

SELÊNIO ROCHA SILVA

SISTEMA EÓLICO DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

Tese apresentada ao curso de DOUTORADO EM CIÊNCIAS no domínio de ENGENHARIA ELÉTRICA, vinculado ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento de Energia.

TELMO SILVA DE ARAÚJO - Dr. Ing.

Orientador

CAMPINA GRANDE - PB

1988




S586s Silva, Selênio Rocha.  
Sistema eólico de geração de energia elétrica / Selênio Rocha Silva. - Campina Grande, 1988.  
279 f.

Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1988.  
"Orientação : Prof. Dr. Telmo Silva de Araújo".  
Referências.

1. Energia Elétrica - Geração. 2. Sistema Eólico. 3. Tese - Engenharia Elétrica. I. Araújo, Telmo Silva de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.311(043)



A minha esposa Beth,  
Aos meus filhos Gabriel e Jamine.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Telmo Silva de Aradjo, pela amizade, atenção, apoio e entusiasmo com que me orientou durante o transcurso deste trabalho.

Ao Prof. Francisco José Simões, do DEM/UEPB, pelo incentivo e contribuições.

Aos professores Evandro Fachine Alencar, Edison Roberto Cabral da Silva, Cursino Brandão Jacobina e Gurdip Singh Deep, do DEE/UEPB, pelo estímulo e amizade.

Aos professores participantes da banca do Exame de Qualificação pelas inúmeras sugestões na definição de tópicos de relevância.

Aos professores José Celso Borges de Andrade, Benjamim Rodrigues Menezes, Pyramo Pires da Costa Jr. e João Antônio de Vasconcelos pelo incentivo e apoio.

Ao engenheiro Paulo de Almeida Farias do DEE/UEPB, pelo apoio técnico e amizade.

Aos demais professores, funcionários e alunos do Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica das UFG e UEPB, pela solidariedade a mim dedicada nestes anos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro.



Em especial, desejo agradecer à equipe técnico-administrativa do Núcleo de Energia - NERG/CCT/UFPb -, pelo apoio e interesse e pela amizade cultivada durante estes anos.

Coordenadora : Prof. Maria Solange Moroni Vidal

Equipe Técnica :

Projeto Mecânico : Jorge Eduardo de Jesus Serey Lopez

Eletro-eletrônica : Manoel do Carmo Silva

Manoel Adalberto Guedes

Mecânica : Francisco Barros Filho

Francisco Cândido da Silva Filho

Gervásio Antônio Ribeiro Gomes

Marcenaria : José Policarpo da Souza Sobrinho

José Antônio da Silva

Desenho : Flávio Cândido da Silva

Secretaria : José Marcelo Medeiros Rodrigues

Normando Gomes de Carvalho

## ABSTRACT

This work addresses the engineering of wind energy conversion systems where the converted electrical power is utilised to charging batteries and water pumping through centrifugal pump-induction motor sets.

The load matching is studied taking into account the different characteristics of the intended use and the local wind regime. The several control strategies are analyzed in view of maximising the useful energy.

The methodology of analysis involves the modelling, parameters determination and data reductions of the individual system components. The complexity of the input/output characteristics of the components suggests that careful load matching is required to ensure adequate system performance.

The experimental results obtained from field operation of such systems are presented and compared with those obtained by digital simulation. The effect of the alternator self-excitation control is evaluated with a view to optimizing the overall efficiency.

The dynamic behaviour of the wind power pump system is studied to demonstrate that the performance is highly dependent on wind fluctuations and the previous operation point. The electrical transients are presented and the simulation algorithms are discussed.

## RESUMO

Este trabalho enfoca a engenharia de sistemas de conversão de energia eólica aplicados à geração de energia elétrica para carregamento de baterias e bombeamento de água.

O acoplamento de cargas em um sistema eólico é estudado identificando-se as particularidades das aplicações pretendidas em um determinado regime de ventos. Várias estratégias de controle são analisadas em vista à maximização da energia utilizável.

É definida uma metodologia de análise composta de modelagem dos diversos componentes do sistema, determinação de parâmetros e redução de dados. A complexidade das características dos diversos componentes sugere um estudo cuidadoso do acoplamento a fim de garantir um desempenho adequado ao sistema.

Os resultados experimentais, obtidos por ensaios em campo aberto, são apresentados e comparados com resultados oriundos da simulação digital. O efeito do controle da autoexcitação do alternador é avaliado com vistas à otimização da eficiência global.

O comportamento dinâmico do sistema eólico de bombeamento de água é estudado em diversas condições de operação, avaliando-se seu desempenho em flutuações de vento e os transitórios elétricos de chaveamento dos motores.

## ÍNDICE

ABSTRACT

RESUMO

INDICE

SIMBOLOGIA

I. INTRODUÇÃO

I.1. Histórico

I.2. Estado de Arte

I.2.1. Energia Eólica no Mundo

I.2.2. Energia Eólica no Brasil

I.3. Propostas de Trabalho

I.4. Organização do Texto

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1. Energia Eólica

II.1.1. A Fonte Energética

II.1.2. O Vento

II.1.3. A Energia Eólica

II.2. Turbina Eólica

II.2.1. A Conversão de Energia

II.2.2. As Características Operativas

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA ... i  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação ... vi  
Rua Aprígio Vellozo, 333 - Tel. (063) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

... 1

... 2

... 3

... 3

... 8

... 11

... 14

... 16

... 17

... 17

... 18

... 22

... 25

... 25

... 29

II.2.3. A Operação	... 35
II.3. Sistemas de Conversão de Energia Eólica	... 37
II.3.1. Características Básicas de SCEE	... 37
II.3.2. Classificação - Aplicações	... 40
II.3.3. Acoplamento de Cargas - Operação de SCEE	... 45
II.3.4. Fornecimento de Energia Elétrica	... 50
II.3.4.1. Gerador Elétrico	... 51
II.3.4.2. O Armazenamento - Bateriais de Acumuladores	... 53
II.3.4.3. O Acoplamento de Cargas	... 54
II.3.4.4. Estratégias de Controle Ótimo	... 59
II.3.4.5. Esquemas Típicos do Fornecimento. Uma Comparação	... 64
II.3.5. Bombeamento D'Água	... 66
II.3.5.1. Características do Conjunto Motor- Bomba	... 68
II.3.5.2. O Acoplamento de Carga	... 70
II.3.5.3. Estratégias para Operação Motor- Bomba	... 72
II.3.5.4. Uma Avaliação do Aproveitamento	... 77
II.4. Conclusão	... 81
III. MODELAGEM E DETERMINAÇÃO DE PARAMETROS EM SCEE	... 84
III.1. Descrição do Sistemas em Estudo	... 85



III.1.1. O SCEE Básico	...	85
III.1.2. Os Subsistemas de Cargas	...	89
III.2. Metodologia Geral Empregada	...	91
III.3. Turbina Eólica	...	93
III.3.1. Modelo Matemático	...	93
III.3.2. Determinação de Parâmetros e Características	...	96
III.3.3. Redução de Dados	...	100
III.4. Gerador Elétrico	...	112
III.4.1. Modelização	...	114
III.4.2. Testes Laboratoriais	...	119
III.4.3. Redução de Dados	...	124
III.5. Transmissão Mecânica	...	130
III.6. Controle do Passo Variável	...	131
III.7. Bateria de Acumuladores	...	135
III.8. Conversores Estáticos	...	136
III.9. Motores de Indução	...	139
III.9.1. Modelização	...	139
III.9.2. Ensaio e Redução de Dados	...	141
III.10. Bombas Centrífugas e Aparatos Hidráulicos	...	144
III.10.1. Modelização	...	144
III.10.2. Ensaio e Redução de Dados	...	147

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Pró-Reitoria para Assuntos do Interior

Coordenação Geral de Pós-Graduação

Rua Aprígio Velloso, 22 - 14 (033) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

III.11. Conclusão	...152
IV. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE SCEE	...154
IV.1. Descrição dos Sistemas	...155
IV.1.1. Introdução	...155
IV.1.2. Sistemas de Fornecimento de Eletricidade	...155
IV.1.2.1. Controle de Autoexcitação	...156
IV.1.2.2. Esquemas em Estudo	...168
IV.1.3. Sistema Eólico de Bombeamento D'água	...168
IV.2. Metodologia de Análise	...173
IV.3. SCEE para Fornecimento de Eletricidade	...176
IV.3.1. Simulação de Características	...176
IV.3.1.1. Modelagem do Sistema	...176
IV.3.1.2. Algoritmos de Simulação	...179
IV.3.1.3. Tratamento dos Dados de Simulação	...184
IV.3.2. Operação em Campo Aberto	...186
IV.3.3. Comparação de Resultados	...193
IV.3.4. Avaliação da Operação	...199
IV.4. SCEE para Bombeamento D'Água	...202
IV.4.1. Simulação de Características	...202
IV.4.2. Resultados Experimentais	...208
IV.4.3. Comparação de Resultados	...212
IV.4.4. Avaliação da Operação	...215
IV.5. Conclusão	

V. DINAMICA DE UM SISTEMA EOLICO DE BOMBEAMENTO D'AGUA	...221
V.1. Introdução	...222
V.2. Modelos Dinâmicos	...222
V.3. Simulação Dinâmica	...229
V.3.1. Algoritmos Utilizados	...229
V.3.2. Avaliação dos Algoritmos	...235
V.4. Comportamento Dinâmico	...238
V.4.1. Transitórios de Chaveamento dos Motores	...238
V.4.2. Transitórios de Rajadas de Vento	...245
V.4.3. Transitórios em Regime de Vento Real	...251
V.5. Conclusão	...254
VI. CONCLUSÃO	...258
VI.1. Considerações Específicas	...259
VI.2. Perspectivas de Futuros Trabalhos	...262
BIBLIOGRAFIA	...266
TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR	...275
APENDICE	...277

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Geral de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Viana, s/n - CEP 58201-900 - 7227-4355  
68.107 - Campina Grande - Paraíba



## SIMBOLOGIA

### Variáveis e Parâmetros :

A	Área
B	Densidade de fluxo magnético
c	Corda de um perfil aerodinâmico
C	Coeficiente aerodinâmico
d	Diâmetro ou distância
D	Diâmetro
E	Tensão interna
E	Energia
e	Energia por unidade de volume
F	Força
f	Frequência
H	Altura
h	Altura
I	Corrente elétrica em regime permanente
i	Corrente elétrica instantânea
J	Momento de inércia
K	Constantes
L	Indutância
l	Distância
M	Indutância de magnetização
m	Massa
N	Rotação em rpm

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso 232 - 1.4 (683) 321 7223-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

P	Potência
P	Peso
p	Número de polos
Q	Vazão
q	Vazão instantânea
R	Raio
r	Resistência elétrica
s	Solidez de um rotor eólico
T	Conjugado
T	Período
t	Tempo
V	Tensão elétrica
V	Velocidade de vento
v	Tensão elétrica instantânea
w	Velocidade angular em rad/s
$\alpha$	Ângulo de disparo em um conversor estático
$\beta$	Ângulo de passo de um rotor eólico
$\gamma$	Ângulo de ataque
A	Variação
$\rho$	Densidade específica do ar
$\lambda$	Relação de velocidades de um rotor eólico
$\xi$	Amperes-espira equivalentes estator-rotor
$\sigma$	Desvio padrão
$\eta$	Eficiência
$\Psi$	Enlace de fluxo magnético
$\tau$	Constante de tempo

- $\phi$  Ângulo do fator de potência  
 $\delta$  Ângulo de carga do alternador

### Índices

São relativos a :

- a Fase A da máquina elétrica  
ad Perdas adicionais numa máquina elétrica  
b Bomba hidráulica  
bat Bateria  
C Acionamento  
c Carga  
cc Curto-circuito  
cin Cinética  
d Disponível ou em eixo direto  
D Arrastro  
DC Corrente contínua  
dc Corrente contínua  
e Extraível  
f Circuito de campo ou excitação do alternador  
fd Circuito de Campo ou excitação do alternador  
F Corte  
F Perdas por correntes de Foucault  
Fe Perdas no ferro  
fn Valor eficaz fase-neutro da componente fundamental  
g Gerador  
gust Rajada de vento

H	Perdas por histerese
kima	Imã permanente
l	Dispersão de fluxo magnético
L	Sustentação
M	Valor médio
m	Motor ou magnetização
max	Valor máximo
mec	Mecânico
n	Nominal
no	Ruído aleatório de vento
o	Máxima potência do rotor eólico
O	Valor determinado
p	Potência
P	Partida
q	Conjugado ou em eixo quadratura
r	Rotor de uma máquina elétrica
ra	Rampa de vento
R	Regulagem
RMS	Valor eficaz da componente fundamental
s	Estator
S	Saturação
t	Turbina eólica
T	Transmissão mecânica
tt	Tubulação hidráulica
$\alpha$	Eixo de referência fixo no eixo da fase A de estator
$\beta$	Eixo de referência fixo no estator em quadratura com eixo A

## CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

A energia eólica representa, atualmente no Mundo, uma das formas alternativas mais promissoras. A indústria de artefactos eólicos tem se estabelecido na Europa há alguns anos e, principalmente na Dinamarca, estão os mais importantes produtores mundiais de turbinas para "fazendas de cataventos".

No porte das baixas e médias potências, os sistemas eólicos para aplicações em regiões remotas e rurais constituem um mercado com significativa demanda e apresentam em diversos aspectos problemas tecnológicos a se desvendar. A geração de eletricidade para aplicações localizadas, através de aerogeradores, tem predominado e, o carregamento de baterias e o acionamento de motores elétricos para fins de bombeamento de água estão, hoje, entre as mais promissoras formas do aproveitamento nesta escala de potências.

Neste capítulo são apresentados os aspectos históricos e os desenvolvimentos feitos na área em diversos países e no Brasil, destacando-se as instituições que mais têm investido em pesquisa no assunto. São introduzidas as propostas deste trabalho e a organização do texto ora apresentado.



## I.1. HISTORICO

Por vários séculos, o homem utilizou o vento como fonte de energia. Desde o ano 2.000 A.C., cataventos têm sido usados, para moagem de grãos e produção de energia, na Babilônia, China e Pérsia.

Os cataventos apareceram na Europa no século XII e constituíram uma das poucas fontes de energia mecânica rotacional, até os meados do século XVIII.

Com o desenvolvimento da máquina a vapor, o número de cataventos em operação decresceu rapidamente, durante os últimos dois séculos. A tecnologia eólica, desde então, apresentou vagaroso desenvolvimento, como pode ser ilustrado pelo aparecimento do catavento multipás americano no final do século XIX. Muitas máquinas deste modelo são utilizadas, atualmente, em áreas rurais dos EUA, Brasil, Austrália e outros países, para bombeamento de água.

Seguindo os avanços da tecnologia de aviação durante a 1ª. Grande Guerra, a turbina eólica de eixo horizontal, utilizada para geração de eletricidade, foi introduzida e utilizada extensivamente em áreas rurais. Desde então, a turbina eólica de eixo horizontal tem atingido um elevado estágio de desenvolvimento tecnológico. Recentes avanços têm conduzido a um novo projeto de máquina, a turbina de eixo vertical Darrieus ou de pás retas, que tem-se mostrado bastante competitiva economicamente.

Em 1973, a crise energética serviu como alerta para problemas da natureza finita das reservas de petróleo e gás natural e sua crescente demanda. Os países desenvolvidos com limitados recursos hídricos tornaram-se vulneráveis aos eventos externos que afetaram significativamente suas economias. Ao mesmo tempo, a geração nuclear tornou-se objeto de desagrado popular em vista ao impacto ambiental e à saturação futura dos depósitos de lixo radioativo. Também a energia de reatores de fusão não apresentou-se como solução técnica viável.

A necessidade de fontes de energia renováveis incentivou pesquisadores de diversos países, ao estudo de formas não convencionais de energia. Desde então, a energia eólica tem sido estudada exaustivamente, devido principalmente as suas características de continuidade, não-poluente, disponibilidade e possível exploração a baixo custo.

## I.2. ESTADO DA ARTE

### I.2.1. Energia Eólica no Mundo

Desde 1973, vários países no Mundo têm reiniciado, de maneira concreta, seus programas de pesquisa e desenvolvimento de sistemas eólicos. Os EUA apresentam, nestes termos, o mais extenso e bem sucedido programa eólico. Apesar de uma ação prioritária para grandes turbinas, o programa americano dedica uma significativa atenção para sistemas de pequeno porte. Neste mesmo senti-

do os países europeus têm-se tornado progressivamente ativos, tendo como incentivo um dos melhores regimes de vento do Mundo. Na Europa se destacam os programas eólicos da Holanda, Dinamarca, Inglaterra, Alemanha Ocidental, Suécia e França (BWEA, 1982).

Embora a ênfase, na maioria dos programas eólicos nacionais, tenha sido no desenvolvimento de turbinas eólicas na escala de megawatts, considerável enfoque tem sido dado a pequenas turbinas. O desenvolvimento na Dinamarca de turbinas de 10 a 15 m de diâmetro tem sido particularmente notável. Estas turbinas têm sido projetadas para uso em fazendas, conectadas à rede elétrica por geradores de indução e possibilitando a economia de energia, tanto pela demanda de potência de origem eólica, como pelo envio da potência excedente para a rede elétrica, vendida assim, à companhia de eletricidade. Projetos similares têm sido desenvolvidos na Holanda e EUA e, o mercado para tais máquinas deve crescer substancialmente nos próximos anos.

Pequenos sistemas eólicos conectados a rede elétrica têm sido utilizados na área rural em muitos países, operando em paralelo com sistemas diesel. Os problemas na otimização e operação de sistemas eólicos/diesel são substanciais, contudo alguns progressos têm sido feitos e, um número de instalações se encontram em fase de testes em campo aberto.

Nos EUA, muitos fabricantes estão produzindo pequenos sistemas eólicos para uma variedade de aplicações, incluindo o bombeamento d'água e o carregamento de baterias em localidades



remotas, embora o maior mercado se encontra em sistemas conectados à rede. Muitos sistemas eólicos conectados à rede são instalações individuais, como na Dinamarca. O conceito de uma "fazenda de cataventos" se concretizou inicialmente pela instalação em Altamond Pass (San Francisco, EUA), contendo, na época, centenas de turbinas eólicas iguais de 17 m de diâmetro e potência nominal de 50 kW. Atualmente devem existir mais de 2.000 turbinas eólicas instaladas em "fazendas de cataventos", principalmente na Califórnia, e a Holanda está procedendo planos para instalação de uma fazenda de cataventos de 10 MW em Sexebierum.

Desde 1978, a Alemanha tem dispendido DM 150 milhões em projetos de grande, médio e pequeno porte de Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE). O programa alemão procura desenvolver diferentes configurações de SCEE, consagrando atenção ao estudo de turbinas verticais tipo Darrieus e horizontais de uma, duas ou três pás.

Priorizando o estudo de engenharia de sistemas eólicos, vários centros de pesquisa no Mundo têm devotado esforços a projetos de SCEE enfocando o desenvolvimento de esquemas adaptados a aplicações específicas. O Imperial College (Inglaterra) tem estudado diversas estratégias de controle, em vistas à maximização da energia contida nos ventos, baseadas em controladores analógicos e digitais, visando aplicações simples como o aquecimento ambiental ou de fluidos (Buehring e Freris, 1981 e Casanova e Freris, 1984). No Sandia Laboratories (EUA), estudos foram desenvolvidos visando as combinações adequadas das característi-

cas de turbinas eólicas e cargas (Bannas e Sullivan, 1976). O Brace Research Institute (Canadá) tem analisado configurações bem definidas de SCEE, principalmente o bombeamento d'água por via elétrica (Memarzadeh e Barton, 1975) e o carregamento de baterias (Papadopoli, 1981). Alguns estudos têm sido direcionado ao projeto de geradores elétricos para sistemas eólicos (Bolton e Nicodemou, 1979; Binns e Kurdali, 1979; Menzies e outros, 1980; Jurer, 1983; entre outros). Vários congressos científicos nacionais e internacionais ocorrem anualmente mostrando o espectro bastante amplo da pesquisa de sistemas eólicos e indicando que o assunto além de apresentar um caráter de atualidade, possui aspectos com necessidade urgente de pesquisa.

No último European Wind Energy Conference (EWEC'86), diversos países apresentaram seus programas eólicos. A maioria dos trabalhos neste congresso enfatizou os aspectos de projeto, aplicações e desempenho, indicando as diretrizes atuais de pesquisa, principalmente na Europa, como ilustra a Tabela I.1.

Em 1985, a Associação Americana de Energia Eólica (AWEA) comemorou o marco de 1 milhão de barris de petróleo economizados nos EUA pelas "fazendas de cataventos" de Altamont Pass. Segundo a AWEA, as 16000 turbinas eólicas da Califórnia representarão, no período de 10 anos de existência (1981 - 1991), uma redução no lançamento de gases nocivos à saúde, por centrais térmicas, equivalente ao salvamento de 200 vidas humanas. Considerando este benefício social da fonte eólica, o custo da energia torna-se mínimo comparado com as fontes convencionais.

TABELA I.1 Avaliação da Pesquisa no EWEC '86

Áreas/ Subéas	% de Trabalhos	Principais Países Envolvidos
1. Projetos de Sistemas	45,0%	Dinamarca, Holanda Itália, Alemanha, Inglaterra, França, Suécia Grécia
Recursos Eólicos	14,3%	
Projetos Rotores	13,5%	
Sistemas	8,7%	
Controle	3,9%	
2. Aplicações	17,0%	Inglaterra, Holanda, Itália, Grécia Dinamarca, China Brasil, Alemanha e Belgica
Fazendas	3,9%	
Eólico/Diesel	6,5%	
Eletricidade	2,2%	
Bombeamento	2,2%	
3. Desempenho/Testes	13,0%	Holanda, Dinamarca Inglaterra, EUA, Grécia, China
Sistemas	4,8%	
Dinâmica	1,8%	
Central de Testes	1,3%	
Tunel de Vento	1,3%	

### I.2.2. Energia Eólica no Brasil

No Brasil, apesar das perspectivas indicarem uma pequena, porém crescente, contribuição da energia eólica ao balanço energético nacional, podendo atingir níveis da ordem de 0,5% a 2,7% na geração elétrica do Nordeste do País no ano de 2015 (Lopes, 1985), poucas instituições de pesquisa e poucos recursos financeiros têm sido dedicados à área. Algumas instituições têm desenvolvido trabalhos que abrangem o estudo de SCEE de uma maneira apenas marginal, onde o assunto representa "motivo de pesquisa" e não "objetivo da pesquisa". Em outras instituições, alguns grupos de trabalho têm se constituído e desenvolvem esforços significativos à área. Entre estas se destacam, NERG/UFPb, COPPE/UFRJ, UFPe e UFRS. A Tabela I.2, apresentada inicialmente por Araújo (1983) é indicativo dos tópicos que estão sendo pesquisados e das instituições que a estes se dedicam.

O Instituto de Atividades Espaciais (I.A.E./CTA) vinha desenvolvendo trabalhos em energia eólica, desde 1975, buscando aprimorar o desempenho de turbinas eólicas, notadamente para produção de eletricidade com sistema de armazenamento por banco de baterias. Neste sentido construiu-se cataventos tipo Gedser de 20kW, 3 pás e um tripás de 3,8kW.

A COPPE/UFRJ em conjunto com a Induco S.A., desenvolveu um sistema eólico, consistindo de uma turbina de eixo horizontal de 4 pás acoplado a um alternador para carregamento de

TABELA 1.2 Programas Eólicos no Brasil

Entidades	CTA *	NERG	COOPETE	PUC- RJ	UNICAMP	UFSC	UFPE	UFRRS	ITAJUBA	IPOM *	SEPLAN	UFMG
Topicos												
1. Potencial eólico	x	x		x				x			x	
2. Turbinas												
a) horizontais	x	x	x				x		x			
b) verticais												
b.1) savonius		x		x	x	x	x			x		
b.2) darrieus		x		x				x				
b.3) Pás retas		x										
3. Bombas e transmissões		x					x					
4. Geradores elétricos e projetos	x	x	x		x	x			x			x
5. Sistemas de controle	x	x	x			x						x
6. Túnel de vento	x		x	x	x							
7. Centrais em campo aberto	x	x										
8. Economia de energia/ fontes alternativas		x										

(\*) Programas desativados

baterias, e tem desenvolvido estudos com esquemas de controle deste sistema. Além disso, foram desenvolvidas turbinas tipo Darrieus, Savonius e Multipás.

A PUC-RJ, apresenta algum esforço na área, onde pode-



se destacar a construção de uma turbina Savonius de 3 estágios, estudos sobre sistemas de bombeamento e levantamento do regime de vento.

O grupo de Energia Eólica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE vem exercendo atividades de pesquisa aplicada ao bombeamento d'água. Nestes termos foram desenvolvidos cataventos múltiplos acoplados a compressores de ar alternativos e de bombas de ar comprimido, além de bombas especiais.

A UFRS tem desenvolvido trabalhos voltados à aplicação de energia eólica para irrigação e de levantamento do regime de vento na região.

A UFPb, no Campus de Campina Grande, vem trabalhando no sentido de consolidar o aproveitamento da energia eólica na região NE. O Núcleo de Energia e o Núcleo de Meteorologia elaboraram uma carta eólica para a região. Nestes termos, o NERG vem, desde 1978, trabalhando em projeto, construção e simulação de SCEE e vários protótipos encontram-se em fase final de construção e testes. Tem sido construídas várias turbinas do tipo Darrieus, indicando um pioneirismo no Brasil nesta área, sistemas de bombeamento com turbinas Savonius, vários protótipos de geradores elétricos e instrumentação.

Nos últimos congressos nacionais, tais como VI Congresso Brasileiro de Automática e IV Congresso Brasileiro de Energia, que não se constituem em eventos específicos da área eólica, os poucos trabalhos apresentados enfatizam o projeto de

sistemas, destacando os esforços da UFPb, UFRS, COPPE e UFPe.

### I.3. PROPOSTAS DO TRABALHO

O estudo de Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE) de pequeno e médio porte tem se desenvolvido em aplicações bem distintas, como aquecimento ambiental e fornecimento diesel/eólico. Nestes sistemas, o aspecto de projeto tem predominado à análise operativa em campo aberto.

Neste trabalho são analisados os aspectos de projeto, otimização operativa, modelagem e ensaios dos componentes individuais de SCEE e operação em campo aberto. São estudadas duas aplicações da conversão eólico-elétrica de significativa importância no meio rural: bombeamento d'água e carregamento de baterias. Neste sentido, o trabalho busca qualificar uma metodologia de análise e, ao mesmo tempo, avaliar o desempenho destes sistemas frente a um projeto específico de um SCEE, modelo Elektro WVG-120 da Winterthur.

Baseada na engenharia de sistemas eólicos, o trabalho procura identificar e solucionar os problemas inerentes à modelagem e determinação de parâmetros de um sistema físico complexo, onde diversos fenômenos ocorrem simultaneamente de maneira a contribuir no comportamento específico do sistema como um todo. Definida uma modelagem e uma metodologia de ensaios que preserve os fenômenos significativos, a análise do desempenho global é

conduzida tanto teórica quanto experimentalmente.

A compatibilização dos resultados teóricos e experimentais constitui outra dificuldade à conclusão sobre o comportamento do sistema. A operação com ventos reais aleatórios limita uma avaliação do regime permanente e, portanto estático, do SCEE.

Os sistemas eólicos estudados são operados em diversas condições de vento e de controle em vista a uma melhor caracterização na comparação dos resultados obtidos pelos modelos.

A otimização operativa de um SCEE para carregamento de baterias é analisada e implementada através de uma malha de realimentação de velocidade controlando a autoexcitação do gerador elétrico. No sistema de bombeamento, o chaveamento de conjuntos motor-bomba é escolhido como alternativa a um melhor acompanhamento da característica de eficiência máxima do rotor eólico.

O acoplamento turbina-carga é avaliado e são discutidas as características inerentes do projeto do SCEE. As alternativas de melhoria operativa do sistema são destacadas face a uma distribuição de ventos obtida na Central de Testes do Núcleo de Energia/UFPb.

Tendo em vista os impactos de carga provenientes do chaveamento de motores de indução nos terminais elétricos do aerogerador, é analisado o comportamento dinâmico do sistema de bombeamento d' água, a fim de garantir o bom desempenho deste acionamento.



O trabalho engloba diversos aspectos da engenharia de sistemas eólicos, onde se pode identificar contribuição nos seguintes tópicos:

- Modelagem e ensaios em geradores síncronos, motores de indução e bombas centrífugas quanto aos aspectos de perdas dissipadas;
- Modelagem e ensaio de uma turbina eólica a passo variável;
- Estudo do acoplamento de cargas em sistemas eólicos de carregamento de baterias;
- Estudo do acoplamento de cargas em sistemas eólicos de bombeamento d'água com conexão elétrica de motores-bombas;
- Ensaio em campo aberto e tratamento de dados do SCEE;
- Otimização de SCEE;
- Análise dinâmica de SCEE para bombeamento d'água com conexão elétrica.

Este esforço possibilitou a publicação de 07 trabalhos técnicos em congressos nacionais e de 03 trabalhos em congressos internacionais.

#### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto foi organizado de maneira a privilegiar a metodologia empregada em relação à aplicação específica da energia eólica. Deste modo, são abordados nos seus diversos capítulos, os aspectos essenciais à análise de sistemas físicos.

O capítulo II apresenta os fundamentos básicos de engenharia de sistemas eólicos, identificando a energia eólica como fonte energética e os aparatos que compoem um SCEE. No aspecto sistêmico, são avaliadas as características básicas, os diversos esquemas de fornecimento e o aspecto do acoplamento de cargas envolvendo sistemas de bombeamento d'água e fornecimento de eletricidade. É definida uma metodologia simplificada de análise à luz do conhecimento adquirido na literatura técnica e dos trabalhos desenvolvidos no Núcleo de Energia /UFPb.

O capítulo III define a modelagem, os ensaios e os tratamentos de dados necessários à precisa representação dos diversos componentes de um SCEE. Neste capítulo, os sistemas eólicos estudados são descritos com objetivo de caracterizar cada subsistema de cargas.

No capítulo IV, a análise da operação dos SCEE é apresentada, descrevendo-se os esquemas de controle projetados e implementados na prática. Os algoritmos de simulação são descritos e a metodologia de ensaio em campo aberto e de tratamento de dados é avaliada. A comprovação teórico-experimental conduz a uma

avaliação mais fundamentada do aproveitamento.

No capítulo V, o comportamento dinâmico do sistema eólico de bombeamento d'água é analisado. São apresentados os algoritmos e modelos dinâmicos de simulação. Diversos resultados são apresentados identificando-se os diferentes impactos à que o sistema está sujeito quando em operação.

## CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As noções básicas do aproveitamento de energia eólica são apresentadas, neste capítulo, dando ênfase à geração de energia elétrica e suas aplicações. As metodologias de acoplamento de cargas aplicadas ao fornecimento de energia elétrica propriamente dito e ao bombeamento centrífugo são discutidas com base na experiência desenvolvida no Núcleo de Energia (NERG - CCT - UFPB).

Portanto, são apresentados os fundamentos teóricos básicos de aerodinâmica, da geração e uso da eletricidade e as principais diretrizes dos estudos de sistemas de conversão de energia eólica, que darão subsídios à compreensão deste trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321 7222 - R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

## II.1. ENERGIA EOLICA

### II.1.1. A Fonte Energética

A energia eólica resulta da transformação de parte do efeito térmico solar em energia cinética da atmosfera. A diferença de radiação solar sobre regiões distintas do planeta provoca o deslocamento de camadas de ar, os ventos.

O inventário da energia recuperável a partir dos ventos tem sido objeto de constantes equívocos e exageros. Para o levantamento deste potencial energético é necessário distinguir três níveis diferentes de energia (Jufer, 1984):

- A "energia cinética armazenada na atmosfera" resultante do efeito solar, cuja quantidade de energia renovável num período de apenas três dias, é estimada em  $7 \cdot 10^{20}$  J, equivalente a cinco vezes a energia total consumida anualmente no mundo.
- A "energia cinética teoricamente recuperável" contida entre 5 e 100 m de altitude, representa 3 a  $30 \cdot 10^{20}$  J/ano, ou seja 2 a 20 vezes a energia total consumida anualmente no mundo.
- A "energia cinética praticamente recuperável" é avaliada em 3 a  $30 \cdot 10^{17}$  J/ano ou seja 0.2 a 2% do consumo mundial em um ano.

Apesar de representar uma pequena parcela do consumo mundial, a energia eólica praticamente recuperável representa

importante potencial para regiões diversas e usos específicos.

Além disso, a energia eólica é caracterizada pelo seu aspecto difuso e por sua aleatoriedade, indicando propriedades peculiares para seu emprego e possibilidades de fornecimento de grandes parcelas de energia.

### II.1.2. O Vento

A velocidade do vento varia com a localização geográfica e altitude, constatando-se alterações anuais e diárias. Dentro de certos limites de comportamento atmosférico, considera-se que para altitudes menores que 100m, a variação da velocidade de vento com a altura do solo pode ser expressa por (BWEA, 1982):

$$V(h) = V_1 \left( \frac{h}{h_1} \right)^\xi$$

onde  $V_1$  é a velocidade de vento medida na altura  $h_1$  (em geral 10m) e

$\xi$  é um coeficiente dependente da natureza do terreno.

p. ex.: terra plana  $\xi \cong 0.1$

terra muito acidentada  $\xi \cong 0.2$

O vento é caracterizado por duas grandezas variáveis em relação ao tempo, a velocidade e a direção. As variações destas grandezas obedecem a fenômenos de naturezas diversas: as variações instantâneas (rajadas ou turbulências) e as variações diárias e sazonais.

Segundo Golding (1976), as variações de velocidade e direção do vento afetam o desempenho de uma turbina eólica e as forças sobre as pás. As flutuações do vento constituem fenômeno estocástico que pode ser representado por métodos estatísticos.

O potencial eólico de um local é estimado a partir de curvas de duração de velocidade do vento. Segundo os padrões do World Meteorological Organization, as medições são efetuadas na altura de 10 m do solo e preferencialmente em intervalos de 10 minutos. Esta última proposta é baseada na análise espectral da velocidade de vento, como pode ser observado na Figura II.01, para a qual as flutuações da velocidade de vento durante um mês ocorrem significativamente em frequências correspondentes a períodos entre 10 h e 100 h e para períodos menores que 5 minutos. Sendo que esta segunda categoria denomina-se rajadas. Não ocorrem significativas variações de vento para períodos entre 5 minutos e 10 h, onde o comportamento da turbina eólica pode ser considerado quase-estático (Kinderen, Van Neel e Smulders, 1977).

Em termos de análise estatística, o regime de vento em um determinado local é representado por funções de distribuição obtidas de medições efetuadas em um determinado período. Entre as funções mais utilizadas destacam-se a distribuição de velocidade média de vento (Figura II.02) e a distribuição de frequência de ocorrência da velocidade de vento (Figura II.03). Enquanto a primeira representa o valor da velocidade média de vento ( $V_M$ ) em intervalos determinados, a segunda identifica o número de ocorrências de um determinado valor de velocidade de vento (Hladik



1984).

A distribuição de frequência de ocorrência tem sido satisfatoriamente modelada através da distribuição de Weibull (Justus, 1978, Ceballos e outros, 1978; e Simões, 1986). Esta distribuição é representada pela função:

$$f(V_M) = (K/C) (V_M/C)^{K-1} \cdot e^{-(V_M/C)^K}$$

onde  $f(V)$  = função densidade de probabilidade

$V_M$  = velocidade média de vento

$K$  = fator de forma

$C$  = velocidade característica

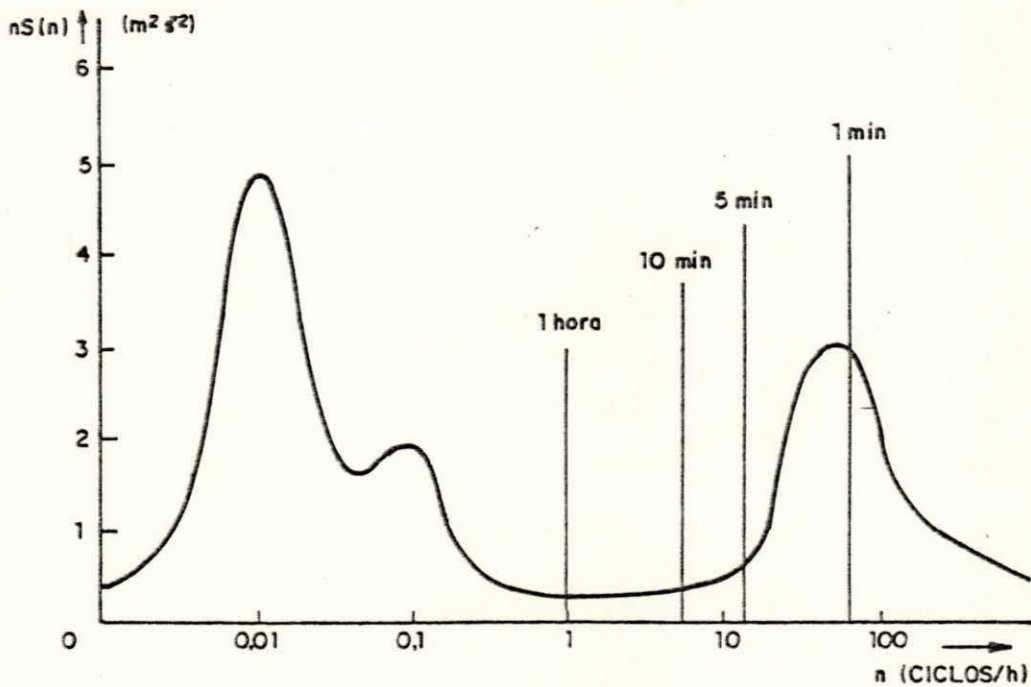


Figura II.01. Espectro esquemático da velocidade de vento, estimado por Van der Hoven.  $S(n)$  é a densidade de potência espectral.



