quad (6.2)$$

Onde k é o período de amortização ou “pay back” em anos. E q é calculado em 6.3 e é função da taxa anual de juros denominada por r em porcentagem.

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (6.3)$$

A receita anual esperada decorrente da implantação do sistema de geração fotovoltaico, na comunidade, pode ser calculada através da equação 6.4.

$$R_{E(SGF)} = E_c \cdot H \cdot (C_{mex} - C_{el(SGF)}) \quad (6.4)$$

Onde:

C_{mex} \Rightarrow é o custo marginal de expansão da oferta de energia elétrica em US\$/kWh;

6.2.1 - Cálculo do Custo Final da Eletricidade Produzida e Receita Anual Esperada

Inicialmente calcula-se o custo da eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico sem se levar em conta os possíveis subsídios a serem obtidos através de programas do governo. As condições de cálculo consideram um período de amortização de 10 a 18 anos e que a vida útil de um painel fotovoltaico esteja em torno de 25 anos. As taxas de juros consideradas serão as praticadas pelo BNDES de 4%, 8% e 12%. Por fim serão considerados também os subsídios entre 10% a 50%, disponibilizados pelos programas sociais do governo.

Para obter-se os custos operacionais da planta serão efetuados alguns cálculos que consideram alguns aspectos que podem ser próprios de cada comunidade. Por exemplo, sendo o sistema projetado para operar em comunidades isoladas, pode-se formar um técnico da comunidade para realizar as manutenções necessárias e efetuar as operações quando necessárias. Ressalta-se ainda que, pouca ou nenhuma operação deva ser realizada durante os dias, uma vez que é adotada a lógica fuzzy no sistema de controle e supervisão. Devido a estes aspectos pode-se atribuir ao técnico e um auxiliar um custo de US\$0,007/kWh, referente a uma folha de pagamento mensal de US\$ 57,00.

O custo de manutenção da planta referente a peças de reposição, transporte etc, pode ser estimado considerando a tabela 6.1, adotando-se um agravio no valor do custo por kW devido ao acesso à região, resultando em um

custo final é de US\$ 0,035/kWh. Através da variação dos possíveis subsídios destinados a implantação do sistema, e um tempo de amortização de 15 anos, para as taxas de juros aplicadas obtém-se o gráfico da figura 6.1.

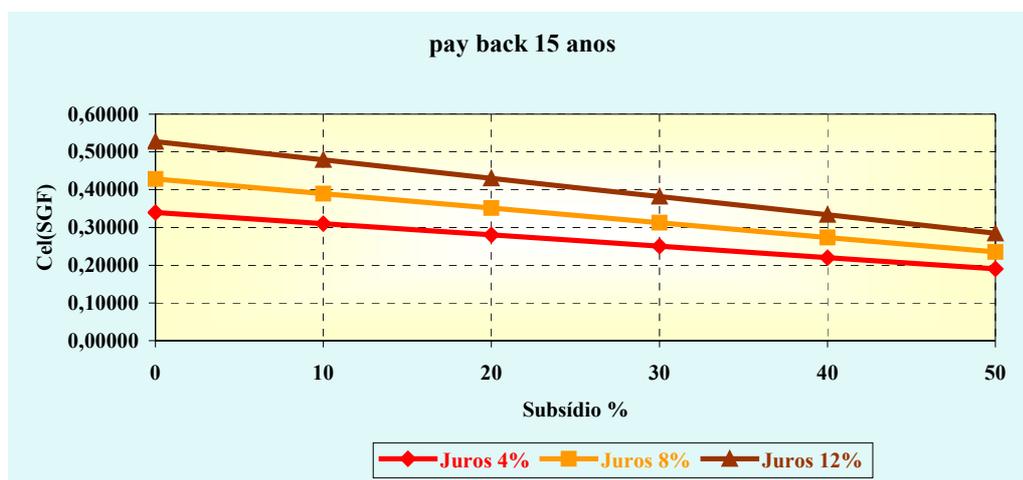


Figura 6.1 – Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGF em função dos subsídios disponíveis.

Para a situação apresentada, e estimando-se um custo para aquisição do sistema fotovoltaico em torno de US\$ 7/W_p, devido aos equipamentos auxiliares agregados ao sistema: inversores, banco de baterias e um dispositivo de controle com um conversor elevador. Nestas condições o custo da eletricidade produzida pelo SGF ficou em torno US\$ 0,55/kWh, para uma taxa de juros de 12%, sem aplicação de subsídio. Por outro lado, quando se aplica um subsídio de 50%, o custo da eletricidade produzida cai para US\$ 0,34/kWh, referente a uma diminuição de 38% no custo.

O benefício anual para este sistema de geração de energia elétrica, a ser implantado em comunidades isoladas, onde a necessidade de armazenamento se faz necessária, é calculada pela equação (6.4). Para as taxas de juros praticadas pelo BNDES, e um custo marginal de expansão do setor elétrico (s.e) de US\$ 0,09/kWh, têm-se os gráficos ilustrados na figura 6.2.

Analisando-se os gráficos percebe-se claramente que o tempo de amortização do sistema fica bem acima de 18 anos, isto se for considerado o valor do custo de expansão do sistema elétrico, medido para as regiões de fácil acesso e com linhas elétricas de transmissão nas proximidades. Nestas condições verifica-se a inviabilidade de implantação deste sistema para geração.

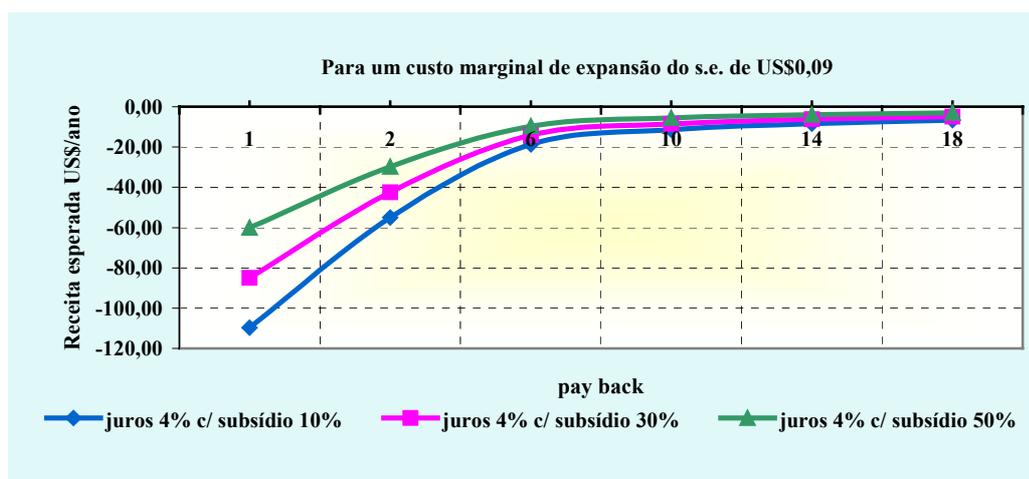


Figura 6.2 – Benefício anual esperado com os subsídios disponíveis.

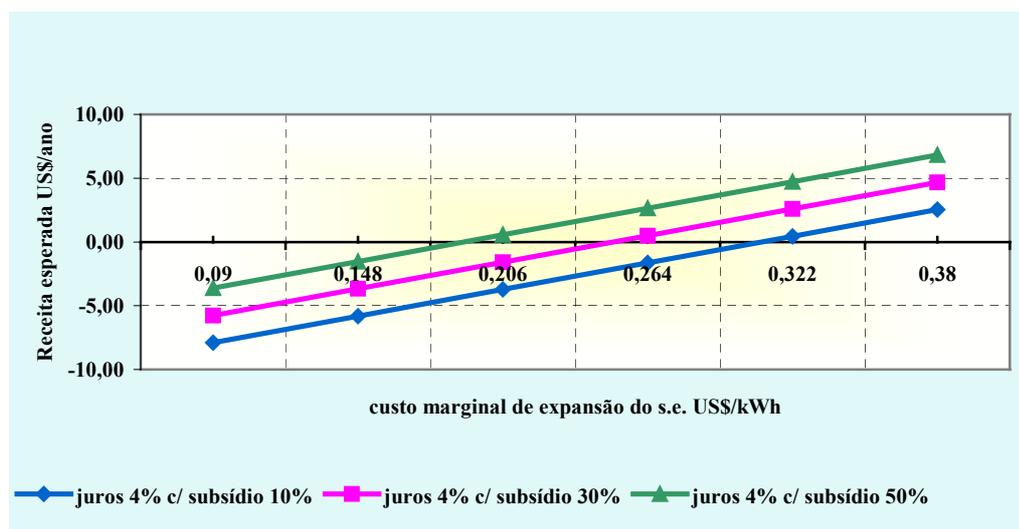


Figura 6.3 – Variação da receita anual esperada contra o custo marginal de expansão do s.e.

No entanto se o custo marginal de expansão atingir valores acima de US\$ 0,17/kWh, a opção pela implantação de um **SGF** começa a ficar viável economicamente. Esta situação está ilustrada nos gráficos da figura 6.3. Para um tempo de amortização de 15 anos e com taxas de juros de 4%.

6.3 - ANÁLISE ECONÔMICA PARA O SGE

Adotando-se o mesmo procedimento para o cálculo do custo da eletricidade do sistema fotovoltaico, calcula-se os valores para o SGE. Neste caso o projeto é para 10 kW de potência instalada, o investimento necessário para aquisição do conjunto turbina/gerador, torre e acessórios é da ordem de US\$ 2,2/W, conforme orientação [48].

6.3.1 - Cálculo do Custo da Eletricidade Produzida e Receita Anual Esperada

Para este sistema o custo operacional utilizado será o mesmo utilizado para o **SGF** US\$ 0,007/kWh, pois será instalado na mesma região. Para os gastos com manutenção será adotado um valor de um valor de US\$ 0,02/kWh, conforme orientação obtida em [48]. Os subsídios disponíveis serão considerados na análise. Para essas condições, as variações dos custos da eletricidade produzida pelo sistema de geração eólico, estão indicados nos gráficos da figura 6.4.

Convém estabelecer uma análise comparativa entre os custos da energia gerada pelo **SGF** e o **SGE**. Analisando-se os gráficos das figuras 6.1 e 6.4, para as mesmas condições verifica-se que o custo da energia gerada pelo **SGE**, fica em torno de 2,5 vezes mais barata que o **SGF**, analisando as curvas de variação dos custos para juros de 4% e sem utilização de subsídio.

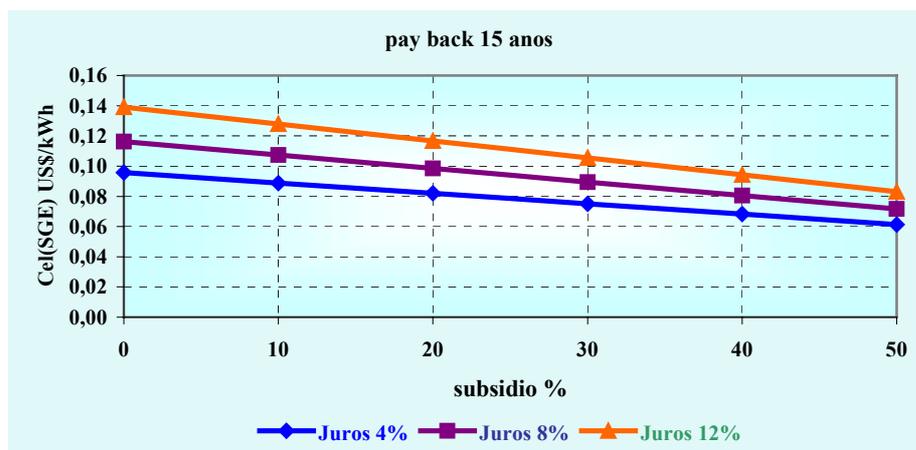


Figura 6.4 - Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGE em função dos subsídios disponíveis.

Calcula-se o benefício anual esperado para este sistema, considerando o custo marginal de expansão adotado anteriormente, US\$ 0,09/kWh. O resultado está ilustrado nos gráficos da figura 6.5. Para este sistema o tempo de amortização é da ordem de 6 a 10 anos dependendo da taxa de juros e do subsídio obtido.

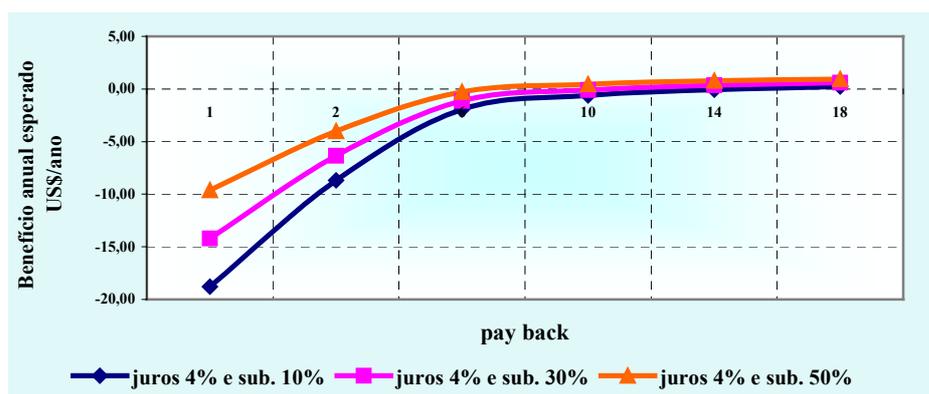


Figura 6.5 – Variação do benefício anual esperado contra o tempo de amortização.

Os gráficos da figura 6.6 ilustram o benefício anual esperado contra o custo marginal de expansão do setor elétrico, no caso foi adotado US\$ 0,09/kWh. Percebe-se que o benefício esperado está bem acima do valor do custo de expansão do setor elétrico, logo a implantação de SGE em comunidades isoladas torna-se economicamente viável.

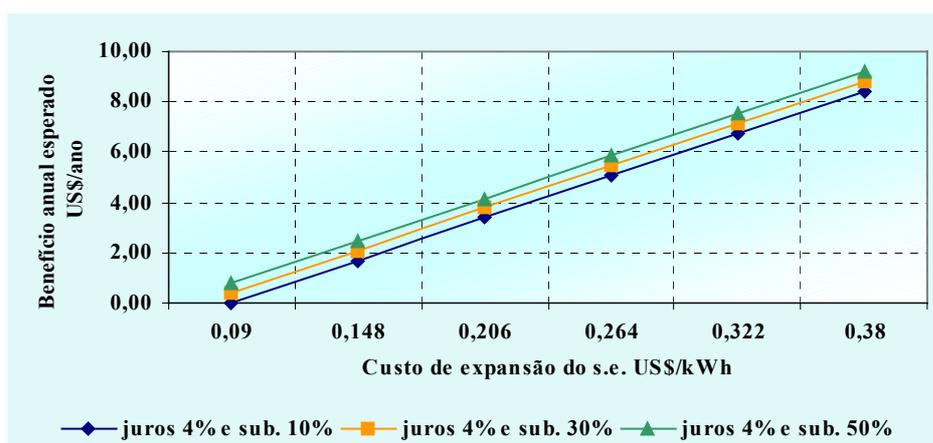


Figura 6.6 – Avaliação do benefício anual esperado para variações no custo marginal de expansão do s.e.

6.4 - ANÁLISE ECONOMICA PARA O SGB

Na análise econômica para o sistema que utiliza na geração o biogás, serão seguidos os mesmos procedimentos para os estudos anteriores, considerando que a equação que calcula o custo da eletricidade será dada por (6.5).

$$C_{el(SGB)} = \left(\frac{I_{SMG} \cdot f}{H_{MG} \cdot E_{MG}} \right) + \frac{C_{comb} \cdot E_{comb}}{E_{MG}} + C_{man} \quad (6.5)$$

Sabe-se que o custo do gás natural é da ordem de US\$ 0,013/kWh, e para o biogás, que é mais barato, estima-se um custo entre 0,002 a 0,006 US\$ /

kWh. Nos cálculos será adotando um valor médio de US\$ 0,004/kWh para o biogás.

Para o custo otimizado de manutenção de acordo com Silveira em [45] o conjunto motor gerador é de US\$ 0,009/kWh. Considerando estes valores obtem-se os gráficos 6.7, 6.8 e 6.9 referentes ao custo da eletricidade produzida e do benefício anual esperado.

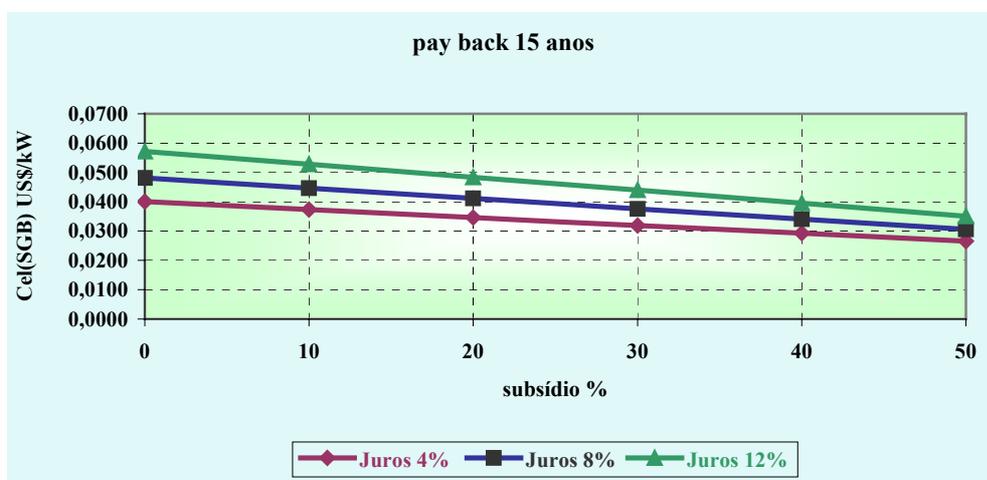


Figura 6.7 – Custo da eletricidade produzida para um sistema de geração a biogás SGB.