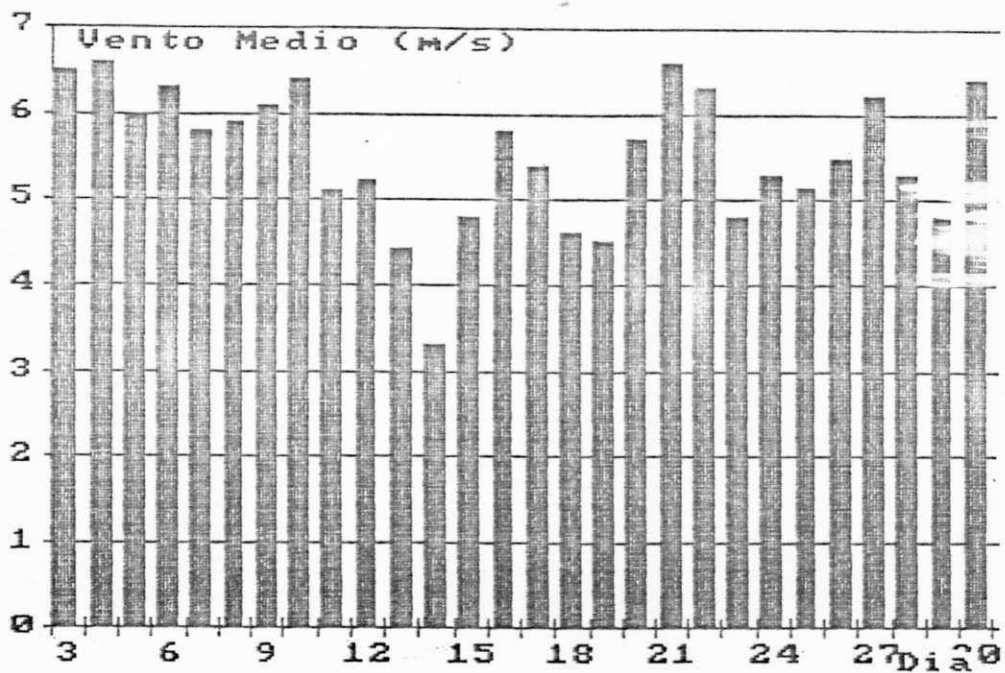


Figura II.02. Distribuição da velocidade de vento média diária em Campina Grande/NERG (agosto/83).

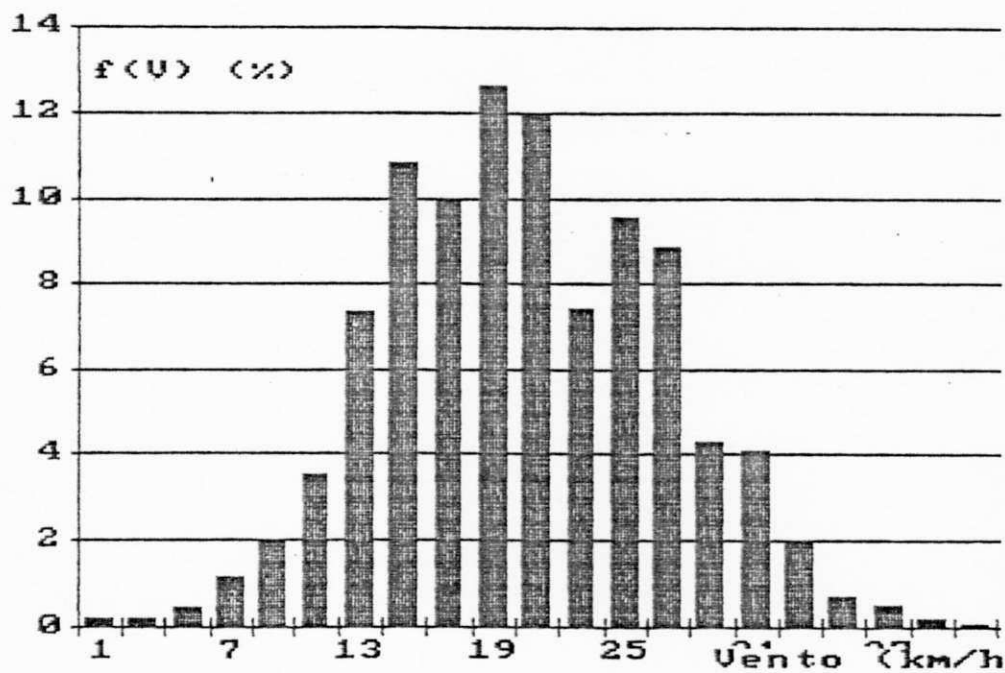


Figura II.03. Frequência de ocorrência de uma determinada velocidade de vento em Campina Grande/NERG (agosto/83)

K e C são parâmetros dependentes do local, e foram avaliados em  $K = 3,6$  e  $C = 6,18$ , para Central de Testes/NERG (Medeiros, 1986).

A modelagem através da distribuição de Weibull possibilita a determinação do potencial eólico de um local e a análise do desempenho dos sistemas eólicos ali instalados.

### II.1.3. A Energia Eólica

A energia cinética do vento por unidade de volume, obtida em uma velocidade de vento V, vale:

$$e_{cin} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2$$

onde  $\rho$  é a massa específica de ar ( $\approx 1,2 \text{ Kg/m}^3$ ).

A potência eólica disponível vale:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

onde A é a área varrida pelo rotor eólico.

É possível mostrar que apenas uma parte desta energia cinética é convertível, uma vez que o ar deve conservar uma velocidade que permita seu fluxo através do rotor de uma turbina eólica. A melhor conversão de energia é obtida quando a velocidade na esteira do rotor é igual a 1/3 da velocidade do vento incidente. A potência mecânica, teoricamente recuperável de uma

instalação eólica, corresponde no máximo a 59.3% (limite de Betz) da potência disponível incidente, (BWEA, 1982).

A energia eólica recuperável em um dado local é proporcional à média do cubo da velocidade de vento. Admitindo-se o rendimento de uma turbina eólica de 42%, valor relativamente elevado, obtém-se para uma área de  $1m^2$  de hélice, uma potência extraível equivalente a (Jufer, 1984):

$$P_e \approx 0,25 \bar{v}^3$$

onde a velocidade média cúbica vale:

$$\bar{v} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T v^3 dt \right]^{1/3}$$

facilmente distinguível da velocidade média,  $V_M$ , expressa por:

$$V_M = \frac{1}{T} \int_0^T v dt$$

Esta lei cúbica interfere diretamente na conversão de energia eólica, já que uma pequena variação de velocidade de vento repercute significativamente na potência disponível.

A energia eólica disponível, referente a um determinado período de tempo  $T$ , vale

$$E_d = \int_0^T P_d dt$$

onde  $dt = T f(V) dV$

Portanto pode-se escrever que:

$$E_d = \frac{1}{2} \rho A T \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV$$

A potência efetivamente extraível por unidade de área depende de características implícitas à aplicação pretendida da energia. Em sistemas eólicos de bombeamento d'água tradicionais, que comportam conexões unicamente mecânica entre turbina e bomba, esta potência vale aproximadamente (Musgrove, 1983):

$$\frac{P_e}{A} = 0,1 \bar{V}^3$$

Isto equivale a uma eficiência global em torno de 8%, enquanto em sistemas eólicos de geração de eletricidade atinge-se a eficiência de 20%.

A função densidade de energia disponível fornece dados importantes sobre o aproveitamento eólico, possibilitando uma visão global do desempenho do sistema. Esta função é representada por (Justus, 1978):

$$\frac{dE_d}{dV} = \frac{1}{2} \rho A T \bar{V}^3 f(V) dV$$

Assim pode-se determinar a escala de velocidade de vento com maior conteúdo energético (Figura II.04), útil ao projeto e à operação de sistemas eólicos. Segundo Dixon (1979), 90% da energia disponível encontra-se entre  $V_M$  e  $3V_M$ , o que pressupõe um projeto baseado em uma velocidade de vento de

1,8V<sub>M</sub>. Para a Central de Testes do NERG, foi detectado que 90% da energia eólica disponível encontra-se contida entre 0,7V<sub>M</sub> e 1,8V<sub>M</sub>, denotando um comportamento distinto do previsto por Dixon.

## II.2. TURBINA EOLICA

### II.2.1. A Conversão de Energia

Uma turbina eólica é formada essencialmente por um conjunto de pás sob a ação do vento. As forças que são exercidas sobre estas pás fazem com que estas girem em torno de um eixo. A ação do vento sobre um corpo pode ser definida por duas componentes de força: o arrasto e a sustentação. A força de arrasto é a componente na direção da velocidade de vento relativa, enquanto a força de sustentação é a componente perpendicular a esta direção (Figura II.05), (Hladik, 1984).

A velocidade relativa  $V_r$ , que é medida levando em conta fator de interferência ( $a$ ) da turbina sobre a velocidade de vento  $V$ , vale :

$$V_r = V.(1-a) - w_t . R$$

As forças de sustentação ( $F_L$ ) e arrasto ( $F_D$ ) são proporcionais à densidade do ar, à área das pás e ao quadrado da velocidade relativa do aerofólio. As constantes de proporcionalidade são definidas como coeficientes de sustentação ( $C_L$ ) e arrasto ( $C_D$ ), funções do ângulo de ataque,  $\gamma$ , e constituem caracterís

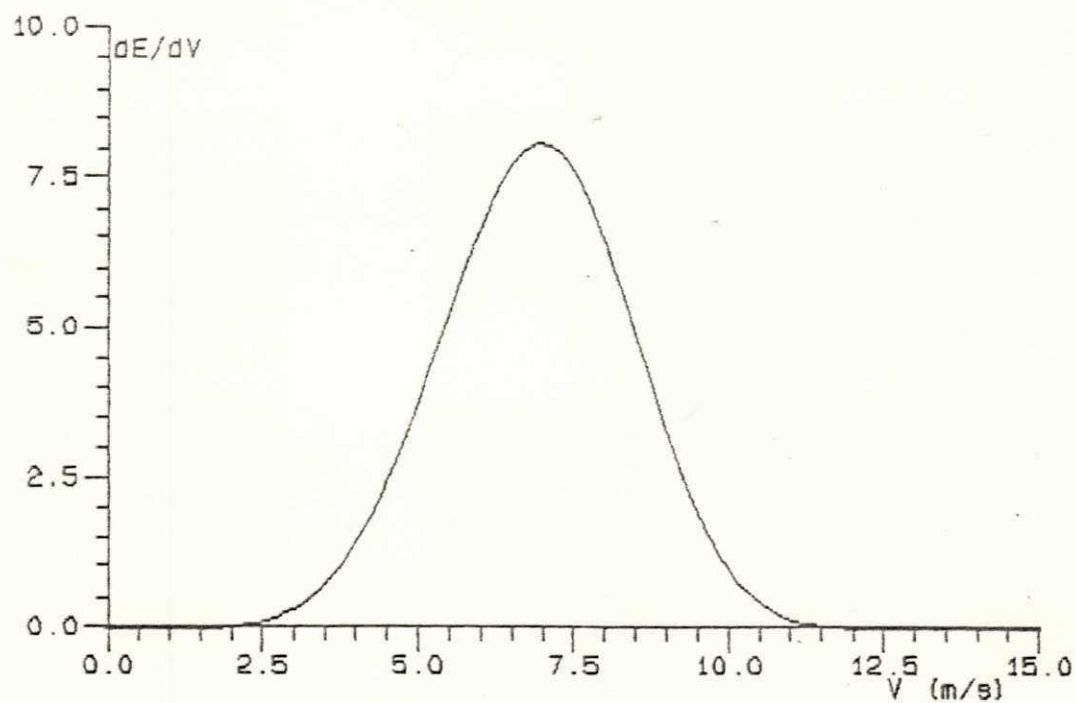


Figura II.04. Densidade de Energia Disponível em Campina Grande/PB ( agosto/83).

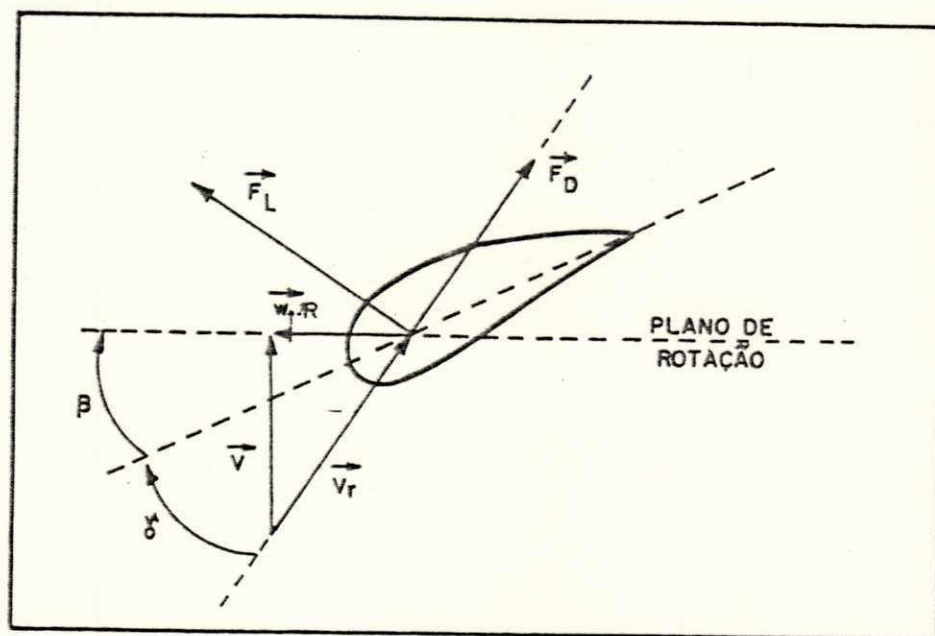


Figura II.05. Vetores de velocidades e forcas sob um perfil aerodinâmico.



ticas implícitas ao perfil aerodinâmico, (Figuras II.06 e II.07).

A força resultante, no plano de rotação, que contribui para o conjugado desenvolvido pela pá, vale (Gimpel and Stodhart, 1958) :

$$F_a = F_L \text{ sen } \theta - F_D \text{ cos } \theta$$

onde  $\theta = \gamma + \beta$

$\gamma$  = ângulo de ataque em relação ao plano de rotação

$\beta$  = ângulo de passo

As pás de cataventos modernos são construídas utilizando-se perfis aerodinâmicos projetados para produzirem elevados coeficientes de sustentação (Figura II.06). Um aerofólio apresenta uma borda de ataque e uma borda de fuga, cuja distância entre seus pontos extremos constitui a corda do perfil. Os perfis de turbinas eólicas modernas são em geral do tipo plano-convexo (Gottingen) ou biconvexo (NACA). Ao longo da estrutura da pá, esta pode apresentar uma torção para garantir um ângulo de ataque aproximadamente constante em toda sua extensão (Hladik, 1984).

Algumas turbinas eólicas apresentam dispositivo de variação do ângulo de passo, a fim de controlar a velocidade, e portanto, a potência, reduzindo-se o ângulo de ataque pelo aumento do ângulo de passo.

O projetista de turbinas eólicas portanto tem à sua disposição diversas ferramentas para garantir um bom projeto aerodinâmico, isto é, alta sustentação com baixo arrasto. Para o

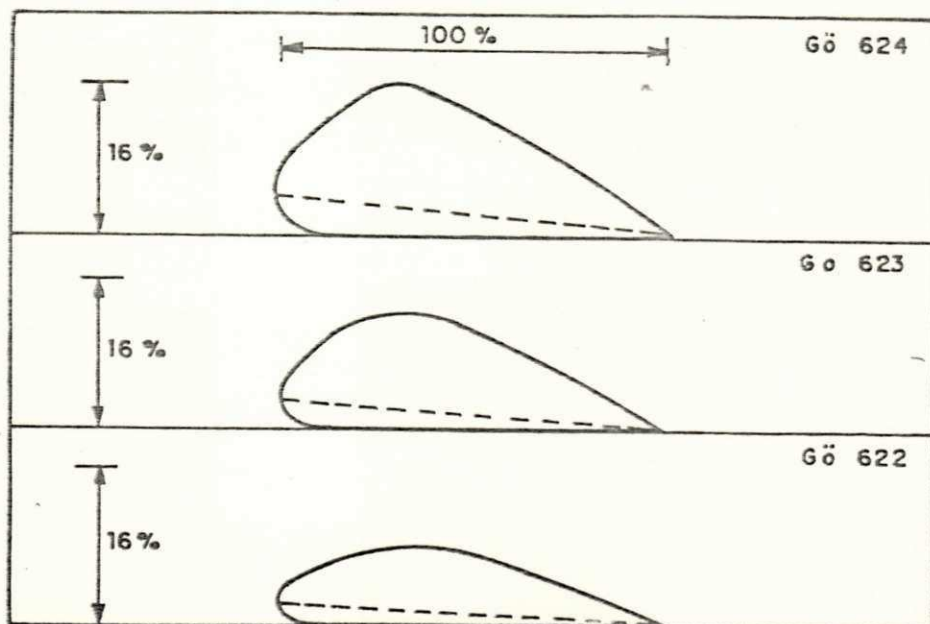


Figura II.06. Formas Geométricas dos perfis aerodinámicos Gottingen 622, 623 e 624.

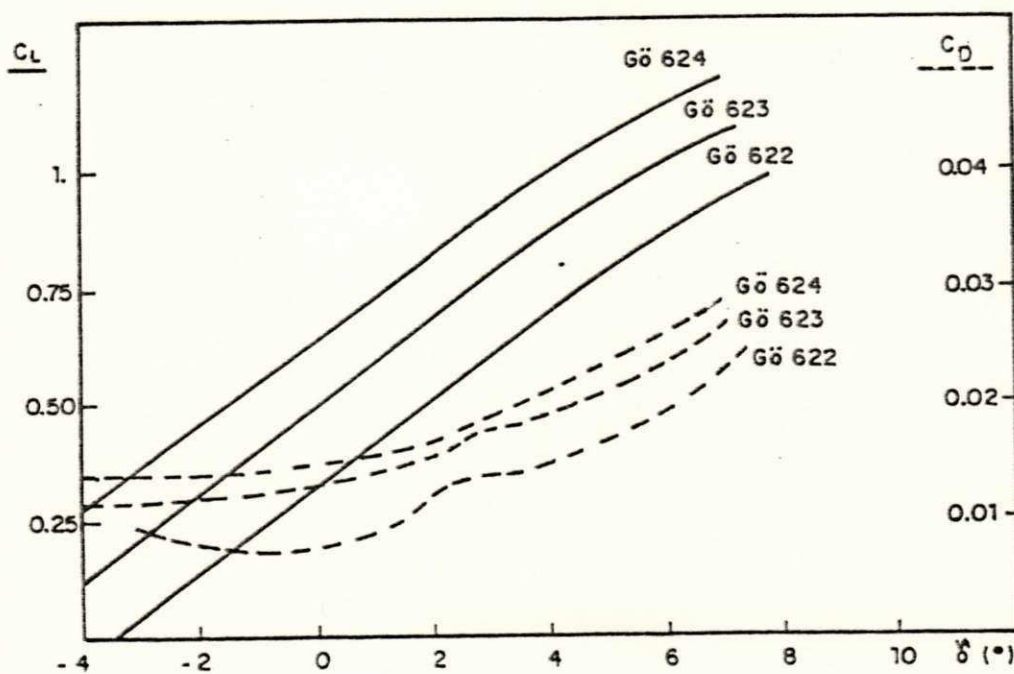


Figura II.07. Coeficientes de Sustentação ( $C_L$ ) e de Arrastro ( $C_D$ ) em função do ângulo de ataque  $\alpha$ .

sistema eólico como um todo, o projeto estrutural é vital a fim de garantir uma operação confiável, por prolongado período (maior que 20 anos), com baixo custo de construção.

#### II.2.2. Características Operativas

Na literatura técnica é comum distinguir as turbinas eólicas segundo dois critérios:

- direção do eixo de rotação em relação ao vento (eixo horizontal ou vertical)
- qualidade das forças predominantes (arrasto e sustentação)

As turbinas de eixo horizontal apresentam seu eixo de rotação em paralelo com a direção do vento. Nestes tipos de turbinas se encontram os modelos multi-pás americano e as turbinas eólicas rápidas de 3, 2 e 1 pás.

As turbinas de eixo vertical são representadas principalmente pelos modelos Savonius e Darrieus funcionando com qualquer direção de vento, (Warne e Calnan, 1977).

A qualidade das forças predominantes na operação de uma turbina eólica dita praticamente suas características básicas. As turbinas que funcionam por arrasto (modelo Savonius, por exemplo) apresentam baixas velocidades rotacionais, baixo rendimento aerodinâmico e um custo elevado pela grande quantidade de material envolvido. As turbinas rápidas como as tri-pás, bi-pás,

monópteros e Darrieus, se caracterizam por operarem por sustentação apresentando elevadas velocidades e altos rendimentos aerodinâmicos sendo, portanto, indicadas para geração de eletricidade.

A potência desenvolvida por uma turbina eólica depende da velocidade do vento e da velocidade rotacional. As relações entre a potência, a velocidade do vento e a velocidade rotacional são normalmente apresentadas por coeficientes adimensionais, a fim de tornar esta informação aplicável em diversas circunstâncias. Dois parâmetros adimensionais mais largamente utilizados para descrever estas relações são a relação de velocidades  $\lambda$  e o coeficiente de potência  $C_p$ . O primeiro é definido como:

$$\lambda = \omega_t R / V$$

onde  $R$  é o raio do rotor eólico, medido na ponta da pá,  $\omega_t$  é a rotação da turbina. O coeficiente de potência, também chamado de rendimento aerodinâmico de uma turbina eólica, é definido como:

$$C_p = \frac{P_e}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

Outro parâmetro adimensional importante é o coeficiente de conjugado, definido como :

$$C_q = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho A R V^2}$$

onde  $T_t$  é o conjugado desenvolvido pelo rotor eólico.

As características  $C_p(\lambda)$  e  $C_q(\lambda)$  de uma turbina

eólica são ilustradas na Figura II.08. Nesta pode-se verificar que a potência desenvolvida por um rotor eólico é nula ( $C_p = 0$ ) em dois valores de relação de velocidades; quando o rotor está estacionário e quando a velocidade na ponta da pá do caivoento é várias vezes maior que a velocidade do vento. A máxima eficiência ( $C_{pmáx}$ ) é obtida em um valor intermediário da relação de velocidades,  $\lambda_0$ . De maneira análoga o conjugado desenvolvido pelo rotor é máximo ( $C_{qmáx}$ ) em uma determinada relação de velocidades,  $\lambda_t$ , o que determina a região de operação estável da turbina para  $\lambda > \lambda_t$ . A região de baixas relações de velocidades é caracterizada pelo "estolamento" das pás, isto é, a perda de sustentação que ocorre das seções externas da pá (ponta) para as internas (raiz da pá).

Um importante parâmetro do projeto de turbinas eólicas é a relação entre a área total das pás do rotor e a área varrida por estas, num perímetro correspondente a 70% do raio das pás. Este parâmetro adimensional é conhecido por solidez ( $s$ ) e vale (Gimpel e Stodhart, 1958):

$$s = \frac{n c}{0,7 \pi D}$$

onde

$n$  = número de pás.

$c$  = corda a 0.7 do raio das pás (m)

$D$  = diâmetro do rotor (m)

A referência ao ponto de 70% do raio é utilizada uma

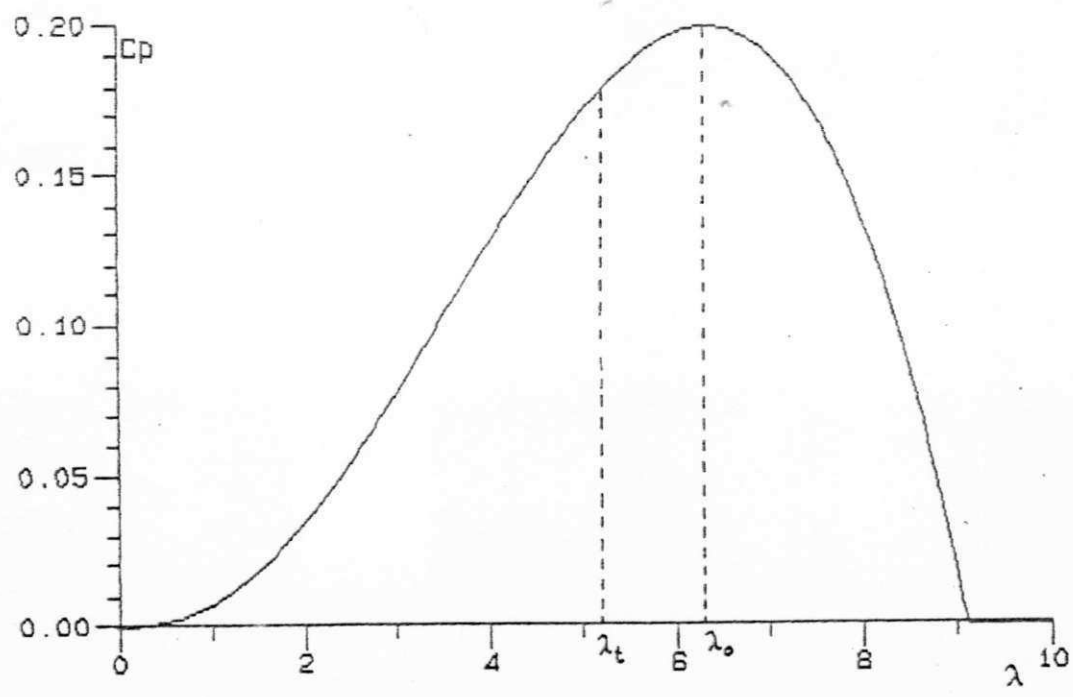


Figura II.08.a. Característica  $C_p(\lambda)$  da turbina de eixo horizontal do SCEE Elektro WVG-120.

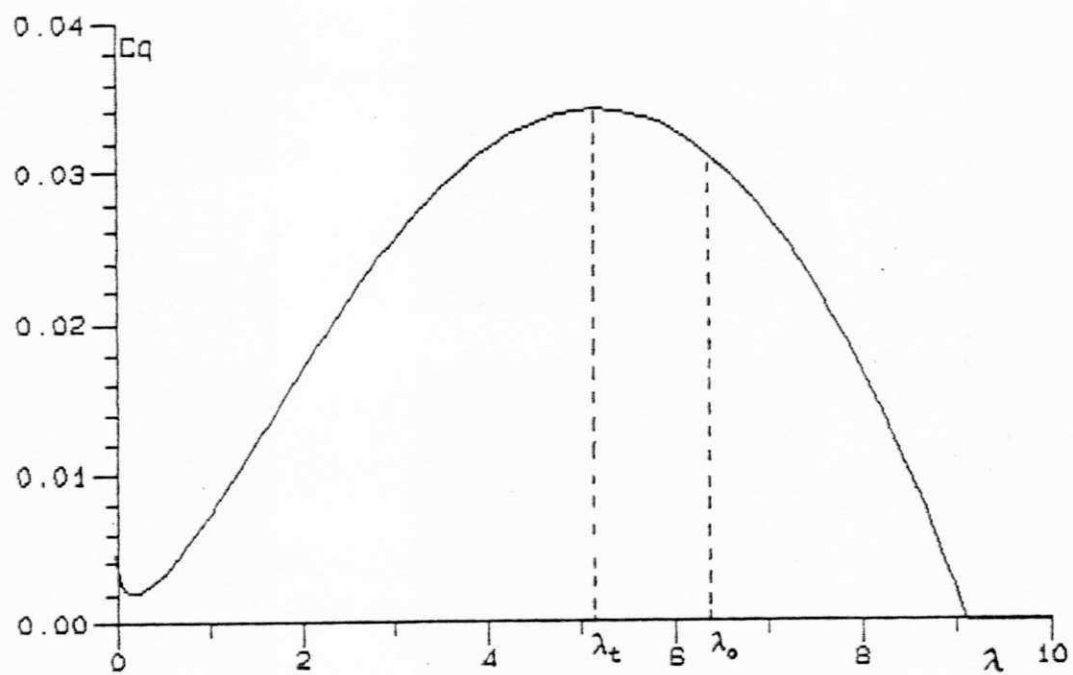


Figura II.08.b. Característica  $C_q(\lambda)$  da turbina de eixo horizontal do SCEE Elektro WVG-120.



vez que esta região é que esta sujeita aos maiores esforços. Pela análise de alguns projetos eólicos tem-se observado que a solidez pode fornecer informações mais detalhadas sobre a operação da turbina. Pode-se escrever que (Gimpel e Stodol, 1958)

$$\lambda_0 = s^{-0,6}$$

A solidez caracteriza de forma significativa a operação das turbinas eólicas. Nas figuras II.09.a e II.09.b. são comparadas características de turbinas de solidez diferentes. Um rotor de alta solidez apresenta alto conjugado de partida e bom desempenho em baixas velocidades. Rotores de baixa solidez operam a velocidades elevadas, a rendimentos maiores e com pobre característica de partida.

Dentre as turbinas de baixa solidez os rotores de eixo horizontal tem sido amplamente empregados em faixas de potência de 100W a 3,2MW (projeto MOD-5 do programa eólico americano). Os rotores de eixo horizontal, apesar de necessitarem de dispositivo de orientação com a direção do vento, operam a altos rendimentos e podem ser instalados em alturas elevadas onde estão presentes as maiores velocidades de vento.

A solidez de turbinas eólicas modernas atinge valores entre 5% e 10%, já que projetadas para altas eficiências e altas velocidades o que implica aplicações direcionadas à geração de energia elétrica. No caso de uma turbina eólica Elektro modelo WVG-120 a solidez vale 4,62% e  $\lambda_0 = 6,35$ , enquanto no modelo tradicional multipás a solidez excede 50%.

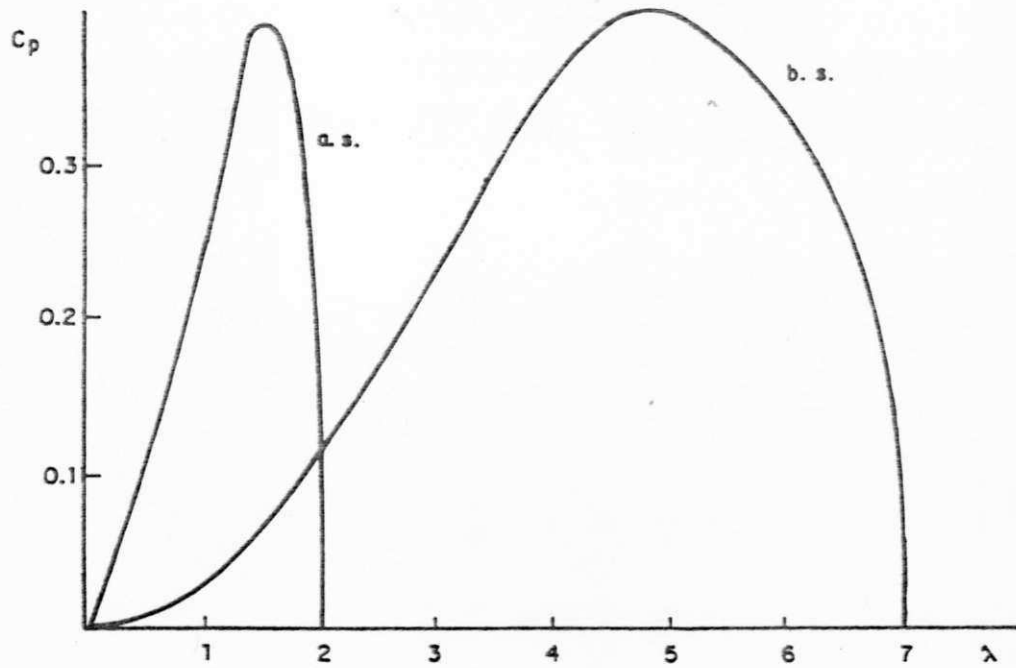


Figura II.09.a. Características  $C_p(\lambda)$  de turbinas de solidez diferentes.

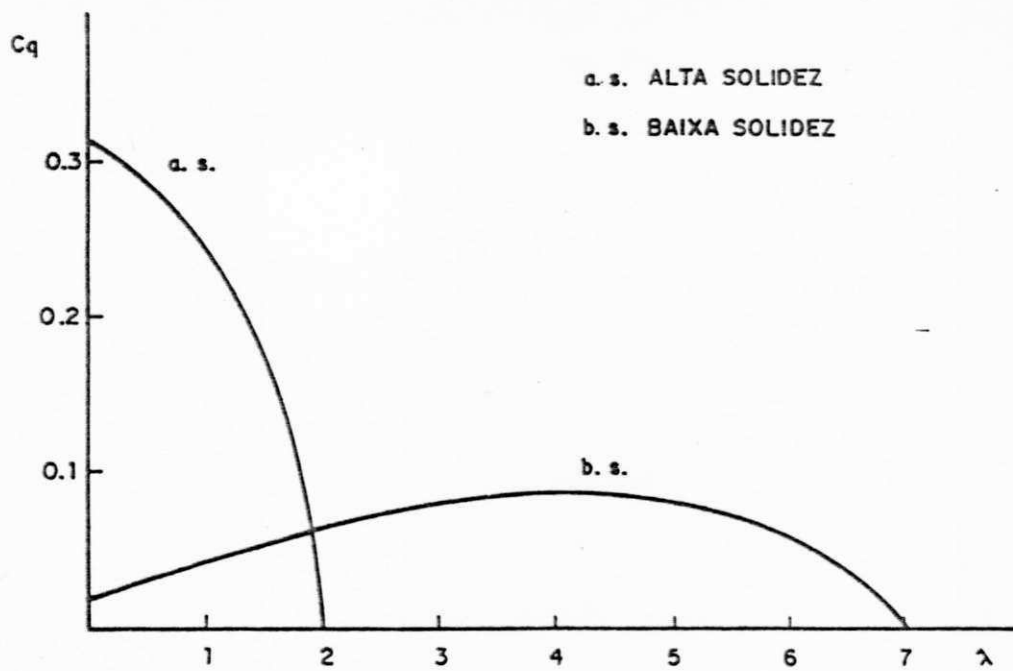


Figura II.09.b. Características  $C_q(\lambda)$  de turbinas de solidez diferentes.

### II.2.3. A Operação

Devido a operação em altas velocidades, os rotores de baixa solidez necessitam de dispositivos de controle e proteção afim de garantir confiabilidade e segurança aos equipamentos. Uma turbina eólica, operando à relação de velocidades constantes  $\lambda = \lambda_0$ , apresenta uma concordância linear entre a velocidade rotacional e a velocidade de vento, o que conduz a uma característica de potência dependente do cubo da rotação. Torna-se praticamente difícil prever uma carga que se sujeite a uma variação cúbica em ampla escala de rotação. Em vista destes fatores, é usual limitar a potência desenvolvida por uma turbina, de modo que a partir da velocidade nominal de projeto  $V_R$ , a rotação e, portanto a potência, permaneçam aproximadamente constantes.

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p = \frac{1}{2} \rho A R^3 \omega_t^3 \frac{C_p}{\lambda^3}$$

Para operar à potência constante a turbina deve apresentar um comportamento tal que a relação  $C_p/\lambda^3$  seja constante.

Esta limitação de potência pode ser implementada por diversas maneiras, entre elas: o sistema centrífugo de variação do passo (em turbinas de passo variável) e o controle por "stall" (em turbinas de passo fixo). A variação do passo consiste no aumento do ângulo de passo da pá,  $\beta$ , com o aumento da rotação, levando a uma redução no ângulo de ataque, que reduz a sustentação e o rendimento aerodinâmico de turbina. Um exemplo de um

sistema centrífugo é mostrado na figura II.10.

Em velocidades de vento superiores à velocidade de corte  $V_F$ , as forças que atuam sobre as pás podem danificá-las, podendo ocorrer falhas em outros componentes do SCEE e portanto este deve ser desativado.

Por operarem com reduzidas potências em baixas velocidades e pelas pobres características de partida nas turbinas eólicas de baixa solidez, um dispositivo de partida geralmente retira o sistema de funcionamento para velocidades inferiores à velocidade inicial de acionamento,  $V_C$ .

Pode ser considerado que o conjugado desenvolvido por um rotor eólico na partida é devido basicamente à variação da quantidade de movimento do fluxo de ar defletido. A partir destas afirmações pode-se deduzir que o conjugado produzido por um elemento da pá de comprimento radial  $dR$ , situada a uma distância  $R$  do eixo de rotação, vale:

$$dT_p = c v^2 \frac{\sin 2\beta}{2} R \cdot dR$$

Integrando esta expressão no intervalo de 25% a 100% do raio do rotor eólico, pode-se escrever (Gimpel e Stodhart, 1958) :

$$T_p = 0.2577 \rho s R^3 v^2 \sin 2\beta$$

Portanto, nos rotores de passo variável obtém-se máximo conjugado de partida para  $\beta = 45^\circ$ .