6.8 – Variação do benefício anual esperado contra o tempo de amortização para o SGB.

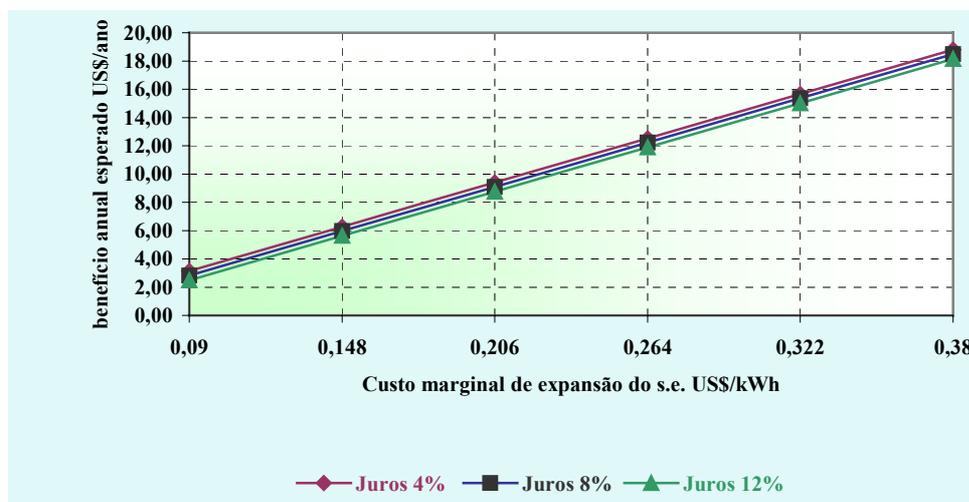


Figura 6.9 – Benefício anual esperado contra o custo marginal de expansão do setor elétrico.

6.5 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS

Estabelecendo a comparação entre os custos da energia gerada por cada sistema, conforme ilustrado nos gráficos da figura 6.10 e 6.11, percebe-se que a energia mais cara é a obtida do sistema fotovoltaico. Inúmeros fatores influenciam estes custos, porém deve-se ressaltar que o custo dos painéis fotovoltaicos é o que mais encarece o produto final. Porém, apesar destes valores elevados ainda existem regiões onde a instalação dos sistemas fotovoltaicos fica economicamente viável, principalmente quando são utilizados os subsídios disponibilizados pelo governo, conforme mostrado no gráfico 6.3.

É importante considerar que apesar dos sistemas fotovoltaicos serem caros existe a expectativa de que em curto prazo de serem produzidos em grande escala, de acordo com trabalho desenvolvido por Aguirre e Silveira [49].

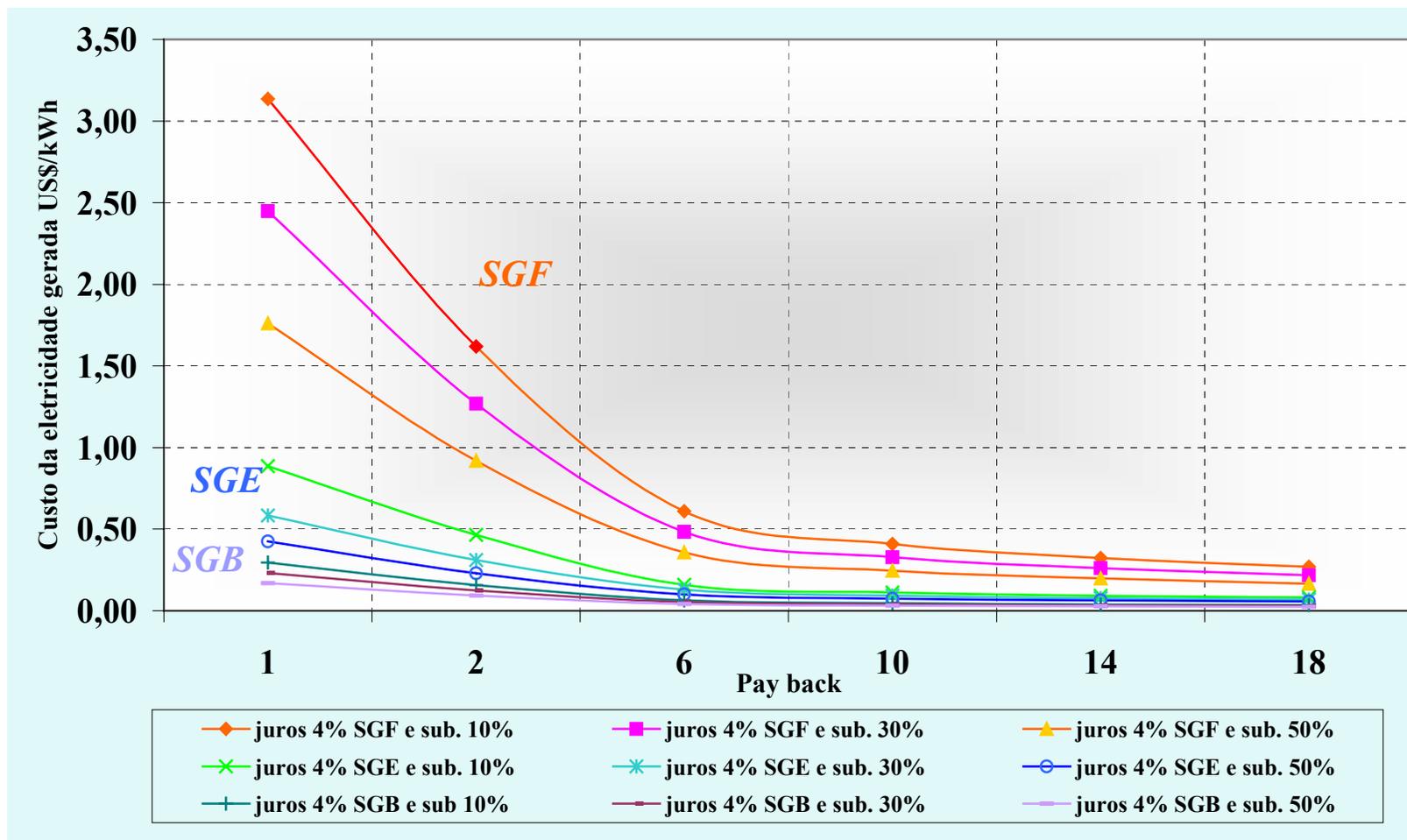


Figura 6.10 – Comparação entre os custos de energia produzida pelas fontes de energia estudadas.

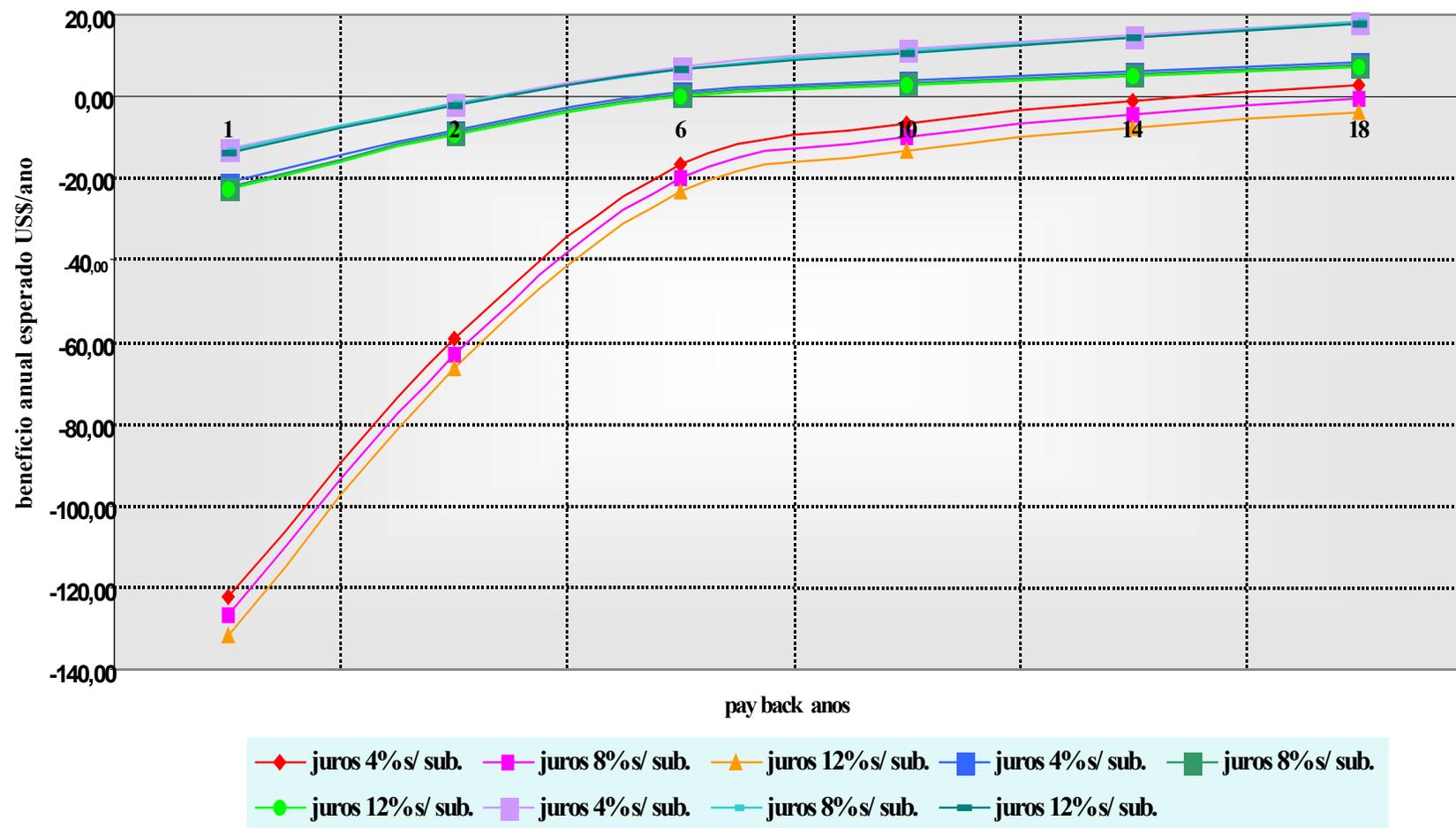


Figura – 6.11 – comparação do benefício anual esperado proporcionado pelas fontes alternativas em estudo.

Capítulo 7: RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES.

7.1 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Serão efetuadas simulações nos sistemas: fotovoltaico, eólico e supervisão inteligente considerando algumas das situações em que os dispositivos de geração estarão sujeitos na operação diária. Serão observadas as ações dos dispositivos de controle analisando os aspectos de busca de potência máxima, tempo de acomodação, tempo de subida, sobre-sinal [44] etc.

O sistema de supervisão inteligente, também, será submetido a algumas condições de variação da potência nas fontes. E através dos resultados numéricos será verificado se ações de controle correspondem às decisões esperadas.

7.2 - SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO (SGV)

Os resultados de simulações para o SGF, serão obtidos a partir do modelo em malha fechada representado figura 7.1. Na ilustração podem ser identificados os blocos: **Modelo cel. PHV** representando o modelo do painel fotovoltaico. As entradas deste bloco são: a corrente de realimentação do sistema, a radiação luminosa, λ_s , representada no por **Lamb.**, o número de unidades fotovoltaicas que compõem o painel sendo: 75 conectadas em paralelo e 5 em série e por fim a temperatura, T , de operação do painel fotovoltaico. O sinal de saída é a tensão nos terminais do painel, V_o .

O modelo do conversor elevador representado por, **Modelo conv. boost**, possui como entradas: a tensão do painel fotovoltaico, V_{cel} , a impedância de carga representada por, R_C , e o ciclo de trabalho, δ .

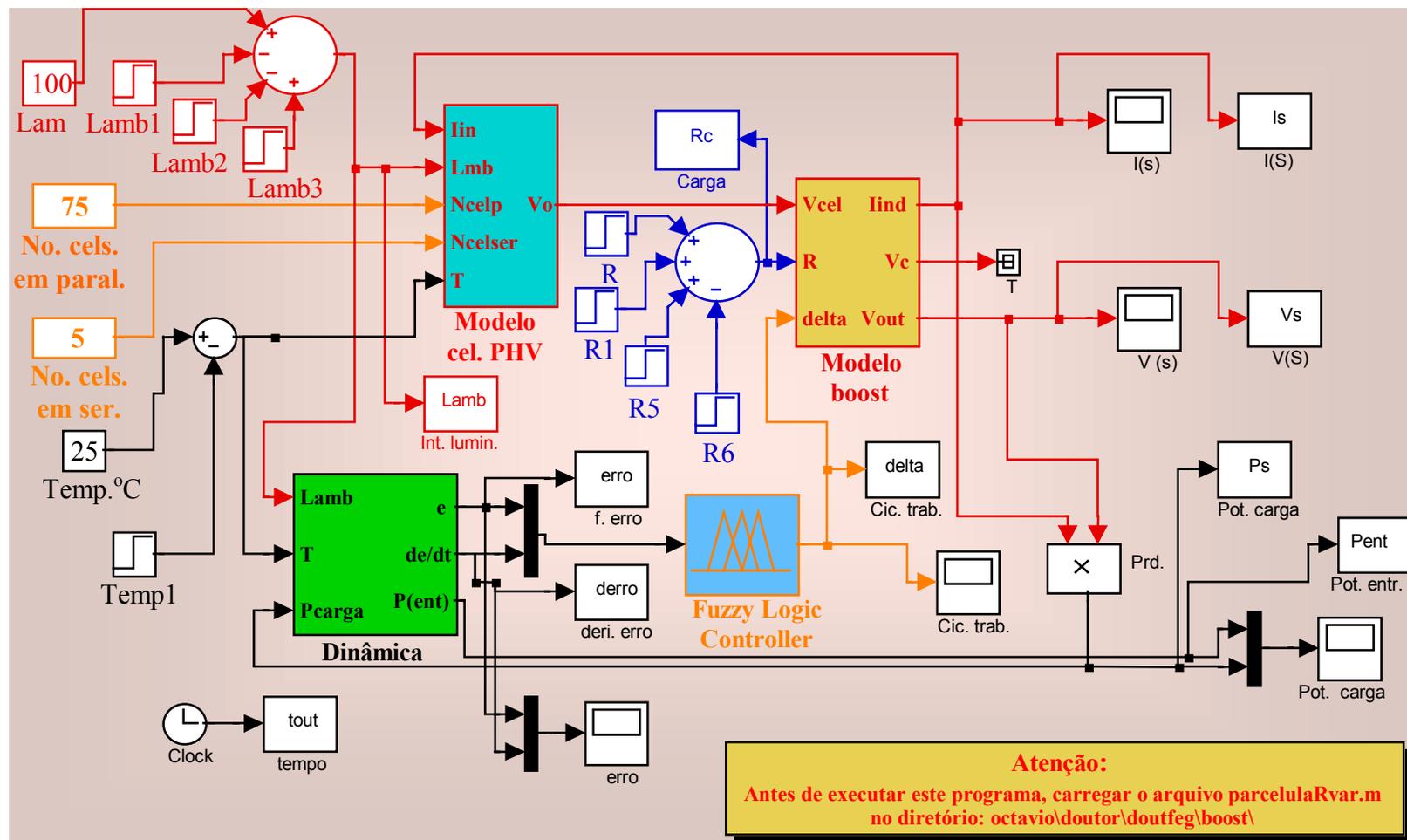


Figura 7.1 – Modelo em malha fechada do Sistema Fotovoltaico.

O bloco de controle fuzzy é representado por, “Fuzzy Logic Controller”, onde as entradas são: o erro de potência (*epot*) e a derivada do erro (*depot*). E a saída é o ciclo de trabalho, δ

7.2.1 - Simulação considerando as alterações da intensidade luminosa no painel fotovoltaico ao longo do dia

Para a simular as variações da radiação luminosa, (λ_s) no painel solar, que ocorreram durante o dia, recorre-se à função degrau unitário. Uma composição dos vários degraus com intensidades diferentes, representarão as variações de λ_s , na entrada do Sistema Fotovoltaico. Esta situação é indicada no gráfico 7.2(B). Serão adotados os mesmos procedimentos para representar as variações da temperatura, e da carga.

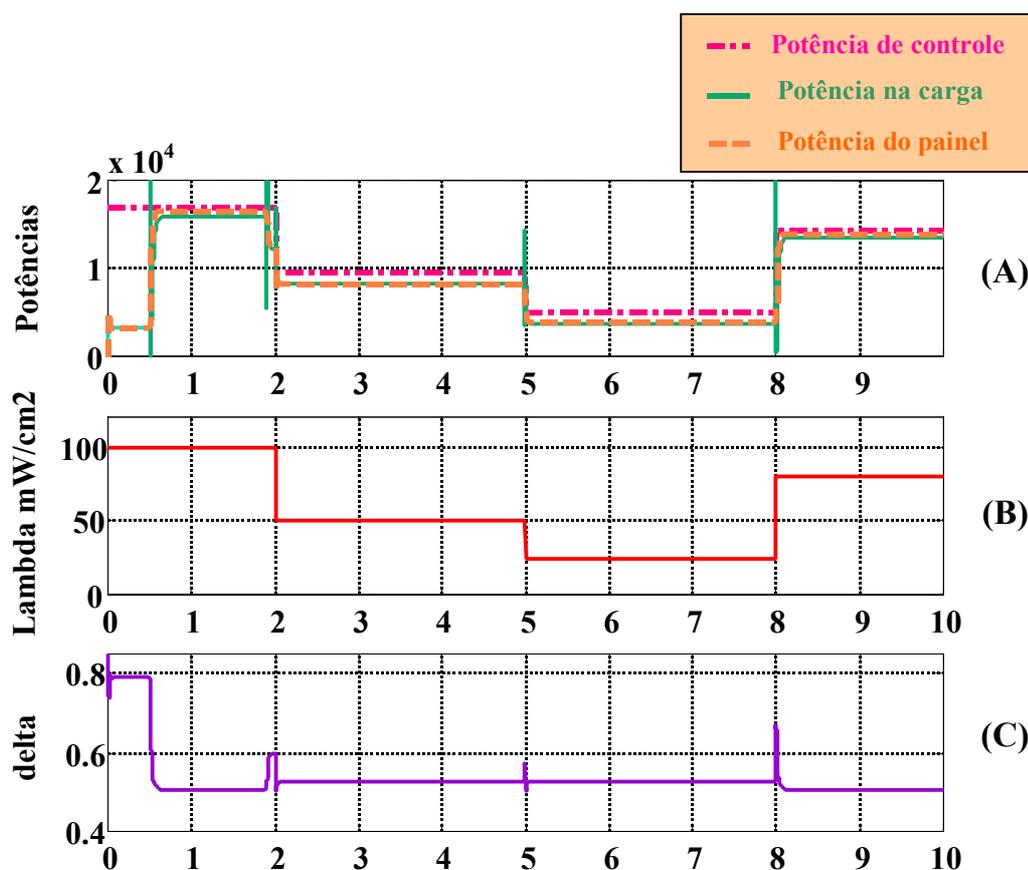


Figura 7.2 – Gráficos das potências na entrada e na carga considerando as variações na radiação luminosa, λ_s .