A característica de operação  $P_e(V)$  de uma turbina

eólica fica definida pela determinação dos parâmetros  $V_C$ ,  $V_R$  e  $V_F$  (Figura II.11). Sabe-se que para velocidades inferiores a  $V_C$  e superiores a  $V_F$ , a potência de saída é nula, já que nestas condições o sistema não deve estar acionado. Para velocidades de vento compreendidas entre  $V_C$  e  $V_R$ , a potência depende das características da carga e fica limitada pela curva de máxima potência convertida pela turbina (operação a  $\lambda = \lambda_0$ ). No intervalo entre  $V_R$  e  $V_F$  a potência absorvida é igual à nominal, e este intervalo é caracterizado pela operação a rotação constante.

### II.3. SISTEMAS DE CONVERSAO DE ENERGIA EOLICA

#### II.3.1. Características Básicas de SCEE

Um sistema de conversão de energia eólica consiste basicamente de dois subsistemas: o subsistema acionante representado pela turbina eólica e seus mecanismos de controle e, o subsistema acionado que, para o caso da geração elétrica, consiste de um sistema de geração, controle e utilização da energia extraída dos ventos em forma de energia elétrica. A turbina capta a energia cinética dos ventos e transforma em energia mecânica rotacional em seu eixo, enquanto o subsistema acionado possibilita a conversão desta energia em trabalho útil.

A engenharia de SCEE envolve a seleção de combinações turbina/carga que são compatíveis ou que devem ser compatibilizadas e, a análise do desempenho desta combinação perante um regime

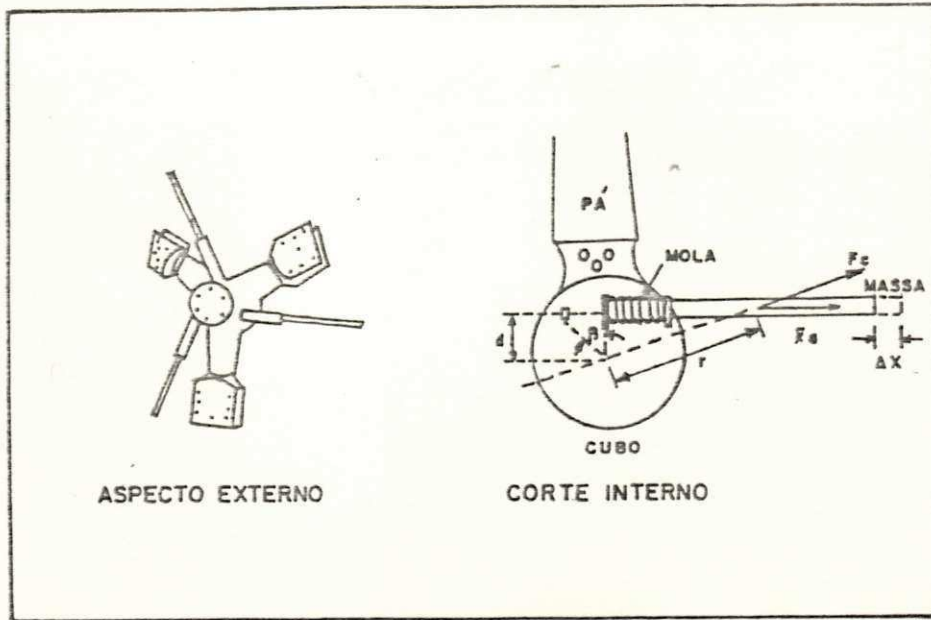


Figura II.10. Sistema de Controle Centrífugo do passo da pá no SCEE Elektro.

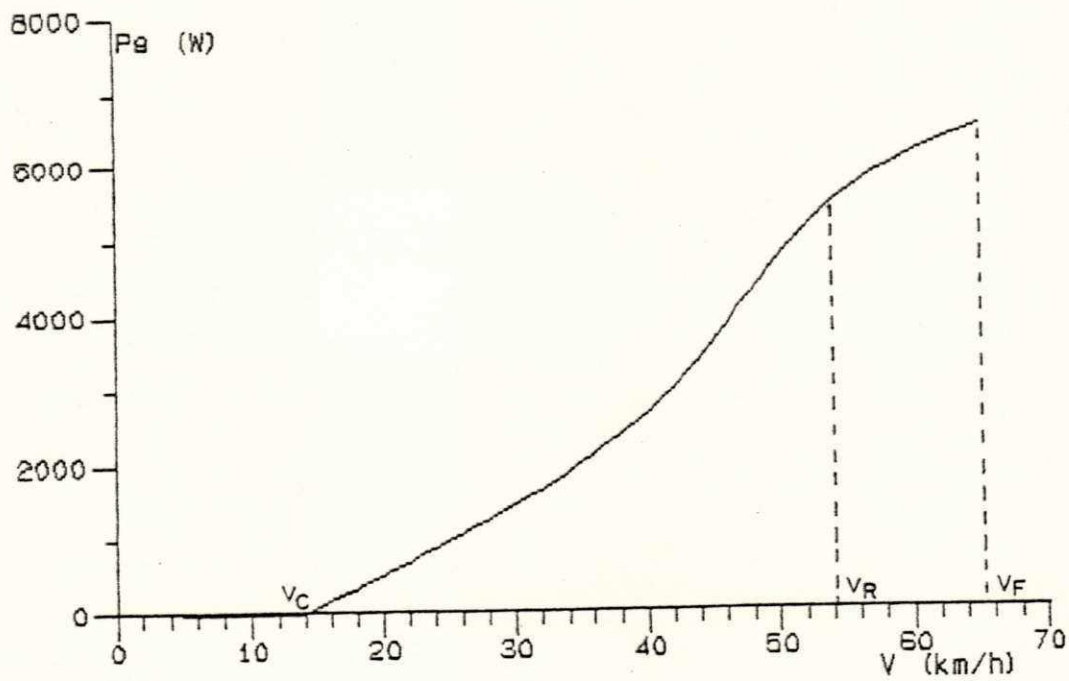


Figura II.11. Característica  $P_e(V)$  do SCEE Elektro.



de vento local.

Devido à complexidade das características entrada/saída dos diversos componentes de um SCEE, não é possível determinar uma solução geral, já que o problema do acoplamento de características é dependente de um grande número de variáveis. Portanto, não há uma turbina ideal para todas as aplicações e nem uma dada carga prescreve um conjunto de propriedades desejáveis que um rotor eólico requisitaria.

As características de desempenho de turbinas eólicas,  $C_p(\lambda)$  são parte integrante do estudo de SCEE (Bannas e Sullivan, 1976). As características  $T_t(w_t, V)$  de turbinas eólicas são definidas, pela sua forma, como aninhadas, não-aninhadas ou híbridas. Nas curvas aninhadas ( Figura II.12.a), um aumento da velocidade de vento, a uma dada rotação, implica sempre num acréscimo de conjugado ( p.ex. turbinas de eixo horizontal). As não-aninhadas ( Figura II.12.b) têm a propriedade segundo a qual o conjugado para uma dada rotação deve crescer com a velocidade de vento mas, eventualmente decresce se a velocidade de vento continua a aumentar (p.ex. turbina Darrieus). Nas características híbridas o conjugado em uma dada rotação pode decrescer com o aumento da velocidade de vento mas eventualmente cresce se a velocidade de vento continua a aumentar. Esta última classe de características são encontradas nas turbinas Darrieus com modelo Savonius acoplado a seu eixo.

### II.3.2. Classificação - Aplicações

As vantagens da conversão da energia eólica em energia elétrica são numerosas, dentre elas destacam-se:

- o gerador elétrico pode ser projetado para possuir alta eficiência em ampla escala de velocidades, com alta confiabilidade e baixa manutenção;
- a energia gerada pode ser transmitida ao ponto de consumo com eficiência e baixos custos;
- a energia elétrica pode ser condicionada, modulada e convertida em outras formas energéticas.

Baseando-se na análise sistêmica, os esquemas de conversão eólica-elétrica podem ser classificados em sistemas de velocidade constante e frequência constante (VCFC), sistemas de velocidade variável e frequência variável (VVFV) e sistemas de velocidade variável e frequência constante (VVFC) (Jadayadev, 1976). Esta classificação abrange a grande maioria dos esquemas até então propostos e em estudo.

Os esquemas VCFC utilizam geralmente geradores síncronos, de ímã permanente ou assíncronos conectados diretamente à rede elétrica. São empregados em localidades onde existe fornecimento convencional de eletricidade, e em "fazendas de catavento".

A característica principal dos sistemas VVFC é a conexão indireta à rede elétrica, que geralmente é implementada por conversores estáticos. Nesta categoria se distinguem: o esquema

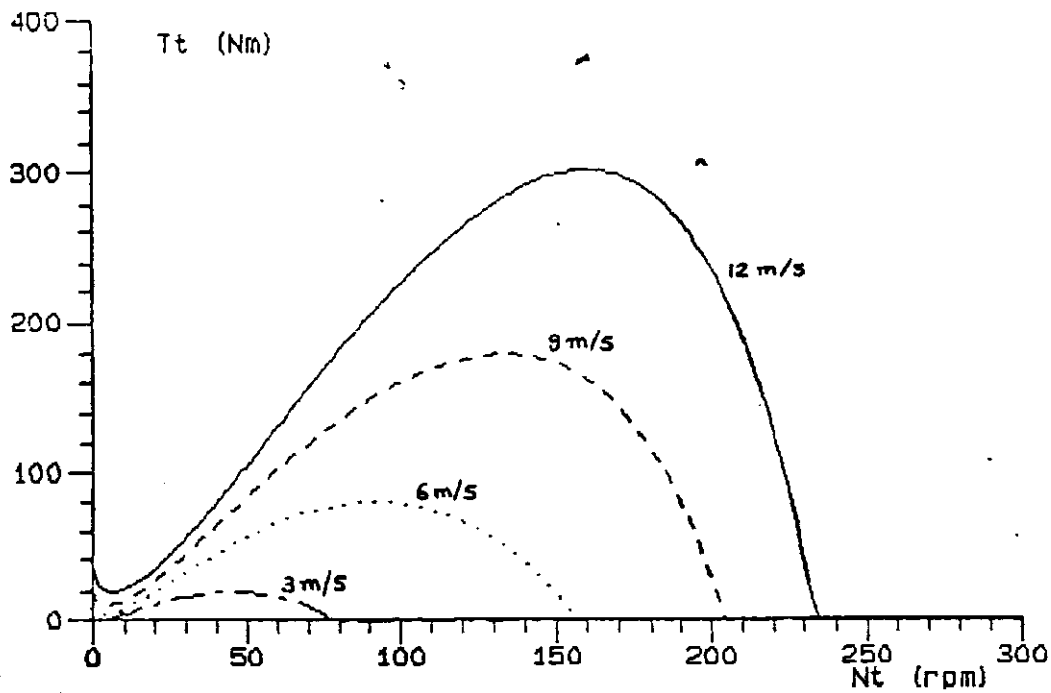


Figura II.12.a. Características aninhadas de  $T_t(w_t, V)$  da turbina do SCEE Elektro em ventos de 3, 6, 9 e 12 m/s.

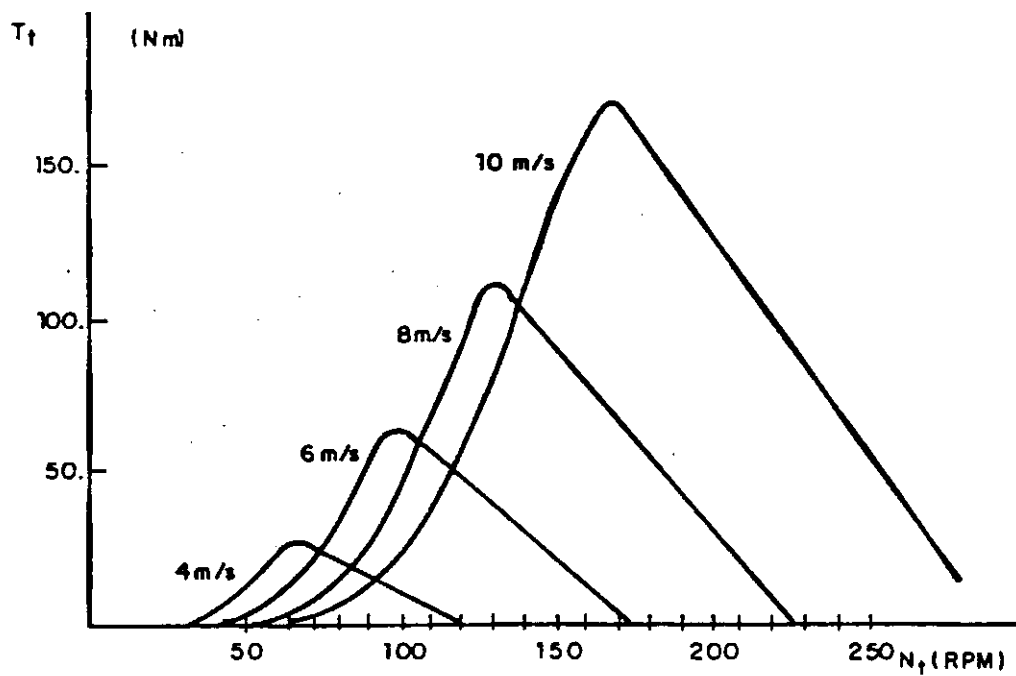


Figura II.12.b. Características não-aninhadas de  $T_t(w_t, V)$  de uma turbina Darrieus de pás retas em ventos de 4, 6, 8 e 10 m/s.

clássico de conexão indireta (turbina-alternador-retificador-inversor à comutação natural-rede elétrica) e o esquema com gerador de indução com recuperação de energia rotórica.

Os sistemas VVfV utilizam normalmente turbinas a passo variável acionando geradores assíncronos ou síncronos e podem ser subdivididos em sistemas com carga a frequência constante e carga a frequência variável. Os esquemas com carga a frequência constante apresentam um certo nível de controle de frequência e tensão, e prevêm um estágio de armazenamento intermediário (por exemplo, baterias). Tem suas aplicações em estações repetidoras, estações de sinalização, fornecimento de eletricidade a pequenas comunidades rurais ou isoladas, entre outras. Os sistemas VVfV, que operam com carga a frequência variável, pressupõem que o nível de armazenamento é procedido em outra forma energética que não a elétrica, e portanto a carga é sujeita as variações naturais de aproveitamento eólico. Estes esquemas se prestam para transformação de energia elétrica em energia térmica (por exemplo: aquecimento ambiental, granjas, etc) ou para bombeamento d'água ou em sistemas de refrigeração.

A operação de sistemas a VVfV proporcionam diversas possibilidades de controle para várias aplicações. Como estes esquemas são típicos para alimentação de cargas isoladas, três aplicações básicas se destacam:

- Aquecimento resistivo ambiental ou de fluídos;
- Bombeamento d'água para irrigação, uso humano ou

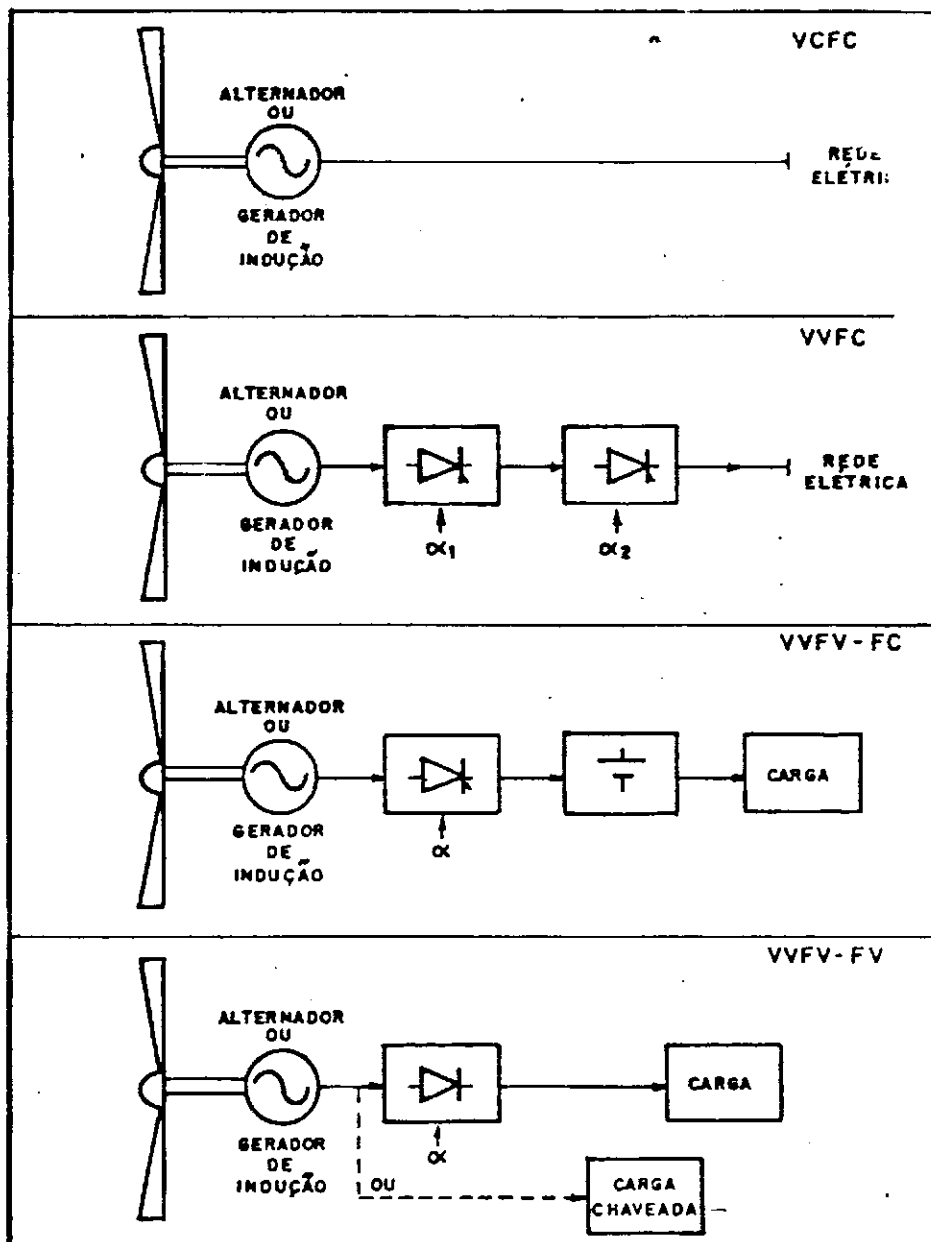


Figura II.13. Esquemas Típicos de SCEE

animal;

- Fornecimento de energia elétrica para pequenas comunidades.

A utilização da energia eólica para aquecimento constitui uma das aplicações mais simples, em vista das poucas exigências da carga quando a qualidade da energia fornecida. Uma série de estratégias de controle tem sido preconizadas (Buehring e Freris, 1981) com o objetivo de proporcionar uma operação a relação de velocidades constante, isto é, a eficiência máxima da turbina.

O uso de conversão intermediária da energia eólica em eletricidade, para fim de bombeamento d'água, representa solução promissora em vista do bom acoplamento de carga possível e pela associação das vantagens da conversão eólica-elétrica. O acionamento de conjuntos motores de indução-bomba centrífuga por aerogeradores pode ser promovido por conexão direta ou indireta (uso de conversores estáticos). É evidente que a conexão direta é vantajosa pelo baixo custo, desde que operacionalmente seja evitada a instabilidade do acoplamento motor-bomba em altas frequências, (Mattatia, 1983 e Silva e outros, 1986).

O fornecimento de energia elétrica para alimentação de cargas convencionais, pressupõe um nível de armazenamento energético, por baterias de acumuladores, por exemplo. O esquema possibilita a alimentação de cargas em C.C. e/ou em C.A. Para o arranjo em C.C., os requisitos de potência são geralmente modestos e um conjunto de baterias é dimensionado para sustentar o forneci-



mento em períodos de calmarias. O arranjo em C.A., em tensão e frequência constantes, é utilizado para suprimento energético de pequenas comunidades afastadas. Neste caso, os requisitos de potência são mais elevados e a relação autonomia/custo exige algum nível de controle para maximização da energia extraída dos ventos e um dimensionamento criterioso da capacidade dos acumuladores.

### II.3.3. Acoplamento de Cargas - Operação de SCEE

O ponto de operação de um SCEE para uma dada velocidade de vento é determinado pela intersecção das características conjugado versus velocidade dos subsistemas acionante e acionado,  $T_t(w_t, V) = T_c(w_t)$ . O sistema acionado determinado pela aplicação pretendida da energia, possui características de conjugado, geralmente dependente da rotação. Contudo o acoplamento destas características está intimamente ligado ao esquema/aplicação. O critério básico para o acoplamento de cargas é tornar a característica  $T_c(w_t)$  da carga o mais próxima possível da característica  $T_t(w_t, V)$  da turbina para  $\lambda = \lambda_0$ ; isto significa ter a turbina operando a  $\bar{C}_{pmax}$ . A operação a relação de velocidades constantes pressupõe uma característica de potência variando com o cubo da velocidade; na prática, torna-se difícil obter conversores de energia que respondam de tal maneira. Em vista disto, o problema de adaptação de características dos dois subsistemas se resume a aproximar a curva de potência da carga à máxima potência da turbina para velocidades de vento que abranjam maior conteúdo

energético local.

Do ponto de vista do projeto de SCEE, esta adaptação de características pode ser obtida por:

- Escolha da relação de transmissão mecânica entre turbina e gerador elétrico.
- Dimensionamento adequado da carga.
- Utilização adequada das características do gerador (ajuste de excitação, por exemplo).

Através destes métodos pode-se proporcionar um funcionamento bastante próximo da curva de máxima potência da turbina, sem atingir a região de instabilidade e, adequado com o regime de vento local. Este procedimento constitui o casamento estático de cargas.

Além da preocupação com o ponto de operação do SCEE o casamento estático deve possibilitar a partida da turbina eólica. Para partir o sistema do repouso, o conjugado de partida da turbina deve exceder o conjugado do sistema acionado e, neste caso, a escolha da relação de transmissão tem efeito significativo. O aumento da relação de transmissão tende a reduzir a velocidade de partida,  $V_C$ , do sistema. Uma turbina com características aninhadas possibilita, dependendo das características da carga, condições para a partida própria do sistema e a operação estável em ponto de alta eficiência aerodinâmica.

Quando um SCEE é instalado num local onde os ventos variam rapidamente, o rotor não opera exatamente em pontos de

equilíbrio, dependendo contudo de sua inércia e das variações do vento. Em turbinas não aninhadas o sistema não apresenta partida própria e a operação em pontos próximos a  $C_{pmax}$  conduz em certos casos a problemas transitórios de instabilidade, onde rápidas e significativas variações de vento podem conduzir ao "estolamento" do rotor eólico. Apesar de não apresentar problemas de partida os rotores que possuem características híbridas possuem os mesmos problemas de estabilidade.

As propriedades estruturais dos componentes do sistema normalmente limitam a rotação do rotor eólico a um valor seguro. A partir da velocidade de vento de regulação  $V_R$ , o sistema deve ser limitado em potência e ao atingir a velocidade de corte  $V_F$ , o sistema deve ser desativado. Diversos meios para proporcionar estas características são utilizados, entre eles: o controle do leme, o controle do passo da pá e os freios dissipativos. Neste aspecto o casamento estático tem influência significativa pois, é a partir dele que se obtém o relacionamento entre rotação e velocidade de vento.

A conversão eólica-elétrica apresenta uma maior flexibilidade operativa, possibilitando um melhor acoplamento entre as características dos subsistemas acionante e acionado. Através do ajuste contínuo das variáveis elétricas pode-se fazer a turbina operar em ponto de  $C_{pmax}$ . A este processo designa-se casamento otimizado de cargas. O casamento otimizado depende também das características da carga, pois estas delimitam a escala de velocidades em que o controle pode operar. Neste sentido, a maximi-

zação da energia extraível dos ventos depende da relação de transmissão, para possibilitar o controle em escalas de velocidade de vento local com maior conteúdo energético. Este acoplamento pode ser implementado pelo controle da excitação ou da corrente de armadura, através de conversores estáticos.

Definida a estratégia de casamento de cargas, a análise do desempenho do sistema deve procurar identificar a taxa de variação da energia extraível dos ventos no provável local de instalação. Neste âmbito a distribuição da frequência de ocorrência de uma velocidade de vento é imprescindível para a determinação da escala de velocidades de maior conteúdo energético. A máxima energia extraível dos ventos corresponde à área de característica  $dE_d/dV(V)$  multiplicada pelo valor de  $C_p$  máximo da turbina. Os pontos de intersecção das características  $T(w)$  da carga e rotor eólico determinam, para cada valor de velocidade de vento, o coeficiente de potência da turbina, de modo que a taxa de variação da energia praticamente extraível pode ser determinada por:

$$\frac{dE_e}{dV} = \frac{dE_d}{dV} C_p(V)$$

Um bom acoplamento de cargas pode ser obtido quando a área da curva  $dE_e/dV(V)$  aproxima-se da máxima energia extraível dos ventos, tendo em conta as velocidades de acionamento, regulação e corte. Este procedimento permite avaliar o desempenho do sistema perante condições de vento existentes no local. A Figura

II.14 exemplifica este estudo levando em consideração dados obtidos na Central de Testes do NERG.

A partir destes dados a energia convertida anual pode ser calculada pela integração da potência extraída da máquina  $P_e$

$$E_c = \int \eta(V) P_e(V) f(V) dV$$

onde  $f(V)$  é a distribuição da frequência de ocorrência de uma velocidade de vento.

$P_e(V)$  é a potência da saída do subsistema acionante.

$\eta(V)$  é a eficiência global do subsistema acionado.

A eficiência  $\eta(V)$  é normalmente função da rotação e não da velocidade de vento e pode contudo ser convertida usando-se a relação entre  $V$  e  $w$  implícita nos pontos de intersecção das características dos dois subsistemas.

Além de objetivar a maximização da energia extraível, o casamento de cargas deve garantir a operação dos diversos componentes do sistema em pontos de máxima eficiência. A extração de uma maior quantidade energética deve implicar numa conversão desta energia em trabalho útil, com máxima eficiência, estabilidade, confiabilidade e segurança. Portanto, a avaliação do desempenho dos componentes do subsistema acionado é necessária ao funcionamento otimizado do SCEE como um todo. Neste sentido, as características de aplicação pretendida da energia são determinantes no diagnóstico do comportamento do sistema.

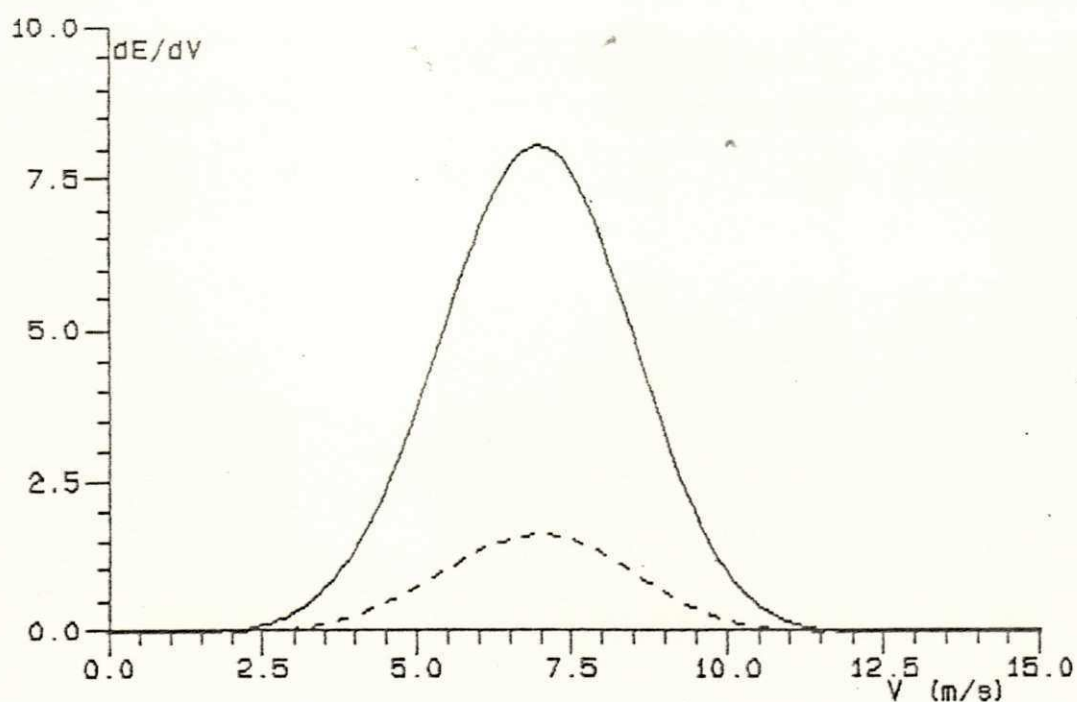


Figura II.14. Densidade de Energia Disponível e Máxima Recuperável para o SCEE Elektro instalado na Central de Testes do NERG.

Cada aplicação apresenta suas características bem definidas que orientam os procedimentos de análise. Nos próximos itens serão apresentados os estudos de dois SCEE para aplicações bastante distintas. O primeiro SCEE constitui um sistema típico para fornecimento de energia elétrica para pequenas comunidades isoladas, enquanto o segundo sistema comporta o bombeamento d'água por via elétrica.

#### II.3.4. Fornecimento de Energia Elétrica

A produção de eletricidade para alimentação de aparatos domésticos é um objetivo limitado ao preço final do kWh produzido. Com efeito, o custo da turbina eólica soma-se ao custo



da estocagem por acumuladores eletroquímicos e de aparelhagem elétrica eventual da conversão de corrente contínua em corrente alternada. Uma característica essencial do vento é a descontinuidade no tempo. A fim de garantir um fornecimento energético regular algum nível de armazenamento deve ser utilizado. O sistema de armazenamento deve permitir estocar a energia produzida pelo vento e que não é utilizada diretamente durante os períodos de produção, a fim de restituir uma parcela, tão grande quanto possível, durante os períodos de calmaria.

Para os sistemas de geração de energia elétrica de pequeno porte, a bateria de acumuladores constitui o principal nível de armazenamento, apresentando um rendimento típico de 80%. Em SCEE de médio e grande porte o armazenamento é geralmente proporcionado pela conexão com a rede elétrica, neste caso a rendimentos bastante superiores. Em algumas aplicações, o nível de armazenamento é procedido em outra forma de energia, como por exemplo nos casos de cargas de aquecimento onde a estocagem é feita na forma de energia térmica.

#### II.3.4.1. Gerador Elétrico

Quanto ao tipo de gerador elétrico a ser utilizado existem duas situações básicas a serem consideradas:

- Aerogeradores servindo a redes elétricas;
- Aerogeradores em operação autônoma.

Para o primeiro caso algum nível de controle deve ser

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel. (083) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

proporcionado pela própria máquina elétrica. Neste caso a principal vantagem do gerador síncrono é a versatilidade no controle do fator de potência pela variação da corrente de excitação e pela simplicidade do controle automático de tensão. Severos problemas de estabilidade ocorrem, contudo, quando o sistema eólico é responsável por mais de 20% da potência da rede elétrica, devido ao efeito das flutuações da velocidade de vento. O gerador de indução apesar de consumir potência reativa, facilita a absorção de transitórios energéticos e não apresenta problemas de sincronização, sendo máquina de baixo custo e robusta, apresentando-se como a máquina mais adequada à operação em paralelo com redes C.A.

Os progressos efetuados no domínio dos ímãs permanentes tem permitido a construção de geradores síncronos sem coletores, apresentando alto rendimento e baixa manutenção, além da possibilidade de acionamento direto sem caixa de multiplicação de velocidades. Os projetos de geradores a fluxo concentrado (Araújo, 1985; Alencar e Mazenc, 1987), dentre estes os de rotor imbricado, acrescentam a estas vantagens a fácil imantação (devido ao número reduzido de ímãs) e a resistência a curto-circuitos (desimantação evitada por bobina de amortecimento ou estrutura de ferro).

A escolha do tipo de máquina elétrica adequada para operação autônoma depende de diversos fatores mas é governada principalmente pelas características das cargas conectadas. Se, por exemplo, a máquina é usada para suprimento de energia para

aquecimento ambiental ou de fluídos, bombeamento d'água, processos químicos, entre outros, onde o controle de frequência e tensão não necessitam ser precisos, máquinas de corrente contínua ou alternadores podem ser igualmente adequados, levando em conta apenas os custos de ambos os tipos. A medida que as exigências de controle, o custo e/ou desempenho de cada máquina, tornam-se fator preponderante no projeto do SCEE, as máquinas síncronas, de indução ou de imã permanente aparecem como alternativa mais adequada.

#### II.3.4.2. O Armazenamento - Baterias de Acumuladores

Em sistemas autônimos, a bateria de acumuladores constitui a carga principal do sistema e, portanto, suas características são preponderantes sobre as outras cargas conectadas ao sistema. A bateria promove a regulação de tensão para a carga, além do armazenamento energético para o qual é utilizada. A tensão da bateria depende das condições do carregamento desta. Durante os processos de carga e descarga, ocorrem flutuações de tensão dentro dos seguintes limites de operação confiável: 1,85V/célula e 2,25V/célula para baterias chumbo-ácido. Este comportamento é ilustrado na Figura II.15.

Uma descarga excessiva, que ocorre quando a tensão por célula é menor que 1,85V/célula, provoca sulfatação das placas de chumbo, gerando fissuras nas mesmas, o que impede a recarga. De maneira inversa, um carregamento excessivo, para tensões supe-

riores a 2,25V/célula, provoca a formação de gases pela eletrólise da água, causando deslocamento de material ativo das placas e pode conduzir ao aparecimento de curto-circuitos no elemento acumulador (Cunty, 1982). A corrente máxima de carga deve corresponder a aproximadamente 10% do valor absoluto de capacidade de carga. Além disto, esta capacidade de carga varia com o regime imposto à bateria, isto é, em regimes mais fortes a capacidade diminui e em regimes mais brandos a capacidade aumenta.

A maioria dos aparatos eólicos para fornecimento de eletricidade utilizam acumuladores de chumbo-ácido devido ao baixo custo e ao seu bom rendimento. A vida útil destes acumuladores depende de numerosos fatores tais como modos de fabricação, regimes de carga e descarga, entre outros. A auto-descarga de acumuladores de chumbo-ácido é acelerada pela presença de impurezas, o que obriga uma mínima corrente de manutenção de 0,3mA/Ah (Cunty, 1982), durante longos períodos fora de operação.

Os acumuladores necessitam dispositivos de proteção contra carga ou descarga excessivas. No caso de excesso de carga, o aerogerador deve ser desoperado e no caso de descarga mais elevada, a carga elétrica deve ser desconectada. Vários esquemas tem sido propostos (Cunty, 1982) para este fim, além de circuitos de regulação da carga.

#### II.3.4.3. O Acoplamento de Cargas

Como dito anteriormente, a bateria constitui a carga

principal de um SCEE para fornecimento de eletricidade. As condições de carregamento determinam a velocidade inicial de operação do sistema. Existe uma família de características de  $P_g(w_g)$ , representando as diversas condições de carga.

Uma representação simplificada das características tensão versus corrente,  $V_{dc}(I_{dc})$ , de um alternador e excitação independente, tomando como referência cargas a fator de potência unitário, pode ser expressa por:

$$\frac{V_{dc}^2}{a^2} + \frac{I_{dc}^2}{b^2} = 1$$

onde  $a = E_0 = K_0 \cdot w_g =$  tensão a vazio convertida em C.C.

$b = I_{cc} =$  corrente de curto-circuito convertida em C.C.

onde  $K_0$  é função da excitação e  $w_g$  é a velocidade no eixo do alternador.

Para diferentes velocidades ou valores de excitação obtém-se uma família de elipses, (Aradjo e outros, 1987). A característica  $E_{bat}(I_{dc})$  da bateria de acumuladores mais a carga elétrica em paralelo pode ser representada por uma família de retas definidas pela aleatoriedade das condições de carregamento, como ilustra a Figura II.16.

A potência fornecida pelo alternador à bateria, em função da rotação, pode ser aproximada por:

$$P_g = K_1 (1 - K_2/w_g^2)^{1/2}$$

onde  $K_1 = E_{bat} \cdot I_{cc}$

$$K_2 = (E_{bat}/K_0)^2$$

Esta expressão mostra a dificuldade no acoplamento turbina-carga. O acoplamento neste caso fica definido pela escolha da relação de transmissão e nível de excitação no gerador que proporcione um melhor aproveitamento da energia eólica disponível. Com este objetivo, a relação de transmissão e o nível de excitação devem ser projetados para que se obtenha maior área sobre a curva  $dE_g/dV(V)$ , tendo em vista as velocidades de acionamento e de corte do sistema.

As características de potência versus rotação dos dois subsistemas são apresentadas na Figura II.17, para diversos valores da relação de transmissão e Figura II.18, para diversos valores de excitação.

Quanto ao acoplamento otimizado, tendo em vista o formato das curvas de potência gerada, pode-se prever que a tentativa de controlar a excitação, a fim de obter um acompanhamento contínuo da característica de máxima potência, fica restrita a uma escala de velocidades dependente da relação de transmissão definida. Quanto maior a relação de transmissão maior será a escala de velocidades cujo controle é possível. Contudo, este controle fica limitado na máxima corrente de campo e nos valores máximos e mínimos de velocidade de vento em que se justifica o aproveitamento (Araújo e outros, 1987). A Figura II.19. ilustra a variação da corrente de campo com a rotação que proporciona o acoplamento otimizado para várias rotações de transmissão.



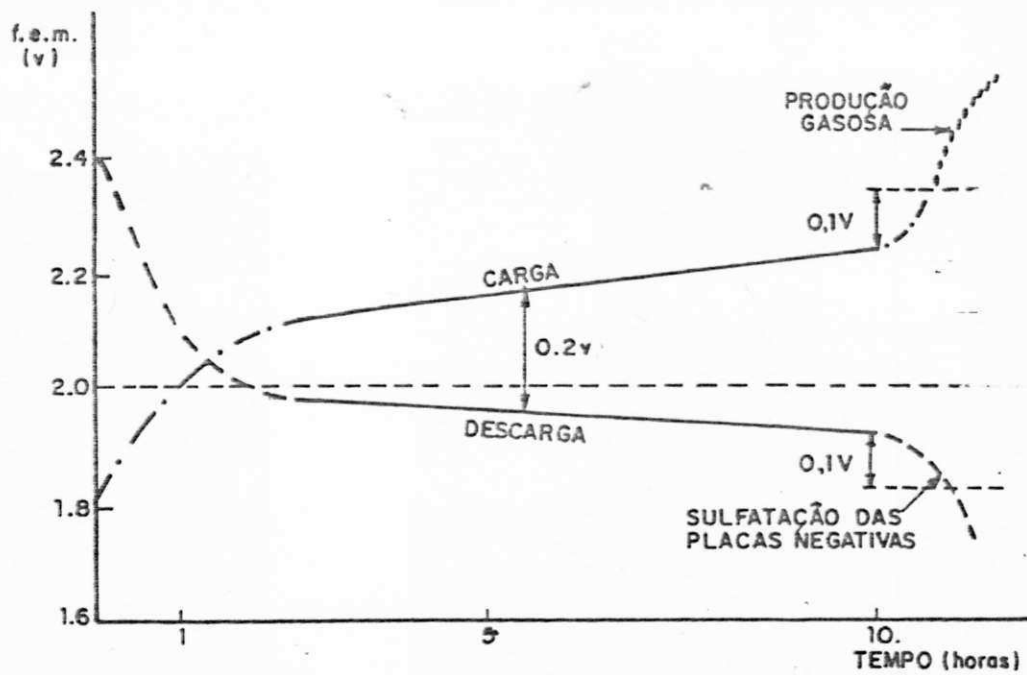


Figura II.15. Características de carga e descarga de um elemento de bateria de acumuladores chumbo-ácido.

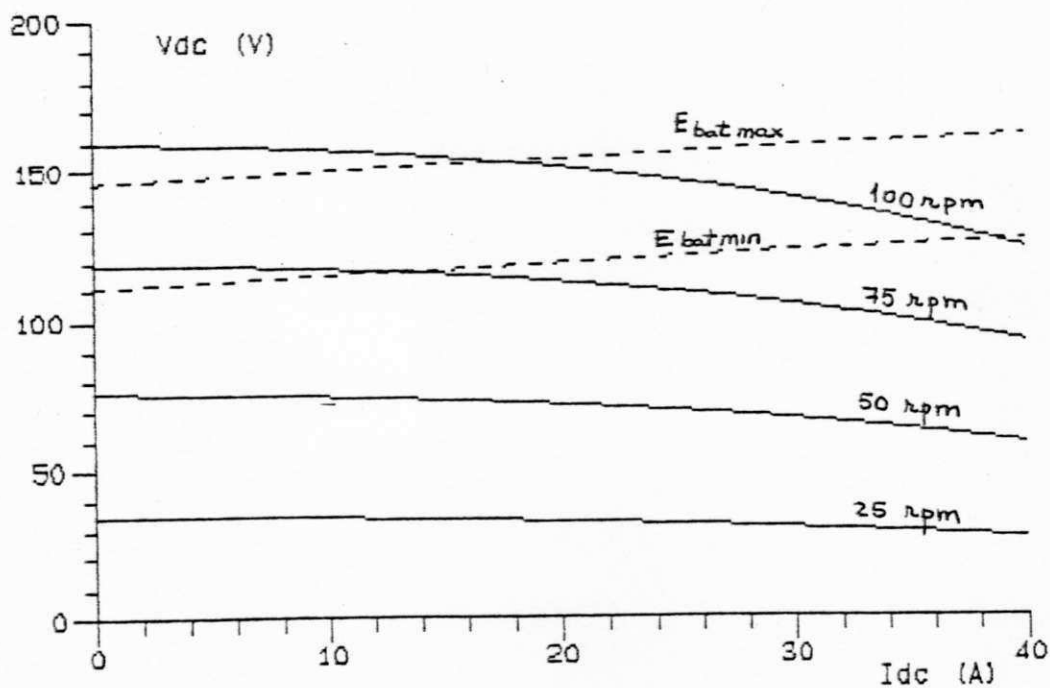


Figura II.16. Características  $V_{dc}(I_{dc})$  de um alternador e de um conjunto de baterias, referidas ao elo C.C.

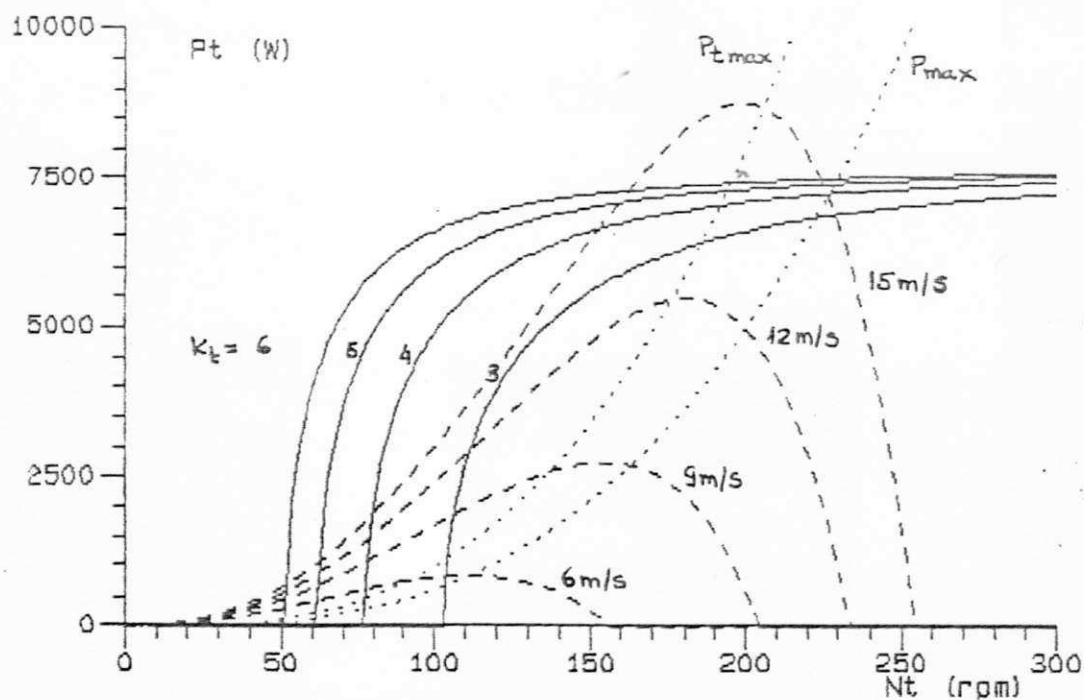


Figura II.17. Acoplamento Estático em várias relações de transmissão e velocidade de vento.

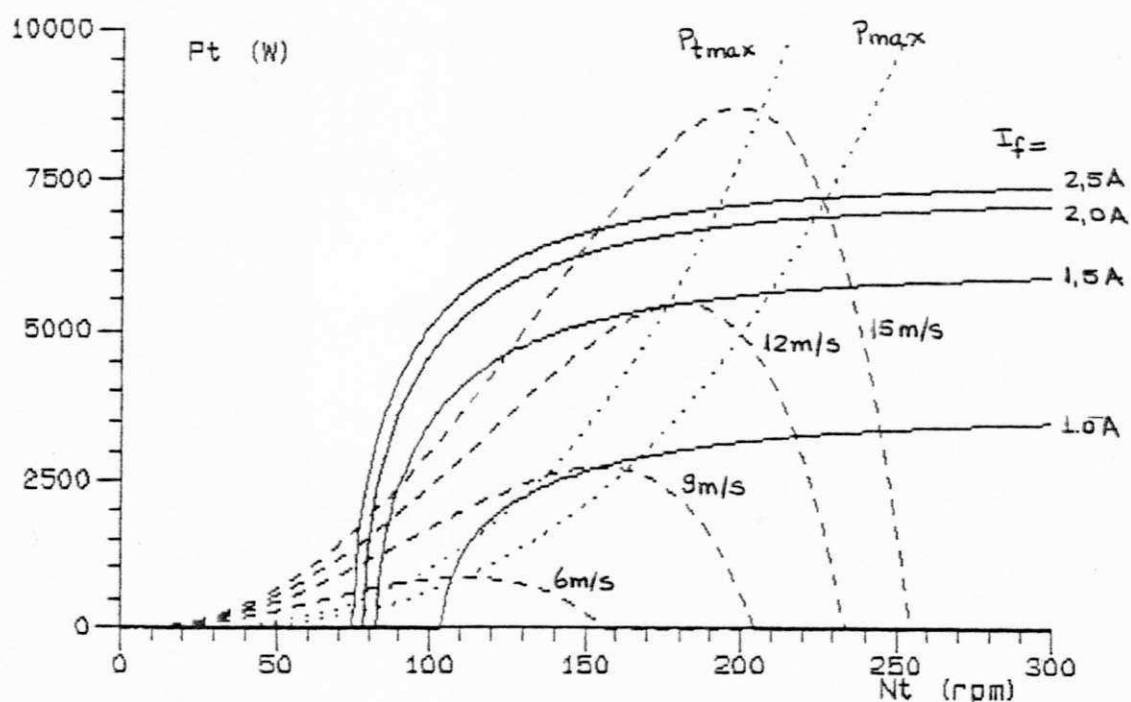


Figura II.18. Acoplamento Estático em várias correntes de excitação e velocidades de vento.

Neste caso a escolha da transmissão é definida pelo valor que conduz o sistema à uma operação otimizada, dentro da faixa de velocidades de vento responsável pelo maior conteúdo energético local.

O casamento de cargas depende, primordialmente, do esquema de fornecimento energético. Além do controle de excitação, é possível outras estratégias como o controle de armadura e a auto-excitação.

#### II.3.4.4. Estratégias de Controle Ótimo

Dentre as estratégias de controle otimizado de sistemas eólicos de pequeno porte para fornecimento de eletricidade, aquelas relativas a ação sobre o gerador elétrico são as mais eficientes. Entre elas destacam-se o controle no campo e o controle na armadura. Além do controle no campo, a própria auto-excitação do gerador tem se apresentado como solução ao problema de um melhor acoplamento de cargas (Bolton e Nicodemou, 1979 ; Suzuki e outros, 1982).

A premissa de que a autoexcitação promove uma operação a relação de velocidades constante está condicionada a algumas hipóteses, tais como:

- Carga resistiva
- Gerador elétrico comportando-se como um dínamo C.C.
- Característica de magnetização aproximada à relação:

$$\Psi = K I_f^{1/3}$$

onde  $\Psi$  é o enlace de fluxo magnético e  $I_f$  é a corrente na bobina de campo.

Nestas condições, a potência gerada varia com o cubo da velocidade rotacional, comprovando uma operação compatível com a característica de máxima potência de um rotor eólico. Afastando-se porém das condições impostas anteriormente, o ótimo acoplamento de cargas não acontece, apesar de obter-se uma melhor concordância de características (Silva e outros, 1986). Neste sentido, a autoexcitação pode ser ajustada pelo acréscimo de resistores externos ao circuito de campo, reduzindo-se as perdas da autoexcitação e adaptando-se as características da carga com as da turbina. Além disto a autoexcitação não representa um

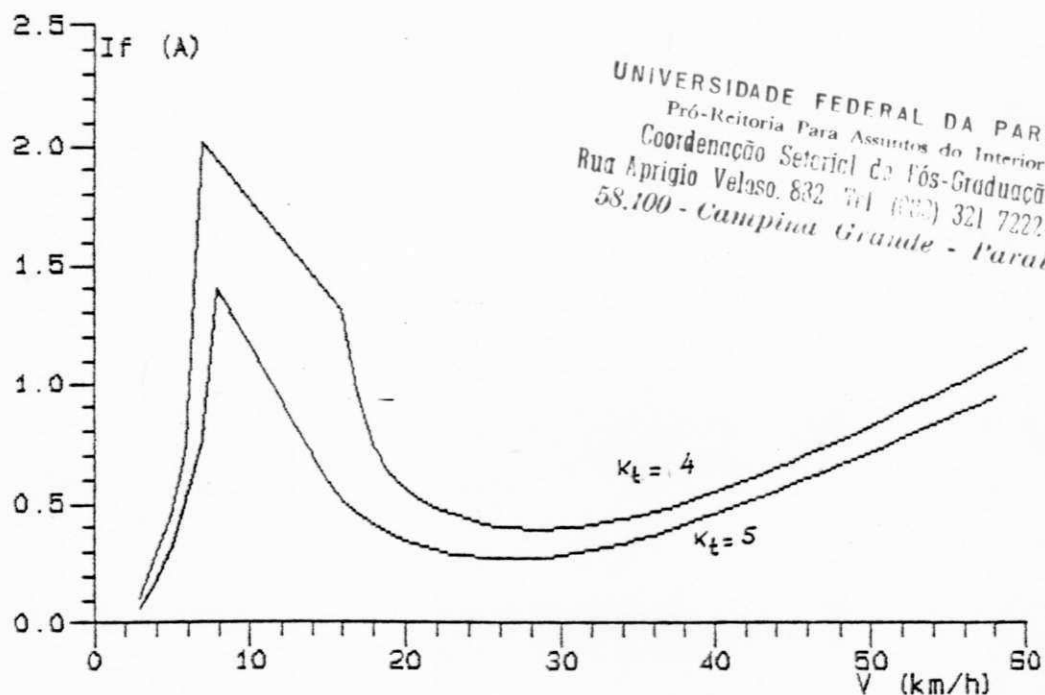


Figura II.19. Correntes de Excitação Ótimas em relações de transmissão,  $K_t$ , iguais a 4 e 5.

consumo de potência constante, já que em baixas velocidades o gerador opera a baixas correntes de campo fornecida pelo próprio alternador, facilitando a partida do rotor eólico.

O controle de campo ou de armadura tem sido implementado, principalmente, através de duas estratégias: realimentação de velocidade ou realimentação de potência (Buehring e Freris, 1981; Casanova e Freris, 1982; Casanova e Freris, 1984). A realimentação de velocidade consiste na operação do sistema a relação de velocidades constante, pelo monitoramento da rotação da turbina em sintonia com a velocidade de vento. A realimentação de potência atinge o mesmo objetivo pelo controle de potência gerada em função da característica cúbica do rotor eólico, como ilustrado na Figura II.20.

A eficiência de ambos esquemas é dependente do projeto do controlador e da eficácia deste em garantir o acoplamento ótimo dinamicamente, aproveitando ao máximo a energia contida nas flutuações de velocidade de vento. O esquema de realimentação de potência, contudo, exige dispositivo de partida do SCEE. A realimentação de velocidade além de constituir um esquema mais simples, apresenta maior eficiência, apesar deste ganho ser pouco substancial, principalmente se o projeto do controlador não é otimizado.

A capacidade de uma turbina eólica em extrair a energia de rajadas de vento depende da potência disponível no vento, das características do rotor eólico e de sua resposta

dinâmica (Kirchoff e Mannwell, 1985). Uma turbina ideal, operando a relação de velocidades constante, produziria potência máxima se pudesse aproveitar a energia contida em rajadas. No entanto, as constantes de tempo mecânicas inerentes impedem este aproveitamento. Considerando que a velocidade de vento instantânea  $V$ , consiste de um termo constante médio,  $V_M$  e, flutuações  $\Delta V$ , pode-se deduzir que as potências máxima e média valem :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A C_p ( V_M^3 + 3 \overline{\Delta V^2} V_M )$$

$$P_M = \frac{1}{2} \rho A C_p V_M^3$$

Para uma intensidade das rajadas de vento na faixa de  $0.1 < (\overline{\Delta V^2}/V_M^2)^{1/2} < 0.35$ , o aproveitamento energético varia entre os seguintes limites :

$$1.03 < P_{\max}/P_M < 1.37$$

Dependendo do projeto adequado do esquema de controle uma parcela considerável da energia contidas nas rajadas pode ser extraída, desde que seja justificável este ganho em relação às condições locais e as características do rotor eólico.

Pela análise das equações dinâmicas de um sistema eólico operando a carga quadrática  $\lambda = \lambda_0$ , pode-se deduzir que a constante de tempo mecânica vale (Casanova e Freris, 1984):

$$\tau_{\text{mec}} = \frac{\lambda_0 \cdot J}{\frac{1}{2} \rho R^4 (2 C_{q0} - \lambda_0 C'_{q0}) V_0}$$

onde  $J$  = momento de inércia do rotor eólico



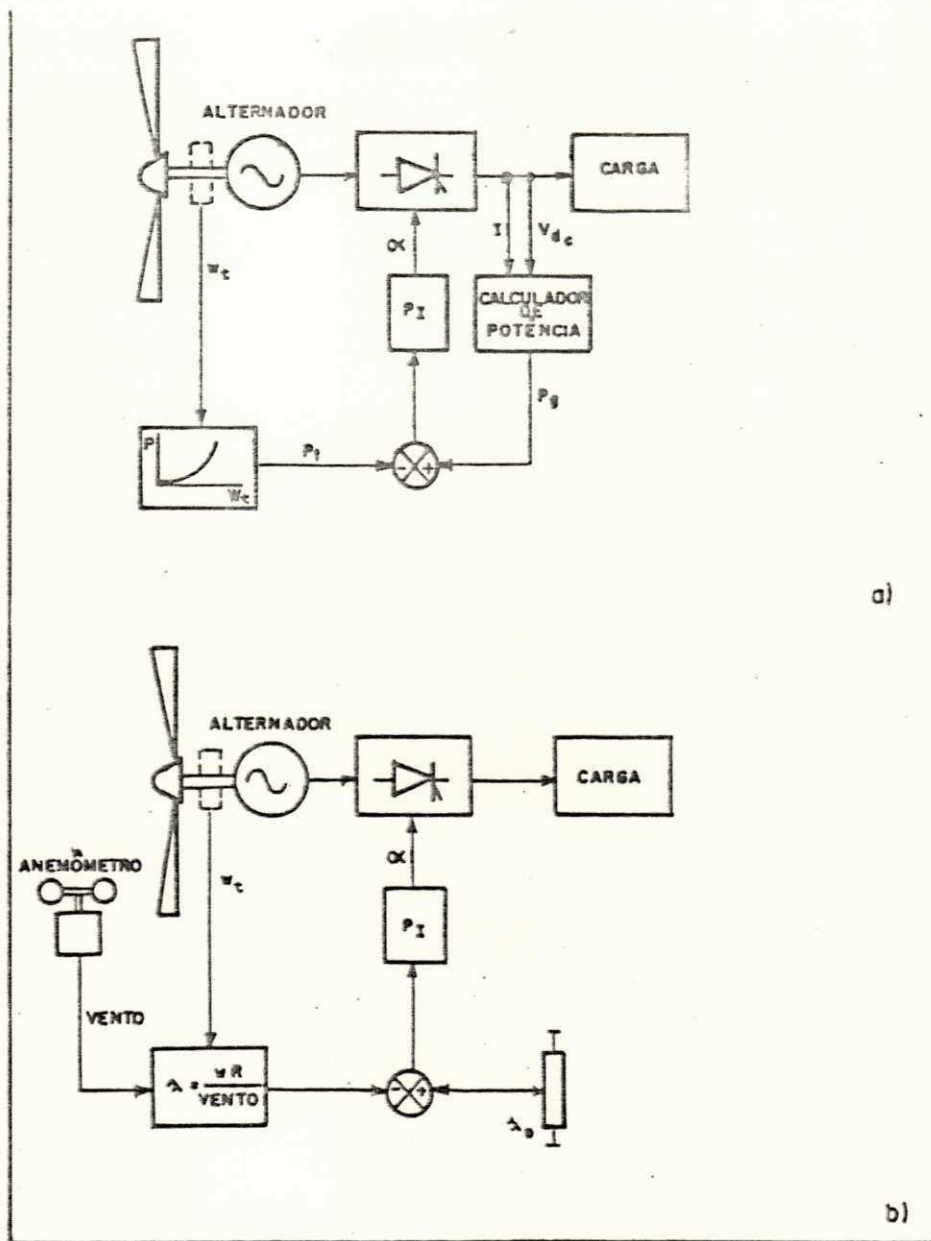


Figura II.20. Estratégias de Controle em um SCEE.

a.) Realimentação de potência.

b.) Realimentação de velocidade.

$R$  = Raio da turbina

$\lambda_0$  = relação de velocidades a  $C_{pmax}$

$C_{q0} = C_q(\lambda_0)$

$C'_{q0} = dC_q/d\lambda (\lambda_0)$

$V_0$  = determinado valor de velocidade de vento

Desta expressão pode-se observar que o sistema apresenta uma frequência de corte  $f_c = 1/(2\pi\tau_{mec})$  que limita o aproveitamento das flutuações de vento para rajadas de frequências mais lentas. O sistema eólico reage mais lentamente nas seguintes condições:

- Baixas velocidades de vento
- Turbinas de mesmo projeto e de maiores raios ou peso
- Turbinas de mesmo tamanho e menor solidez

Pequena melhoria no desempenho de SCEE de pequeno porte, tem sido observada com o uso de estratégias de controle ótimo (Freris e outros, 1980) em face de pouco esforço no projeto de controladores e de características inerentes ao sistema. Soluções mais simples tem sido propostas, entre elas se destaca a autoexcitação e o chaveamento mecânico de cargas.

#### II.3.4.5. Esquemas Típicos do Fornecimento.

##### Uma Comparação.

A aplicação de SCEE para fornecimento de energia elétrica para pequenas comunidades pressupõe a necessidade de armazenamento energético para garantir um fornecimento durante períodos de calmaria. Se estratégias de controle são implementadas

visando a maximização da energia extraível, o problema de viabilidade do fornecimento, que está relacionado com a autonomia do sistema, onde tópicos relativos às condições de carga de bateria, à aleatoriedade do regime de vento e às necessidades de demanda são destacadas, torna-se portanto um problema de controle de demanda. Isto é, definido o acoplamento otimizado, o consumo energético deve ser mantido dentro de limites definidos que possibilitem a operação normal em épocas de escassez de potencial eólico.

Entre os esquemas usualmente propostos para esta aplicação destacam-se:

1. Alternador autoexcitado - retificador - inversor estático.
2. Alternador - retificador controlado - bateria - inversor estático.
3. Alternador - transformador a tap variável - retificador - bateria - inversor estático.

Em todos os esquemas acima o inversor estático opera a frequência constante, comercial, comportando filtros de harmônicos e/ou regulador de tensão, podendo apresentar nível de potência menor, em vista da utilização direta da energia no ramo de corrente contínua.

No primeiro esquema, a autoexcitação permite uma aproximação do funcionamento ótimo. Além disto, dispensa malhas de controle, tornando o esquema mais simples e de baixo custo. Se a

autoexcitação é promovida por retificador controlado é possível a implementação de malhas de controle , (Watanabe e outros, 1986).

No controle de armadura, representado pelo segundo esquema, pode ser obtida uma operação em faixa mais ampla de velocidades pelo projeto adequado do armazenamento no ramo C.C. A operação com corrente descontínua na alimentação das baterias pode, contudo, reduzir sensivelmente a vida útil destes acumuladores (Mattatia, 1983). Um esquema alternativo, onde o controle de armadura é substituído por controle no campo por chaveadores estáticos diretamente do ramo C.C., conduz a uma operação a menor eficiência, pelo fato da energia cedida ao campo do alternador circular por um caminho mais longo e de baixo rendimento.

O terceiro esquema apresenta problemas de partida do sistema, em vista do transformador representar um curto circuito para o alternador em baixa velocidade. Além disto apresenta custo elevado, apesar de proporcionar facilidade no acoplamento pela escolha do tap de tensão do transformador (Mattatia, 1983).

Diversos esquemas têm sido propostos para fornecimento de eletricidade utilizando vários tipos de geradores elétricos, diversos arranjos e propostas de controle. Uma avaliação dos SCEE produzidos pela indústria eólica indica uma maior viabilidade comercial dos esquemas autoexcitados, (Warne e Calnan, 1977).

#### II.3.5. Bombeamento de Água

Uma das mais tradicionais aplicações da energia eólica

consiste do bombeamento d'água para consumo humano, animal ou irrigação. Os sistemas eólicos projetados para este fim utilizam basicamente turbinas de alta solidez (Savonius ou Multipás americano) acionando, através de conexão mecânica, bombas alternativas. A potência eólica pode, então, ser utilizada efetivamente e economicamente mesmo em áreas com modestos valores de velocidades de vento, devido à confiabilidade, baixo custo do investimento e longa vida útil destas instalações tradicionais.

Os sistemas eólicos convencionais de bombeamento d'água são, contudo, relativamente ineficientes. A potência demandada por bombas de deslocamento positivo cresce de forma aproximadamente linear com a rotação, em contraste com a característica cúbica do rotor eólico. Estes sistemas operam em baixas velocidades apresentando eficiência da ordem de 2% a 4% (Dixon, 1979; Medeiros, 1986), e fornecendo baixas vazões coerentes com aplicações que exijam menor volume de água (Simões e outros, 1984).

A conexão de bombas centrífugas pode ser feita mecanicamente ou eletricamente. O uso da conversão intermediária de energia eólica em eletricidade proporciona alternativas bastante promissoras com possibilidade de rendimento globais maiores que 10% (Silva e outros, 1987), além de permitir a conexão imediata com sistemas de irrigação convencionais existentes. A transmissão de energia em forma de energia elétrica possui a vantagem de dissociar os pontos de coleta de água do ponto de aproveitamento eólico, possibilitando uma localização adequada do rotor eólico. A utilização de motores elétricos de indução acionando bombas

centrífugas acrescenta simplicidade, robustez e eficiência (Memarzadeh e Barton, 1975).

O acoplamento de rotores eólicos com bombas centrífugas possui a vantagem do casamento de características bastante semelhantes, já que a bomba apresenta variação cúbica de potência com a rotação. Contudo este tipo de bomba não funciona eficientemente em larga escala de velocidades e o motor elétrico não é capaz de operar cargas, a conjugado quadrático, em altas rotações.

#### II.3.5.1 Características do Conjunto Motor-Bomba

Um motor de indução, alimentado por uma fonte ideal que forneça um relação constante entre tensão e frequência, apresenta características a frequência variável bem próximas ao seu funcionamento nominal para frequências superiores a 15Hz (Murphy, 1974). Em baixas frequências, contudo, o efeito da queda de tensão na resistência de armadura promove deteriorização nos níveis de fluxo magnético do motor reduzindo o valor do conjugado máximo. Em altas frequências, contudo, a característica conjugado máximo versus frequência estabiliza-se em valores compatíveis com a operação a fluxo constante, limitando o nível de conjugado de carga admissível.

Quando a alimentação do motor é provida por um alternador acionado a velocidade variável, às impedâncias de dispersão do motor acrescentam-se as impedâncias síncronas do alternador e



linha de transmissão. Deste modo, ocorre um significativo aumento de quedas de tensão que reduz os níveis dos conjugados de partida e máximo, conduzindo a uma operação afastada das condições nominais para a qual a máquina elétrica foi dimensionada. A redução nos níveis de conjugado se acrescem os problemas de instabilidade estática do conjunto motor-bomba em altas velocidades, como explicitado pela Figura II.21.

A bomba centrífuga possui suas características básicas estreitamente ligadas à rotação. As relações entre as variáveis básicas (altura manométrica,  $H$  e vazão,  $Q$ ) e a rotação ( $w_b$ ) definidas pela lei da afinidade, podem ser expressas por:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left[ \frac{w_{b1}}{w_{b2}} \right]^2$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{w_{b1}}{w_{b2}}$$

Estas expressões conduzem a uma característica de potência dependente do cubo da velocidade rotacional, compatível assim com a operação a relação de velocidades constante de um rotor-eólico (Silva e outros, 1986).

As características  $H(Q)$  de uma bomba centrífuga operando a velocidade variável são apresentadas na Figura II.22, onde podem ser observados os pontos de intersecção com a característica de altura manométrica da instalação hidráulica.

O projeto da instalação hidráulica, além de estar asso-

ciado ao uso preconizado para esta, influencia significativamente o desempenho do sistema como um todo. A altura de elevação afeta a velocidade de partida do bombeamento d'água e, junto com o dimensionamento da tubulação, pode conduzir a uma operação a máximo rendimento da bomba em ampla escala de rotação (Silva e outros, 1987).

Em termos práticos, a transmissão elétrica entre o gerador elétrico e o motor-bomba deve ser tão curta quanto possível, ou menor que 1 km de comprimento (Hemarzadeh e Barton, 1975), a fim de evitar um aumento exagerado da queda de tensão, o que conduziria à redução do conjugado do motor.

#### II.3.5.2. O Acoplamento de Carga

O comportamento da carga neste caso aproxima-se da característica de conjugado quadrático, portando o acoplamento com a turbina reduz-se simplesmente à escolha da relação de transmissão que proporciona a operação a  $\lambda = \lambda_0$ . Neste caso, existe um único valor de relação de transmissão. A visão de operação do sistema, através desta ótica, poderia apenas ser válida se o motor elétrico fosse suficientemente superdimensionado, para se poder considerar que não há variação significativa no deslize com a variação de carga e, que o motor opera com fonte ideal de conjugado, para suprir as necessidades de carga em toda a faixa de velocidade de vento local.

Neste caso, o projeto da instalação hidráulica afeta

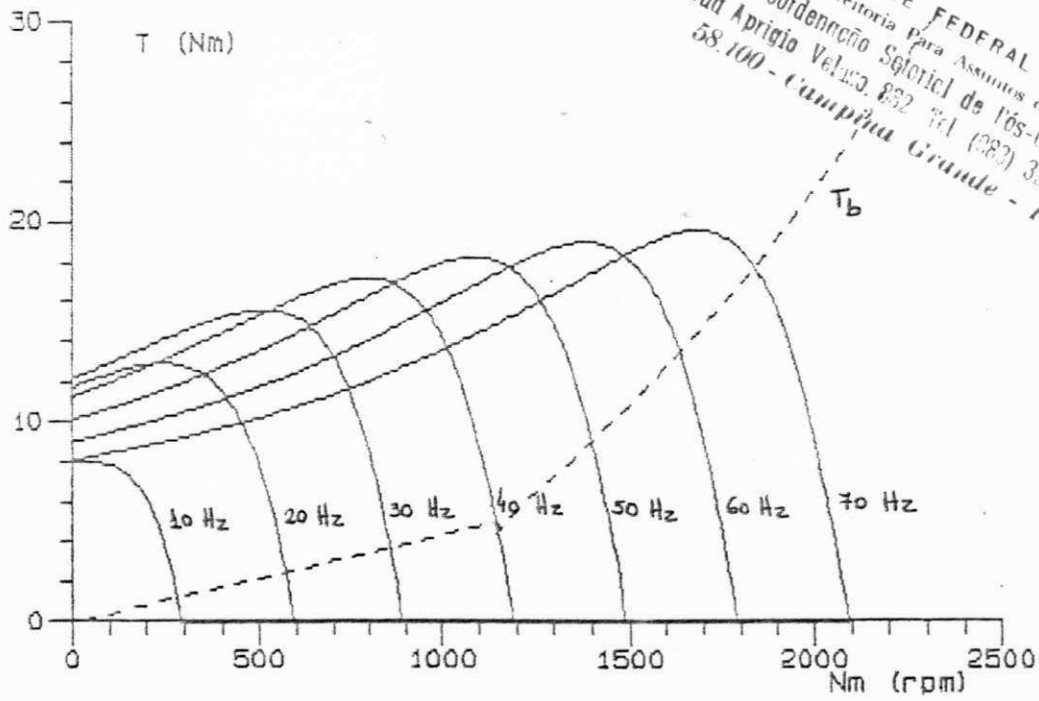


Figura II.21. Características  $T(N)$  de um motor de indução e de uma bomba centrífuga em varias frequências de alimentação ( 10 a 70 Hz).

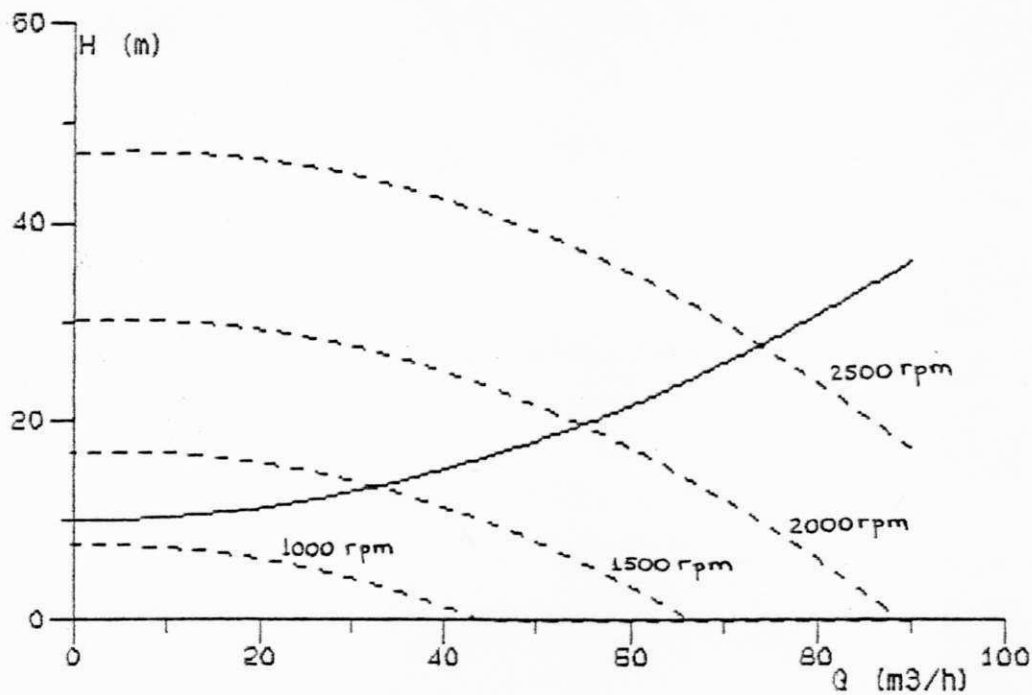


Figura II.22. Características  $H(Q)$  de uma bomba centrífuga e tubulação, em várias rotações.

significativamente o desempenho do sistema. As Figuras II.23 e II.24 apresentam o acoplamento para vários valores de altura de elevação e de diâmetro da tubulação, onde pode ser observado o efeito da variação destes parâmetros sobre o comportamento do SCEE. A altura de elevação deve ser escolhida obedecendo aos requisitos da aplicação pretendida e baseado nas características de rendimento da bomba. A característica  $H(Q)$  da instalação hidráulica deve interceptar as curvas  $H(Q)$  da bomba em pontos próximos à eficiência máxima, de maneira que esta região de máximo rendimento ocorra em larga escala de rotações. Isto pode ser obtido pela escolha dos dois parâmetros acima citados.

Num SCEE onde a potência do motor é equivalente à potência da bomba, o problema da instabilidade estática do conjunto deste ser considerada. Para este fim diversas estratégias tem sido propostas (Mattatia, 1983; Silva e outros, 1986) e serão discutidas no próximo item.

#### II.3.5.3. Estratégias para Operação Motor-Bomba

A avaliação do problema de instabilidade do conjunto motor-bomba em altas rotações deve levar em conta o uso de alternadores a ímã permanente ou a bobina de excitação. Neste sentido algumas estratégias tem sido preconizadas, a fim de aumentar a escala de velocidades de operação estável.