O primeiro conjunto de resultados está ilustrado nos gráficos da figura 7.2. Nestas simulações foram realizadas variações na radiação luminosa em uma faixa de 100 mW/cm^2 até 25 mW/cm^2 . Esta faixa de valores foi adotada por que os valores de potências máximas correspondentes aos de, λ_s , foram previamente determinadas. Assim sendo, as verificações da operação do sistema de controle fuzzy poderão facilmente ser comprovadas. Nestas simulações a temperatura será mantida constante em $25 \text{ }^\circ\text{C}$, uma vez que os valores de potência máxima foram obtidos nesta condição.

Efetuando-se a análise nos gráficos apresentados na figura 7.2, para cada um dos intervalos, tem-se: entre 0 a 0,5 segundo o Sistema Fotovoltaico está na condição de partida. Nesta situação adota-se a estratégia de conectar uma impedância de valor elevado nos seus terminais, permitindo que os dispositivos de controle encontrem as referências adequadas para iniciar a operação. Após o transitório de partida, tem-se o intervalo entre 0,5 s a 2 s, onde o sistema opera com uma potência de entrada, da ordem de 16,5 kW de pico. Este valor é correspondente a uma radiação luminosa de 100 mW/cm^2 incidindo no painel fotovoltaico. Considerando as perdas elétricas no painel, nas conexões e no conversor elevador, a potência transferida à carga é da ordem de 15,8 kW de pico, conforme indica o gráfico da potência na carga. Verifica-se que as potências permanecem constantes durante todo o intervalo de 0,5 s a 2 s, onde o valor de, λ_s , ficou inalterado. Importante notar que neste intervalo a potência máxima foi transferida à carga para um valor do ciclo de trabalho é igual 0,508.

Outra forma de confirmar-se a ocorrência da máxima transferência de potência, é através do gráfico da variação do ciclo de trabalho contra a potência de saída. Os resultados para esta situação estão ilustrados na figura 7.3. Comparando-se dos gráficos 7.2 (C) e 7.3, percebe-se que a potência consumida pela carga, da ordem de 15,8 kW, também ocorre para o ciclo de trabalho de 0,508.

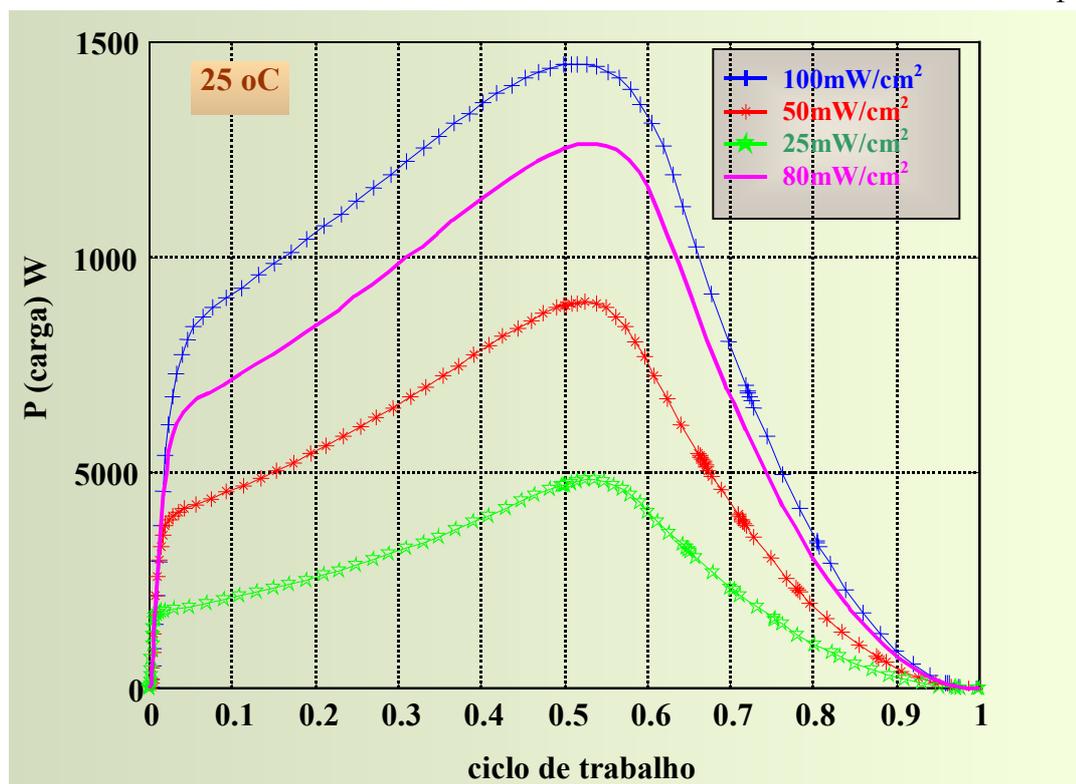


Figura 7.3 – Gráfico do ciclo de trabalho contra a potência de saída, para temperatura constante: $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e λ_s variável.

Os valores das potências máximas de controle correspondentes às radiações luminosas iguais a 50 e 25 mW/cm^2 também foram determinados previamente no capítulo 5, e correspondem às potências máximas 9,56 kW e 5.50kW, respectivamente. Efetuando-se os mesmos procedimentos para analisa-los, verifica-se que eles correspondem exatamente aos valores de ciclo de carga: 0,53 e 0,52.

Tem-se também nos gráficos ilustrados na figura 7.4 o comportamento da corrente, da tensão, da impedância na entrada do conversor elevador e das funções *erro* de potência e sua derivada. Percebe-se que a tensão na carga permanece em torno de 200 V, isto devido a combinação escolhida para os módulos no projeto. Pode-se, no entanto, ajustar a tensão em torno de 220 V ou outra tensão padrão, bastando apenas mudar a configuração dos módulos fotovoltaicos.

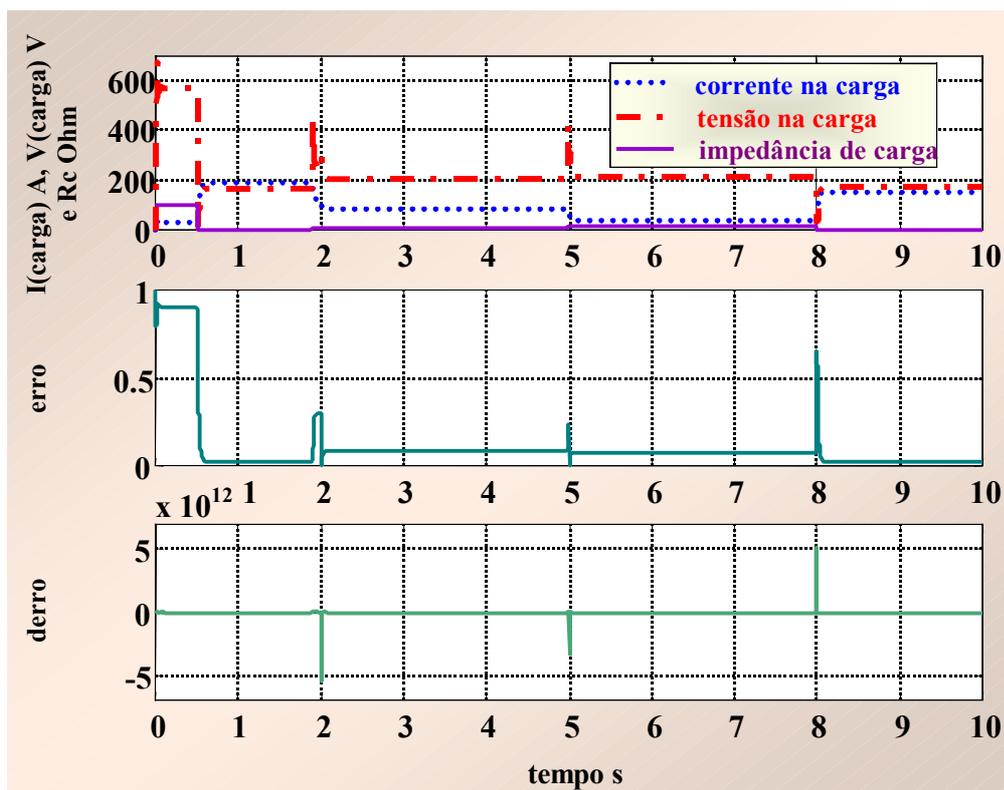


Figura 7.4 - Gráficos da tensão na carga, corrente na carga, impedância de entrada do conversor. Da função erro e sua derivada.

O próximo passo é analisar o tempo de acomodação do controlador fuzzy do SGF. Recorrendo-se aos gráficos apresentados na figura 7.5, no instante 8 segundos a radiação luminosa passou de 25 mW/cm^2 para 80 mW/cm^2 . E a potência na carga saiu de 3800 W para 13500 W . A curva de potência na saída foi ampliada no instante da transição, permitindo uma visualização mais clara do ocorrido.

Definindo os critérios a serem adotados para análise do tempo de acomodação, tempo de subida e sobre-sinal; e por tratar-se de um dispositivo de controle, serão utilizados os mesmos que são aplicados para a análise de sistemas que utilizam o controle convencional. No gráfico da figura 7.5 (A) está definido cada um dos parâmetros a serem analisados, bem como se estabelecem valores aceitáveis pela teoria de controle [44]. Lembrando sempre que os dispositivos de controle aplicados em sistemas elétricos, devem ter um

tempo de atuação de no máximo igual a algumas dezenas de milissegundos [13], [39].

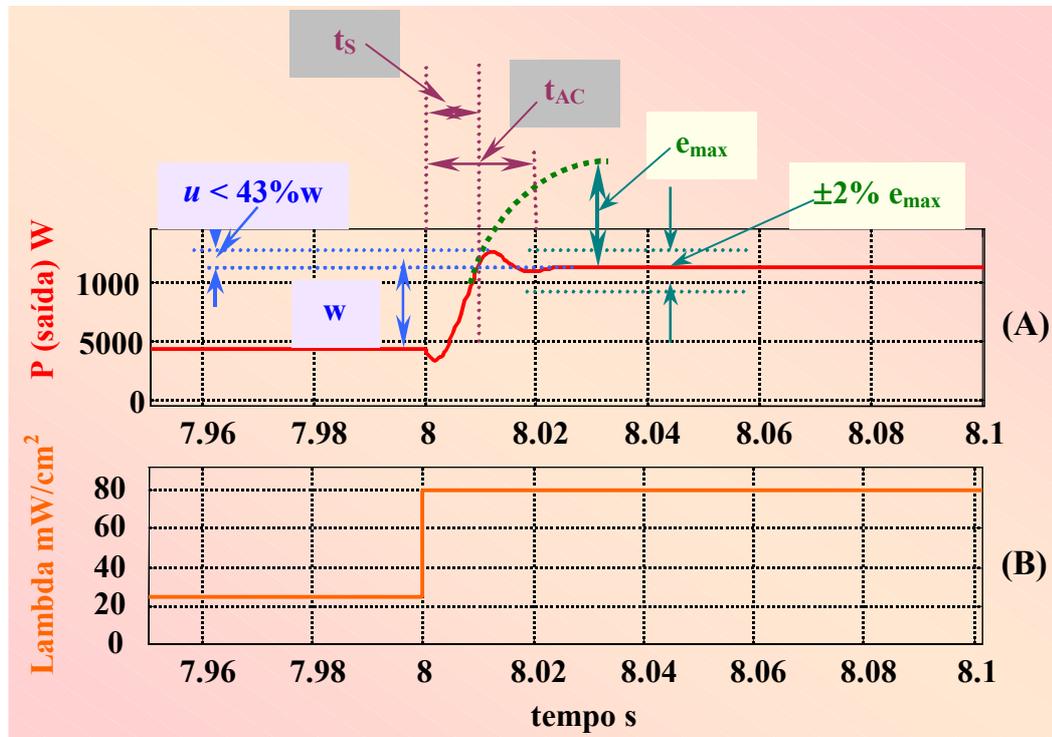


Figura 7.5 – Tempo de resposta do controlador fuzzy para uma transição da radiação luminosa de 25 para 80 mW/cm².

Estabelecidos os critérios comparativos, tem-se para o tempo de subida (t_s) do valor da potência de saída, 10 ms. Em termos de sistemas elétricos, este valor é considerado dentro dos padrões definidos para transitórios elétricos. Ressaltando que os tempos das ocorrências em sistemas elétricos são caracterizados por valores muito baixos menores que dezenas de milissegundos. O tempo de acomodação também é medido no gráfico da figura 7.5 (A), no qual obtem-se um valor de aproximadamente 22 ms. Na teoria de controle a avaliação de, t_{AC} , deve ser feita em conjunto com o valor do primeiro sobre-sinal, u , o produto entre eles, resulta em um valor aproximado da área desvio-tempo. Quanto menor for o resultado desta área mais eficiente será o controle.

Os valores permitidos para o sobre-sinal devem obedecer a relação: $u < (43\%) w$ onde w corresponde a altura do degrau definido entre as transições de potência. No caso em análise o valor do sobre-sinal vale 1270 W e a altura do degrau de transição 6500 W e a relação entre esses parâmetros vale 19,5%, que é menor que o valor máximo permitido.

Obtidos os valores de sobre-sinal e do tempo de acomodação obtém-se um produto abaixo dos valores pré-determinados em relação aos definidos para o controle convencional. Portanto os valores de sobre-sinal e tempo de acomodação atendem os critérios estabelecidos para a teoria de controle.

7.2.2 - Simulação considerando as alterações na temperatura do painel fotovoltaico ao longo do dia

Conforme discutido no item 3.5.2, no capítulo 3, os painéis fotovoltaicos são afetados pela temperatura. Serão efetuadas simulações envolvendo as variações na temperatura que ocorrem diariamente nos painéis fotovoltaicos. Será também utilizado o modelo apresentado na figura 7.1, considerando duas situações de radiação luminosa, 100 mW/cm² e 50 mW/cm². Para a primeira situação as temperaturas serão de 25 °C, 45 °C e 80 °C. Para a segunda situação, onde λ_s vale 50 mW/cm², a temperatura baixa para 40 °C. Serão analisadas as variações nas potências envolvidas, na tensão, corrente e nas ações definidas pelo controlador fuzzy.

Na figura 7.6, tem-se os resultados das simulações, destacando as variações nas potências, na temperatura e na radiação luminosa. No intervalo 0,5 a 2,5 segundos a temperatura foi mantida constante em 25 °C obtendo-se os valores: para a potência no painel fotovoltaico 16,5 kW de pico e para a carga 15,8 kW de pico.

No intervalo, 2,5 a 5 segundos, a temperatura foi elevada para 45 °C, mantido o valor de λ_s , constante. Conforme estabelecido no estudo dos painéis, no capítulo 3, a temperatura afeta o desempenho dos painéis fotovoltaicos diminuindo a potência gerada. Neste caso as potências

envolvidas valem 15,5 kW e 14,86 kW respectivamente. No intervalo subsequente as potências continuaram diminuindo atingindo os valores: 14,07 kW e 13,13 kW. Deve-se notar que durante as alterações na temperatura, também se observam sensíveis variações no ciclo de trabalho, ajustando sempre o SGF, de forma a operar no ponto de máxima potência.

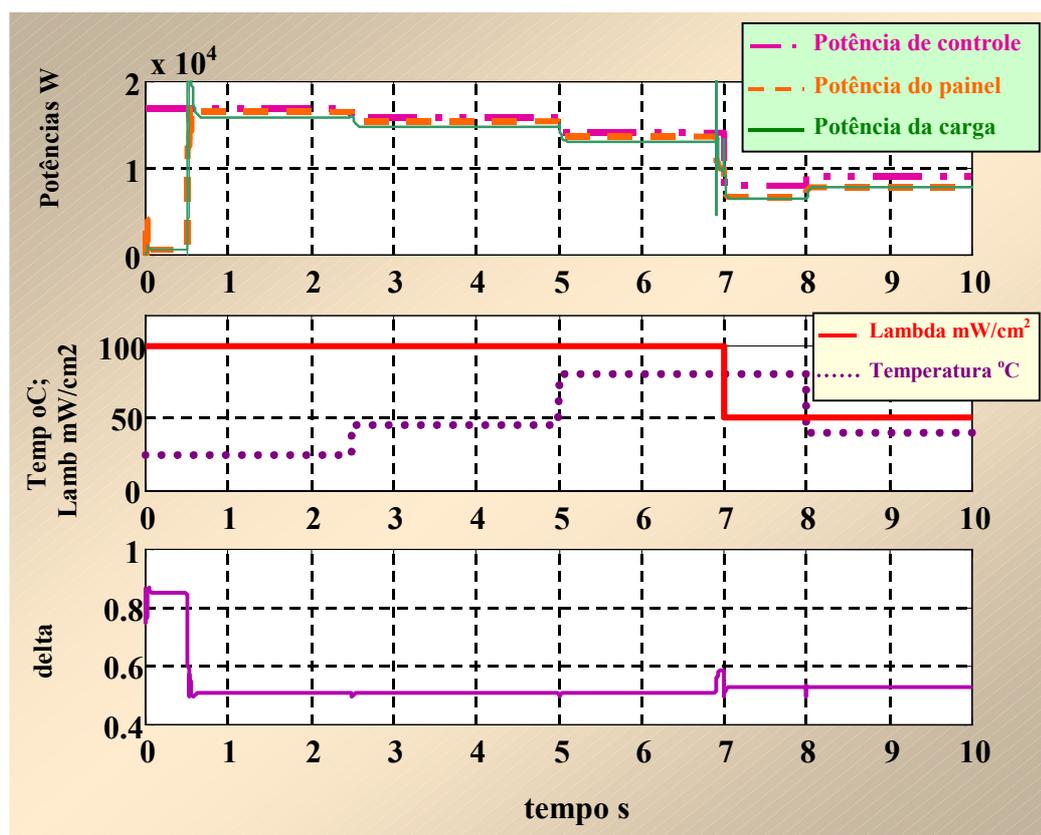


Figura 7.6 - Gráficos das potências na entrada e na carga considerando as variações na temperatura e radiação luminosa, λ_s .