Em sistemas com alternadores a ímã permanente, a utilização de capacitores conectados aos terminais do motor de

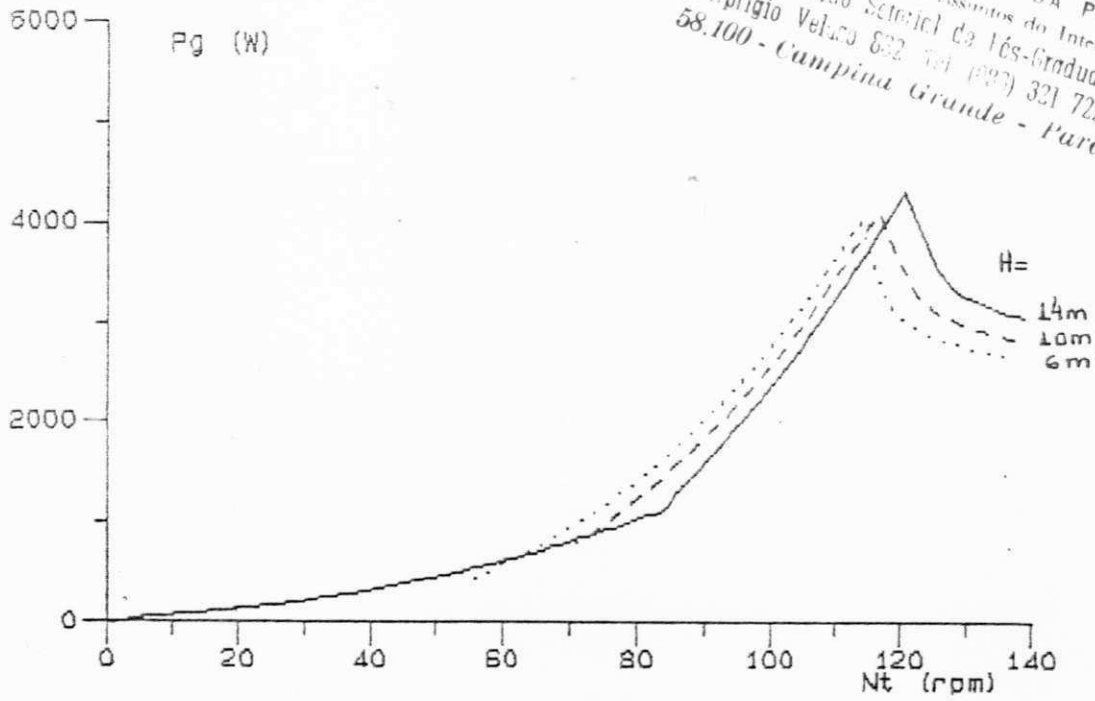


Figura II.23.a. Características  $P_g(N_t)$  do sub-sistema acionado em várias alturas de elevação (6, 10 e 14 m)

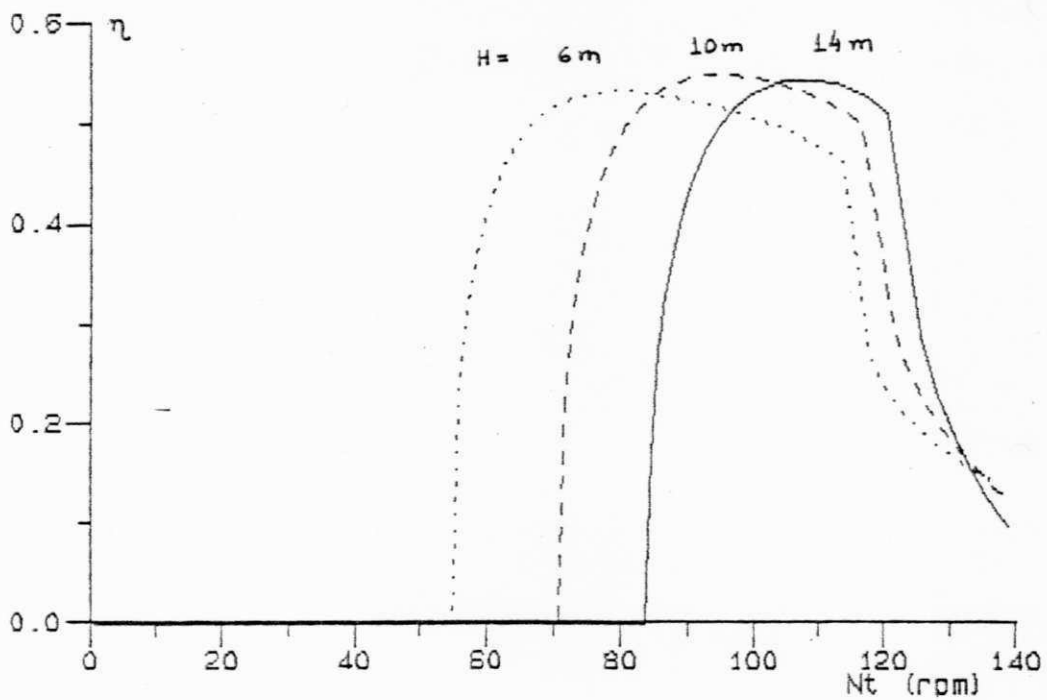


Figura II.23.b. Características  $\eta(N_t)$  do sub-sistema acionado em várias alturas de elevação (6, 10 e 14 m).

indução (Mattatia, 1983) apresenta-se como uma solução prática à garantia do conjugado motor suficiente para acionar a bomba em altas rotações.

O uso de capacitores terminais garantem a melhoria do fator de potência da instalação, aliviando o suprimento de reativos pelo alternador a imã permanente e reduzindo as quedas de tensão na linha de transmissão. Com isto, recupera-se a capacidade de conjugado do motor, aumentando a escala de velocidades de operação estável.

A operação de geradores autoexcitados acionados por turbinas eólicas (Bolton e Nicodemou, 1979) é proposta como alternativa eficiente ao acoplamento ótimo para SCEE para aquecimento e para aplicações de bombeamento d'água (Silva e outros, 1986).

A autoexcitação possibilita o aumento da tensão terminal, garantindo compensação gradativa das quedas de tensão nas impedâncias do alternador e linha de transmissão. Além disto, a autoexcitação pode ser ajustada por inclusão de resistores externos ao circuito de campo, ou por controle da autoexcitação através de conversor estático. Deste modo, apesar da operação com menor eficiência do subsistema acionado, pode-se obter estabilidade em ampla faixa de velocidades de vento.

O efeito de cada estratégia para o comportamento do SCEE será analisado considerando os seguintes esquemas:

♦ ESQUEMA 1: Alternador a imã permanente (E1)

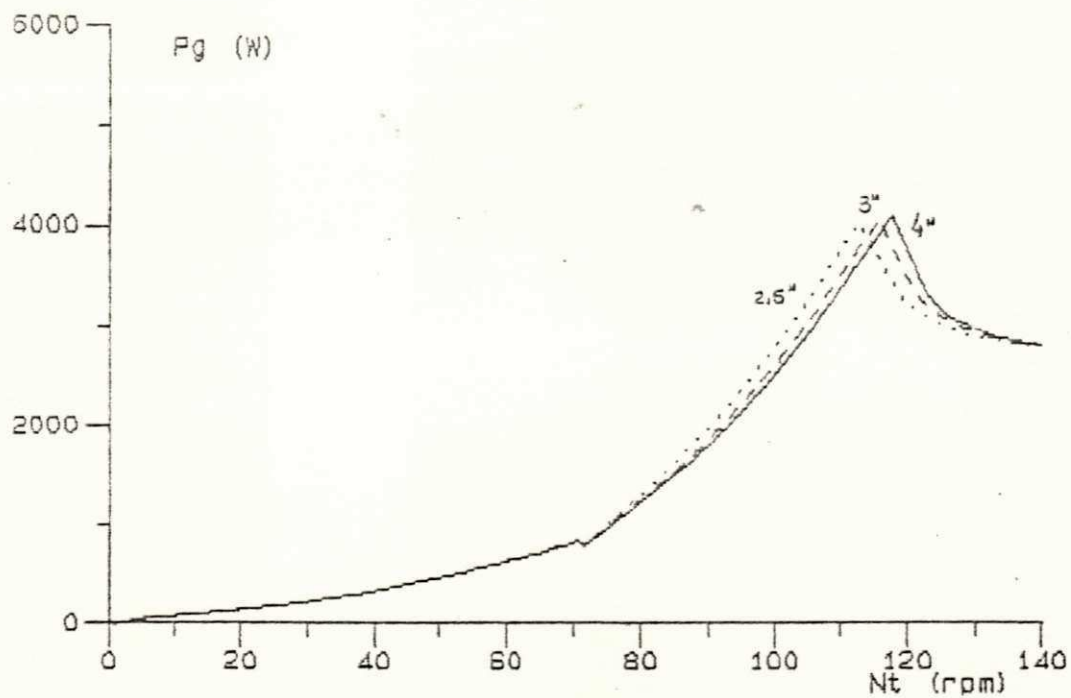


Figura II.24.a. Características  $P_g(N_t)$  do sub-sistema acionado para vários diâmetros de tubulação (2.5", 3" e 4").

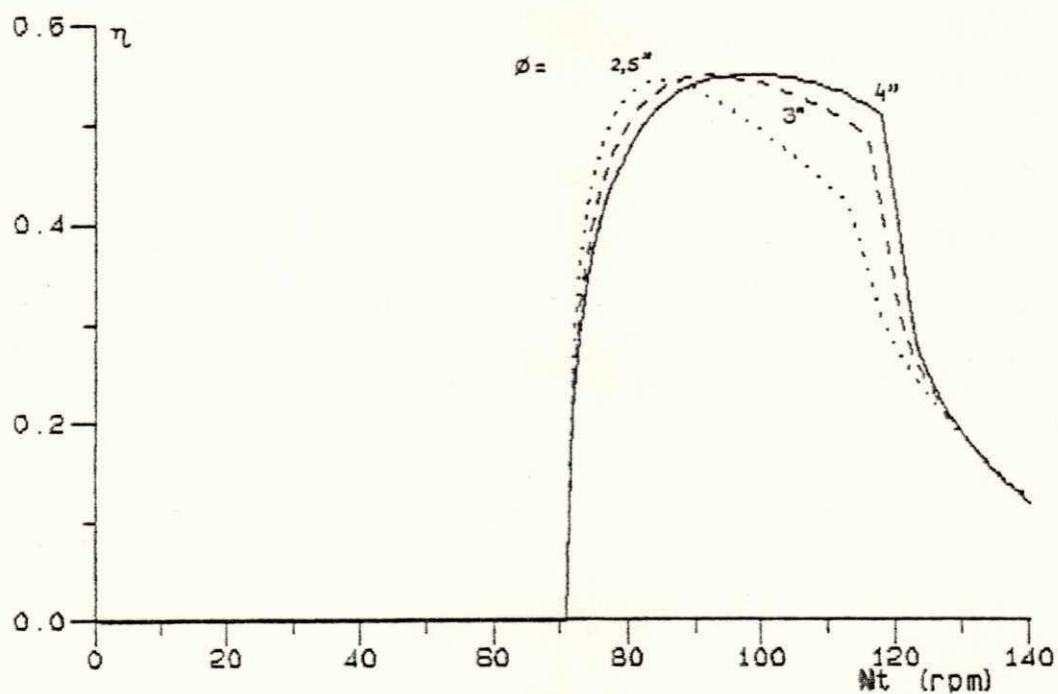


Figura II.24.b. Características  $\eta(N_t)$  do sub-sistema acionado para vários diâmetros de tubulação (2.5", 3" e 4").



• ESQUEMA 2: Alternador a imã permanente com capacitores (E2)

• ESQUEMA 3: Alternador autoexcitado (E3)

A Figura II.25 apresenta as características de potência,  $P_t$ , em função da velocidade de vento para os três esquemas discutidos, onde pode-se observar os pontos de instabilidade estática correspondentes a 9 m/s e a 10 m/s para os esquemas E1 e E2 respectivamente. Além disto, observa-se um melhor acoplamento turbina-carga e uma operação plenamente estável proporcionados pelo esquema E3.

O ajuste da autoexcitação, por inclusão de resistores no circuito de campo (20  $\Omega$  e 40  $\Omega$ ), e a escolha adequada do valor do capacitor podem proporcionar melhoria do desempenho global do sistema, ora aumentando a eficiência do sistema, ora aumentando a faixa de operação estável, como observado na Figura II.26. Nesta figura, o rendimento global do SCEE é plotado em função da velocidade de vento e é definido pela relação entre a potência hidráulica armazenada em uma determinada altura de elevação pela potência eólica incidente na turbina.

O aumento do valor do capacitor desloca o problema da instabilidade para maiores rotações, garantindo alta eficiência ao sistema. A inclusão de resistores adicionais, reduz as perdas dissipadas no campo do alternador, melhorando a eficiência do sistema, sem perda significativa na estabilidade. Apesar de garantir a capacidade de conjugado do motor, a autoexcitação

opera a menor rendimento global, conduzindo à produção de menores vazões para uma dada velocidade de vento, como evidencia a Figura II.27. Além disto o início do bombeamento ocorre para uma maior velocidade de vento, o que pode ser justificado pela operação em menores relações de velocidade.

O esquema E2, apesar das vantagens indicadas, apresenta custo elevado que está relacionado não apenas ao tipo de gerador elétrico mas, também, com a presença do banco de capacitores. Deixando-se o aspecto do tipo de alternador e considerando a possibilidade de uso de gerador elétrico com bobina de campo alimentada por conjunto de baterias, a comparação entre estas duas estratégias conduz a novos horizontes. A operação de um alternador a corrente de campo constante pressupõe o armazenamento da energia elétrica em períodos intercalados aos de bombeamento. A eficiência desta operação deve levar em conta, portanto, uma perda joulica de campo constante suprida pelo alternador, através de um percurso menos eficiente, onde a conversão atravessa um estágio de armazenamento. Neste sentido, a análise energética é a única a possibilitar uma real comparação do desempenho do sistema.

#### II.3.5.4. Uma Avaliação do Aproveitamento

A integração do SCEE ao local de instalação é decisiva para a escolha da melhor estratégia de acoplamento de cargas.

Utilizando os dados de vento referentes à Central de

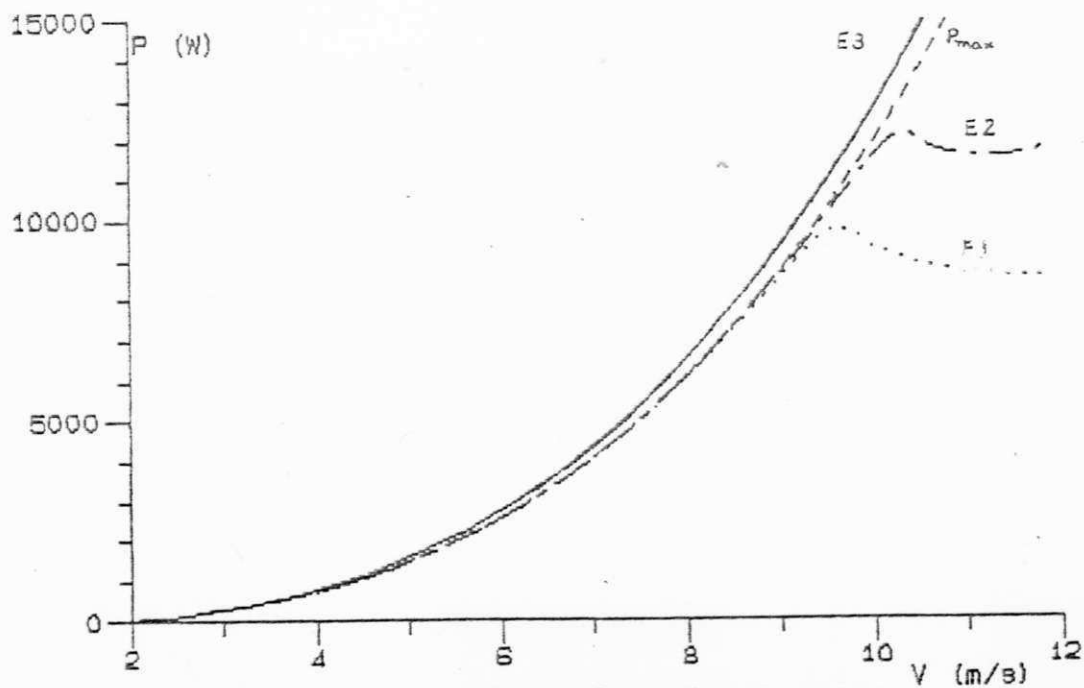


Figura II.25. Características de Potência do Aproveitamento nos vários esquemas propostos.

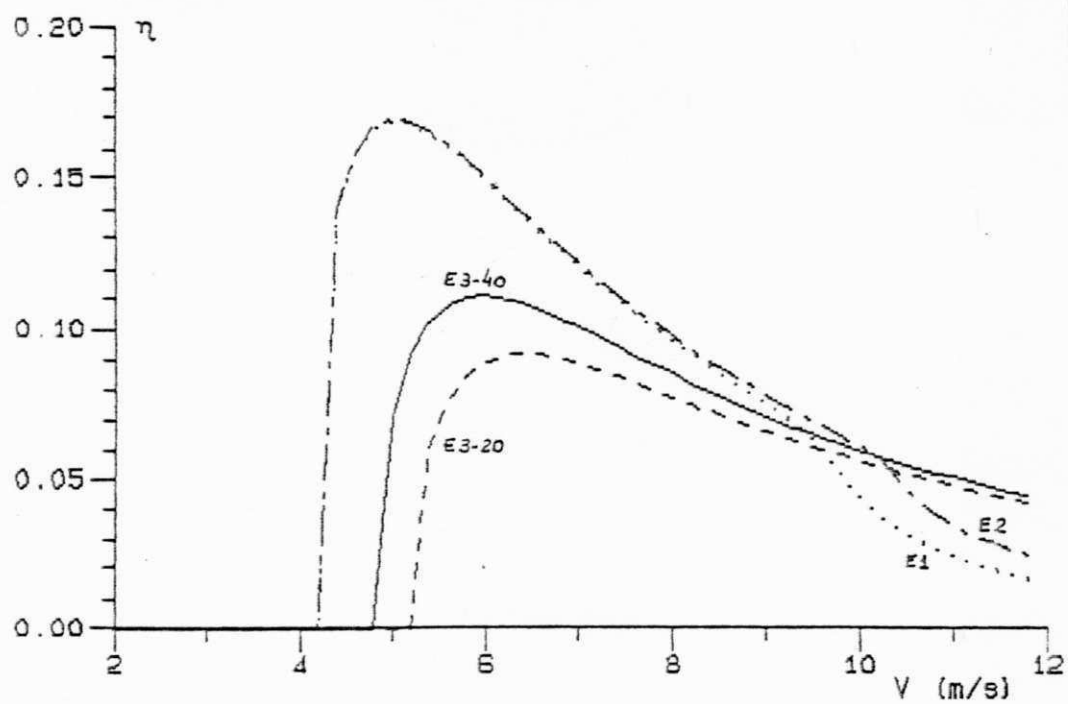


Figura II.26. Rendimentos Globais da Conversão nos vários esquemas propostos.

Testes do NERG, apresentados na Figura II.03, pode-se determinar o volume de água bombeada em um mês de operação do sistema, onde obtém-se para as regiões de operação estável os resultados mostrados na Figura II.28.

Para este regime de vento, a configuração com capacitor apresenta maior volume de água bombeada, devido a pouca ocorrência de velocidades de vento acima da média (6.5 m/s). Em vista disto e, viabilizando-se a possibilidade de ajustar a velocidade de regulagem da turbina para  $V_R = 10$  m/s, obtém-se um acréscimo de mais de 10% de água bombeada, sem problemas de instabilidade.

Além das estratégias já discutidas, o chaveamento de vários conjuntos motor-bomba proporciona alternativa promissora, pela maior flexibilidade e confiabilidade ao aproveitamento e possibilidade de utilização de outras estratégias como: bombeamento a várias alturas de elevação, conexão de bombas em circuito hidráulico série ou paralelo, entre outros.

O uso de rotores hidráulicos em série, conectados a um único motor, conduz a uma maior facilidade na escolha da bomba, já que se pode determinar por otimização o número de estágios que proporciona melhor acoplamento de características (Semedo e outros, 1986).

O equacionamento do problema de otimização do projeto destes sistemas tem sido discutido por Goezinne (1986), baseado nas condições de uma operação a relação de velocidades ótima e

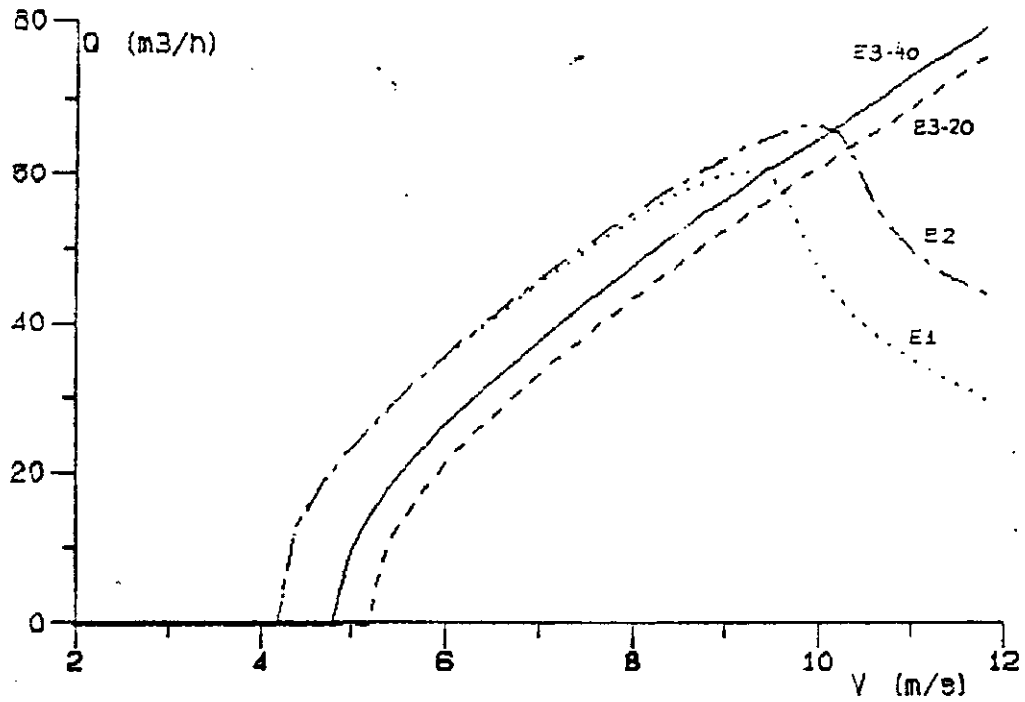


Figura II.27. Vazões Bombeadas nos Vários Esquemas.

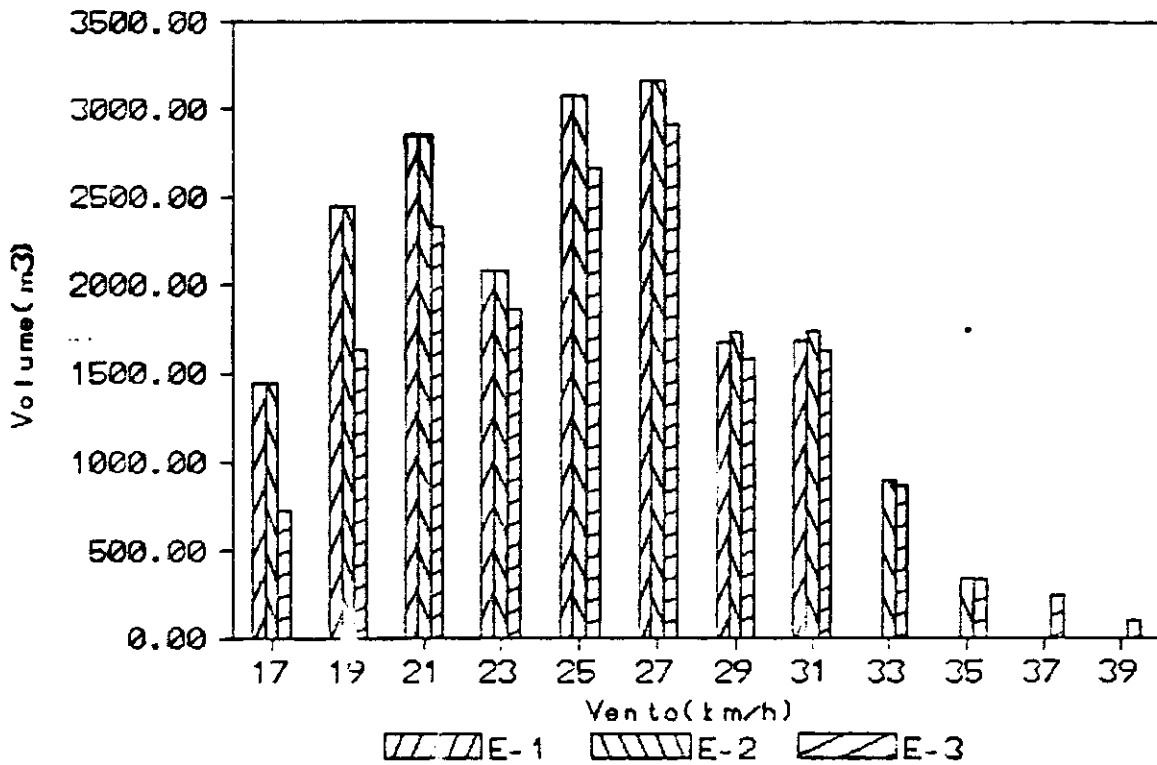


Figura II.28. Volume de água bombeado em um mês nos três esquemas analisados.

máximo rendimento da bomba, dependentes da relação de transmissão, do número de estágios da bomba centrífuga e da velocidade de projeto do SCEE que conduz a  $\lambda = \lambda_0$ . Este estudo conclui que máximo rendimento global do sistema é obtido para velocidades de projeto entre 1,4 e 1,6 de  $V_M$  e, para velocidades nominais maiores que  $2V_M$ .

#### II.4. CONCLUSÃO

Apesar das características de irregularidade e aleatoriedade, a energia eólica apresenta-se como uma vantajosa solução energética para suprimento de eletricidade para comunidades rurais, instalações afastadas e de difícil acesso, entre outras. A energia eólica tem-se mostrado viável economicamente em conexão com grandes sistemas elétricos, a fim de economizar combustível.

A viabilidade de um sistema, contudo, depende de um projeto adequado que conduza a uma operação ótima com baixo custo. A engenharia de sistemas eólicos envolve o equacionamento deste problema, através de uma visão sistêmica, onde o comportamento de cada componente é avaliado para determinação da sua influência sobre o desempenho do sistema como um todo. O acoplamento estático de cargas para uma turbina eólica prevê uma melhor utilização da característica da carga em relação à característica de máxima potência de rotor eólico, enquanto o acoplamento ótimo promove o controle da energia cedida à carga a fim de que a

turbina opere sempre a rendimento máximo.

A produção de eletricidade, a partir da energia dos ventos, tem proporcionado uma melhor operação do SCEE em vista dos altos rendimentos da conversão elétrica e, pelas facilidade de controle que esta possibilita.

Diversas formas de armazenamento energético tem sido propostas para o aproveitamento eólico. Entre estas, o uso de baterias de acumuladores e o armazenamento em forma de energia potencial hidráulica, se destacam.

O fornecimento de eletricidade para pequenas comunidades pressupoe a necessidade do uso de baterias de acumuladores e, diversas estratégias tem sido propostas para a otimização de seu funcionamento.

O bom acoplamento de bombas centrífugas às características de rotor eólico torna-se limitado pelo uso de transmissão elétrica. Estratégias de controle podem, contudo, amenizar estas limitações e possibilitar uma operação com bom desempenho para um dado regime de vento local. A integração de um sistema eólico ao sítio de instalação constitui fase crucial do projeto, tendo em vista a própria irregularidade na distribuição de vento. Torna-se impossível, portanto, em vista da diversidade de fatores e variáveis, projetar um sistema que opere adequadamente em qualquer sítio. A distribuição de vento em determinado local definitivamente aprovará um sistema e não outro e, mesmo uma estratégia ou outra, independentemente de suas características estáticas.



As melhorias tecnológicas em materiais tem viabilizado a energia eólica como fonte energética. Segundo o DOE (Department of Energy - EUA), a fonte eólica se situará como primeira opção energética, entre as alternativas solares, no início do próximo século (Solar Working Group, 1978).

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321-7222-N 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos de Iniciação  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (051) 821.7222-R. 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

### CAPÍTULO III - MODELAGEM E DETERMINAÇÃO

#### DE PARÂMETROS EM SCEE

O desenvolvimento de modelos matemáticos para representação dos componentes de um sistema físico, aliado à implementação de ensaios para determinação de características e parâmetros, constitui-se em fase imprescindível a qualquer análise de engenharia de sistemas. A complexidade destes modelos e o correspondente ajuste na determinação dos parâmetros elegem a precisão desejada nos resultados obtidos frente a resultados experimentais. A análise confiável de sistemas complexos, com um grande número de variáveis e envolvendo uma série de fenômenos físicos, prevê uma precisa avaliação dos fatores que influenciam determinantemente o comportamento do sistema.

Com o objetivo de conciliar a complexidade dos fenômenos com uma representação adequada das características dos diversos componentes de um sistema são apresentados, neste capítulo, os modelos matemáticos desenvolvidos e/ou utilizados, os ensaios implementados e os métodos de tratamento de dados aplicados a um SCEE, voltado ao fornecimento de eletricidade e bombeamento centrífugo.

### III.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

#### III.1.2. O SCEE Básico

O sistema eólico, objeto do presente estudo, constitui o modelo Elektro WVG120 da empresa suíça Winterthur, com potência nominal de 10kW em ventos de 12m/s, que comporta uma turbina eólica de eixo horizontal, um multiplicador mecânico de velocidades, um alternador trifásico, sistemas de proteção e controle e conversores estáticos.

A turbina eólica possui três pás de 6,5m de diâmetro, com passo variável por acionamento centrífugo, comando manual ou automático do leme. As pás são construídas com elemento central em madeira maciça, ladeado por chapas metálicas para garantir rigidez mecânica, medindo 2,75m de comprimento e com corda constante de 20,15cm. As pás apresentam uma torção que varia de 5° a -3° da raiz à ponta e, uma semelhança geométrica com os perfis aerodinâmicos padronizados Gottingen, correspondendo aos tipos Go624, Go623 e Go622, respectivamente na raiz, centro e ponta da pá, (NERG, 1985). O sistema de controle do passo da pá consiste de três conjuntos massa-mola acionados por força centrífuga e distribuídos simetricamente entre cada par de pás. Este sistema prevê um dispositivo mecânico que sincroniza a variação do passo nas três pás. A turbina apresenta originalmente um ângulo mínimo de passo de 15°, podendo atingir um ângulo máximo de, aproximadamente, 50°, (NERG, 1985).

A caixa de multiplicação de velocidades do SCEE, tipo

engrenagens retas, apresenta uma relação de transmissão  $K_t = 4,1176$ , responsável pelo acoplamento mecânico turbina alternador.

O alternador trifásico possui 16 polos e uma estrutura particular de rotor com excitação mista, comportando um ímã permanente e bobina de campo. O estator apresenta um projeto convencional com 8 bobinas por fase, com 56 espiras cada uma, conectadas em paralelo. O rotor é construído em configuração imbricada (Figura III.1), comportando 4 estágios de excitação. Cada estágio rotórico possui duas peças magnéticas, com 8 sapatas polares cada e um elemento central de excitação, cuja magnetização se processa axialmente. O circuito do rotor, portanto, contém dois estágios com ímãs permanentes e dois estágios com bobinas de excitação como mostra a Figura III.2.

O funcionamento original do sistema prevê o alternador em sua configuração autoexcitada, o que justifica a presença dos ímãs permanentes na estrutura, facilitando o processo de partida ('build up') da autoexcitação.

Além de constituir um dispositivo de orientação da turbina na direção preferencial de vento, o leme do sistema eólico Elektro constitui a base do sistema de proteção e operação. O leme pode ser deslocado da direção preferencial de vento, total ou parcialmente, através de acionamento manual por meio de uma manivela ou remoto, através de um motor elétrico de corrente contínua. O sistema Elektro comporta proteções contra sobrecorrente no alternador, sobretensão nos barramentos C.A. ou

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
P.O. Caixa de Correio 3061 - Assis do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (824) 321-7222-11 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

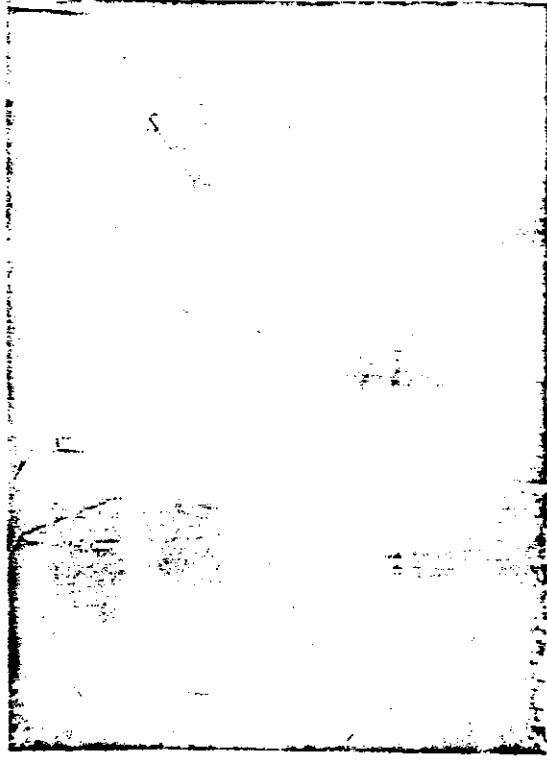


Figura III.1. Aspecto do Rotor do Alternador do SCEE Elektro.

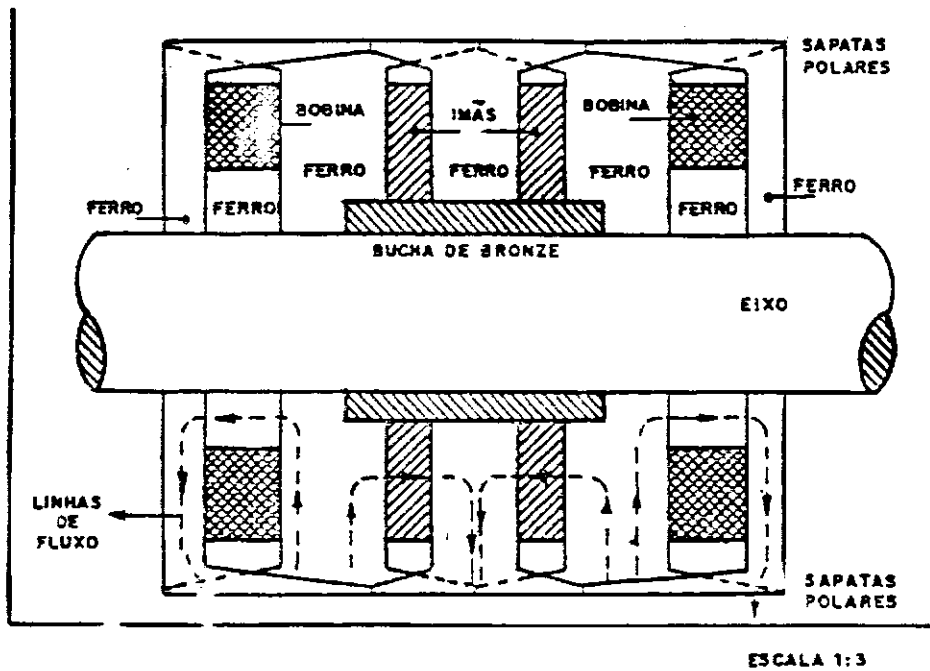


Figura III.2. Corte Axial do Rotor do Alternador do SCEE Elektro.

C.C. e sobrevelocidade de vento, que resultam em ação sobre o leme.

A proteção contra sobrecorrente é ajustável entre 55A e 72A e, é feita em uma única fase do alternador, através do transformador de corrente e relé eletromecânico. É possível também o ajuste da tensão máxima admissível nos barramentos de carga, proporcionando adequada proteção contra excesso de carga em acumuladores. A proteção contra ventos elevados é feita por lâminas metálicas, que se deslocam sob a ação de velocidades de vento superiores a 72 km/h, fechando contatos elétricos que acionam o circuito de travamento do leme. Um relé de tempo, ajustado para intervalos de 6 ou 12 horas, possibilita a liberação automática do leme, necessária ao funcionamento do sistema sem operador.

Dois conversores estáticos, um retificador trifásico a diodos e um inversor a comutação forçada, possibilitam o armazenamento energético em baterias de acumuladores e o fornecimento de eletricidade em corrente contínua, a tensão constante, ou em corrente alternada a tensão e frequência comerciais. O retificador é formado em dupla ponte de Graetz em paralelo, com potência compatível com o sistema eólico. O inversor estático consiste de uma ponte monofásica a 4 tiristores e oito diodos, com potência nominal de 3kVA. O inversor estático é conectado a um transformador 110/220 V, possuindo ainda um circuito de regulação de tensão e filtros de harmônicos, como ilustrado na Figura III.3.