A partir do instante 7 segundos a radiação luminosa é diminuída para 50 mW/cm^2 e no instante 8 segundos a temperatura baixou para 40 °C. Em ambas as ações são verificadas alterações nas potências; entre 7 a 8 segundos elas são diminuídas devido à redução de λ_s . E a partir de 8 segundos as potências são aumentadas devido a uma diminuição na temperatura.

No gráfico da figura 7.7, tem-se as variações da corrente, tensão e as variações do erro de potência e a derivada.

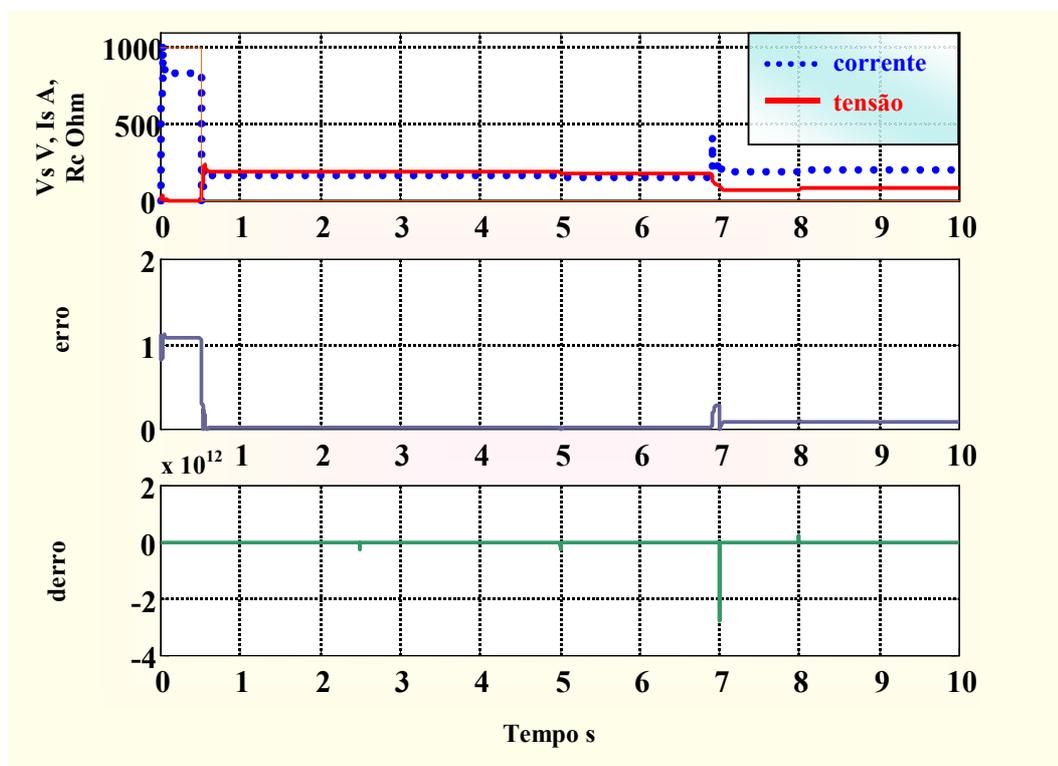


Figura 7.7 - Gráficos da corrente, tensão e as variações no erro da potência e a derivada. para as variações na temperatura consideradas.

7.3 - SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICO (SGE)

Procedendo de forma análoga ao estabelecido nas simulações anteriores, serão aplicados dois degraus para avaliação do desempenho do sistema, e os resultados analisados de acordo com os mesmos critérios, estabelecidos na avaliação do desempenho do **SGF**.

Os resultados de simulações a serão obtidos a partir do modelo em malha fechada desenvolvido no Simulink. O diagrama de blocos do **SGE** está indicado na figura 7.8. Será aplicada a função degrau para representar as variações na velocidade do vento na região. Serão observadas as variações nas potências envolvidas, na corrente e tensão, bem como nas variáveis de controle.

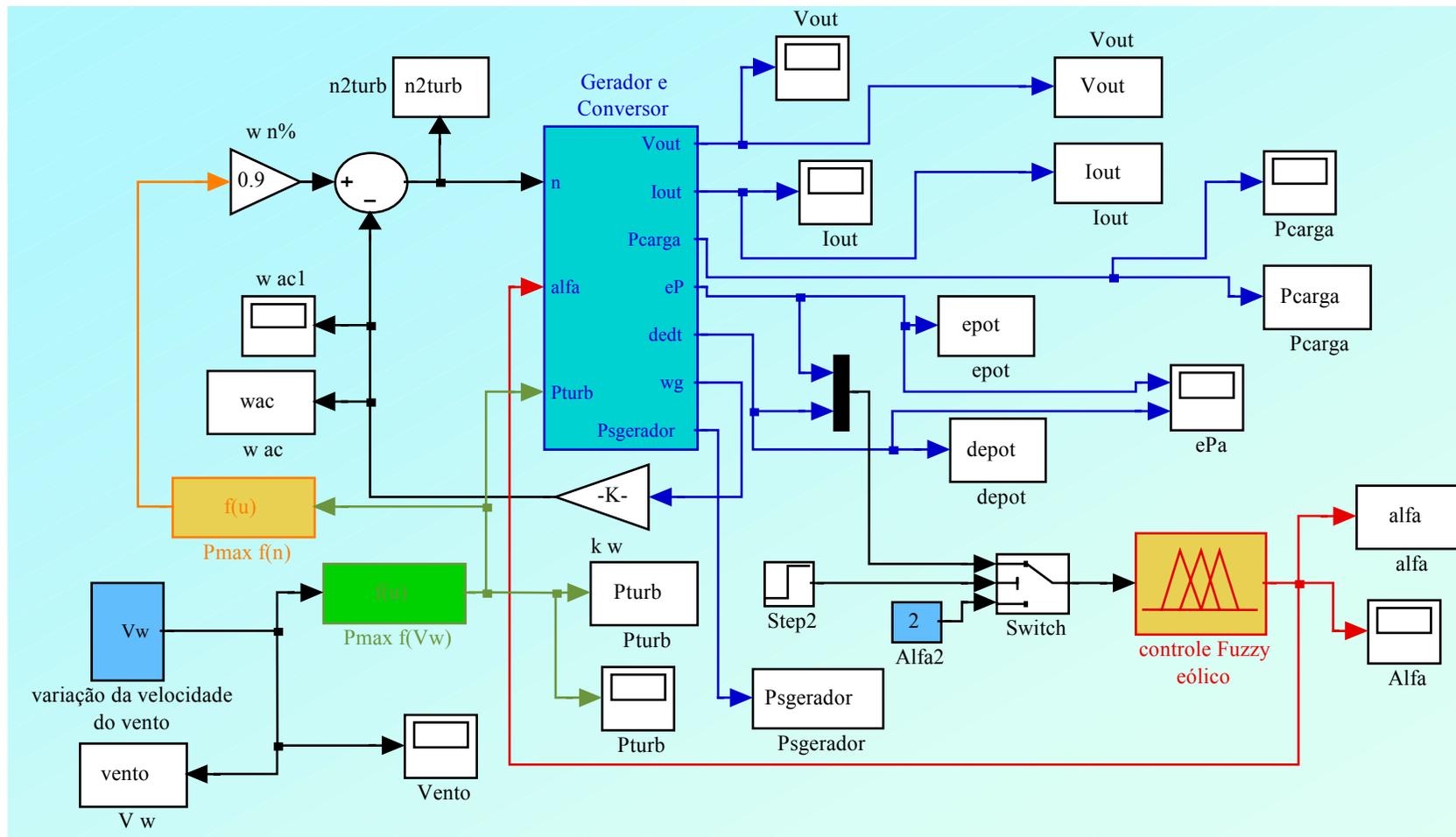


Figura 7.8 – Modelo em malha fechada do Sistema Eólico.

No modelo do SGE, observa-se o bloco denominado por “Gerador e Conversor” onde estão os modelos do gerador de indução e do conversor retificador desenvolvidos nos capítulo 5. O bloco de controle é denominado por “controle fuzzy eólico”, onde se identifica em sua entrada os blocos, “*epot*” e “*depot*”, onde estão as rotinas computacionais das funções erro de potência e a respectiva derivada. A saída do controlador fuzzy é o ângulo de disparo da ponte. Existem também no modelo dois outros blocos que devem ser explicados, esses blocos contém as funções polinomiais determinadas também no capítulo 5, responsáveis pela referência da máxima potência sempre que houver alterações na velocidade do vento. Assim o bloco denominado por, “ $P_{\max}f(V_w)$ ”, define a potência máxima para cada velocidade do vento. Lembrando que estas variações afetam a rotação e a potência da turbina eólica o bloco denominado por, “ $P_{\max}f(n)$ ”, da referência para a malha de rotação em que ocorre a potência máxima.

7.3.1 - Simulação considerando as alterações na velocidade do vento na turbina eólica ao longo do dia

Foram aplicados dois degraus de intensidade 11 m/s, 9 m/s, aumentando-se para 10 m/s, representando as variações no vento. Neste caso, com como não foram consideradas as alterações na impedância da carga no modelo a cada variação na potência, optou-se por variações de pequena intensidade na velocidade do vento. Desta forma não haverá grandes diferenças nas potências medidas. Os resultados obtidos estão ilustrados nos gráficos da figura 7.9.

Nos gráficos da figura 7.9, mostram os resultados da simulação, no instante de 0 a 0,1 segundo onde a velocidade do vento é de 11 m/s a potência de controle vale 13,67 kW, correspondendo à potência máxima determinada pelo controle. A potência transferida à carga foi de 12,1 kW, lembrando que esta diferença de potência ocorre devido às perdas no sistema. Os gráficos da variação na velocidade do vento e do ângulo alfa estão ilustrados nas figuras

7.9(B) e 7.9(C) respectivamente. No instante 0,5 segundo houve alteração na velocidade do vento para 9 m/s. Diminuições na velocidade do vento significa que há uma diminuição nos valores de potência disponível. Assim o dispositivo de controle reage a essas variações de tal forma a seguir o novo ponto de potência máxima. Para o caso desta velocidade em particular, obtem-se o valor de 6,663 kW para a potência máxima. O polinômio determinado no capítulo 5 e representado na equação (5.14), é que define os valores de máxima potência a cada velocidade do vento. Este novo valor de potência é transmitido ao gerador que disponibiliza em sua saída uma potência efetiva de 5,8 kW. Esta potência é levada até a carga através da ponte conversora, que abatida à parcela das perdas entrega a carga uma potência de 4,8 kW.

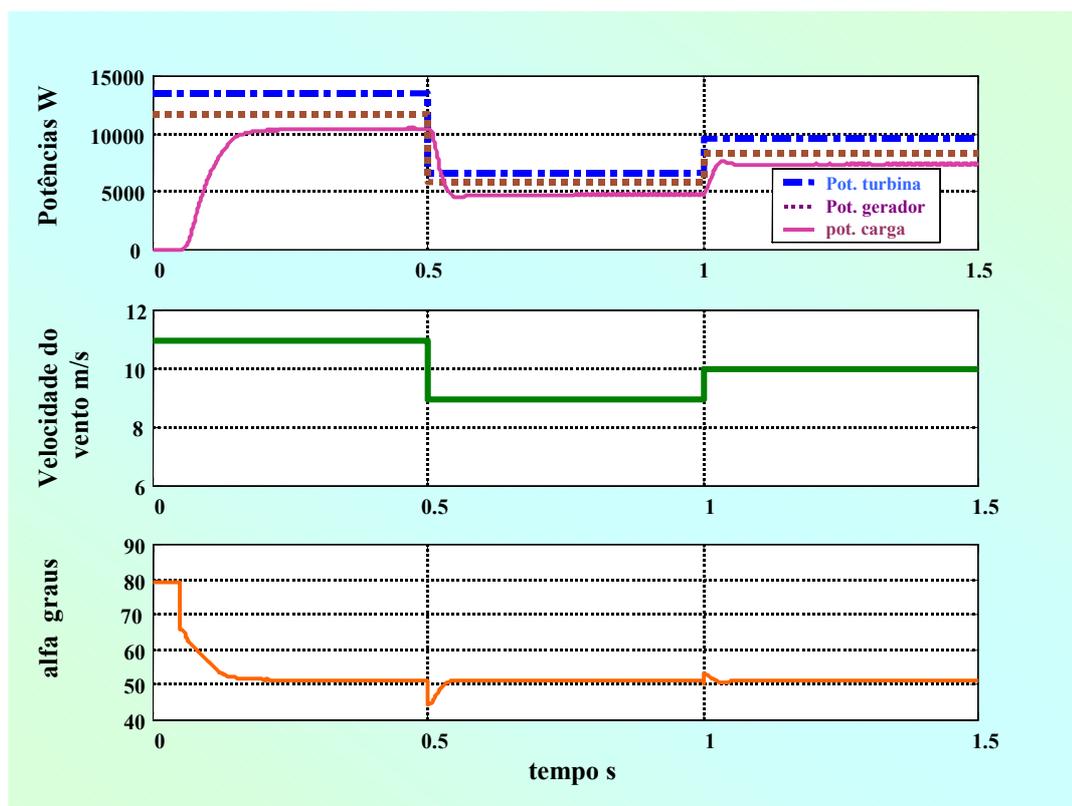


Figura 7.9 – Gráficos das potências na carga e na turbina, e da tensão e corrente para variações na velocidade do vento.

Resta efetuar-se a análise dos tempos em que o controle gasta para seguir esse ponto. Neste caso mede-se um tempo de acomodação em torno de 0,08 segundo, tempo satisfatório para ocorrência de transitórios neste sistema.

Nos gráficos da figura 7.10, tem-se o aspecto da tensão e da corrente na carga e na saída da ponte conversora. Percebe-se que nos mesmos intervalos onde houve a variação na velocidade do vento, os valores da tensão e da corrente também acompanharam as mudanças. Os valores encontrados para regime permanente são tais que resultam no melhor ponto de operação do sistema.

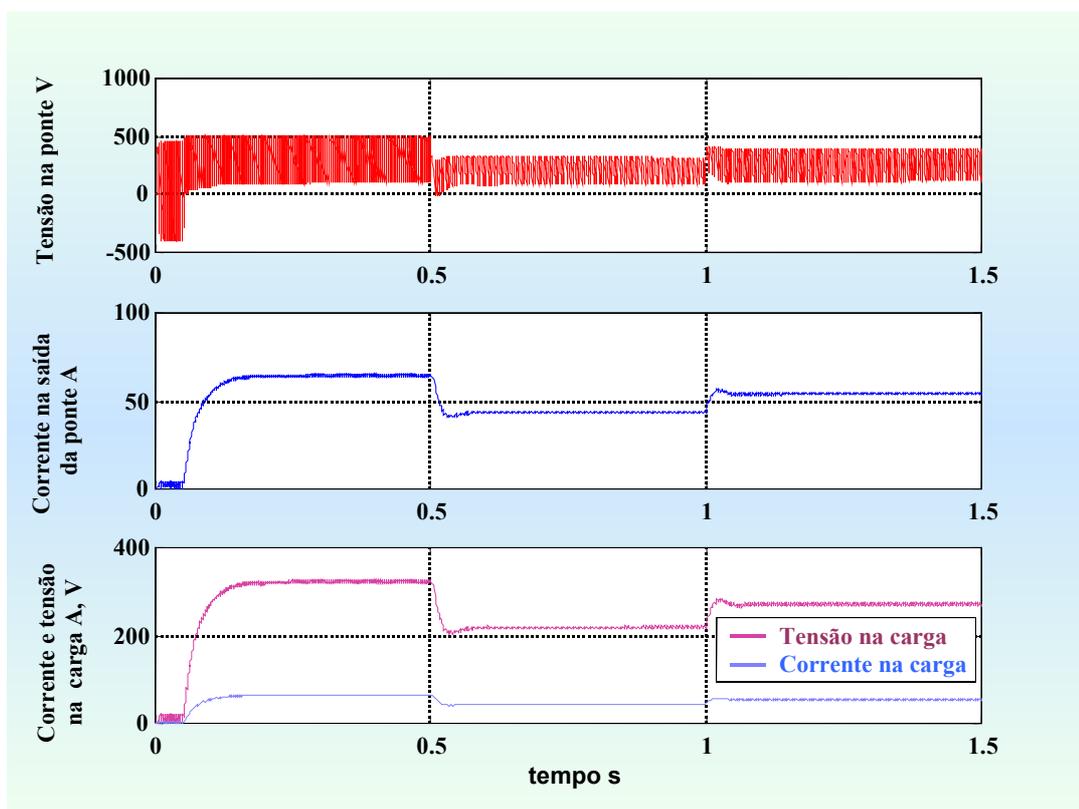


Figura 7.10 – Gráficos do comportamento da tensão, corrente na carga e na saída da ponte.