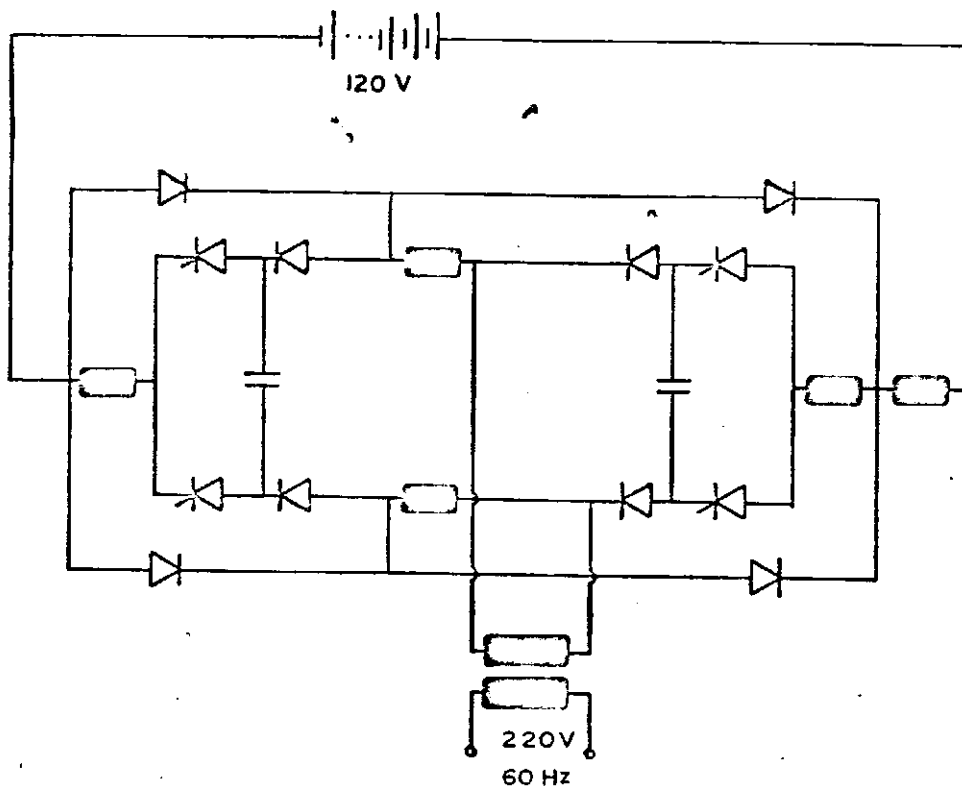


Figura III.3. Esquema do Inversor Estático do Elektro

Uma torre de medição com 03 anemômetros de copos e 01 diretor de vento, instalada a uma distância de aproximadamente o dobro do diâmetro do rotor eólico e com os instrumentos localizados à mesma altura do eixo do catavento, proporciona adequado sistema de monitoramento do regime de vento incidente sobre o SCEE.

Este SCEE encontra-se instalado na Central de Testes do Núcleo de Energia - NERG/CCT/UFPb, com rotor eólico erguido por uma torre a uma altura de aproximadamente 8 metros.

### III.1.2. Os Subsistemas de Cargas

Baseados nas aplicações referentes ao fornecimento de eletricidade e ao bombeamento centrífugo, dois subsistemas de



cargas ficam definidos:

- conjunto de baterias de acumuladores e cargas resistivas
- conjunto de motores de indução e bombas centrífugas.

Um conjunto de 10 baterias de chumbo-ácido de 12V e 175Ah por unidade está conectado, em série, ao barramento C.C. de cargas. Além do armazenamento energético para alimentação de cargas em C.C. diretamente, ou em C.A., através do inversor estático, este conjunto de baterias alimenta em 48V os circuitos de comando do leme e, em 24V, os vários circuitos de controle que serão implementados.

Um banco de cargas, composto de lâmpadas incandescentes constitui carga elétrica a ser conectada aos diversos barramentos de operação do sistema.

Três conjuntos de motor de indução trifásico - bomba centrífuga de 1CV, 110/220V, 3500 rpm, estão instalados em conexão direta ao aerogerador, através de uma linha de transmissão de 100m.

Os procedimentos utilizados na escolha dos modelos matemáticos e na determinação de parâmetros dos componentes descritos anteriormente são discutidos nos próximos itens.

### III.2. METODOLOGIA GERAL EMPREGADA

A escolha de um modelo matemático, que enfatize os fenômenos dominantes do comportamento do sistema compreende parte inicial da metodologia de análise. O modelo deve promover um equilíbrio entre a complexidade e a precisão desejada dos resultados e, com esta finalidade, uma avaliação criteriosa das reais necessidades da análise deve ser efetivada.

A definição do modelo pressupõe a possibilidade prática da determinação de seus parâmetros básicos, através de testes operativos sobre o sistema. Neste sentido, as condições laboratoriais ditam os limites de confiabilidade na obtenção destes parâmetros. A diversidade dos fenômenos físicos presentes constitui a maior dificuldade da modelização e determinação de parâmetros. O projeto e montagem de bancadas de teste constituem soluções para superar a inexistência de laboratórios equipados adequadamente para ensaiar os diversos componentes de um sistema de conversão de energia eólica.

A avaliação do desempenho de um SCEE, considerando alguns de seus componentes, operando a velocidade variável, prevê a determinação de parâmetros e de características, para a qual os dados obtidos de ensaios devem ser tratados através de métodos estatísticos. Os métodos matemáticos, usualmente utilizados para tal fim, compreendem a regressão linear ou polinomial baseada no algoritmo dos mínimos quadrados. A esta metodologia de tratamento e filtragem dos dados colhidos de ensaios denomina-se

redução de dados e pressupõe o processamento computacional.

A metodologia empregada neste trabalho segue estes procedimentos básicos de escolha de modelos, definição do método de ensaio, projeto e construção de bancadas de testes, redução de dados. O processo de modelização compreende ainda a reconciliação entre os resultados experimentais e a expectativa teórica do modelo. Neste sentido, alguns ajustes são necessários para compatibilizar o modelo à experimentação, com ênfase na definição de expressões matemáticas que melhor representem as características básicas dos componentes do sistema.

A metodologia empregada pode ser ilustrada pelo fluxograma da Figura III.4, onde são evidenciadas as diferentes rotas entre a determinação de parâmetros e de características.

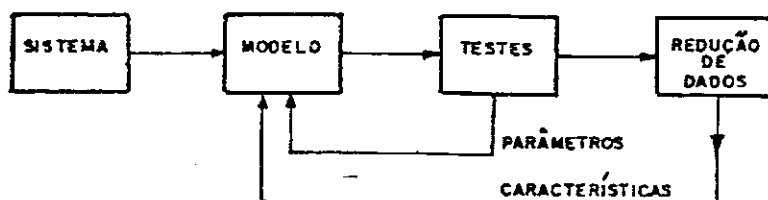


Figura III.4. Fluxograma da Metodologia Empregada na Modelagem.

Um desenvolvimento mais detalhado desta metodologia pode ser observado nos próximos itens onde são apresentados, para cada componente dos SCEE em estudo, os modelos, métodos de

ensaio e algoritmos para redução de dados empregados neste trabalho.

### III.3 TURBINA EÓLICA

#### III.3.1. Modelo Matemático

Em estudos de SCEE torna-se imprescindível, para qualquer avaliação, a característica do coeficiente de potência do rotor eólico. O coeficiente de potência ou rendimento aerodinâmico é função da relação de velocidades  $\lambda$  e do ângulo de passo  $\beta$ . Neste sentido, várias expressões matemáticas tem sido utilizadas para prever esta dependência (Power, 1980 ; Anderson e Bose, 1983 ; Murdoch e outros, 1983).

Entre os modelos matemáticos analisados, o que apresenta maior correlação com as características físicas do rotor eólico é o polinômio proposto por Power (1980) para turbinas a passo fixo. Este polinômio possui a seguinte fórmula geral :

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=1}^{2n+1} b_{i-1} \lambda^{1+(i-1)/n}$$

onde  $b_{i-1}$  são coeficientes constantes

$n$  é a ordem do modelo.

Nesta expressão, o coeficiente  $b_0$  está estreitamente

relacionado ao conjugado de partida da turbina. A dependência do conjugado de partida com o quadrado da velocidade de vento é um fato comprovado pela aerodinâmica básica. O coeficiente  $b_{pn}$  se relaciona ao conjugado à velocidade de vento nula, correspondente à operação como ventilador. Os modelos de ordem superior à  $2a$  ( $n > 2$ ) são desaconselháveis pela complexidade envolvida, com grande número de coeficientes e, pela tendência de oscilação da função. Os modelos de  $1a$  e  $2a$  ordem ( $n=1$  e  $n=2$ ) apresentam a seguinte forma :

Para o coeficiente de potência :

Modelo de  $1a$  ordem :

$$C_p = b_0 \cdot \lambda + b_1 \cdot \lambda^2 + b_2 \cdot \lambda^3$$

Modelo de  $2a$  ordem :

$$C_p = b_0 \cdot \lambda + b_1 \cdot \lambda^{3/2} + b_2 \cdot \lambda^2 + b_3 \cdot \lambda^{5/2} + b_4 \cdot \lambda^3$$

e para o coeficiente de conjugado estas expressões valem :

Modelo de  $1a$  ordem :

$$C_q = b_0 + b_1 \cdot \lambda + b_2 \cdot \lambda^2$$

Modelo de  $2a$  ordem :

$$C_q = b_0 + b_1 \cdot \lambda^{1/2} + b_2 \cdot \lambda + b_3 \cdot \lambda^{3/2} + b_4 \cdot \lambda^2$$

Outras expressões matemáticas têm sido utilizadas para representação da característica  $C_p(\lambda)$ , incluindo ou não o efeito do passo variável (Anderson e Bose, 1983 ; Simões e outros,

1986). Contudo, estas funções foram selecionadas, por estes autores, por apresentarem apenas coerência gráfica, sem nenhuma conotação teórica envolvida.

O efeito do passo variável tem sido considerado, explicitado sobre coeficientes  $b_{i-1}$  do polinômio de Power (Hirata e outros, 1987). No entanto, a representação utilizada é baseada no polinômio de 1ª ordem, impossibilitando uma avaliação mais geral de características típicas a rotores eólicos.

A modelização do efeito do passo variável é conduzida, neste trabalho, através da determinação da dependência  $b_{i-1} = f(\beta)$ , cuja função consiste de polinômio da seguinte forma :

$$b_{i-1} = a_0 + a_1 \cdot \beta + a_2 \cdot \beta^2$$

onde os coeficientes  $a_j$  são avaliados durante o processo de redução de dados.

É necessário que a expressão proposta deve apresentar coerência com a característica física, principalmente obedecendo a faixa de operação de interesse do estudo. Portanto, se o controle centrífugo do passo inicializa o processo de regulação a partir de uma dada velocidade e, que a operação anterior a este ponto ocorre a passo fixo, igual a  $\beta_0$ , a característica  $C_p(\lambda, \beta_0)$  deve ser cuidadosamente representada para todos os valores de relação de velocidades. As características  $C_p(\lambda, \beta)$  para  $\beta < \beta_0$  podem ser representadas na faixa de operação estável da curva  $C_p(\lambda)$ , isto é,  $\lambda > \lambda_t$ .

### III.3.2. Determinação de Parâmetros e Características

Diversos procedimentos têm sido empregados para determinação da característica  $C_p(\lambda, \beta)$ . A partir do conhecimento da geometria dos perfis aerodinâmicos das pás de um rotor eólico, o conjugado produzido em seu eixo pode ser determinado através de métodos desenvolvidos (Milborrow, 1978), tais como a teoria do elemento de pá ("Propeller Theory") e a teoria do ventilador ("Fan Theory"). Embora os testes em túnel de vento constituam importantes métodos para obtenção de informações quanto à aerodinâmica fundamental e aos problemas estruturais, eles apresentam pouca validade na predição do desempenho de rotores eólicos (BWEA, 1982). Testes em túnel de vento requerem grandes túneis ou modelos reduzidos perfeitos, onde a influência de efeitos de escala e as dificuldades operacionais tornam estes testes pouco práticos.

Ensaio em campo aberto, requeridos para determinar as características de conversão de turbinas e sistemas, estão sujeitos às variações na velocidade de vento, que dificultam o tratamento de dados. A maioria dos ensaios em campo aberto requerem a medição direta do conjugado no eixo da turbina eólica. A instalação de torquímetro ou freio de Prony no eixo do catavento, em alguns casos, pode tornar-se impraticável. Além disto, os resultados não apresentam boa precisão, já que as variações da velocidade de vento exigem medições instantâneas (Simões e outros, 1986; Buehring e Freris, 1980).



Dentre os procedimentos de testes, os ensaios em campo aberto apresentam-se como solução mais adequada para sistemas eólicos já instalados, pois evita desmontagens e deslocamentos e não necessitam de equipamentos e instalações especiais. Dentre estes ensaios, a técnica da aceleração livre (Simões e outros, 1986; BWEA, 1982) constitui uma das alternativas mais simples para avaliação do desempenho de rotores eólicos. Para a sua implementação, a técnica da aceleração livre requer um tacômetro acoplado ao eixo da turbina, podendo ser também utilizado o próprio gerador elétrico que compõe o SCEE e, um registrador gráfico, além da instrumentação para medição da velocidade de vento. O conjugado desenvolvido pelo rotor eólico é deduzido pela determinação da aceleração angular, durante o processo de partida sem carga. Para determinação do momento de inércia foi necessária, a fim de evitar a influência do vento durante a medição, a retirada das pás do catavento. O momento de inércia das pás foi obtido pela medição da frequência de pequenas oscilações pendulares de uma pá, em relação a um eixo que é geometricamente análogo ao eixo do rotor eólico. A partir deste ensaio, desprezando os atritos, obteve-se a seguinte fórmula para o momento de inércia de uma pá:

$$J_{pa} = \frac{P_{pa} \cdot l_c}{\omega^2}$$

onde :

$P_{pa}$  = é o peso da pá ( $P_{pa} = 10,5 \text{ Kgf}$ )

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 832 - Tel (033) 321-7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

$l_c$  = é a distância do centro de gravidade da pá ao eixo  
( $l_c = 1,275$  m)

$w$  = é a frequência de oscilação ( $w = 2,384$  rad/s)

Desta maneira, obteve-se para as três pás um momento de inércia global de :

$$J_{3pas} = 69,24 \text{ Kg.m}^2$$

O sistema restante foi ensaiado por aceleração conjugado constante. Para isto foi fixado ao eixo da turbina um cilindro de plástico de peso desprezível e algumas voltas de cabo de aço foram dadas ao seu redor. Um peso conhecido é conectado a uma extremidade do cabo e é deixado cair em queda livre de uma altura pré-estabelecida. Com o tempo que o peso leva para atingir o solo, pode-se determinar a inércia do sistema por :

$$I_{sr} = \frac{D^2}{8h} \cdot P_a \cdot t_q^2$$

onde :

$P_a$  é a força do peso aplicado

$D$  é o diâmetro do cilindro (15,3 cm)

$h$  é a altura de queda

$t_q$  é o tempo de queda

Após alguns testes com pesos diferentes, obteve-se :

$$J_{sr} = 10,40 \text{ Kgm}^2$$

Levando-se em consideração as duas parcelas calculadas, o momento de inércia total do rotor eólico com alterna-

dor e transmissão mecânica vale :

$$J_T = 79,64 \text{ Kgm}^2$$

O ensaio de aceleração livre, para determinação das características de conversão de um rotor eólico pequeno, que durante o teste não haja grandes flutuações de velocidade de vento. O método consiste das seguintes etapas (Simões e outros, 1986) :

1a Etapa : A turbina é liberada para acelerar-se sem carga a partir do repouso, operando a passo fixo.

2a Etapa : É registrada a velocidade rotacional da turbina por intermédio de tacogerador ou gerador, conectado a um traçador XY e são simultaneamente feitos registros da velocidade de vento, durante todo o processo de aceleração.

3a Etapa : As medições são feitas até que a rotação da turbina atinja um patamar estável, onde as pequenas variações são respostas às flutuações de vento

Para medição da rotação da turbina eólica Elektro foi utilizado o pico da tensão retificada gerada pelo alternador. Um registrador gráfico modelo 1130 da EAI, foi utilizado nas escalas de 10V/cm e com bases de tempo de 1s/cm ou 2.5s/cm, para registrar a evolução da velocidade rotacional da turbina. A velocidade de vento, obtida da torre anemométrica, é fornecida em valores médios a cada 1,2 segundos. O controle do passo foi travado mecânicamente em ângulos constantes, dentro dos limites

físicos, de 15° a 49°. A Figura III.5 mostra esquematicamente a configuração do ensaio.

Foram feitos diversos testes para cada ângulo de passo, constituindo um total de 160 curvas de aceleração e 160 planilhas de velocidade de vento. Todos os testes foram implementados no turno da manhã, apesar deste período apresentar ventos instáveis, porém com a vantagem de conter amplo espectro de velocidades de vento, (16Km/h a 35Km/h).

Obtida a curva de evolução da rotação no tempo, a aceleração da turbina  $dw_t/dt$  e, portanto, o conjugado são calculados por diferenciação numérica. O coeficiente de potência da turbina pode ser expresso por :

$$C_p(\lambda) = \frac{J_T \cdot w_t \cdot dw_t/dt}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (83) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

Uma família de curvas  $w_t(t)$ , obtidas a uma velocidade média de vento de aproximadamente 24 km/h, para vários ângulos de passo da pá, é apresentada na Figura III.6, onde pode ser avaliado o efeito do ângulo de passo sob a operação da turbina.

### III.3.3 Redução de Dados

Em vista do número elevado de testes efetuados, foi necessário definir os procedimentos para seleção dos melhores conjuntos de dados, o algoritmo de diferenciação numérica, a metodologia de aglutinar os resultados parciais e o processo de

redução de dados e ajuste de parâmetros do modelo escolhido.

Dos 160 ensaios desenvolvidos foram aproveitados 61 testes, obedecendo aos seguintes critérios :

- As curvas deveriam apresentar boa continuidade e atingir os níveis de operacionalidade esperados;
- A distribuição de velocidade de vento durante um determinado ensaio, dentro do período de aceleração, deveria apresentar menor relação desvio padrão/média. Foram selecionados os testes que apresentaram desvio padrão/média menor ou igual a 10%.

A Tabela III.1 apresenta o número de testes selecionados para cada ângulo de passo da pá e a velocidade média de vento correspondente.

Foi escolhido para determinação da aceleração angular, o método de diferenciação por interpolação polinomial (Carnahan, Luther e Wilkes, 1969), sendo utilizado um polinômio de quarta ordem, o que resultou nas seguintes expressões de diferenciação :

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_j} = \frac{1}{12\Delta x} \left[ -f(x_{j+2}) + 8f(x_{j+1}) - 8f(x_{j-1}) + f(x_{j-2}) \right] + \frac{\Delta x^4 f^{(5)}(\xi)}{30}$$

onde  $2 < j < n-1$

$n$  é o número de pontos

$\Delta x$  é o intervalo entre medidas.

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_1} = \frac{1}{12\Delta x} \left[ -3f(x_5) + 16f(x_4) - 36f(x_3) + 48f(x_2) - 25f(x_1) \right] + \frac{\Delta x^4 f^{(5)}(\xi)}{5}$$

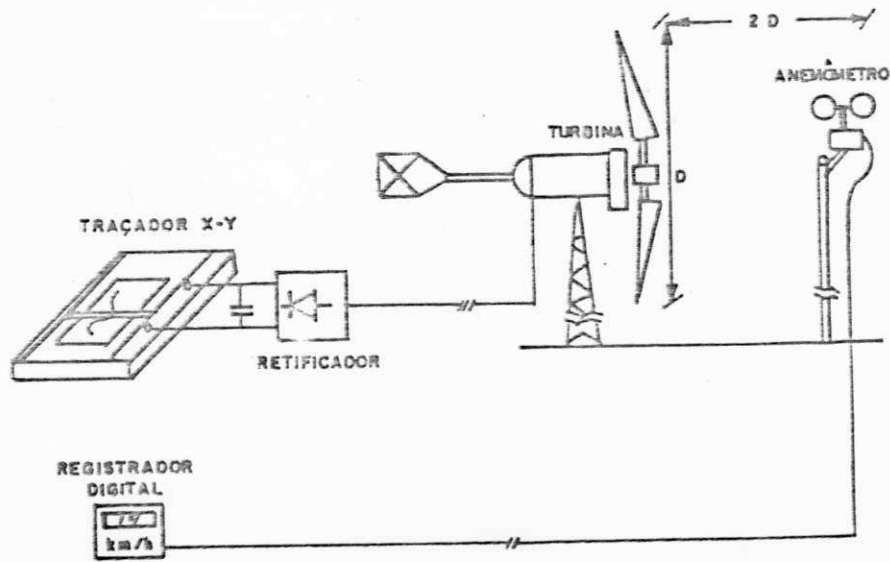


Figura III.5. Esquema Básico do Ensaio de Aceleração Livre.

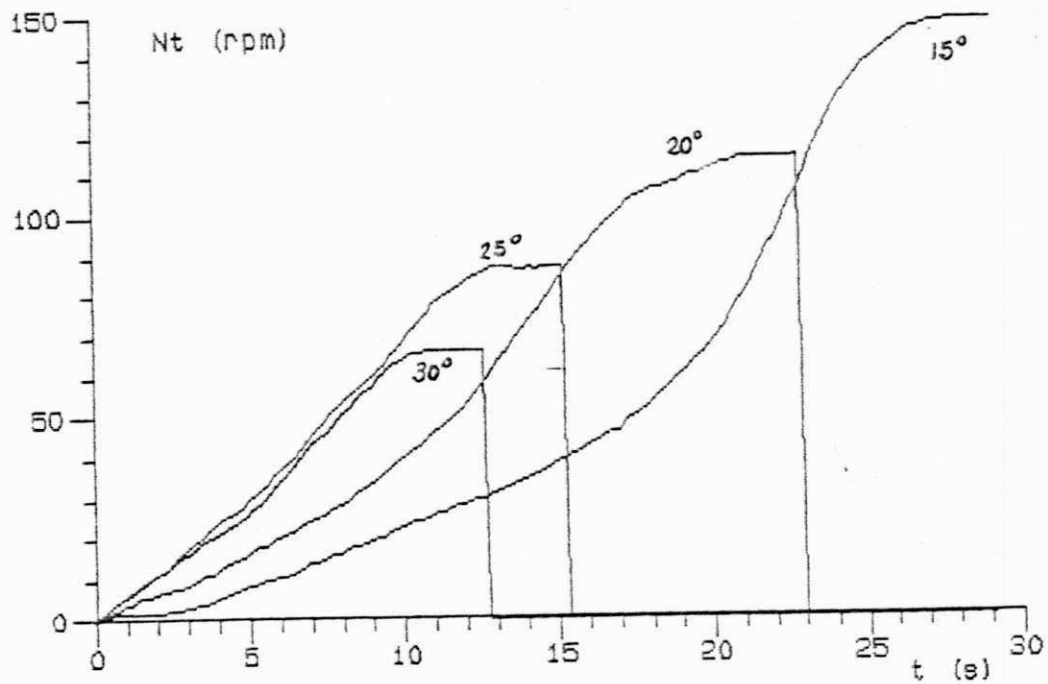


Figura III.6. Curvas  $N_t(t)$  durante Aceleração Livre para  $\beta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  e  $30^\circ$ , em 24 km/h.

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_2} = \frac{1}{12\Delta x} \left[ f(x_5) - 6f(x_4) + 18f(x_3) - 10f(x_2) - 3f(x_1) \right] - \frac{\Delta x^4 f^{(5)}(\xi)}{20}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_{n-1}} = \frac{1}{12\Delta x} \left[ 3f(x_n) + 10f(x_{n-1}) - 18f(x_{n-2}) + 6f(x_{n-3}) - f(x_{n-4}) \right] - \frac{\Delta x^4 f^{(5)}(\xi)}{20}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_n} = \frac{1}{12\Delta x} \left[ 25f(x_n) - 48f(x_{n-1}) + 36f(x_{n-2}) - 16f(x_{n-3}) + 3f(x_{n-4}) \right] + \frac{\Delta x^4 f^{(5)}(\xi)}{5}$$

TABELA III.1 Distribuição dos Testes Seleccionados  
(número de testes)

$f, Y(x_n/n)$	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	35	TOTAL
15°	-	-	-	-	-	01	-	02	02	-	-	01	-	-	-	-	-	-	06
20°	-	-	-	-	-	-	-	-	01	-	02	03	-	-	01	02	01	-	10
25°	-	-	-	-	-	-	-	01	-	01	01	-	02	01	-	-	-	-	06
30°	-	02	-	-	-	-	-	02	01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	05
35°	-	-	-	01	-	01	01	-	02	-	01	01	02	-	01	-	-	01	11
40°	01	-	01	01	01	-	03	-	01	-	01	-	01	01	-	-	-	-	11
45°	-	-	01	-	01	-	-	-	-	-	-	01	01	02	-	-	-	-	06
50°	-	-	-	-	01	-	01	01	-	01	-	-	-	-	01	01	-	-	06
TOTAL	01	02	02	02	03	02	05	06	07	02	05	06	06	04	03	03	01	01	51



A maior precisão é obtida nos pontos centrais, isto é, para  $2 < j < n-1$ , o que corresponde a um erro seis vezes menor que nos pontos extremos ( $x_1$  e  $x_n$ ) e, uma vez e meia menor que os pontos adjacentes aos extremos ( $x_2$  e  $x_{n-1}$ ). A precisão do método depende de  $\Delta x^4$ , o que pode ser considerado uma boa precisão. O intervalo  $\Delta x$  escolhido vale 0,2 segundos, encontrando-se no limite prático de precisão da tomada de pontos da curva  $N_t(t)$  plotada pelo registrador gráfico.

O cálculo do coeficiente de potência foi promovido distribuindo-se os valores de velocidade de vento medidos em cada intervalo adotado para diferenciação numérica. Assim, cada valor de velocidade de vento medido agrupou aproximadamente seis intervalos de cálculo. A expressão utilizada para obtenção do  $C_p(\lambda)$  vale :

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^{nw} w_{ti} \cdot dw_{ti} / dt}{\frac{1}{2} \rho A V_j^3}$$

onde :

$$i = 1, 2, \dots, nw$$

$$j = 1, 2, \dots, nv$$

nw = número de pontos da curva  $w(t)$

nv = número de registros de vento

A primeira dificuldade encontrada para o tratamento de dados consiste na medição dos pontos na curva  $N_t(t)$  em intervalos constantes e reduzidos, acrescida da descontinuidade do próprio traçado, provocada pelo contato papel-pena no registrador grá-

fico. Além disto, as flutuações de vento não contabilizadas pelo processo de medição provocam pequenas variações na inclinação da curva  $N_t(t)$  que aumentam a imprecisão do método. Levando em conta estes problemas, o cálculo da aceleração apresenta grandes variações em torno de um comportamento médio esperado, como apresentado nas Figuras III.7 e III.8, para o teste com  $\beta = 15^\circ$  e  $V_H = 25,38 \text{ km/h}$ .

As características  $C_p(\lambda)$  e  $C_q(\lambda)$  obtidas por este processo, compatíveis com as figuras anteriores, são mostradas nas Figuras III.9 e III.10.

O procedimento para tratamento dos dados das características  $C_p(\lambda)$  obtidas segue a tendência de aglutinar todos os resultados em um único conjunto de pontos, isto é, em uma única curva  $C_p(\lambda)$ . O algoritmo utilizado para este fim, consiste de divisão da característica em intervalos iguais  $\Delta\lambda$  e, contabilizando todos os pontos de todas as características que estão contidos num determinado intervalo, promover a regressão linear com o objetivo de considerar a influência de todos os conjuntos de pontos. A Figura III.11 exemplifica o tratamento de dados implementado. Com a regressão linear, calcula-se o valor médio de cada intervalo  $\Delta\lambda$ .

Para cada ângulo  $\beta$  é, portanto, determinada uma única característica  $C_p(\lambda)$ , que será utilizada para ajuste dos parâmetros do modelo proposto. O algoritmo utilizado na redução de dados consiste dos métodos de Levenberg-Marquardt-Fletcher que

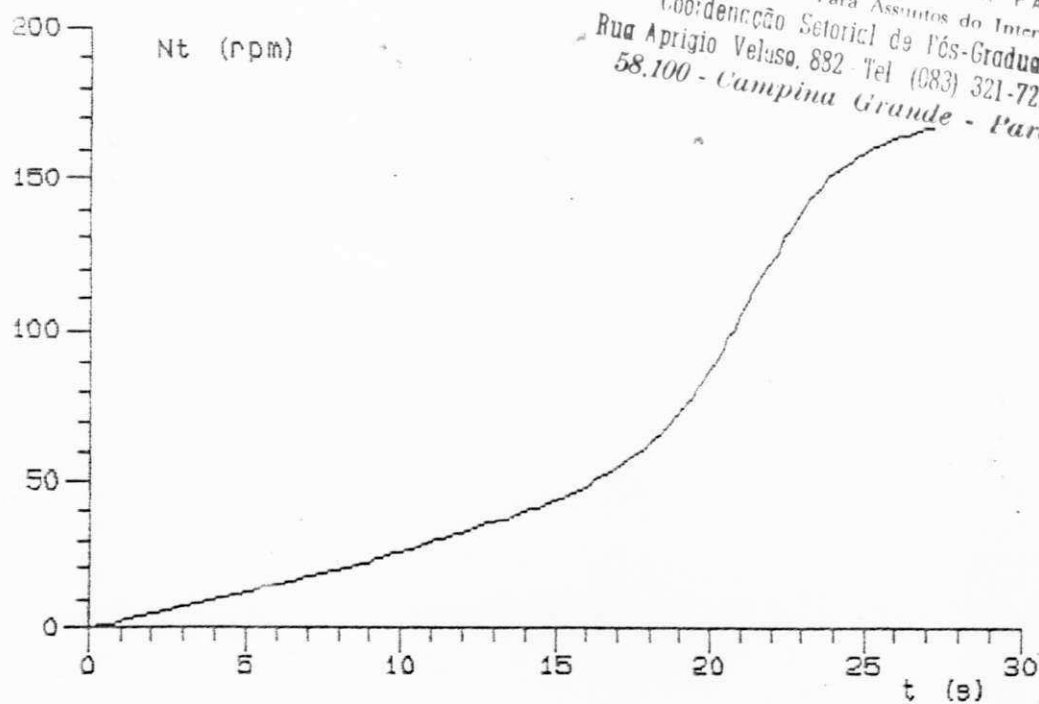


Figura III.7. Curva  $N_t(t)$  do Processo de Aceleração Livre a 25,4 km/h e com  $\beta = 15^\circ$ .

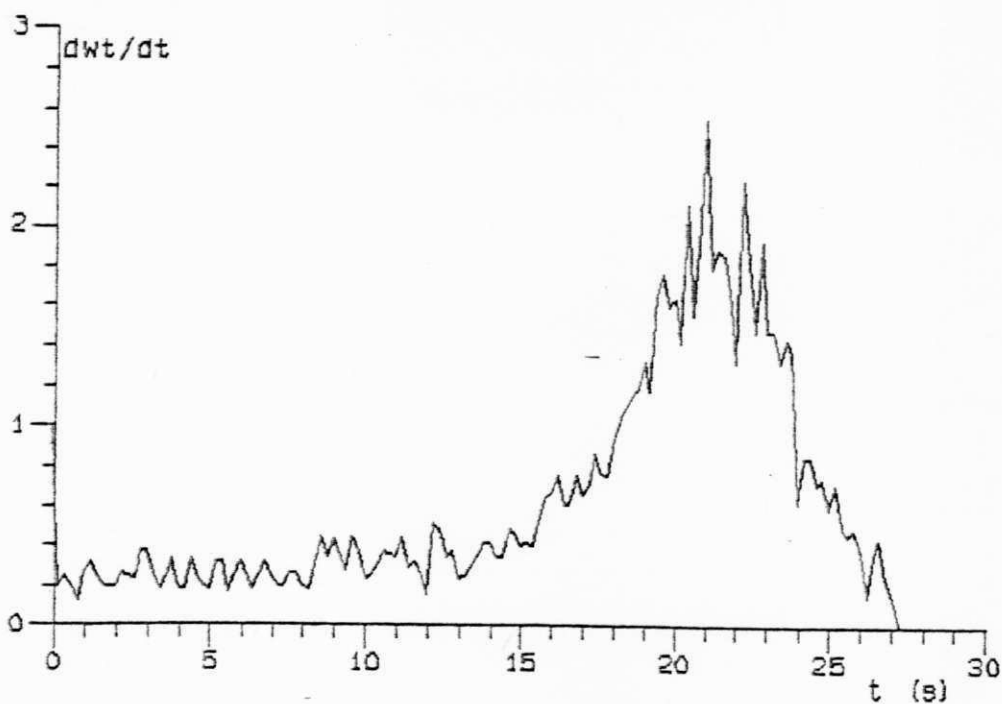


Figura III.8. Aceleração Angular da Turbina a 25,4 km/h e  $\beta = 15^\circ$ .

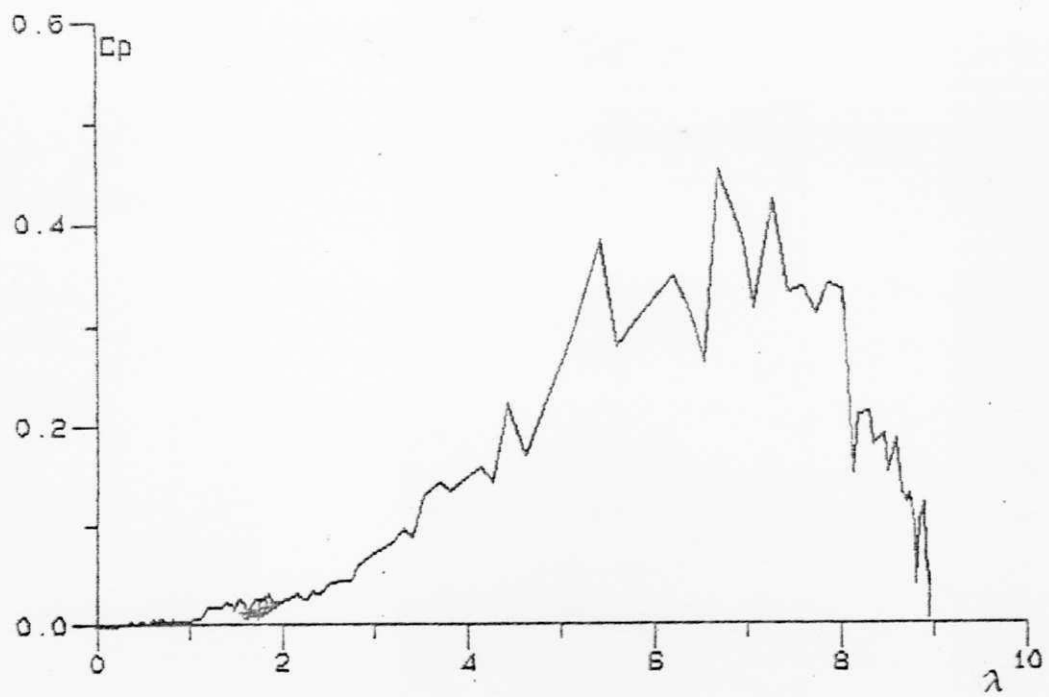


Figura III.9. Característica  $C_p(\lambda)$  para 25,4 km/h e  $\beta = 15^\circ$ .

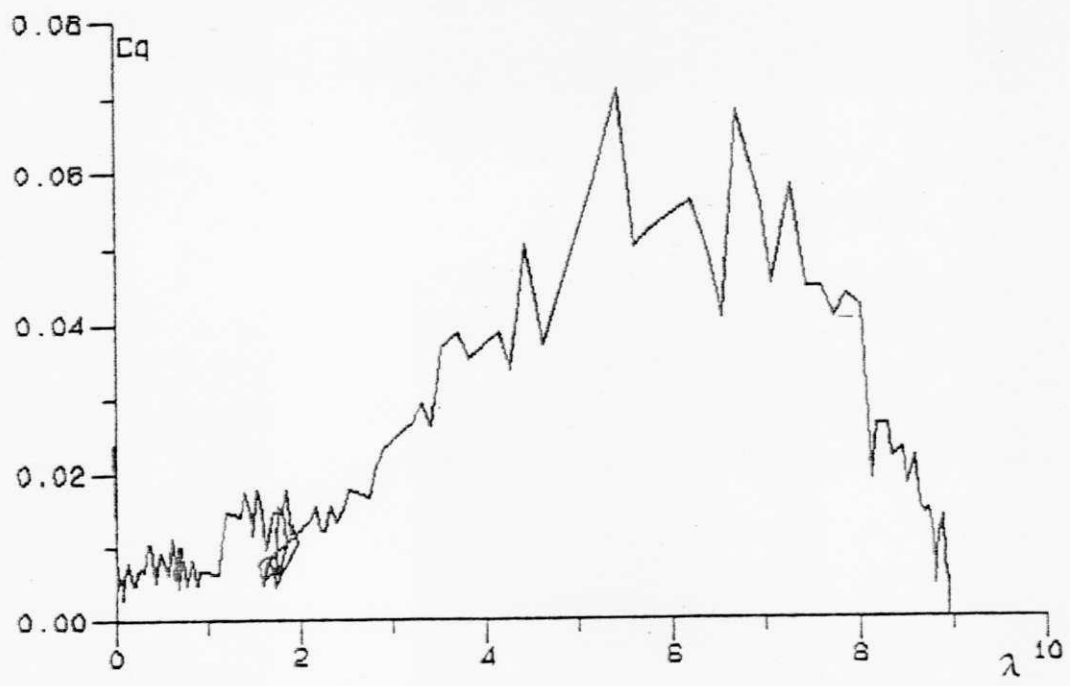


Figura III.10. Característica  $C_q(\lambda)$  para 25,4 km/h e  $\beta = 15^\circ$ .

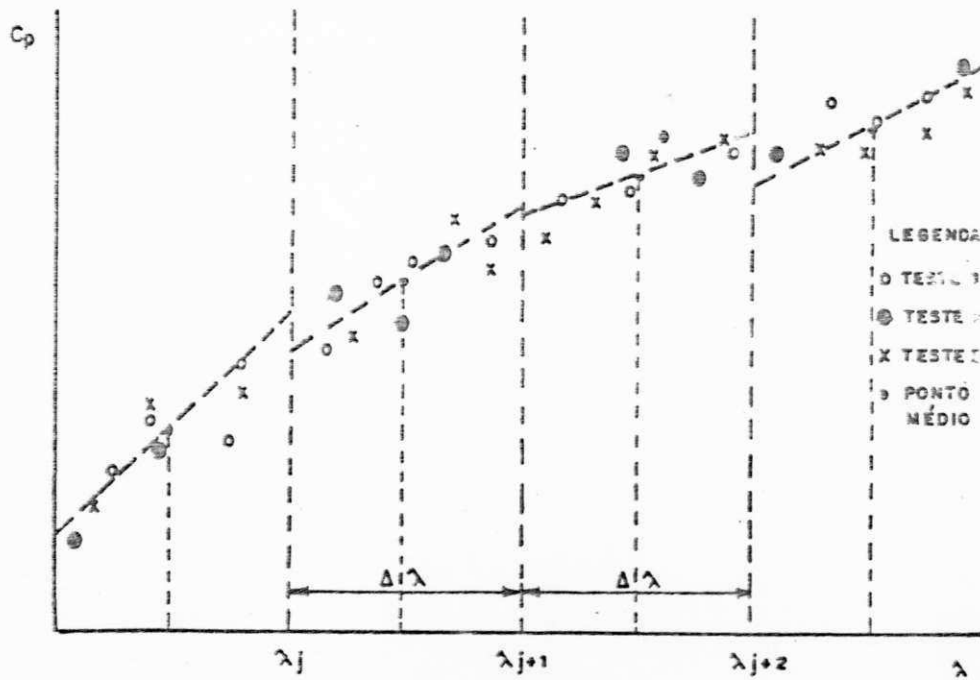


Figura III.11. Processo de Aglutinação de Dados para um único  $\beta = \beta_0$ .

minimizam o erro quadrático entre a função proposta e os dados fornecidos.

Em vista da dificuldade de convergência apresentada no ajuste de curvas, foram utilizados na redução os dados de  $C_q(\lambda)$  e testados os polinômios de 1ª e 2ª ordem de Power. O maior problema, neste processo, é compatibilizar bons resultados em toda a faixa de relações de velocidades.

O modelo de 1ª ordem de Power, por apresentar uma característica parabólica de  $C_q(\lambda)$ , não fornece precisão na representação do desempenho do rotor eólico, apresentando coeficientes  $b_0$  negativos. Com o polinômio de 2ª ordem foi possível obter resultados bastante satisfatórios, com boa representação da

operação a passo fixo da turbina, como mostrado na Figuras III.12 e III.13.

A Tabela III.2 mostra os coeficientes  $b_{1-4}$  obtidos para os vários ângulos de passo testados, enquanto a Tabela III.3 identifica os parâmetros mais importantes de cada curva característica.

Os resultados apresentados na Tabela III.2 indicam uma variação complexa dos coeficientes  $b_{1-4}$  com o ângulo de passo, difícil portanto de ser expressa por relações simples. Na Tabela III.3 pode ser observado o comportamento do coeficiente de conjugado de partida que apresenta valores crescentes com o ângulo de passo e possui um valor máximo a  $\beta = 30^\circ$ . A va-

TABELA III.2 Coefficientes do Polinômio de Power (n=2)  
em Função do Ângulo de Passo da Pá

$\beta$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	ERRO QUADRÁTICO
15°	0.00475	-0.00804	0.00281	0.01154	-0.00388	22,4. 10 <sup>-4</sup>
20°	0.00811	-0.01503	0.02021	0.00056	-0.00231	17,9. 10 <sup>-4</sup>
25°	0.01106	0.01461	-0.04612	0.04861	-0.01426	6,7. 10 <sup>-4</sup>
30°	0.01897	0.00079	-0.02492	0.03366	-0.01195	8,0. 10 <sup>-4</sup>
35°	0.01362	0.01135	-0.02611	0.03045	-0.01246	3,44. 10 <sup>-4</sup>
40°	0.01125	0.04970	-0.13993	0.14873	-0.05327	4,34. 10 <sup>-4</sup>
45°	0.01308	0.01463	-0.03934	0.06413	-0.03615	4,85. 10 <sup>-4</sup>

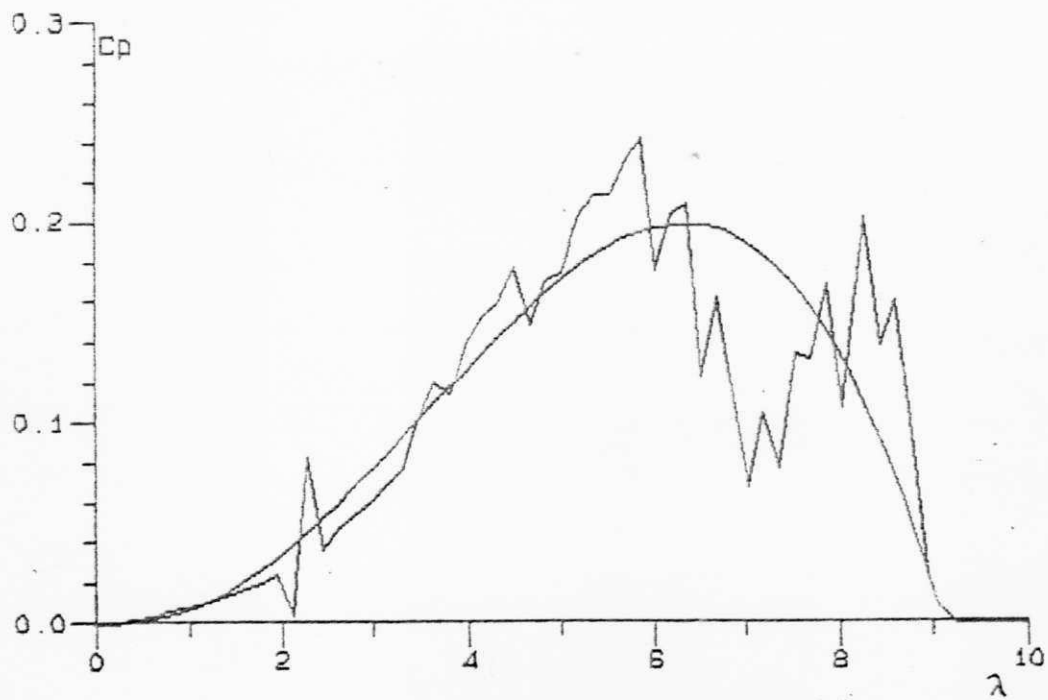


Figura III.12. Características  $C_p(\lambda, \beta=15^\circ)$  experimental resultante do tratamento de dados e teórica .

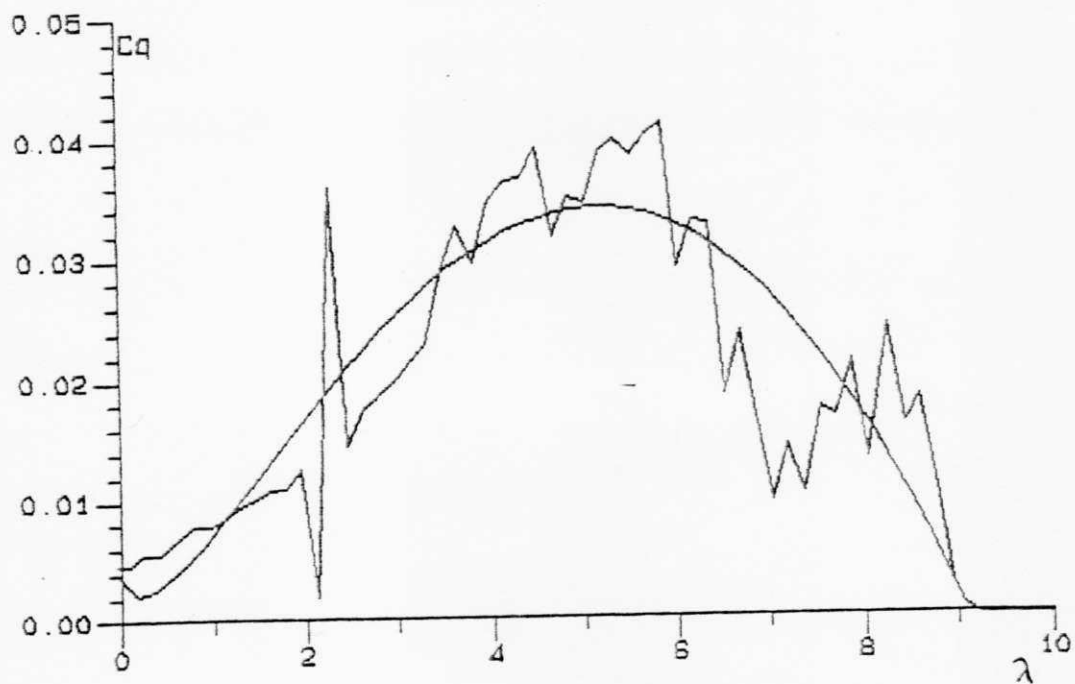


Figura III.13. Características  $C_q(\lambda, \beta=15^\circ)$  experimental resultante do tratamento de dados e teórica.

TABELA III.3 Parâmetros Básicos das Características

$\beta$	$C_q(0)$	$C_{pmax}$	$C_{qmax}$	$\lambda_0$	$\lambda_t$	max. $\lambda$
15°	0,00475	0,1932	0,03288	6,35	5,25	9,06
20°	0,00811	0,1208	0,02647	5,15	3,85	7,50
25°	0,01106	0,0719	0,02230	3,50	2,90	5,00
30°	0,01897	0,0409	0,01911	2,65	1,80	3,90
35°	0,01315	0,0275	0,01685	2,00	1,00	3,04
40°	0,011254	0,0238	0,01715	1,65	1,15	2,34
45°	0,013078	0,0175	0,01777	1,20	0,70	1,80

riação dos demais parâmetros básicos das características  $C_p(\lambda)$  e  $C_q(\lambda)$ , apresentados na Tabela III.3, evidencia a deteriorização destas características provocada pelo efeito do passo variável, o qual possibilita o controle de velocidade da turbina.

Em vista da complexidade da relação entre os coeficientes  $b_{i-1}$  e o ângulo  $\beta$ , o processo de ajuste dos parâmetros do modelo do passo variável utiliza um procedimento diferente daquele até então proposto.

Pela análise do funcionamento do mecanismo centrífugo de controle do passo, foi verificado que a escala de variação do ângulo de passo, que realmente ocorre na prática, está compreendida entre os ângulos de 15° e 25°. A partir desta observação foi promovida a regressão linear dos coeficientes  $b_{i-1}$  para os an-



gulos  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $25^\circ$  e as equações das retas foram ajustadas para representar a curva  $C_p(\lambda, \beta)$  para  $\beta = 15^\circ$ , obtendo-se :

$$b_0 = -38,2229 \cdot 10^{-4} + 57,1626 \cdot 10^{-5} \beta'$$

$$b_1 = -26,5533 \cdot 10^{-3} + 10,9157 \cdot 10^{-4} \beta'$$

$$b_2 = 36,6537 \cdot 10^{-3} - 20,5923 \cdot 10^{-4} \beta'$$

$$b_3 = -10,4963 \cdot 10^{-3} + 14,1841 \cdot 10^{-4} \beta'$$

$$b_4 = 42,9958 \cdot 10^{-4} - 54,6018 \cdot 10^{-5} \beta'$$

onde  $\beta'$  é uma função do ângulo de passo  $\beta$  expresso em graus.

Sabendo-se que apenas a característica  $C_p(\lambda, \beta)$  necessita ser representada fielmente para todos os valores de  $\lambda$  e que, para  $\beta$  diferente de  $15^\circ$  é suficiente a representação da região  $\lambda \geq \lambda_0$ , é pesquisada a relação entre  $\beta$  e  $\beta'$  que obedeça estas premissas. Para expressar esta relação foi obtido o seguinte polinômio :

$$\beta' = 15 + 0,09 (\beta - 15) + 0,056 (\beta - 15)^2$$

As Figuras III.14 e III.15 apresentam as famílias de curvas  $C_p(\lambda, \beta)$  e  $C_q(\lambda, \beta)$ , obtidas.

#### III.4. GERADOR ELETRICO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - 111 (300) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

Vários trabalhos têm sido dedicados à modelização e metodologia de testes de máquinas elétricas, principalmente para os geradores síncronos (IEEE, 1965; Shackshaft, 1963; Jones,

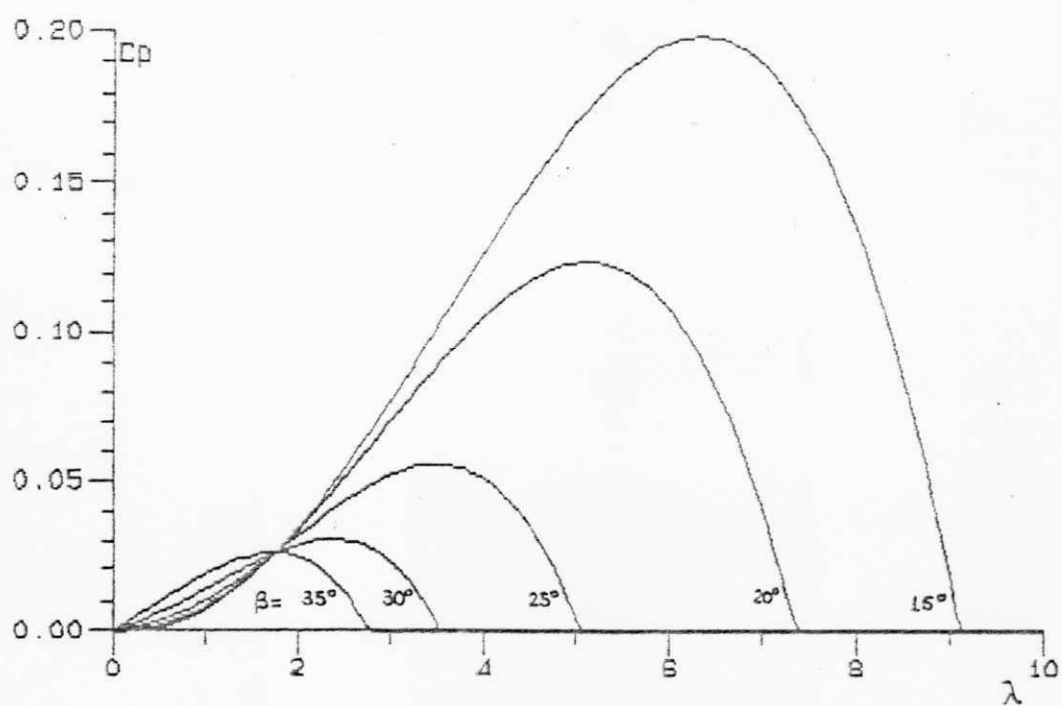


Figura III.14. Características  $C_p(\lambda, \beta)$  para vários ângulos de passo da pá.

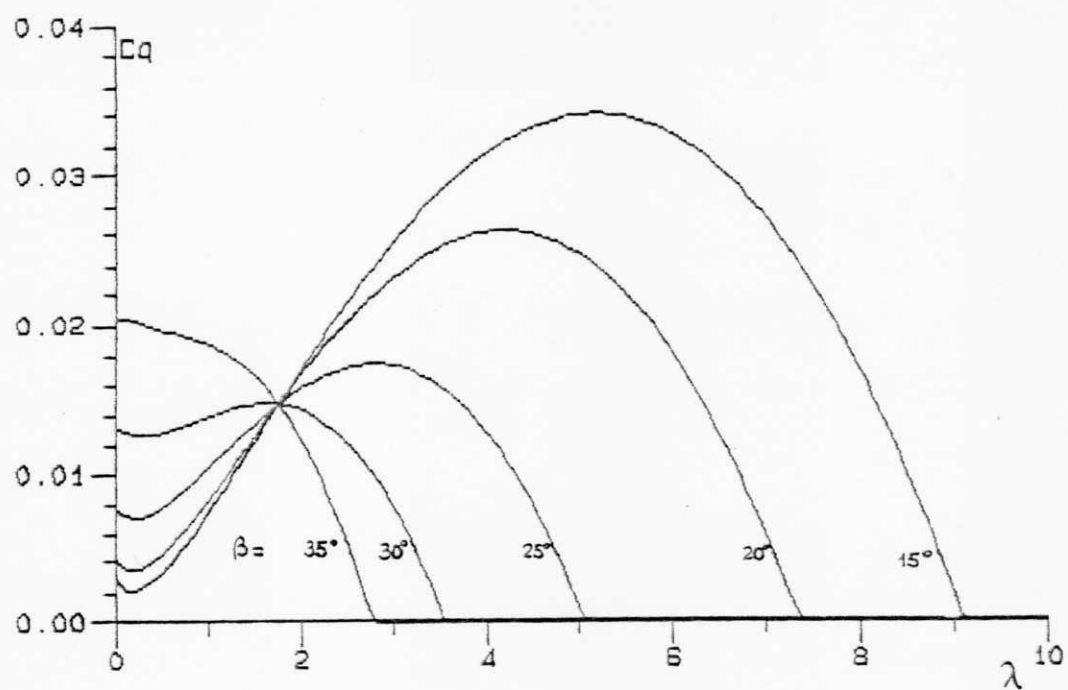


Figura III.15. Características  $C_q(\lambda, \beta)$  para vários ângulos de passo da pá.

1967). Em vista da análise sistêmica de um SCEE, a modelização deve ser compatível com os aspectos da operação a velocidade variável e, da avaliação do desempenho com uma representação adequada das perdas energéticas.

#### III.4.1 Modelização

Os modelos utilizados para representação do gerador elétrico, para o estudo do SCEE, podem ser divididos em termos dos aspectos elétricos e energéticos da análise.

Quanto ao aspecto elétrico, a representação do alternador em regime permanente foi baseada nas seguintes considerações :

- A distribuição da força magnetomotriz é senoidal no entreferro;
- A saliência entre o eixo direto e a quadratura é considerada em vista de sua influência na operação com cargas fortemente indutivas (Shackshaft, 1963);
- A saturação é representada estaticamente através do coeficiente de saturação dependente da corrente de magnetização;
- O imã é descrito de maneira simplificada sem levar em consideração a característica de desmagnetização.

O modelo das duas reações (Concordia, 1951; Anderson e

Fouad, 1977) tem-se mostrado bastante eficiente na representação de alternadores de polos salientes. O alternador em estudo, além de apresentar estrutura rotórica a peças polares, inclui o efeito do ímã permanente que auxilia na distribuição desigual do fluxo magnético entre os eixos direto e em quadratura. A visualização deste processo torna-se bastante complexa devido ao aspecto tridimensional da estrutura magnética a fluxo concentrado.

As equações básicas do modelo são descritas pelas seguintes expressões do regime permanente :

$$V_{dg} = -r_g \cdot I_{dg} + w_g \cdot L_{qg} \cdot I_{qg}$$

$$V_{qg} = -r_g \cdot I_{qg} - w_g \cdot L_{dg} \cdot I_{dg} + E_g$$

onde  $V_{dg}$  e  $V_{qg}$  são as componentes em eixo direto e quadratura da tensão terminal da máquina.

$w_g$  é a velocidade rotacional do alternador em radianos elétricos por segundo

$$E_g = w_g \cdot g(I_m) + w_g \cdot C_{kima}$$

onde  $g(I_m)$  compreende a característica de magnetização devido à bobina de campo;

$C_{kima}$  descreve o efeito do ímã permanente.

Diversas expressões matemáticas foram estudadas para representação da característica de magnetização do alternador, (Smith e Sriharan, 1968; Thaler e Wilcox, 1966; Nicodemou e Bolton, 1979), entre estas o modelo de Smith e Sriharan (1968) apresenta, apesar da complexidade, o melhor resultado. As

equações que definem este modelo podem ser expressas por :

$$\begin{aligned}g(I_m) &= a_1 \cdot I_m + a_2 \cdot I_m^3 \text{ para } 0 \leq I_m < I_{f1} \\ &= a_3 + a_4 \cdot I_m + a_5 \cdot I_m^3 \text{ para } I_{f1} \leq I_m < I_{f2} \\ &= a_6 + a_7 \cdot I_m \text{ para } I_m \geq I_{f2}\end{aligned}$$

onde  $I_{f1}$  é calculado para que a expressão não tenha inclinação negativa

$I_{f2}$  deve corresponder à região saturada

Em vista da operação autoexcitada, é necessária uma representação da saturação magnética. O modelo escolhido para este fim utiliza um fator de saturação  $K_S$ , definido por :

$$K_S(I_m) = \frac{g(I_m)}{L_{afd0} \cdot I_f}$$

onde  $L_{afd0}$  é a indutância mútua não saturada

$g(I_m)$  é a função de magnetização

$I_m$  é a corrente de magnetização definida por :

$$I_m = [(I_f - \xi \cdot I_{dg})^2 + (\xi \cdot I_{qg})^2]^{1/2}$$

onde  $\xi$  é o fator de conversão dos Amperes-espiras de estator para rotor.

O fator de saturação é utilizado na atualização das indutâncias do modelo, segundo a expressão :

$$L_{dg} = L_1 + K_S \cdot L_{md0}$$

$$L_{qg} = L_1 + K_S \cdot L_{mq0}$$

$$L_{afd} = K_S \cdot L_{afd0}$$

$$L_{ffd} = L_{fd} + K_S \cdot L_{mfd0}$$

onde  $L_1$  e  $L_{fd}$  são indutâncias de dispersão dos enrolamentos estatórico e rotórico, respectivamente.

$L_{md0}$ ,  $L_{mq0}$  e  $L_{mfd0}$  são indutâncias de magnetização não saturadas.

Em termos do aspecto energético, foram estudadas as possíveis representações matemáticas para as perdas dissipadas pelo alternador operando a velocidade variável. Na máquina elétrica pode-se definir os seguintes tipos de perdas (Levi, 1984):

- Perdas joulicas nas resistências dos enrolamentos estatóricos e rotóricos;
- Perdas no ferro, que correspondem às perdas por histerese e por correntes parasitas (Foucault);
- Perdas adicionais, que estão relacionadas aos efeitos da corrente estatórica produzindo perdas na superfície dos polos e nos dentes, perdas por pulsação de fluxo e nas terminações das bobinas;
- Perdas mecânicas por atrito e ventilação.

As perdas magnéticas, histerese ( $P_H$ ) e Foucault ( $P_F$ ), apresentam comportamento bastante conhecido que pode ser representado pelas expressões :

$$P_H = K_H \cdot B^2 \cdot f$$

$$P_F = K_F \cdot B^2 \cdot f^2$$

onde  $B$  = densidade de fluxo magnético

$f$  = frequência das grandezas elétricas

$K_H$  e  $K_F$  = coeficientes de proporcionalidade

Pode-se escrever, através de desenvolvimento matemático simples, que as perdas globais no ferro valem :

$$P_{Fe} = \frac{E_g^2}{f} (K_1 + K_2 \cdot f)$$

onde  $K_1$  e  $K_2$  são coeficientes de proporcionalidade

As perdas adicionais apresentam comportamento mais complexo, cuja representação utilizada é proposta por Levi (1984) e equivale a :

$$P_{ad} = K_I \cdot f^q \cdot I_g^2$$

onde  $K_I$  e  $q$  são coeficientes a se determinar

$I_g$  é a corrente por fase de máquina.

As perdas mecânicas englobam diversos fenômenos diferentes que compreendem comportamentos dependentes da velocidade rotacional (atrito estático, atrito viscoso e ventilação). A representação pode ser feita por uma expressão polinomial (Kostenko e Piotrovski, 1975), cujos termos correspondem a cada fenômeno considerado, ou por uma expressão potencial única que aglutina todos estes efeitos (Levi, 1984), tal como :

$$P_{mec} = K_m \cdot \omega_g^p$$

onde  $K_m$  e  $p$  são coeficientes a se determinar

$\omega_g$  é a rotação do alternador em rad/s.

Pela representação de cada parcela de perdas é possível avaliar o rendimento da conversão eletromecânica.

#### III.4.2 Testes Laboratoriais

A metodologia de ensaio de alternadores constitui assunto bastante estudado (IEEE, 1965; Jones, 1967), seguindo-se procedimento clássico a avaliação de características pelos ensaios a vazio, em curto-circuito, em carga e a fator de potência nulo. Neste caso, maior dificuldade é encontrada na avaliação das perdas de potência durante os testes, isto é, na existência de uma bancada de testes que possibilite a medição da potência de entrada no eixo do alternador e que opere nas escalas de velocidade compatíveis com a operação real de máquina elétrica.

A avaliação de parâmetros e características em máquinas elétricas de projeto especial, onde existem ímãs permanentes em sua estrutura, pressupõe dificuldades operacionais na implementação de ensaios clássicos, como ensaio em curto-circuito (Abdelaziz, 1982). No caso dos testes do alternador do sistema Elektro, não houve impedimento à realização destes ensaios, em vista da pequena contribuição do ímã permanente sobre o fluxo magnético produzido no entreferro.

Para efetuação destes testes foi desenvolvida uma bancada de ensaio, cujo órgão primário acionador consiste de um



motor de corrente contínua de carcaça basculante. Com isto é possível medir a potência fornecida pelo órgão primário, por utilização de um dinamômetro entre a base do motor e um braço soldado à carcaça do motor (Figura IPI.16). Uma transmissão mecânica possibilita o acionamento do alternador em escalas de velocidades adequadas. Além disto, um tacômetro digital acoplado ao eixo do motor possibilita o ajuste da velocidade desejada.

A avaliação da potência fornecida pelo motor acionador não é suficiente para a determinação da potência de entrada no alternador, em vista das perdas existentes na caixa de multiplicação. A determinação das características da transmissão mecânica é apresentada no Item III.5 deste capítulo.

O alternador do sistema Elektro foi instalado na bancada de testes conectado à sua própria transmissão mecânica, o que possibilitou operação nas velocidades de 25, 50, 75 e 100 rpm e a medição das perdas mecânicas globais (alternador e transmissão mecânica).

O ensaio a vazio foi feito para as quatro rotações citadas e para diversos valores de corrente de campo, inclusive para valores negativos de corrente de campo que anulam a tensão estatórica. Foram medidas as tensões na bobina de campo, tensões entre fases do estator, corrente e tensão da armadura do motor acionador e conjugado no eixo deste motor. Neste ensaio foi possível obter as perdas mecânicas e no ferro do alternador, bem como a característica de magnetização, o efeito do imã permanente

e a resistência a quente do circuito de campo.

Para o ensaio em curto-circuito foram utilizados transformadores de corrente de relação 50/5 e foi variada a corrente de campo, desde o valor negativo que produziu corrente de estatórica nula ao valor de excitação que produziu corrente de armadura próxima à nominal. Com os dados obtidos deste ensaio foi possível determinar a indutância síncrona não-saturada de eixo direto ( $L_{dg0}$ ) e as perdas adicionais.

O ensaio em carga foi procedido a fim de checar as representações das perdas dissipadas pela máquina elétrica e seus resultados são apresentados após redução de dados.

O ensaio, a fator de potência nulo, foi implementado utilizando-se um motor síncrono subexcitado como carga reativa para o alternador. Neste ensaio, foi obtida a reatância de Potier e a equivalência ampere-espira entre campo e armadura ( $\xi$ ). Devido às condições laboratoriais existentes, o ensaio foi executado com baixa corrente reativa, equivalente a 20% da corrente nominal do alternador.

A medição dos parâmetros elétricos foi promovida por uso de ponte RLC, com o objetivo principal de checar a relação  $X_{qg}/X_{dg}$ , tendo em vista a imprecisão na identificação de indutâncias de máquinas elétricas através deste processo. As resistências elétricas foram medidas a quente e a frio utilizando-se o início e término dos ensaios em curto e a vazio. As indutâncias próprias dos enrolamentos foram obtidas para várias posições

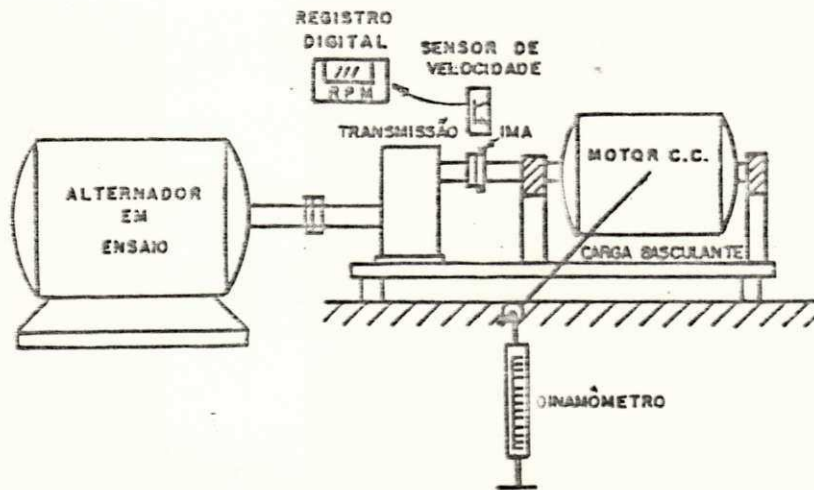


Figura III.16. Bancada de Testes de Geradores Elé-  
tricos em Velocidade variável.

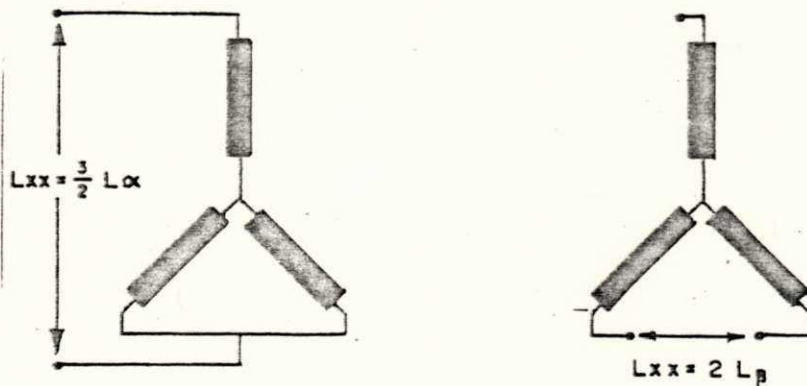


Figura III.17. Conexões das Bobinas de Estator do  
Alternador para Medição de Indutâncias pelo Método  
de Jones.

angulares, a fim de definir o efeito da saliência polar. As indutâncias de armadura foram obtidas utilizando as conexões em eixo  $\alpha$  e  $\beta$  (Jones, 1967), como apresentado na Figura III.17. Este método de ensaio fornece diretamente os parâmetros necessários à implementação de modelos dinâmicos.

A expectativa teórica é que as indutâncias obtidas se comportem segundo as seguintes funções da posição angular  $\theta$  :

$$L_{\alpha} = L_a + L_b \cos 2\theta$$

$$L_{\beta} = L_a - L_b \cos 2\theta$$

Destas expressões pode-se obter as indutâncias em eixo direto e quadratura por :

$$L_{dg} = L_a + L_b$$

$$L_{qg} = L_a - L_b$$

Quando o alternador em teste possui rotor maciço, o efeito das correntes parasitas no circuito magnético provocam sensível alteração nas medições das indutâncias  $L_{\alpha}$  e  $L_{\beta}$ . Neste caso, o ensaio pode apenas fornecer uma orientação quanto aos valores de  $L_{dg}$  e  $L_{qg}$ , ou podem ser utilizados na determinação de parâmetros dos enrolamentos amortecedores.

A presença do ímã permanente na estrutura, produz conjugados estáticos, quando da injeção de corrente nos enrolamentos de armadura, o que dificulta a implementação de testes em posições angulares definidas. Neste caso, tornou-se impraticável a medição de indutâncias por injeção de corrente alternada e de

corrente contínua (Jones, 1967), devido a folga existente na caixa de transmissão.

Os parâmetros e características obtidas durante os ensaios são apresentados no próximo item, onde são discutidos os métodos de redução dos dados.

#### III.4.3. Redução dos Dados

A determinação da reatância de eixo direto, através das características obtidas do ensaio a vazio e em curto-circuito, constitui método bastante conhecido (IEEE, 1965). A reatância de eixo quadratura é, contudo, parâmetro de determinação mais complexa e os ensaios, até então sugeridos, não garantem precisão e apresentam dificuldades operacionais de execução. Uma metodologia de cálculo das reatâncias  $X_{dg}$  e  $X_{qg}$ , sugerida por Abdelaziz (1982), utilizando os dados do ensaio em carga, tem apresentado resultados mais confiáveis com uma implementação prática mais simples. Este método, denominado método da corrente, foi utilizado principalmente na determinação da relação  $X_{qg}/X_{dg}$ .

O método da corrente utiliza os dados do ensaio em carga resistiva e, por processamento numérico das equações do regime permanente do modelo de polos salientes, fornece as reatâncias  $X_{qg}$  e  $X_{dg}$ , como indicado no Apêndice.

Utilizando este método e selecionando os resultados que forneceram erros inferiores a 5%, entre os diversos pontos da curva de carga, obteve-se  $X_{qg}/X_{dg} = 1,3253$ , compatível com o

resultado encontrado por Abdelaziz (1982), para este mesmo tipo de alternador.

As características de magnetização obtidas durante os ensaios para várias velocidades rotacionais são apresentadas na Figura III.18. Para determinação dos parâmetros foi utilizado algoritmo de ajuste de curvas por mínimos quadrados, onde se obteve :

$$g_1(I_m) = a_1 \cdot I_m + a_2 \cdot I_m^3 \quad 0 \leq I_m < 0,8 \text{ A}$$

$$\text{onde } a_1 = 0,20119$$

$$a_2 = -0,09597$$

$$g_2(I_m) = a_3 + a_4 \cdot I_m + a_5 \cdot I_m^3 \quad 0,8 \leq I_m < 2,0 \text{ A}$$

$$\text{onde } a_3 = 0,07810$$

$$a_4 = 0,04484$$

$$a_5 = -0,0041$$

$$g_3(I_m) = a_6 + a_7 \cdot I_m \quad I_m \geq 2,0 \text{ A}$$

$$\text{onde } a_6 = 0,12507$$

$$a_7 = 0,00585$$

$$C_{kima} = 0,06276 \text{ V/rad/s}$$

As perdas no ensaio a vazio são apresentadas na Figura III.19. Utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes dos modelos de perdas, verificou-se que :

$$P_{Fe} = \frac{E_g^2}{f} ( 0,76549 + 0,01106 \cdot f )$$

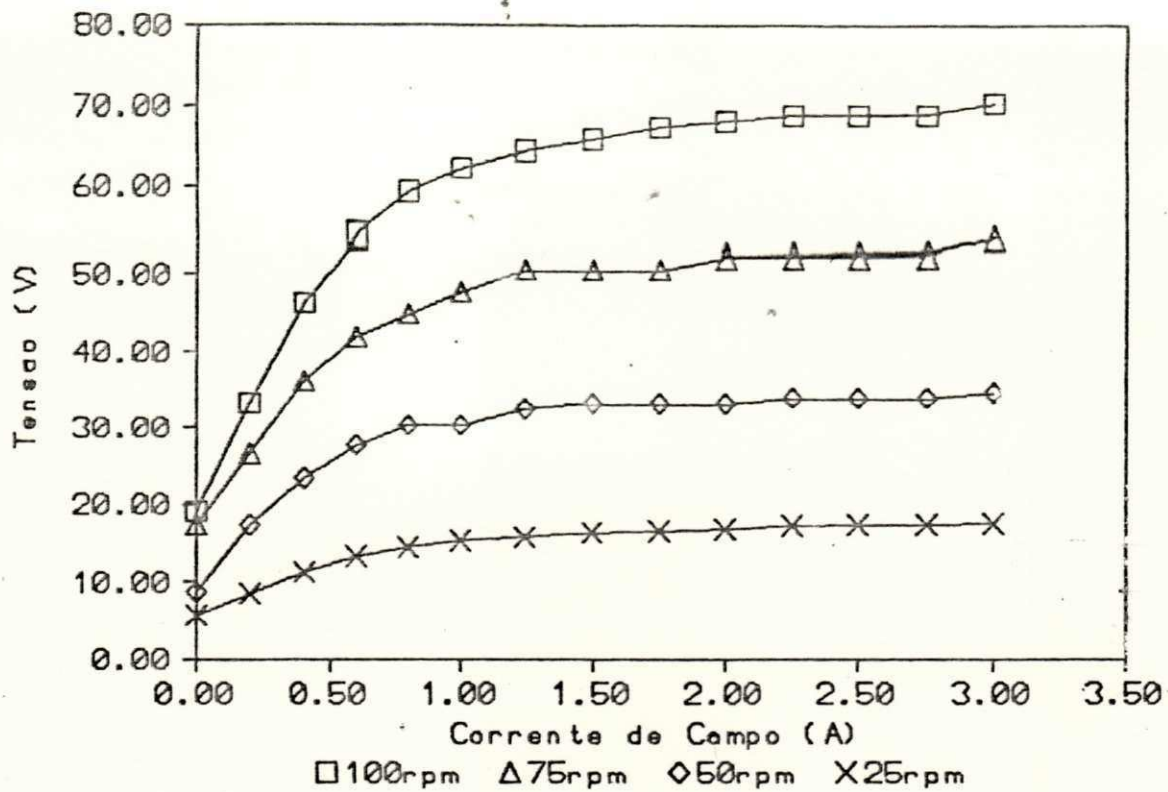


Figura III.18. Características de Magnetização em várias rotações.