Para efetuar-se a comprovação do formato de onda na saída da ponte retificadora, abriu-se uma janela entre nos intervalos de tempo de 0,5 segundo, onde ocorreu a perturbação. Verifica-se na figura 7.11 o aspecto, em detalhes,

do formato da onda de tensão e corrente nos respectivos instantes. Percebe-se que a ponte necessitou de aproximadamente cinco pulsos para levar o sistema ao regime permanente.

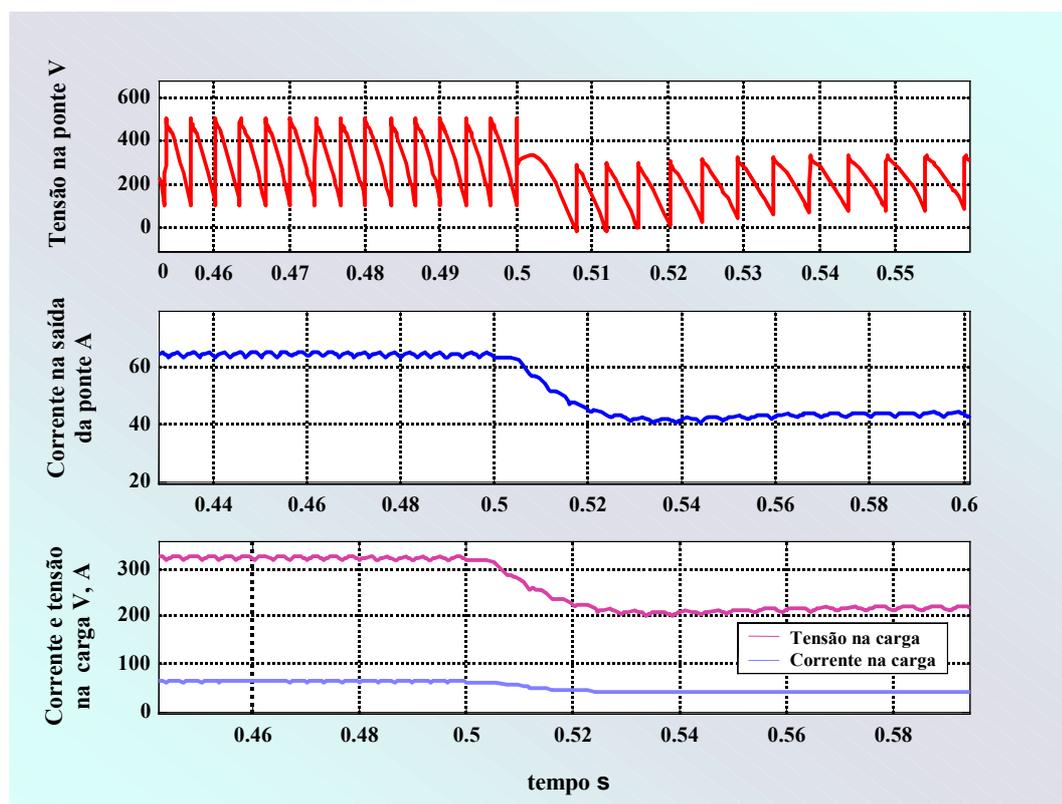


Figura 7.11 – Detalhe da variação da tensão e corrente na ponte durante a transição da velocidade do vento.

Também é importante verificar-se a ação das variáveis de controle de potência, erro e derivada do erro. Mostra-se também a variação da rotação na saída do conjunto turbina/caixa de engrenagens/gerador. Além da variação da frequência angular do sistema. O comportamento dessas ondas está ilustrado na figura 7.12.

Instantes antes de 0,5 segundo, o erro estava constante, ao sofrer a perturbação a potência disponível na entrada da fonte diminuiu, resultando em variações do erro. A ação do bloco derivada do erro reage para definir qual a estratégia a ser seguida pelo controle fuzzy. Após esta definição o controle

fuzzy define se o ângulo de disparo da ponte deva aumentar ou diminuir. Analisando-se a figura 7.9, percebe-se que houve uma sensível variação no valor do ângulo alfa.

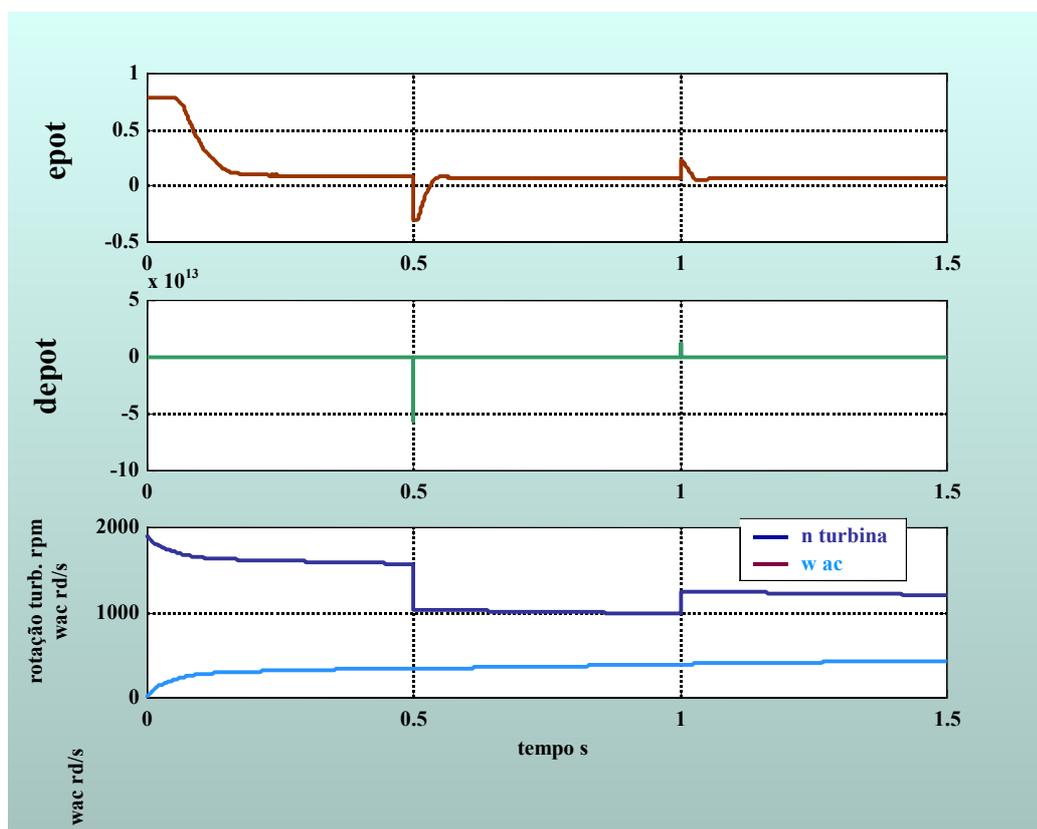


Figura 7.12 – Comportamento do erro e da derivada do erro de potência, rotação e frequência angular.

Verifica-se também, na figura 7.12 que a rotação acompanha as variações na velocidade do vento, e devido a maior inércia do conjunto mecânico necessita de tempo maior para atingir o regime permanente.

7.4 - RESULTADOS DA AÇÃO DO SISTEMA INTELIGENTE

Em um sistema fuzzy o número de regras depende do número de funções de pertinência e do número de variáveis de entrada e saída. Um sistema que utiliza 3 funções de pertinência e possui quatro entradas e duas saídas de controle, inúmeras são as regras que podem ser desenvolvidas para efetuar-se

o controle do sistema. Por outro lado deve-se também observar que nem todas as regras a serem escritas deverão ser obrigatoriamente utilizadas, a técnica da lógica fuzzy permite a exclusão das regras não utilizadas.

Para avaliar o desempenho do controle inteligente desenvolvido neste trabalho, foi observado somente um grupo de dez regras que controlam as principais situações do sistema. A figura 7.13 foi obtida do processo de visualização gráfica das regras no MATLAB e ilustra a situação das entradas e saídas e a ação de cada uma das regras em um determinado instante.

Para efetuar-se a simulação do sistema de controle inteligente serão introduzidos sinais nas entradas do sistema simulando as variações na radiação solar, na velocidade do vento, carga da bateria e consumo das cargas. Essas condições serão representadas pela função degrau, que serão aplicadas nas entradas do sistema de supervisão.

Tem-se na figura 7.14 o aspecto do comportamento das entradas e saídas do sistema de supervisão. Considerando o eixo horizontal como sendo as horas do dia, verifica-se que depôs das 10 horas da manhã, o sistema entra em atividades variando as fontes de energia. Lembrando as ações do controlador fuzzy, modeladas no capítulo 5, tem-se:

- Para a fonte solar e eólica:	0 – 0,75	Baixa	
	0,5 – 1	Normal	
	0,75 – 1,5	Alta	
- Para a Carga:	0 – 0,75	Baixa	
	0,5 – 1	Normal	
	0,75 – 1,5	Alta	
- Para o Banco de Baterias:	0 – 1,1	Carga baixa CB	
	1 – 1,2	Carga normal CN	
	1,1 – 1,5	Carga alta CA	

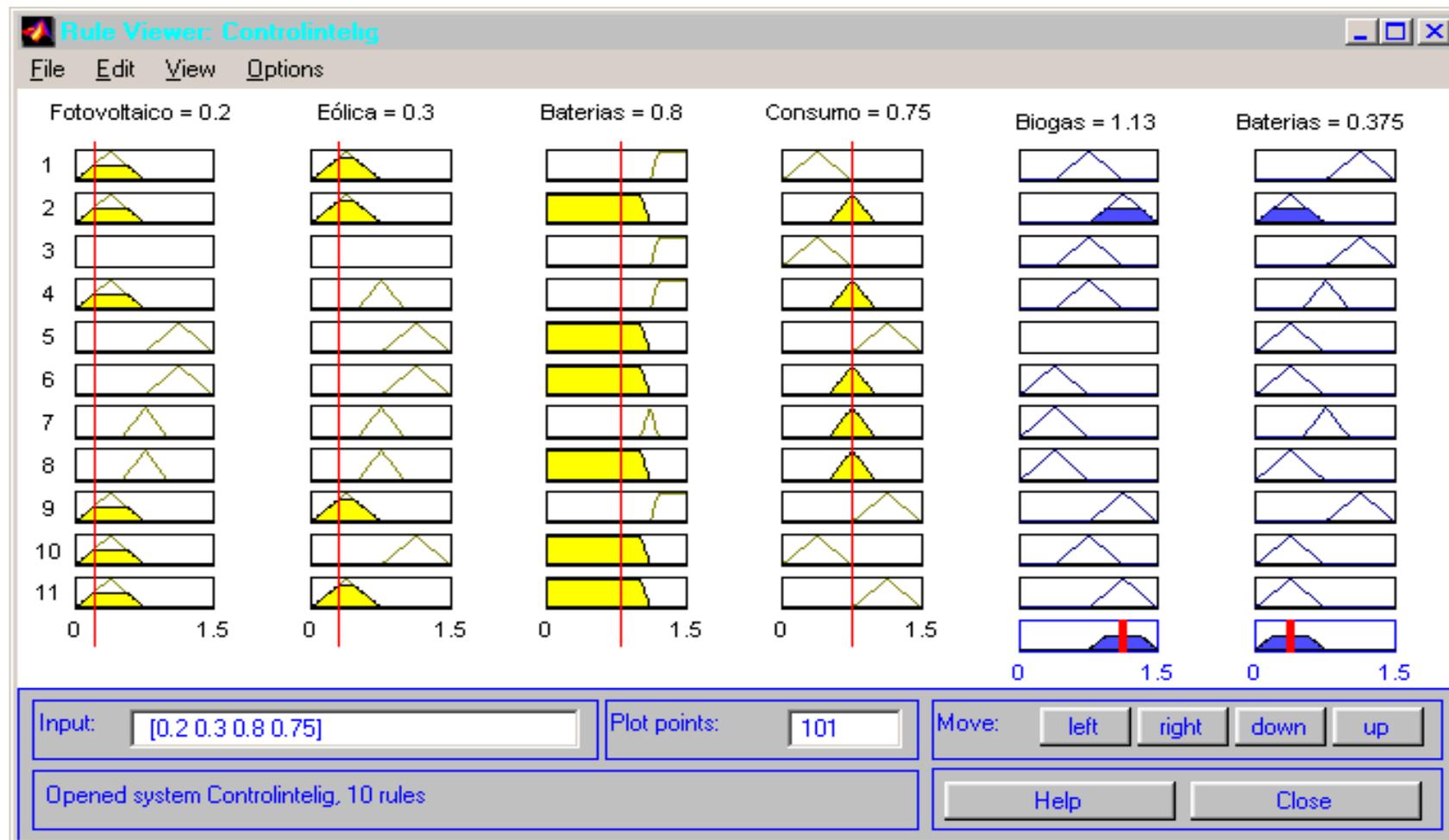


Figura 7.13 – Mapa de regras do MATLAB/Fuzzy para uma situação operacional.

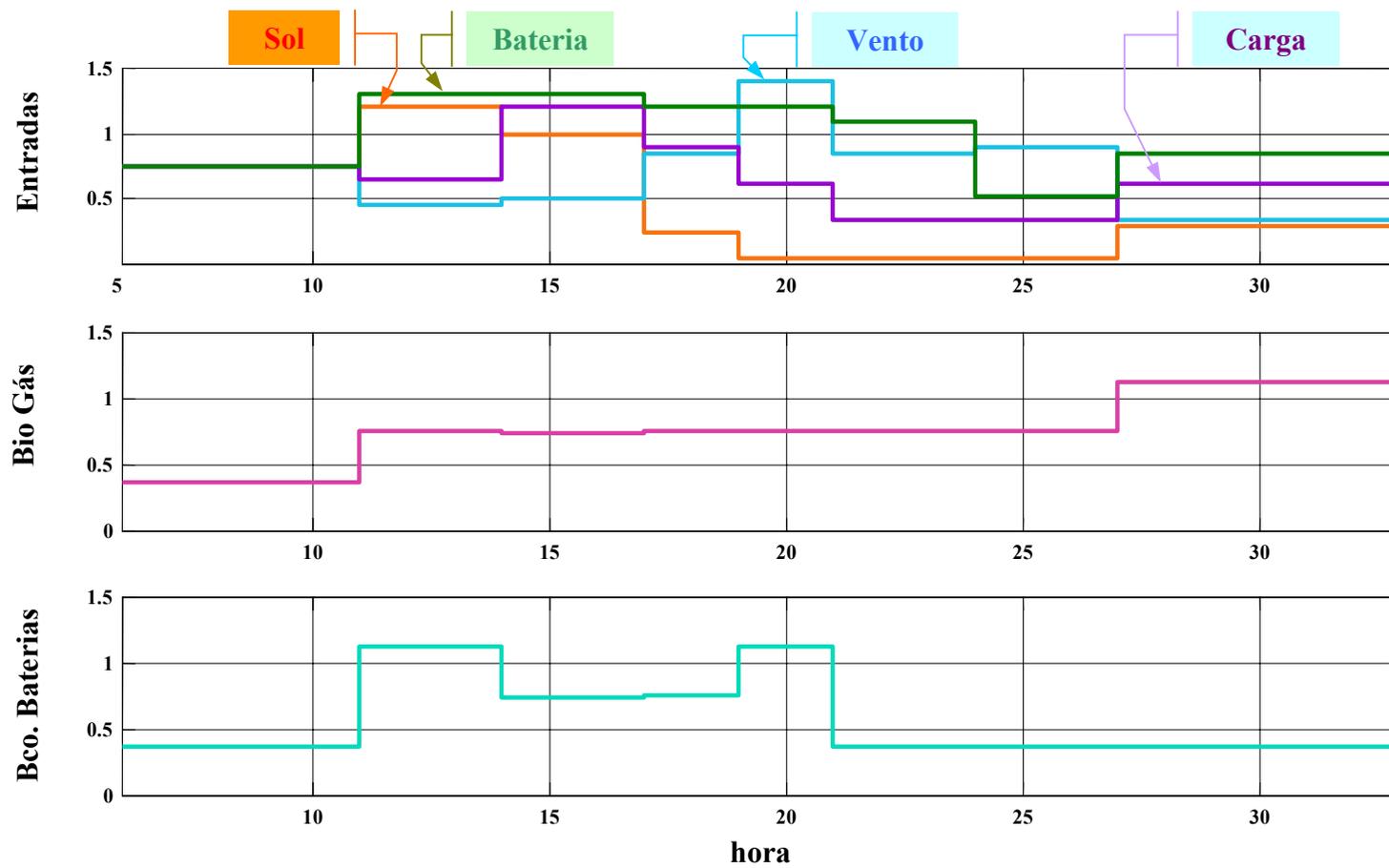


Figura 7.14 – Resultados de simulação do Sistema de Supervisão.

Para as saídas que são o biogás e o banco de baterias tem-se:

- Biogás	0 – 0,75	desligado D
	0,375 – 1,13	flutuando F
	0,75 – 1,5	gerando G
- Banco de baterias	0 – 0,75	carregando BBC
	0,5 – 1	flutuando BBF
	0,75 – 1,5	gerando BBG

Utilizando estas ações de controle efetua-se a análise dos resultados de simulações apresentados na figura 7.14.

No intervalo entre 11 até 14 horas tem-se: a carga em nível médio e a fonte solar gerando. Existe pouco vento e não se tem energia suficiente para suprir as cargas. Nota-se que o banco de baterias é acionado (nível alto na saída), e o gerador do biogás flutua no sistema.

Entre 14 horas e 17 horas tem-se um pequeno aumento na energia eólica. O consumo aumentou, e a fonte fotovoltaica diminuiu. A ação é levar o banco de baterias a completar a sua carga. E o biogás entra em flutuação.

A partir das 21 horas, a fonte solar deixou de gerar, mas houve aumento no vento. Como o consumo está baixo somente esta fonte é necessária para suprir as cargas. Ao mesmo tempo em que carrega o banco de baterias que atingiu o estado de carga baixa.

Depois de decorridas 27 horas devido à condição de pouco vento e pouco sol, e carga da bateria insuficiente, o sistema a biogás assume o suprimento da carga.

7.5 - CONCLUSÕES

Após os estudos, modelagem e simulações do sistema proposto, verifica-se que os resultados foram mais que satisfatórios. Assim atingiu-se o

objetivo do trabalho de propor um sistema de controle fuzzy aplicado a sistemas híbridos de geração que utiliza fontes alternativas. Deve-se no entanto ressaltar que a aplicação da lógica fuzzy, publicadas em vários trabalhos, efetuam o controle individual das fontes de energia, geralmente eólica e fotovoltaica. Neste trabalho a lógica fuzzy é aplicada a três fontes de energia, e eventualmente uma quarta fonte quando o banco de baterias é acionado.

Apesar de ter-se utilizado vários modelos conhecidos no meio acadêmico e científico, como é o caso das células fotovoltaicas, cabe o mérito do processo de adaptação desses modelos para serem utilizados em sistemas híbridos controlados com lógica fuzzy.

Outro aspecto a ser considerado, é quanto à utilização do gerador assíncrono, não só para geração eólica, mas também para geração com biogás. Sabendo-se que, apesar desses geradores serem utilizados em sistemas eólicos, e, que as suas técnicas de controle são pouco usuais. Introduz-se neste trabalho, uma nova técnica que através de chaves eletrônicas efetua o chaveamento do banco de capacitores, responsáveis pelo sistema de excitação desses geradores. Tendo como vantagem a ausência de transitórios, a rapidez nos processos de excitação, além de preservarem as unidades capacitivas de sobre-tensões e sobre-correntes.

Quanto ao aspecto econômico, utilizando técnicas desenvolvidas por Silveira [45], verificou-se que os sistemas fotovoltaicos ainda são inviáveis para serem utilizados em sistemas de geração no meio rural, sem que haja subsídios governamentais envolvidos. Por outro lado, os sistemas a biogás e eólicos, são mais vantajosos economicamente. Principalmente os sistemas que utilizam o biogás, o qual é obtido através de técnicas que podem ser aplicadas em qualquer sítio, fazenda, agroindústria etc. E ainda, se acoplado ao acionamento mecânico que queima o biogás, utilizar-se o gerador assíncrono, os custos certamente atingirão patamares extremamente baratos.

Por fim tem-se também a utilização de um sistema de supervisão inteligente, que também incorpora a lógica fuzzy. E através desta atribui-se ao sistema os meios necessários para efetue os processos de medição, desligamentos, proteção, geração de relatórios etc. E, assim realizando as funções básicas de um sistema de supervisão.

7.6 - SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- 1 – Realizar a montagem do projeto, para uma pequena potência e, obter resultados práticos e comparar com os resultados de simulação obtidos neste trabalho;
- 2 – Efetuar o teste de robustez do sistema, procedendo a mudança dos parâmetros de tal forma a verificar a estabilidade;
- 3 – Desenvolver um estudo para utilização do sistema operando no modo interligado ao sistema elétrico de geração;
- 4 – Efetuar um estudo técnico/econômico para utilizar o sistema para gerar energia em municípios litorâneos, de tal forma a complementar o consumo em épocas de temporada de férias;

Referências bibliográficas

- [1] J. C. Andréas, Energy-Efficient Electric Motors – Selection and application, Marcel Dekker, inc, New York, 1982, pp. 58 – 70.
- [2] Publicações da ANEEL disponíveis na Biblioteca Virtual. <http://www.anel.gov.br>.
- [3] Documentos PRODEEM. <http://www.elektrobras.gov.br>. - Programa Luz no Campo.
- [4] Miroslav Begovic et all. – 2001: An energy odyssey – IEEE/Proceedings, vol. 89, pp 1731-1743, December 2001.
- [5] Luiz Henrique Nobre Avelar, - “Valorização dos Subprodutos Agroindustriais visando a Co-Geração e a Redução da Poluição Ambiental” – Tese de Doutorado apresentada à FEG/UNESP, Guaratinguetá, julho, 2001.
- [6] Paulo F. Ribeiro, Brian K. Johnson, Mariesa L. Crow, Aysen Arsoy and Yilu Liu – Energy storage systems for advanced power applications – IEEE/Proceedings, vol. 89, pp 1744-1756, December 2001. Miroslav Begovic et all. – 2001: An energy odyssey – IEEE/Proceedings, vol. 89, pp 1731-1743, December 2001.
- [7] Fábio M. Silva, Jorge de L. Junior, - Biogás produção e utilização – gráfica FCAV-UNESP, Jaboticabal.
- [8] S. R. Wenham and M. A. Green, “Silicon Solar Cells”, Progress in Photovoltaics: Research and Application, vol. 4 – 1996.
- [9] Angewandte Solarrenergie – ASE GmbH – ASE 50 –ATF/17 – printed in Federal Republic of Germany, 2000, DNR00072440-03, <http://www.ase-international.com>.
- [10] J. M. Chapallaz, J. Dos Ghali, P. Eichenberger, G. Fischer – Manual on Induction Motors Used as generators – MHPG series, Vol 10, publication of Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, Vieweg 1992.

- [11] L. O. M. Reis, L. E. B. da Silva, V. F. da Silva, - Correção do Fator de Potência Através de Chaveamento de capacitores sem corrente de inrush – Dissertação de mestrado, EFEI, Itajubá 1996.
- [12] Grupo de trabalho de energia solar – GTES – Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL-CRESESB, Rio de Janeiro, 1999.
- [13] B. R. Pelly - Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters – John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [14] Bimal K. Bose, Paul M. Szczesny and Robert L. Steigerwald. – Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System – IEEE/IAS Annual Meeting, vol. IA-21, pp852-859, Sept./Oct. 1984.
- [15] J. F. Kreider, F. Kreith, – Solar Energy Handbook – McGraw-Hill book company, 1981.
- [16] AWEA home page: <http://www.awea.org>.
- [17] Ian S. Shaw, Marcelo G. Simões - Controle e modelagem fuzzy – Ed. Edgard Blücher Ltda. 1^a ed., 1999, São Paulo.
- [18] Rohin M. Hilloowala., Adel M. Sharaf – A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in stand alone wind energy conversion scheme. – IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, N^o 1, Jan./Feb. 1996.
- [19] Martin Manattini, - Diseño de sistema conversor de energia eólica – site internet.
http://usuarios.arnet.com.ar/marman/proyecto/conceptos_basicos.htm
- [20] Bay Winds: <http://www.baywinds.com/new/Specifications.html>.
- [21] Synergy Power Corporation:
<http://www.synergypowercorp.com/s20000wind.htm>.
- [22] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore – Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines. – American control conference, Philadelphia, PA, June 24-26, 1998.

- [23] E. Muljadi, C. P. Butterfield, "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. – IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, N^o 1, pp. 240 – 246, Jan./Feb. 2001.
- [24] Manual Fuzzy logic toolbox do MATLAB, versão 2, January, 1999, Matlab 5.2 release 11.
- [25] Rohin M. Hillowala, Adel M. Sharaf – A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in photo-voltaic energy conversion scheme, - IEEE Trans. Industry applications, Vol. 32, N^o 1, January/February, 1992.
- [26] L. Zadeh, - Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, - IEEE Trans. Systems Man Cybernetics, Vol. 28, pp 28-44, 1978.
- [27] P. J. Mac Vicar-Whelan, - Fuzzy sets for man machine interactions, -Int. Journal Man-Machine Studies, Vol. 8, pp.687-697, Nov, 1976.
- [28] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, D. O'Sullivan, – A new maximum power tracking system, - IEEE Trans. Power electronics and systems. 1993.
- [29] N. N. Franceschetti, L. O. M. dos Reis, M. Godoy Simões, - Modelagem e simulação da transferência de potência de um sistema fotovoltaico, - Anais do 5^o Congresso Brasileiro de eletrônica de potência, 19 a 23 de setembro, 1999, Foz do Iguaçu, PR., Brasil.
- [30] Marcelo G. Simões, Bimal K. Bose, Ronald J. Spiegel – Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system, - IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, N^o 4, pp. 956 – 965, July./August. 1997.
- [31] Abdulrahman L. Alolah and Majeed A. Alkanhal, - Optimization-based steady state analysis of three phase self-excited induction generator, - IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 15, N^o 1, March 2000.
- [32] Oleg Chtchetinine, - Voltage stabilization system induction generator in stand alone mode, - IEEE Transaction, vol. 14, N^o 3, September 1999.

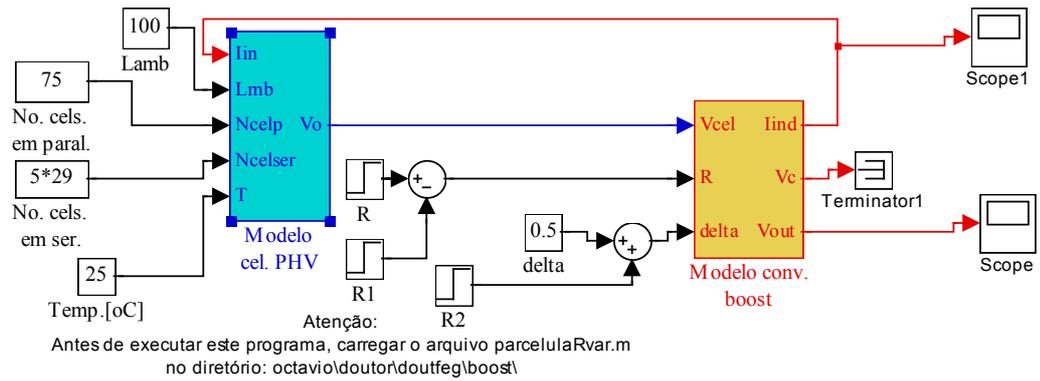
- [33] D. Watson, J. Arrilaga, and T. Densen, - Controlled DC power supply from wind driven self-excited induction machines, - in IEE Proc., Pt. C, vol. 126, N^o 12, 1979, pp. 1245 –48.
- [34] Marcelo G. Simões, Bimal K. Bose, Ronald J. Spiegel – Fuzzy-logic-based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system, - IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, pp. 87-95, January, 1997.
- [35] V. Joseph Thottuvelil, David Chin and George C. Verghese, - Hierarchical approaches to modeling high-power-factor ac-dc converters, - IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, N^o 2, pp. 179-187, April, 1991.
- [36] Roger L. Avant, F. C. Lee and D.T. Chen, - A practical SCR Model for computer aided analysis of AC resonant charging circuits, - Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists conference, 1981, pp. 232-243.
- [37] R. L. Avant and F. C. Lee, - A unified SCR model for continuous topology CADA, - IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-31, pp. 257-268, November, 1984.
- [38] Soib B. Taib, L. N. Hulley, Zhaolin Wu, and W. Shepherd, - Thyristor switch model for power electronic circuit simulation in modified SPICE 2, - IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 7, N^o 3, pp. 568-580, July 1992.
- [39] Chee-Mun Ong, - Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB[®]/Simulink, - Prentice hall PTR, Upper Saddle, NJ, 1997.
- [40] Site da <http://www-2.cs.cmu.edu/Groups/AI/html/faqs/ai/fuzzy/part1/faq-doc-2.html>.
- [41] R. Ramakumar, J.J. Bzura, J. Eyer, J. Gutierrez, et all – Renewable technologies and distribution systems – IEEE Power engineering review, vol. 19, N^o 11, pp 5 – 6, November 1999.
- [42] John P. Benner & Lawrence Kazmerski – Photovoltaics gaining greater visibility – IEEE/Spectrum, vol. 36, N^o 9, pp34 – 42, September 1999.

- [43] National Instruments Corporation. – Lab view Basics Manual, - Austin, Texas, 1996.
- [44] Katsuhiko Ogata, Engenharia de Controle Moderno , PHB Ltda, Rio de Janeiro, 2ª edição, pp. 199-281, 1993.
- [45] José L. Silveira, - “Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários; Estudo de Casos para o Setor Terciário” – Tese de Doutorado, Faculdade Estadual de Campinas/UNICAMP, Campinas, SP, 1994.
- [46] José L. Silveira e L. A. Gomes; Fuel Cell Cogeneration System: A Case of Techno economic analysis”, Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 3, pp. 233-242,1999.
- [47] James P. Dunlop, Brian N. Fahi, et all, - Reducing The Costs Of Grid-Connected Photovoltaics Systems, - Proceedings of Solar Forum 2001: Solar Energy: The Power to Choose, April, 2001, Washington, DC.
- [48] Stanley R. Bull, - Renewable Energy Today and Tomorrow, - Proceedings of IEEE, vol. 89, pp. 1216-1227, N^o 8, August, 2001.
- [49] Alonso Bernabé Aguirre Reto, - “Análise da Performance de um Sistema Solar Fotovoltaico de 2 kW Interligado à Rede Elétrica Pública e Integrado a Uma Edificação Urbana” – Dissertação de Mestrado apresentada a FEG/UNESP, Guaratinguetá, agosto, 2002.

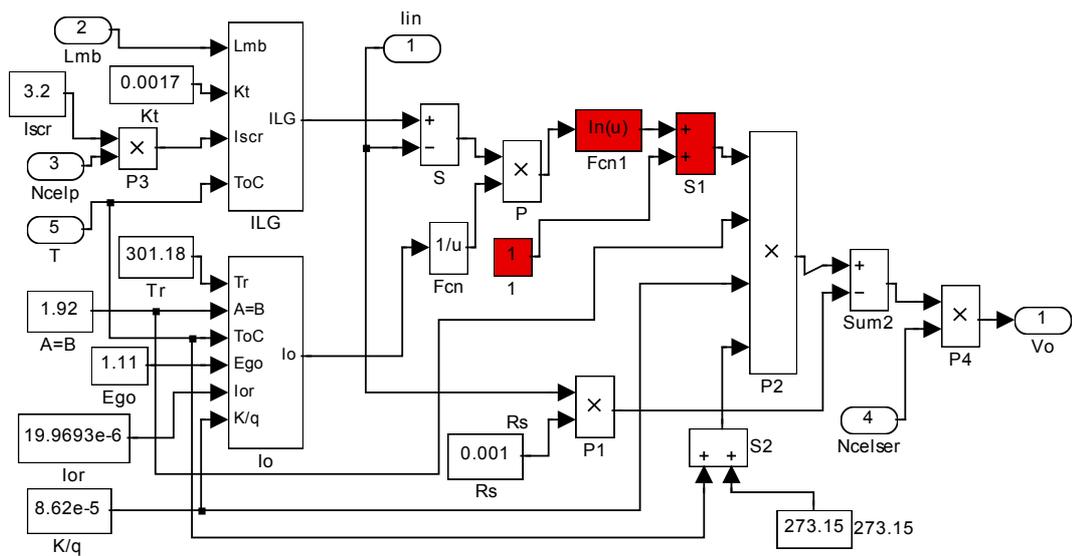
Anexos

Anexo 1

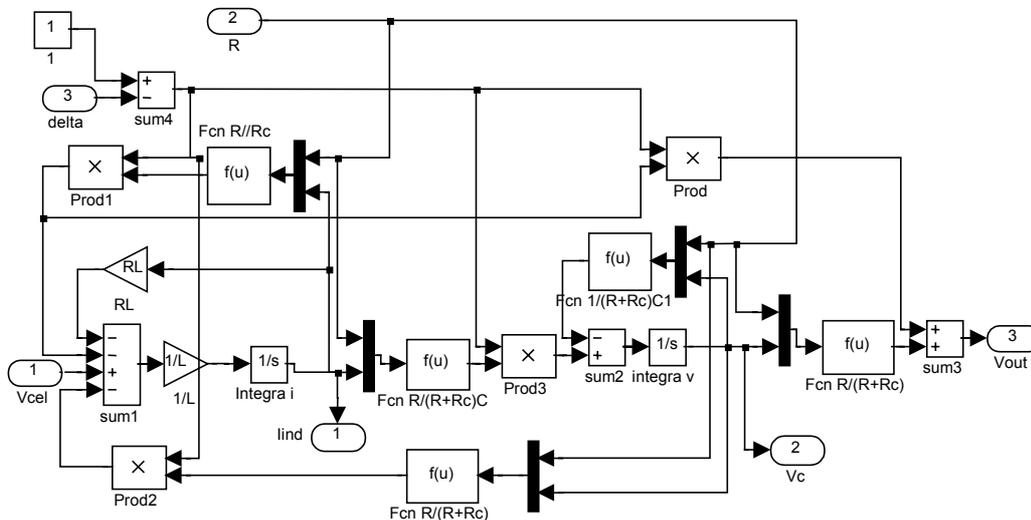
Modelo do painel fotovoltaico no SIMULINK.



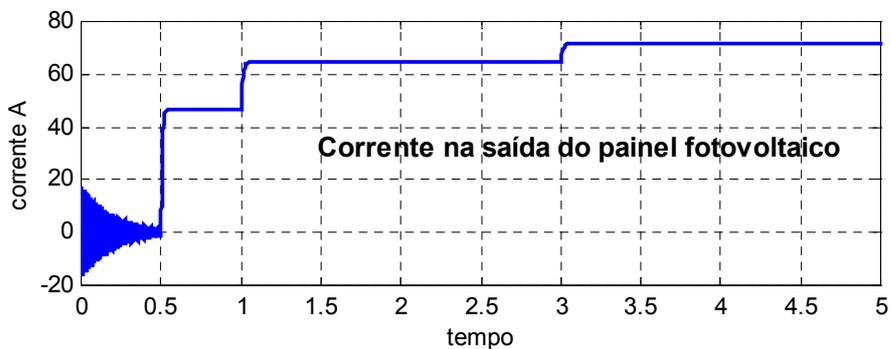
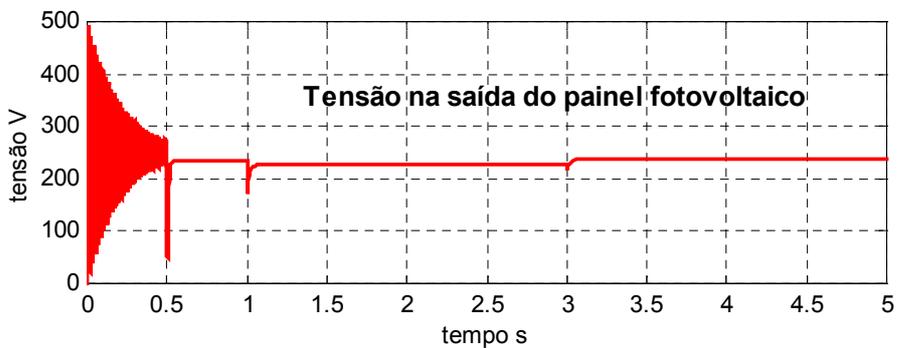
Modelo cel. PHV



Modelo conv. boost



Resultado de simulação



Anexo 2

Rotinas para ajustes de curvas de torque e potência e interpolação das curvas das turbinas eólicas a partir de dados de catálogos.

```

%Rotina desenvolvida no MATLAB para ajuste dos pontos das
curvas de potência;
%Pontos obtidos de catálogos de turbinas eólicas;
%n - rotação da turbina em rpm;
%T - torque no eixo da turbina em N.m;
%P - potência da turbina.
%.....
.....
% Entrada dos pontos referentes ao torque por rotação das
turbinas.
% nas velocidades: v = 6 m/s; v = 8 m/s; v = 10 m/s e v =12
m/s.
n6=[166.67 500 750 1000 1250 1500 1750 2000 2250];
T6=[0 1.28 1.71 1.5 1.28 0.7 0.43 0.14 0]*13.3;
n8=[166.67 500 750 1000 1250 1500 1750 2000 2250 2500 2750];
T8=[0 1.28 2.41 2.85 2.57 2 1.42 0.714 0.43 0.14 0]*13.3;
n10=[166.67 500 750 1000 1250 1500 1750 2000 2250 2500 2750
3000 3250 3500];
T10=[0 1.28 3.28 4.29 4.64 4.21 3.78 3.28 2.85 1.93 1.14 0.71
0.14 0]*13.3;
n12=[166.67 500 750 1000 1250 1500 1750 2000 2250 2500 2750
3000 3250 3500 3750 4000 4250];
T12=[0 1.28 3.28 4.85 6.13 6.65 6.86 6.43 5.86 5.14 4.29 3.29
2 1.43 0.57 0.43 0]*13.3
%.....
%Determinação dos polinômios de ajuste de curvas de torque!
n=5;
p=polyfit(n6,T6,n);
p1=polyfit(n8,T8,n);
p2=polyfit(n10,T10,n);
p3=polyfit(n12,T12,n);
xi=linspace(0,5000,500);
z=polyval(p,xi);
z1=polyval(p1,xi);
z2=polyval(p2,xi);
z3=polyval(p3,xi);
%.....
%Determinação das curvas de potência constante!
Pm6=2205./(n6*2*pi/60);
Pm8=4500./(n8*2*pi/60);
Pm10=9648./(n10*2*pi/60);
Pm12=(18.54e3)./(n12*2*pi/60);
%.....
%Interpolação das curvas de potência constante!
%Interpolação para curva v=6 [m/s]!
a6=7;
y6=polyfit(n6,Pm6,a6);
gi6=linspace(135,2250,100);

```

```

q6=polyval(y6,gi6);
%.....
%Interpolação para curva v=8 [m/s]!
a8=9;
y8=polyfit(n8,Pm8,a8);
gi8=linspace(310,2750,100);
q8=polyval(y8,gi8);
%.....
%Interpolação para curva v=10 [m/s]!
a10=13;
y10=polyfit(n10,Pm10,a10);
gi10=linspace(630,3500,100);
q10=polyval(y10,gi10);
%.....
%Interpolação para curva v=10 [m/s]!
a12=15;
y12=polyfit(n12,Pm12,a12);
gi12=linspace(1200,4250,100);
q12=polyval(y12,gi12);
%.....
%Plotagem das curvas!
plot(xi,z,'r-',n6,Pm6,'b*',gi6,q6,'m-',xi,z1,'b-
',n8,Pm8,'c.',gi8,q8,'m-',xi,z2,'m-
',n10,Pm10,'c.',gi10,q10,'m-',xi,z3,'c-
',n12,Pm12,'c.',gi12,q12,'m-');
grid;
axis([0 5000 0 150]);
%.....

```

Anexo 3

Rotina para determinação do polinômio de potência máxima das turbinas eólicas.

```
%Rotina para determinação do polinômio de potência máxima pela  
rotação da turbina  
%referida ao eixo do gerador.
```

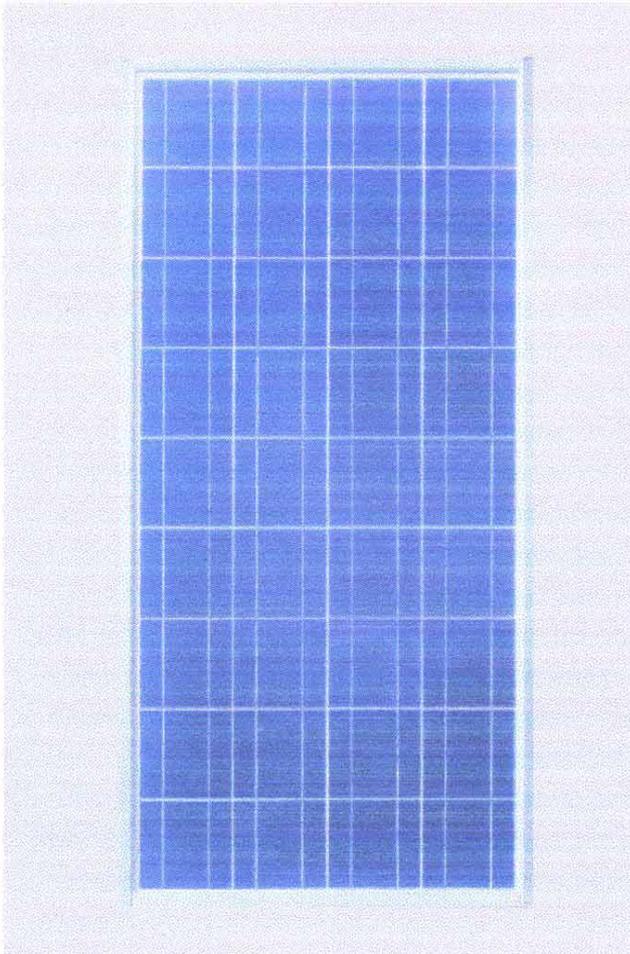
```
Pmax=[2200 4500 9650 18540];  
nt2=[1075 1285 1790 2210];  
n=3;  
p=polyfit(Pmax,nt2,n)  
xi=linspace(0,20000,1000);  
z=polyval(p,xi);  
plot(Pmax,nt2,'rp',xi,z,'r-');  
grid;  
axis([0 20000 0 2500])
```

Anexo 4

Catálogo do painel fotovoltaico utilizado no projeto.



Photovoltaic Standard Module with 36 EFG-Cells



ASE-50-ATF/17

All Purpose, Highly Reliable Module

This module is designed to serve a wide range of applications. It is built in our own production facility and uses the material and energy-saving EFG cell-technology. The full-square solar cells offer a homogeneous crystal blue appearance. By making optimal use of module area the EFG cells provide high energy yields over a long lifetime.

Electrical Characteristics

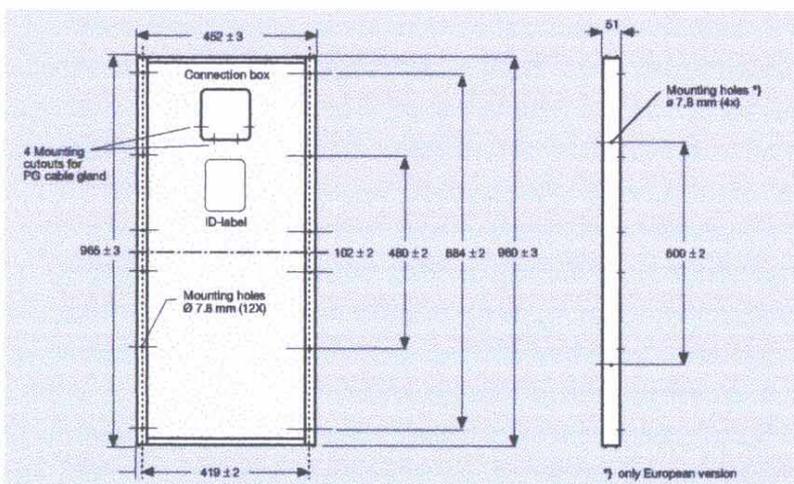
The ASE-50-ATF/17 can be connected to system voltages up to 1000 Volts. It can be used in telecommunication systems as well as in solar home- and grid-connected systems.

The module has a standard power rating of 50W. A narrow pre-selection of $\pm 2.5W$ facilitates series connections with low mismatch losses.

Module Design

The advanced rear-side encapsulation made of aluminium and Tedlar ensures a long service life even in harsh environments.

A robust frame made of mill-finished aluminium with 4 additional mounting holes at the side rails provides easy mounting. The connection box contains screw terminals for cables up to 4 mm².



Assignments:

- A = aluminium
- T = tedlar
- F = frame

ASE-50-ATF/17



Electrical data

The electrical data apply to standard test conditions (STC):
Irradiance at the module level of 1,000 W/m² with spectrum AM 1.5 and a cell temperature of 25°.

Power (max.)	P _{mpp}	50 Wp	45 Wp
Voltage at maximum-power point	U _{mpp}	17.2 V	17.0 V
Current at maximum-power point	I _{mpp}	2.9 A	2.65 A
Open-circuit voltage	U _{oc}	20 V	20 V
Short-circuit current	I _{sc}	3.2 A	2.9 A

The quoted technical data refer to the usual series cell configuration.
The rated power may only vary by ± 2.5 W and all other electrical parameters by ± 10%.
NOCT-value: 45° C.



Dimensions and weights

Dimensions (tolerances ± 3 mm)	965 x 452 mm ²
Overall height (tolerances ± 3 mm)	51 mm
Weight	approx. 6.1 kg



Characteristic data

Solar cells per module	36
Type of solar cell	EFG solar cell (multi-crystalline, 10 x 10 cm ² , full-square)
Connection	Connection box with screw terminals and Heyco Plugs, 2 integrated bypass diodes



Cell temperature coefficients

Power	T _K (P _n)	- 0.47 % / °C
Open-circuit voltage	T _K (U _{oc})	- 0.38 % / °C
Short-circuit current	T _K (I _{sc})	+ 0.10 % / °C



Limits

Max. system voltage	1000 V _{DC}
Operating module temperature	-40... +90° C
Storm resistance	Wind speed of 130 km/h Δ 800 Pa and safety factor of 3

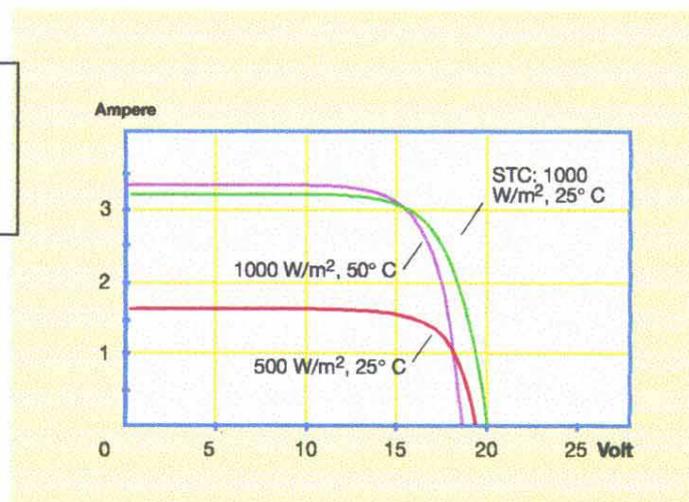
The right is reserved to make technical modifications.



Qualifications

The ASE-50-ATF/17 module complies with the requirements of IEC 61215, UL 1703 (Class A Fire rating), Electrical Protection Class II and the EWG guideline 89/392 (CE).

Current/voltage characteristics with dependence on irradiance and module-temperature



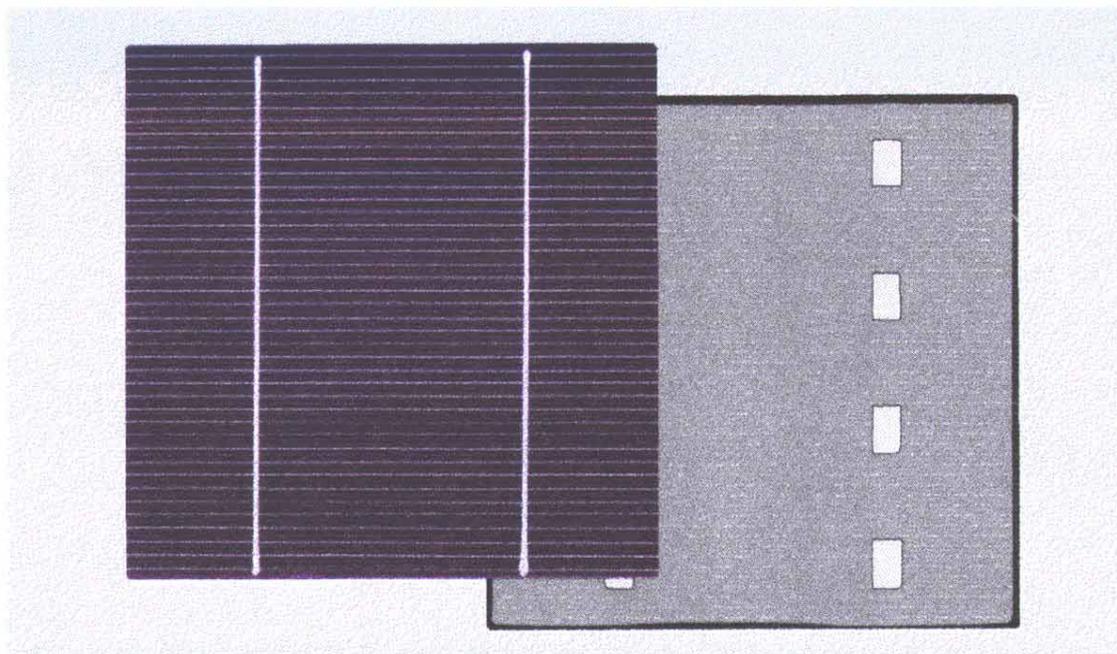
Photovoltaics from your specialist dealer:

Anexo 5

**Catálogo das curvas e características das células fotovoltaicas utilizadas
na modelagem do sistema.**



MAIN-Cell 100 mm x 100 mm



MAIN-Cell 100 mm x 100 mm (front view and backside contact)

The Technology

MAIN-Cells (Multi-crystalline Advanced Industrial Cells) of RWE Solar GmbH are high efficiency silicon cells that use multi-crystalline wafers as the basic material. Multi-crystalline wafers are made from cast silicon ingots which are saw-cut to size.

The wafers are converted into solar cells using proprietary cell technology of RWE Solar. The production features several state of the art process steps and is widely recognized as one of the most advanced cell lines in the world.

The MAIN-Cells have proven to be easy to handle, aesthetically attractive and reliable - important attributes for the core component of a PV module. MAIN-Cells of RWE Solar meet and exceed all requirements for current and future industrial module production.



The unique RWE Solar cell process achieves the highest efficiencies in large-scale multi-crystalline cell production



Maximum packing factor and mono-crystalline look for high performance modules

MAIN solar cells offer essential advantages to the module manufacturer:

Electrical Performance

- efficiencies comparable to advanced mono-crystalline cells
- stable performance due to aluminum back surface field
- high output current due to fine finger technology (high conductance with reduced shadowing)

Application in Modules

- easy handling of multi-crystalline wafer material
- maximum flexibility of module design at minimum loss of current by precise matching of cells that are sorted 100% by current at test voltage
- maximum packing factor by fully square cells
- easy and reliable stringing due to easily solderable, low resistance busbars on the front side and 8 large solder pads on the back side
- front surface compatible with all commercially applied photovoltaic encapsulants due to proprietary Silicon Nitride AR Coating

Cosmetics

- homogeneous appearance due to specially etched surface and uniformly dark blue color in modules

MAIN-Cell 100 mm x 100 mm

MAIN-Cell 100 mm x 100 mm



Design and Mechanical Data

Principal Material	Multi-crystalline Silicon
External Dimensions	100 mm x 100 mm ± 1.0 mm
Cell Thickness	~ 300 µm
Type of Contacts	Front: 2 full length silver busbars Back: 2 x 4 rectangular silver contacts
Polarity	Front: negative Back: positive
Anti-reflection Coating	Silicon Nitride



Electrical Cell Data

		MAIN1026	MAIN1027	MAIN1028	MAIN1029	MAIN1030
Test Voltage	V_{td} (mV)	500	500	500	500	600
Avg. Open Circuit Voltage	V_{oc} (mV)	592	597	603	609	613
Current at Test Voltage	I_{td} (A)	2.6 - 2.7	2.7 - 2.8	2.6 - 2.9	2.9 - 3.0	3.0 - 3.1
Avg. Short Circuit Current	I_{sc} (A)	3.10	3.17	3.23	3.28	3.31
Avg. Power	P_{Vtd} (W _p)	1.33	1.36	1.43	1.47	1.51
Avg. Efficiency	η_{mpp} (%)	13.5	13.9	14.3	14.7	15.1

Standard Test Conditions (STC): Light Spectrum AM 1.5 G; Irradiation Density $E = 100 \text{ mW/cm}^2$; Cell Temperature $T_c = 25^\circ\text{C}$; Accuracy: P_{Vtd} , I_{sc} : ± 3%; V_{oc} : ± 2%; I_t : load condition



Cell Temperature Coefficients

Power	T_K / P_{mpp} (%/K)	- 0.4	$P_{mpp}(T) = P_{mpp}(25^\circ\text{C}) \cdot (1 + \Delta T \cdot T_K)$ $P_{mpp}(25^\circ\text{C}) \hat{=} P_{Vtd}(25^\circ\text{C})$
Open Circuit Voltage	T_K / V_{oc} (mV/K)	- 2.0	$V_{oc}(T) = V_{oc}(25^\circ\text{C}) + \Delta T \cdot T_K$
Short Circuit Current	T_K / I_{sc} (mA/K)	+ 3.0	$I_{sc}(T) = I_{sc}(25^\circ\text{C}) + \Delta T \cdot T_K$

Accuracy between $25^\circ\text{C} - 75^\circ\text{C}$; P_{mpp} , I_{sc} : ± 3%; V_{oc} : ± 2%

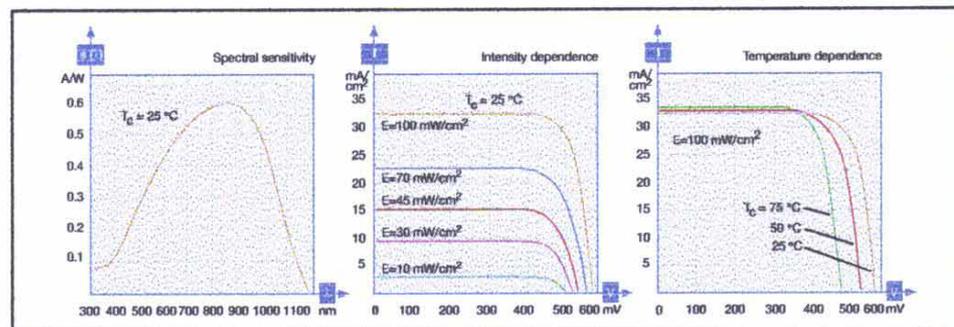


Limits

Operating Temperature	- 50°C to + 80°C
Storage in original packing	- 60°C to + 50°C (Humidity ≤ 55%)
Solder	Soft Solder Sn, 2% to 4% Ag



Electrical Curves



In the current / voltage graphs above, the current is shown per unit of cell area. The absolute values are obtained by multiplying the cell area with the relevant current values.

RWE Solar GmbH reserves the right to change product specification without prior notice.

Anexo 6

Catálogo da turbina eólica utilizada no projeto.

Performance

177

[[Home](#)] [[Company Info.](#)] [[News](#)] [[Products](#)] [[Service](#)] [[Contact](#)] [[Links](#)] [[Search](#)]

This Section:

[Grid Intertie System](#)
[Hybrid Power Plant](#)
[Features](#)
[10-17 Kw Power Curve](#)
[20 Kw Power Curve](#)
[Prices](#)
[Performance](#)
[Turbine/Tower Spec.](#)
[Dealers \(USA\)](#)
[Reps. \(INTL.\)](#)
[Warranty](#)
[Site Factors](#)
[Brochures & Misc. Data](#)

Model No.	23-10	23-12.5	26-15	26-17.5	29-20
Max. Output (Kw)	10	12.5	15	17.5	20
Rotor Diameter (Ft.)	23	23	26	26	29
Rated Wind Speed (mph)	25	27	26	27	26

Wind Speed (MPH)	Estimated Annual Output (KWH)				
	-----	-----	-----	-----	-----
10	10486	10521	11363	14729	19727
11	13618	13800	14966	19320	25704
12	17044	17486	19065	24479	32297
13	20648	21472	23558	30060	39289
14	24321	25643	28317	35900	46468
15	27969	29887	33217	41841	53646
16	31515	34103	38135	47744	60665
17	34899	38205	42963	53486	67398
18	38073	42119	47609	58966	73743

All outputs are based on Rayleigh Distribution, outputs will vary depending on tower height.

Turbine/Tower Spec.

178

[[Home](#)] [[Company Info.](#)] [[News](#)] [[Products](#)] [[Service](#)] [[Contact](#)] [[Links](#)] [[Search](#)]

This Section:

[Grid Intertie System](#)
[Hybrid Power Plant](#)
[Features](#)
[10-17 Kw Power Curve](#)
[20 Kw Power Curve](#)
[Prices](#)
[Performance](#)
[Turbine/Tower Spec.](#)
[Dealers \(USA\)](#)
[Reps. \(INTL.\)](#)
[Warranty](#)
[Site Factors](#)
[Brochures & Misc. Data](#)

System, Rotor, Generator, Transmission, Brake & Tower

Turbine Systems:

[top of page](#)

Models	23-10	23-12.5	26-15	26-17.5	29-20
Kilowatt Output	10	12.5	15	17.5	20
Cut-In Wind Speed (mph)	----- 8 mph -----				
Rated Wind Speed (mph)	25	27	26	27	26
Rated Rotor Speed (rpm)	195	205	205	195	175
Survival Wind Speed	----- 120 mph -----				
Weight (lbs.)	1900	1900	1900	1900	2500
Height (ft.) (less Rotor)	----- 9 feet -----				

Turbine Rotor:

[top of page](#)

Number of Blades	3				
Orientation	Upwind				
Axis (nominal)	Horizontal				
Rotation	Counter Clockwise				
Blade Material	----- Laminated Sitka Spruce Wood -----				Fiberglass
Rotor Diameter (ft.)	23	23	26	26	29
Swept Area (ft.)	415	415	530	530	660
Speed Control	<ol style="list-style-type: none"> 1. Centrifugal variable pitch governor (Loaded 25 - 30 mph, Unloaded 15 - 20 mph). 2. Automatic furling - hypoid gear drive (40 - 45 mph) . 				
Yaw Control	Passive Tailvane				

Generator:

[top of page](#)

Type	Brushless, Synchronous, Three phase AC 12 lead reconnectable with outbound exciter.				
Exciter Field	60 ohm, 2 amps. DC				
Power Rating (kva)	20	20	20	20	23 (Onan) 25 (Winco)
Voltage	40 - 180 VAC				
Speed (rpm)	450-1230	450-1170	450-1170	450-1230	450-1050
Frequency (hz)	0 - 40	0 - 40	0 - 40	0 - 40	0 - 40

Transmission:

[top of page](#)

Type	Offset Hypoid Gear Drive
Ratio	1:6.1

Brake System:

[top of page](#)

Type	Manual Disc (service/maintenance)
------	-----------------------------------

Support Towers:

Type & Material	Three legged free standing lattice (no welds).
Corrosion Protection	Hot dipped galvanized.
Height & Weight	80 ft. = 4300 lbs. 100 ft. = 6200 lbs. 120 ft. = 8200 lbs.
Base Width	80 ft. = 9 ft. 100 ft. = 11 ft. 120 ft. = 13 ft.
Options	Tilting Hinges

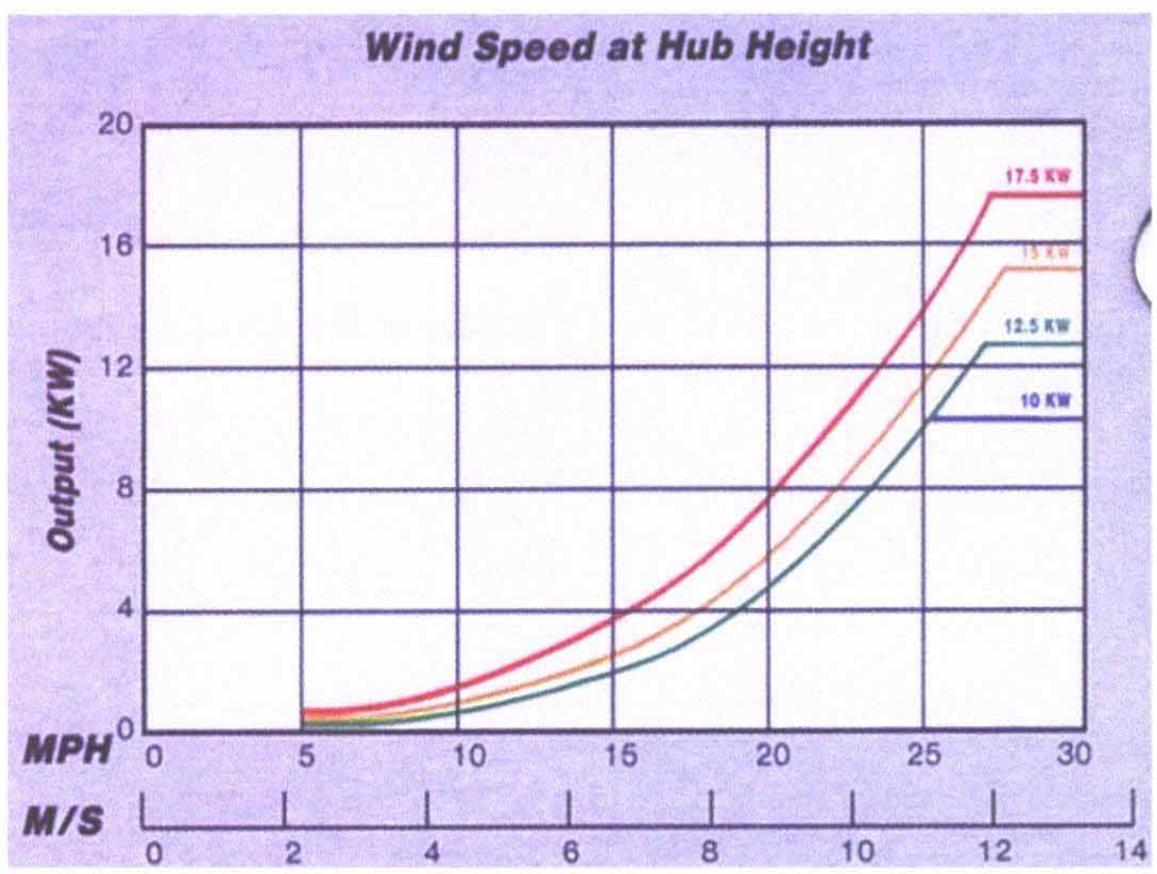
10-17 Kw Power Curve

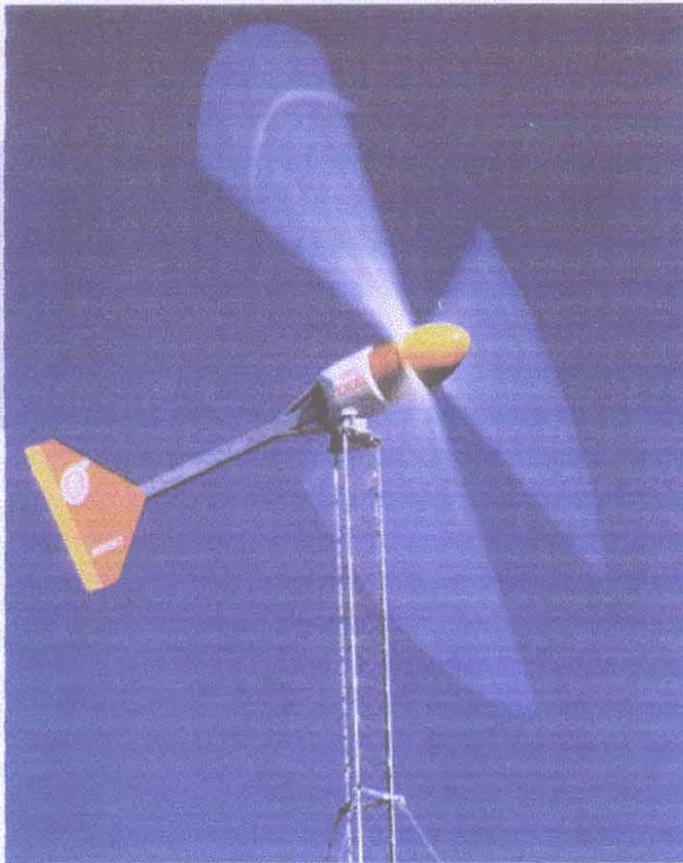
180

[[Home](#)] [[Company Info.](#)] [[News](#)] [[Products](#)] [[Service](#)] [[Contact](#)] [[Links](#)] [[Search](#)]

This Section:

- [Grid Intertie System](#)
- [Hybrid Power Plant](#)
- [Features](#)
- [10-17 Kw Power Curve](#)
- [20 Kw Power Curve](#)
- [Prices](#)
- [Performance](#)
- [Turbine/Tower Spec.](#)
- [Dealers \(USA\)](#)
- [Reps. \(INTL.\)](#)
- [Warranty](#)
- [Site Factors](#)
- [Brochures & Misc. Data](#)





Bergey Turbines
Tornado-Tuff
 Designed, Built, and Proven
 in America's Tornado Alley

181

Exclusive
5
YEAR
Warranty

BWC EXCEL

10KW CLASS WIND TURBINE

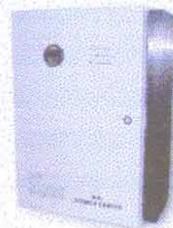
- 5-YEAR WARRANTY
- AMERICA'S BEST SELLING RESIDENTIAL SYSTEM
- CERTIFIED BY CALIFORNIA ENERGY COMMISSION
- SIMPLE DESIGN - 3 MOVING PARTS
- PATENTED POWERFLEX® ROTOR SYSTEM
- AUTOFURL® AUTOMATIC STORM PROTECTION
- DIRECT-DRIVE PM ALTERNATOR
- NO SCHEDULED MAINTENANCE REQUIRED
- HEAVY-DUTY CONSTRUCTION
- DESIGNED FOR 30+ YEARS
- POLYURETHANE AIRCRAFT-QUALITY PAINT
- PROVEN, OVER 50 MILLION OPERATIONAL HOURS

The Bergey BWC Excel is a rugged and reliable small wind turbine that has been proven in hundreds of installations around the world. It comes from the world's leading manufacturer of small wind turbines and is backed by the longest warranty in the industry. Whether you want to reduce the electric bills at your home or power a critical load far from the power grid, the BWC Excel will deliver years of "worry-free" power.

Excel-S: Grid-Intertie Applications (10kW)
 Excel-R: Battery Charging Applications (7.5kW)
 Excel-PD: Pumping Applications (10kW)



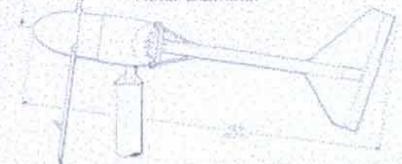
Excel-S GridTek 10
 Power Processor
 (AC output)



Excel-R OptiCharge
 Voltage Regulator
 (DC output)



23 ft (7 meter)
 Rotor Diameter



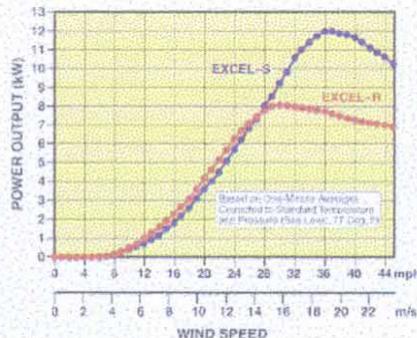
Net Weight: 1,050 lbs
 Shipping Weight: 1,200 lbs

THE ONLY MOVING PARTS ARE THE PARTS YOU SEE MOVING.

PERFORMANCE

Start-up Wind Speed... 7.5 mph
 Cut-In Wind Speed... 8 mph
 Rated Wind Speed... 31 mph
 Rated Rotor Speed... 310 RPM
 Furling Wind Speed... 36 mph
 Max. Design Wind Speed... 125 mph
 (with Extra-Stiff Blades... 150 mph)

POINT, CLICK, LEARN,
ANALYZE & BUY WISELY:
WWW.BERGEY.COM



Predicted Monthly Energy Production

Wind Speeds Taken at Top of Tower

Average Wind Speed	8 mph	9 mph	10 mph	11 mph	12 mph	13 mph	14 mph
Excel-S (AC kWh)	240	375	520	700	900	1,130	1,375
Excel-R (DC kWh)	340	500	680	880	1,090	1,320	1,590

Wind Speeds Taken at 10 meters (per standard wind resource maps)

Average Wind Speed	8 mph	9 mph	10 mph	11 mph	12 mph	13 mph	14 mph
40 ft. Tower	Excel-S: 330 Excel-R: 440	Excel-S: 490 Excel-R: 620	Excel-S: 670 Excel-R: 830	Excel-S: 870 Excel-R: 1,090	Excel-S: 1,110 Excel-R: 1,280	Excel-S: 1,350 Excel-R: 1,510	Excel-S: 1,610 Excel-R: 1,740
50 ft. Tower	Excel-S: 436 Excel-R: 560	Excel-S: 620 Excel-R: 780	Excel-S: 840 Excel-R: 1,030	Excel-S: 1,100 Excel-R: 1,290	Excel-S: 1,370 Excel-R: 1,590	Excel-S: 1,670 Excel-R: 1,820	Excel-S: 2,000 Excel-R: 2,090
60 ft. Tower	Excel-S: 490 Excel-R: 630	Excel-S: 705 Excel-R: 870	Excel-S: 950 Excel-R: 1,140	Excel-S: 1,220 Excel-R: 1,410	Excel-S: 1,510 Excel-R: 1,680	Excel-S: 1,820 Excel-R: 1,950	Excel-S: 2,130 Excel-R: 2,200
70 ft. Tower	Excel-S: 550 Excel-R: 700	Excel-S: 780 Excel-R: 960	Excel-S: 1,050 Excel-R: 1,240	Excel-S: 1,340 Excel-R: 1,530	Excel-S: 1,650 Excel-R: 1,800	Excel-S: 1,970 Excel-R: 2,070	Excel-S: 2,290 Excel-R: 2,320

Assumptions: Inland Site, Rayleigh Distribution, Shear Exponent = 0.18, Altitude = 1,000 ft.
 Note: Battery charge regulation (batteries full) will reduce actual Excel-R performance.
 Your Performance May Vary.



SIMPLICITY • RELIABILITY • PERFORMANCE

2001 PRIESTLEY AVE.
 NORMAN, OK 73069
 T: 405-364-4212
 F: 405-364-2078
 SALES@BERGEY.COM
 WWW.BERGEY.COM