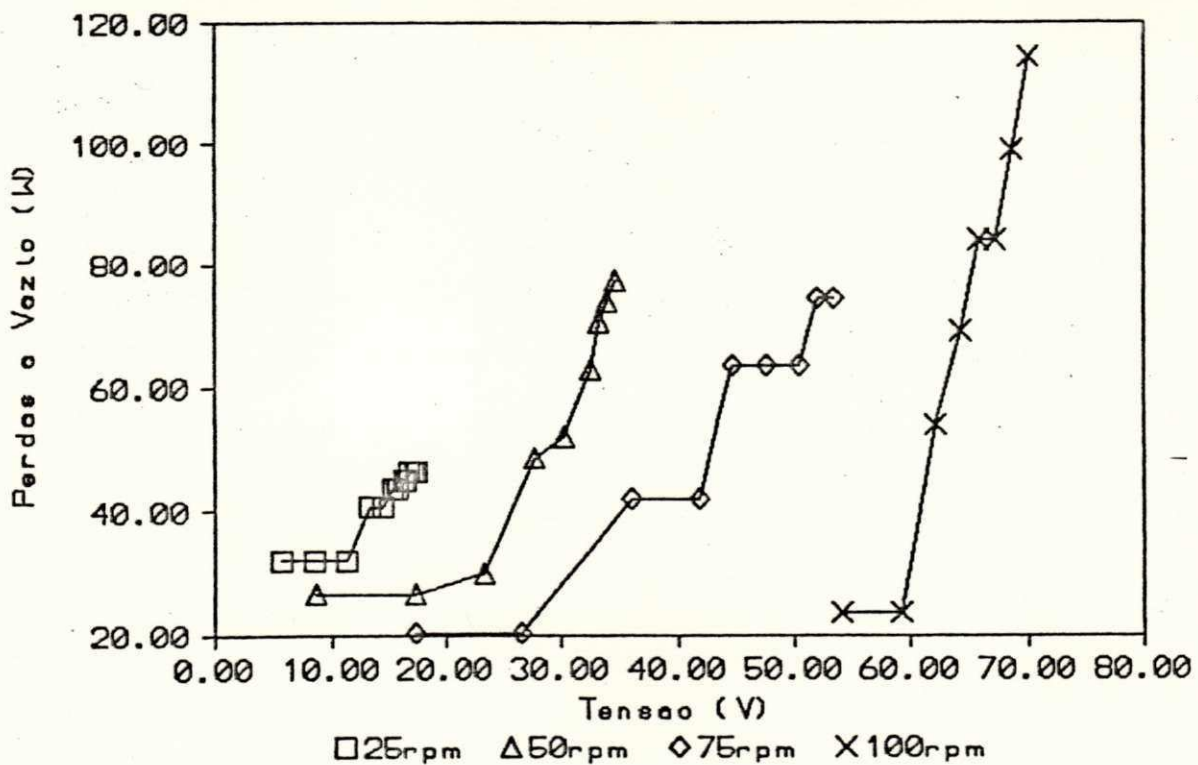


Figura III.19. Características de Perdas a Vazio

$$P_{mec} = 27,61 \text{ Watts}$$

Observa-se que não se previu no modelo a possibilidade da potência mecânica não variar com a rotação. Deve-se, contudo, notar que em todo modelo as perdas mecânicas apresentam menor precisão em sua obtenção.

As características de curto-circuito são apresentadas na Figura III.20, de onde obtém-se os dados para estimar o valor de  $X_{dg}$  não saturado e levantamento do triângulo de Potência de ensaio a fator de potência nulo. Pode-se considerar que as perdas no ensaio em curto-circuito (Figura III.21) devem-se às dissipações joulicas nas resistências de armadura, às perdas mecânicas e adicionais. O resultado da redução de dados sobre o modelo proposto prevê o seguinte comportamento:

$$P_{ad} = 0,00238 \cdot f \cdot I_g^2$$

$$P_{mec} = 24.5 \text{ Watts}$$

Na Tabela III.4 são apresentados os parâmetros básicos do alternador obtidos por medição direta ou indireta, através dos ensaios apresentados neste capítulo.

A contabilização das perdas isoladamente, ou aglutinadas no ensaio em carga, demonstram um rendimento médio do alternador em torno de 77,20%, valor relativamente baixo, porém deve-se considerar dois fatores: a presença da transmissão mecânica e o fato dos limites de carga testados distarem dos valores nominais do alternador, devido a potência máxima de bancada de testes



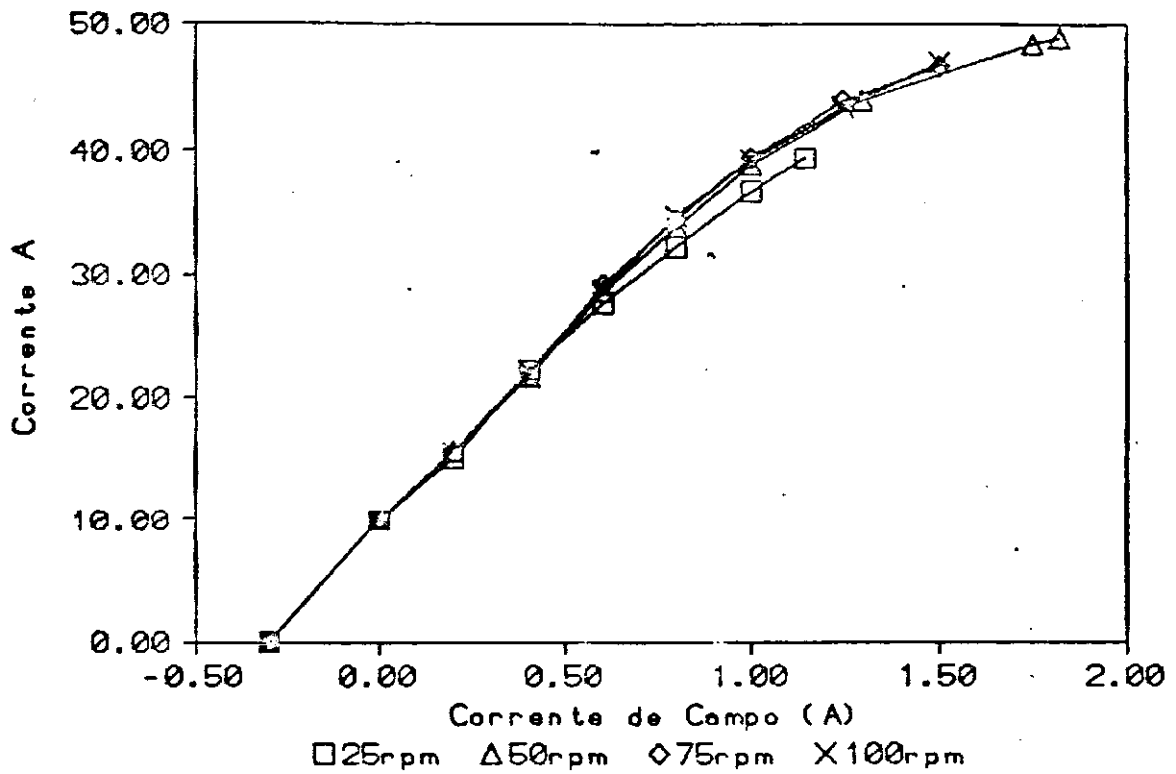


Figura III.20. Características em Curto-Circuito

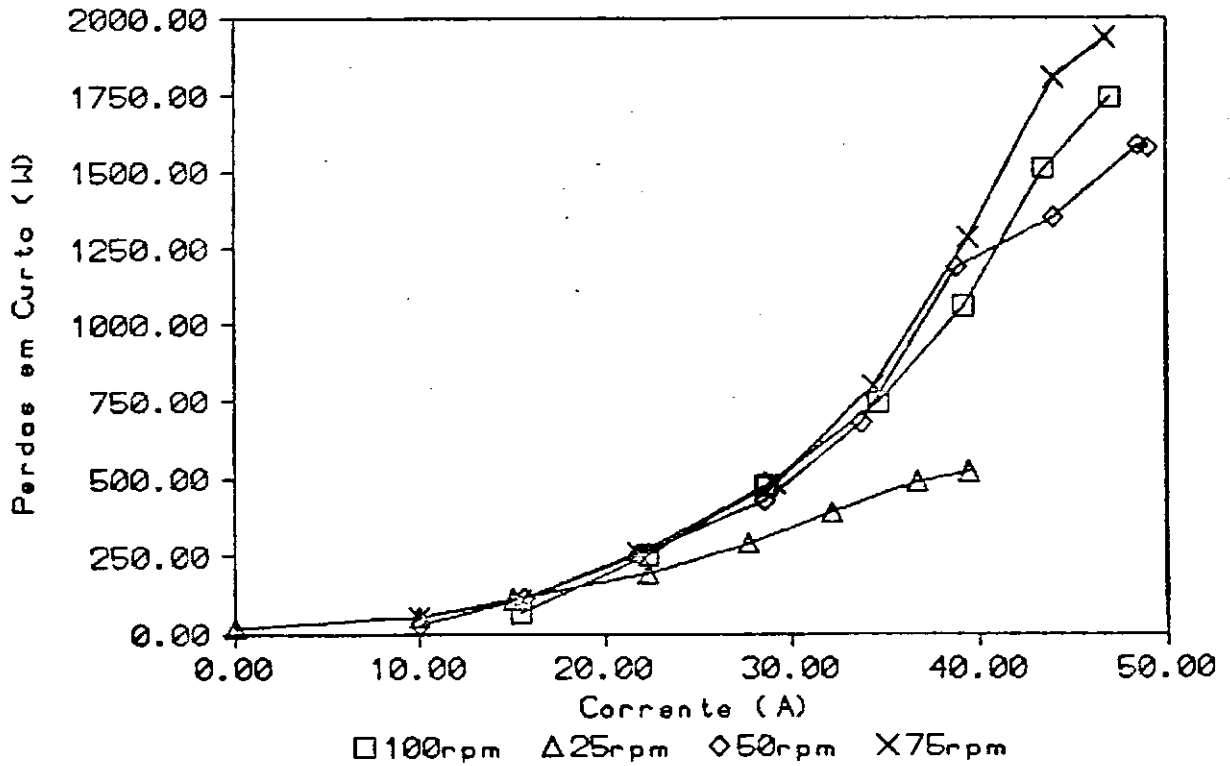


Figura III.21. Características de Perdas em Curto

TABELA III.4 Parâmetros Básicos do Alternador

Parâmetro	Valor	Ensaio Utilizados
$r_g$	0.07236 $\Omega$	Medição direta
$r_{fd}$	53.73 $\Omega$	Medição direta e ensaio a vazio
$C_{kima}$	0.06276 V/rad/s	Ensaio a vazio
$L_{dg}$	6.2652 mH	Ensaio a vazio e em curto
$K_{dq} = X_{qg}/X_{dg}$	1.3253	Método de corrente/Ensaio em carga
$L_{qg}$	8.3033 mH	Método de corrente/Ensaio em carga
$L_l$	2.69 mH	Ensaio a fator de potência nulo
$\xi$	0.01565	Ensaio a fator de potência nulo
$L_{afd}$	190.71 mH	Ensaio a vazio
$L_{ffd}$	1.8 H	Medição direta
$L_{fd}$	20 mH	Estimativa pelo coeficiente de dispersão

corresponder a 2 kW. Estimativas para potência nominal fornecem a seguinte partição de perdas :

Rendimento.....	88%
Perdas ferro/Perdas Totais.....	13%
Perdas cobre-estator/Perdas Totais.....	26,6%
Perdas cobre-campo/Perdas Totais.....	34,8%
Perdas mecânicas/Perdas Totais.....	5,0%
Perdas adicionais/Perdas Totais.....	20,6%

Esta partição de perdas é compatível com dados típicos

de alternadores deste porte, citados na literatura técnica (Levi, 1984; Kostenko e Piotrovski, 1975).

### III.5 A TRANSMISSÃO MECÂNICA

A transmissão mecânica é responsável pelo bom acoplamento de características entre turbina e carga, constituindo um componente de importância decisiva para um desempenho adequado do sistema como um todo. O multiplicador de velocidades dissipa uma certa quantidade da energia que transfere de eixo a eixo, apresentando normalmente um rendimento nunca superior a 95%.

A representação das perdas da transmissão mecânica pode ser feita pela expressão (Levi, 1984) :

$$P_{mec} = k_1 \cdot w + k_2 \cdot P + k_3 \cdot w^{2.8}$$

onde o primeiro termo corresponde às perdas nos mancais e componentes hidrodinâmicos, o segundo termo contabiliza as perdas por atrito no deslizamento das peças e o terceiro compreende as perdas por ventilação.

O propósito de modelagem e efetuação de ensaios para transmissão mecânica, neste trabalho, está relacionado à necessidade do conhecimento das características da bancada de testes apresentada anteriormente. Os modelos e ensaios não foram implementados para a caixa de multiplicação do sistema eólico. Apesar disto, o procedimento é válido para análise de SCEE e apresenta resultados bastantes interessantes para uma avaliação qualitati-

va.

O ensaio da transmissão mecânica foi procedido em duas etapas a fim da avaliação das perdas, com e sem transferência de potência. Com isto, pode-se determinar isoladamente o efeito da variação de velocidade e da variação da potência transferida. Para obter a característica de perdas, em função da velocidade, foi acionada a transmissão através do motor de C.C. da bancada de testes e medido o conjugado solicitado através de um dinamômetro. A medição das características de perdas, em função da potência transferida, foi procedida utilizando-se um freio de Prony como carga. Foram feitas medidas para várias velocidades e conjugados de carga e, as características obtidas, após redução dos dados, são apresentados nas Figuras III.22 e III.23.

O ajuste destas características com o modelo proposto mostra uma boa correlação, o que possibilita sua utilização para cálculo da potência disponível no eixo acionador da bancada de testes.

### III.6. O CONTROLE DO PASSO VARIÁVEL

O sistema de controle do passo da pá de uma turbina eólica possibilita a regulação de rotação e potência para velocidades de vento superior a um dado valor  $V_R$ . No SCEE Elektro, este dispositivo opera por ação da força centrífuga sobre massas distribuídas radialmente. O deslocamento destas massas por ação centrífuga, provoca alteração no ângulo de passo (Figura III.24).

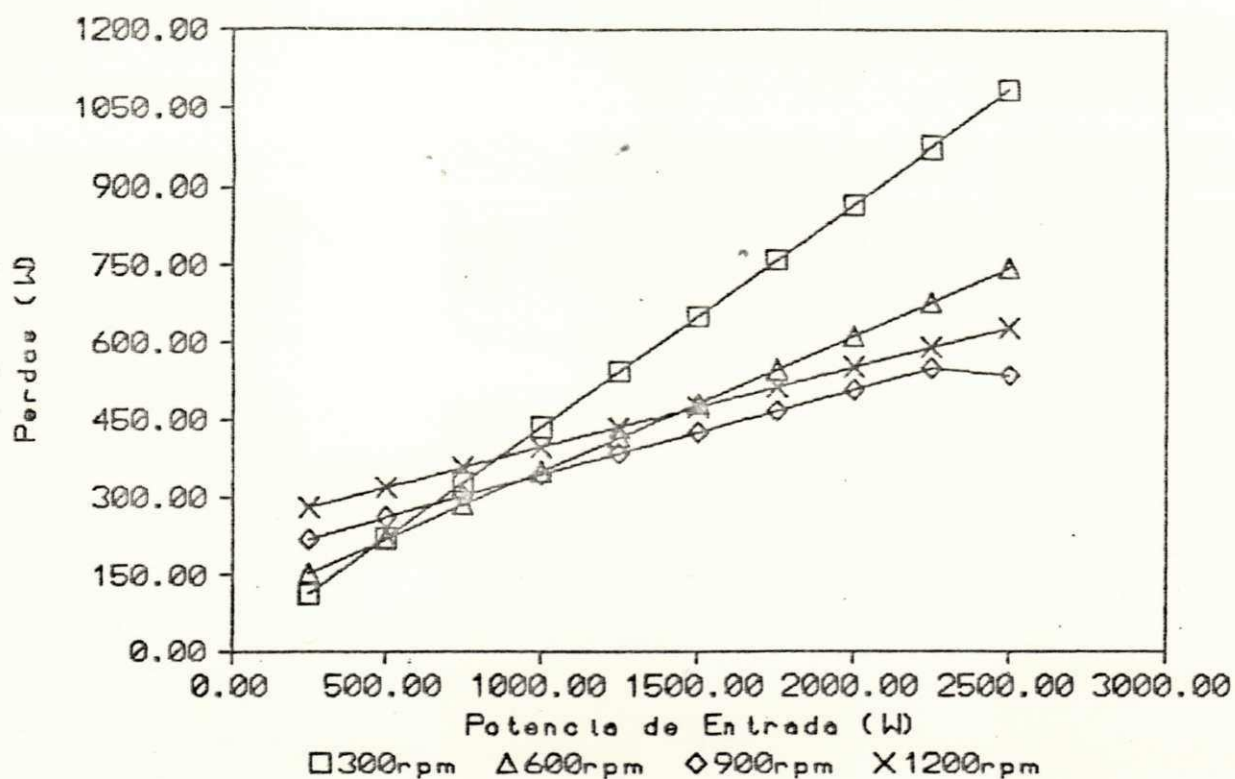


Figura III.22. Característica de Perdas na Transmissão em Função da Potência Transferida.

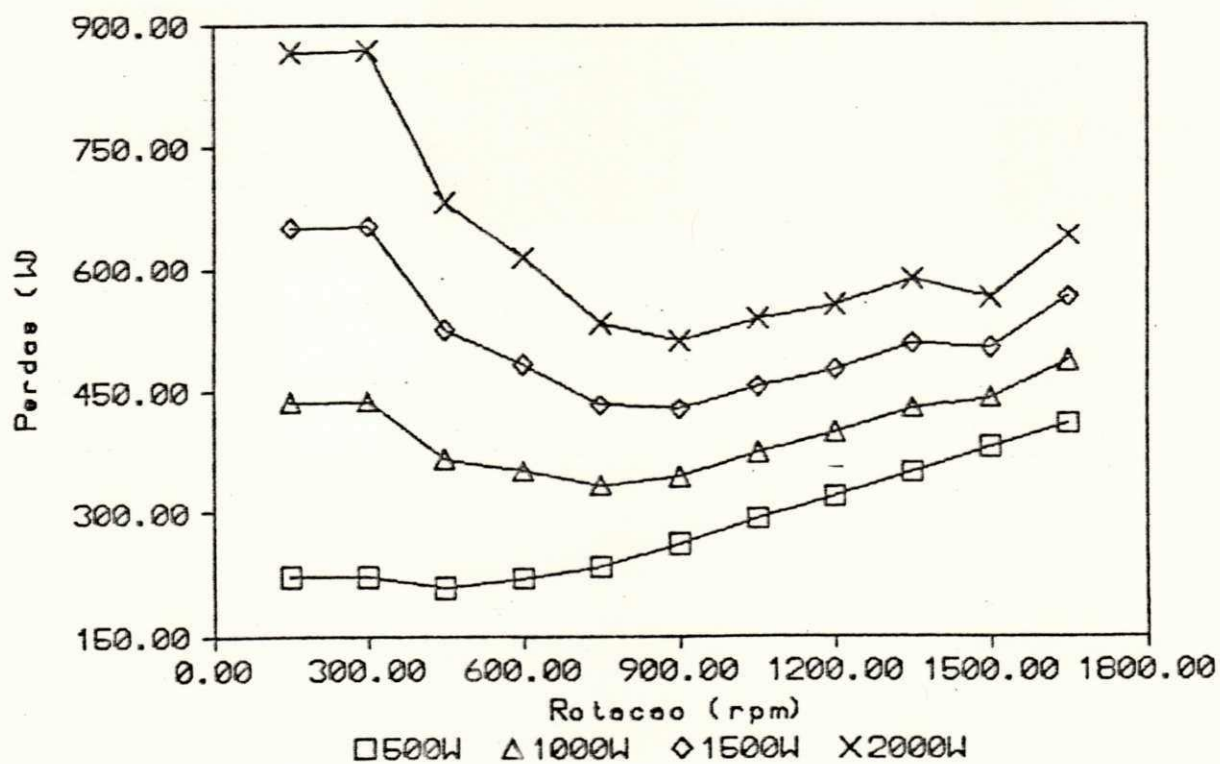


Figura III.23. Características de Perdas na Transmissão em função da rotação.

A componente de força que atua na direção do movimento das massas vale :

$$F_a = m r \omega_t^2 \cos(\text{sen}^{-1}(d/r)) = K_{\text{mola}} (x_0 + \Delta x)$$

A partir desta expressão pode-se determinar por geometria a relação estática entre rotação e ângulo de passo:

$$\Delta\beta = 2 \text{sen}^{-1}\left(\frac{\Delta x}{2b}\right)$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta$$

onde  $\Delta x$  é o deslocamento do cilindro atuador

$x_0$  corresponde à pressão inicial para ajuste da velocidade de regulagem

$\beta_0$  é o ângulo inicial de passo

$d$  e  $b$  são distâncias geométricas no mecanismo

Os parâmetros básicos deste dispositivo valem :

$K_{\text{mola}}$  = constante da mola = 22442 N/m

$m$  = massa do cilindro acionador (kg) = 1,708

$r$  = distância ao centro de gravidade do cilindro =  
0.46m

$d$  = 0.041m

$b$  = 0.062m

O sistema encontra-se originalmente com  $\beta_0 = 15^\circ$  e uma compressão inicial na mola,  $x_0 = 7\text{mm}$ , o que equivale a uma rotação de regulagem igual a  $\omega_R = 135 \text{ rpm}$ . A Figura III.25 ilustra a relação entre o ângulo de passo  $\beta$  e a rotação da turbina.





exigir uma representação mais apurada do processo eletroquímico. Para cargas/descargas mais rápidas a capacidade da bateria diminui, enquanto para processos mais lentos a capacidade aumenta.

A capacidade de carga de baterias de acumuladores pode ser avaliada pela tensão interna que oscila entre os limites de 1,85 V/célula a 2,4 V/célula. A representação analítica destes fenômenos torna-se bastante complexa para justificar sua aplicação. Um modelo simples pode ser utilizado, através de uma fonte de tensão e resistência interna, (Figura III.26). A tensão interna é variada, dentro dos valores limites de operação, de modo que a bateria fica representada por uma região de funcionamento, e não por uma característica definida. A resistência interna pode ser avaliada empiricamente pela relação resistência/massa que segundo Cunty(1982) vale 0.08Ω/Kg/célula. A determinação experimental da resistência interna torna-se um processo bastante complexo, em vista da variação de resistividade em função da concentração do eletrólito .

Para a bateria de acumuladores do sistema Elektro, temos :

$$E_{\text{batmin}} = 111,0 \text{ Volts}$$

$$E_{\text{batmáx}} = 144,0 \text{ Volts}$$

$$r_{\text{bat}} = 0,414 \Omega$$

### III.8. OS CONVERSORES ESTÁTICOS

A função dos conversores estáticos de um SCEE é pro-



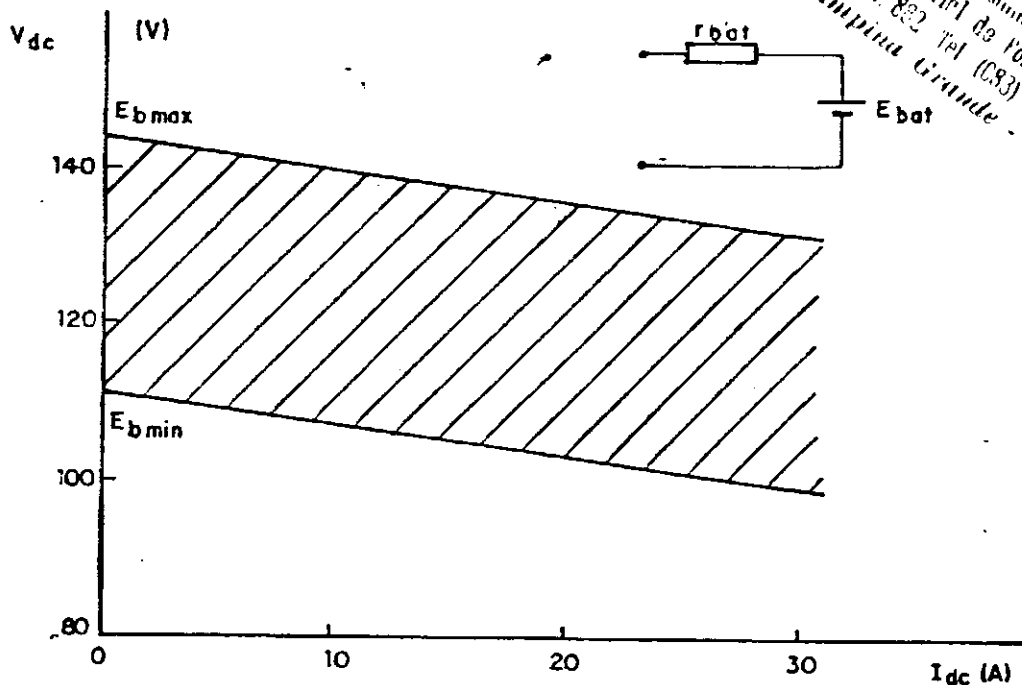


Figura III.26. Característica  $V(I)$  da Bateria de Acumuladores e Circuito Equivalente.

porcionar versatilidade ao suprimento de eletricidade às cargas e controle da energia gerada. A operação de conversores estáticos, além de se constituir em mais um elo de perdas energéticas, acrescentam harmônicos às formas de onda de tensão e corrente da máquina elétrica, reduzindo sua própria eficiência.

A modelagem de conversores estáticos, como de qualquer componente de um sistema, depende das características do estudo em questão. Os transitórios de chaveamento dos dispositivos estáticos ocorrem em constantes de tempo muito rápidas em relação à dinâmica do rotor eólico, podendo portanto serem desprezados. Quanto à sua representação em regime permanente, o fenômeno de operação com corrente descontínua é desprezado, em vista dos valores das indutâncias próprias das máquinas elétricas envolvi-

das.

Para estudos de acoplamento de características, o inversor estático é considerado ideal, sendo a este associado uma parcela de perdas de potência dependente das condições de carga. Para o retificador, as quedas de tensão na comutação são representadas em vista da presença das indutâncias da máquina.

O efeito do fenômeno de comutação em retificadores estáticos conectados aos terminais de um alternador é significativo e pode ser expresso por :

$$AV_{DC} = \frac{3 \cdot \omega_g \cdot L_c}{\pi} I_{DC}$$

onde  $L_c$  é a indutância de comutação

O valor da indutância de comutação pode ser considerado igual à indutância transitória de eixo direto do alternador (Bonwick, 1980).

Através de testes operativos procedidos no inversor do sistema Elektro (NERG, 1985), foi possível avaliar perdas superiores a 10% em ampla faixa de potência, o que representa um rendimento bastante baixo para conversores estáticos deste porte, pois a percentagem de perdas em inversores encontra-se, normalmente entre 3% e 5% para carga nominal. Foram medidas as resistências em série das bobinas de comutação, que associadas às resistências do transformador e circuito de filtragem, equivalem a 0,5Ω, referida ao lado C.C.. As perdas com carga nominal foram estimadas em 300W, o que pode ser representado por perdas em

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

resistência em série de  $0,5 \Omega$  e em paralelo de  $144 \Omega$ .

Para os retificadores do sistema Elektro, a indutância de comutação vale  $3,79 \text{ mH}$  e as perdas consideradas são relativas às quedas de tensão anodo-catodo dos elementos diodos e tiristores presentes.

### III.9. MOTORES DE INDUÇÃO

#### III.9.1 Modelização

O desenvolvimento e análise de modelos matemáticos, para a representação da máquina de indução, tem sido apresentado em vários trabalhos técnicos (Silva, 1984) e tem sido propostas contínuas inovações (Mahmoud e Menzies, 1986). Baseando-se nas premissas clássicas, algumas simplificações podem ser definidas, tais como :

- Os enrolamentos de estator e rotor são equilibrados;
- O rotor é liso e as indutâncias próprias são independentes da posição angular do rotor;
- O coeficiente de mútua indutância, entre quaisquer pares de bobinas de estator e rotor, é função cossenoidal do ângulo elétrico entre seus eixos magnéticos;
- Os efeitos de saturação magnética são desprezados;
- O efeito pelicular nas barras ou condutores rotóricos é considerado insignificante.

Em vista destas afirmativas, a máquina de indução pode

ser representada por seu circuito equivalente clássico (Figura III.27) e seus parâmetros elétricos podem ser determinados pelos ensaios a vazio, com rotor bloqueado e por medida direta de resistências elétricas.

A representação das perdas energéticas na máquina, essencial para avaliação do desempenho global do sistema, enfrenta a dificuldade de expressar matematicamente cada parcela significativa de perdas. As partições de perdas típicas para motores de indução (Levi, 1984; Kostenko e Piotrovski, 1975) propostas na literatura, apresentam uma contribuição insignificante para as perdas adicionais (menores de 6% da perda total). As expressões utilizadas para representar as perdas mecânicas e no ferro são :

$$P_{Fe.m} = \frac{E_m^2}{f} (a_1 + a_2 \cdot f)$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321 7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

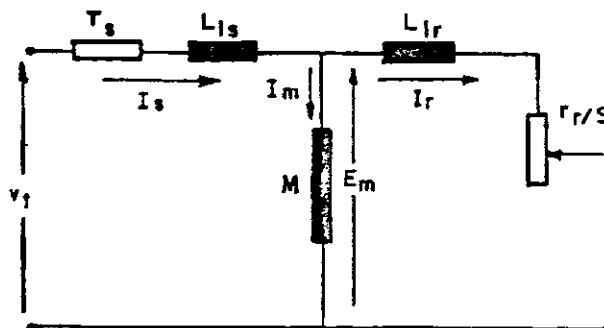


Figura III.27. Circuito Equivalente Clássico do Motor de Indução.

$$P_{\text{mec.m}} = K_m \cdot w_m^q$$

onde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $K_m$  e  $q$  são coeficientes a se determinar.

### III.9.2 Ensaio e Redução de Dados

A determinação de parâmetros elétricos da máquina de indução é normalmente procedida por ensaios a vazio, a rotor bloqueado e pela medição da resistência ôhmica de estator. Os parâmetros mecânicos e as perdas são obtidas por método de segregação e ensaios de desaceleração. Pequenas alterações na metodologia usual destes ensaios pode ser feita a fim de facilitar a segregação de perdas e aumentar a precisão dos resultados. Estas alterações serão descritas a seguir no conteúdo de cada ensaio e sua respectiva redução de dados.

A medição das resistências elétricas de estator é feita em duas etapas: medidas a frio e a quente. As medidas a frio são feitas antes ou depois do ensaio a vazio, em vista das correntes circulantes nestes ensaios não provocarem aquecimento significativo. As medidas a quente são efetuadas após o ensaio com rotor bloqueado, a fim de garantir o aquecimento nominal das bobinas. O efeito pelicular nos condutores de estator é corrigido normalmente por fatores da ordem de 1,1 (Jones, 1965), isto é, um acréscimo de 10% na resistência.

O ensaio a vazio dos motores de indução é efetuado normalmente na condição de tensão e frequência nominais. A fim de facilitar a segregação das perdas mecânicas e no ferro, o ensaio

é procedido em vários níveis de tensão e frequência. Neste trabalho foi utilizada uma escala de tensão entre 120% e 20% da tensão nominal e dois valores de frequência, 60Hz e 50Hz. Com a variação da potência elétrica fornecida ao motor, em função da tensão aplicada, pode-se obter separadamente as perdas mecânicas e perdas no ferro (Silva, 1984). Utilizando o algoritmo de mínimos quadrados, para promover o ajuste das expressões matemáticas do modelo de perdas, pode-se isolar as perdas mecânicas utilizando-se as seguintes expressões, para frequência constante :

$$P_{\text{vazio}} = P_{\text{rot}} + 3 \cdot r_s \cdot I_s^2$$

$$\begin{aligned} P_{\text{rot}} &= P_{\text{Fe.m}} + P_{\text{mec.m}} \\ &= k_1 \cdot E_m^2 + k_2 \end{aligned}$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são determinados por redução de dados.

Os valores de  $k_1$  e  $k_2$  obtidos para os dados em ambas as frequências auxiliam a segregação dos efeitos de histerese e corrente de Foucault e os efeitos de variação da potência mecânica com a rotação. A Tabela III.5 apresenta os parâmetros obtidos para estes testes, nos três motores de indução do SCEE em análise.

O ensaio de desaceleração consiste em desligar o motor após a conclusão do ensaio a vazio e proceder à verificação do tempo necessário à frenagem completa da máquina.

Efetando este ensaio para as rotações referentes às duas frequências de alimentação propostas e, considerando as per-

TABELA III.5 Parâmetros Obtidos para os Motores de  
Indução

Características	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Perdas Mecânicas $P_{mec} = k_m \cdot N_m^q$ $N_m$ (rpm)	$k_m = 3.6196 \cdot 10^{-6}$ $q = 2.0$	$k_m = 1.8955 \cdot 10^{-6}$ $q = 2.0$	$k_m = 3.0588 \cdot 10^{-6}$ $q = 2.0$
Perdas no ferro $P_{Fe} = \frac{E_m^2}{f} (a_1 + a_2 \cdot f)$	$a_1 = 2.12046$ $a_2 = 0.0008185$	$a_1 = 0.6051$ $a_2 = 0.0288681$	$a_1 = 2.85453$ $a_2 = -0.015851$

das mecânicas, a constante de inércia pode ser obtida por :

$$J_m = \frac{P_{mec}(\bar{w}_m)}{w_m \cdot \Delta w_m / \Delta t}$$

onde  $\bar{w}_m$  é a velocidade média entre  $w_{m1}$  e  $w_{m2}$

$$\Delta w_m = w_{m1} - w_{m2}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

$t_1$  = tempo de desaceleração para  $w_{m1}$

$t_2$  = tempo de desaceleração para  $w_{m2}$

$P_{mec}(\bar{w}_m)$  = perdas mecânicas para  $\bar{w}_m$

Se  $\Delta w_m$  é relativamente pequeno em relação à  $\bar{w}_m$ , a precisão do método fica garantida. Neste caso, trabalha-se com  $\Delta w_m / \bar{w}_m = 18\%$ , que fornece uma constante de inércia, para os três motores, aproximadamente igual.

O ensaio com o rotor bloqueado fornece informações sobre as indutâncias de dispersão e resistência rotórica. O



13.05

ensaio é efetuado em baixa frequência, a fim de simular as condições nominais do enrolamento rotórico. É sugerido (Silva, 1984) que, para motores cuja frequência nominal seja 60Hz, o ensaio seja procedido em 15 Hz e que, a partição das indutâncias de dispersão de estator e rotor corresponda a 40% e 60% , respectivamente.

Os parâmetros elétricos e mecânicos obtidos utilizando-se estes procedimentos são apresentados na Tabela III.6.

TABELA III.6 Parâmetros Elétricos e Mecânicos dos Motores de Indução

Parâmetros	Motor 1	Motor 2	Motor 3
$r_s(\Omega)$	0,53	0,53	0,53
$r_r(\Omega)$	0,775	0,768	0,729
$L_{1s}(mH)$	0,674	1,50	0,674
$L_{1r}(mH)$	1,013	2,255	1,013
$M(mH)$	42,86	47,34	48,19
$J_m(Nms^2)$	$1,6713 \cdot 10^{-3}$	$1,5436 \cdot 10^3$	$1,799 \cdot 10^{-3}$

### III.10. BOMBAS CENTRÍFUGAS E APARATOS HIDRÁULICOS

#### III.10.1. Modelização

As bombas centrífugas e os componentes da instalação hidráulica necessitam criteriosa representação, pois correspondem



às cargas efetivas do sistema eólico de bombeamento. Da modelização fiel de suas características depende a precisa simulação do desempenho do sistema e a avaliação da eficiência global.

A bomba centrífuga é representada normalmente pelas curvas  $H_{man}(Q)$  (altura manométrica versus vazão) e  $\eta(Q)$  (eficiência versus vazão). Estas características são obtidas por ensaios laboratoriais e delas depende a perfeita seleção do aparato hidráulico adequado ao projeto.

A representação dos fenômenos físicos que ocorrem em uma bomba operando a velocidade variável constitui um problema de maior complexidade. O desenvolvimento analítico não possibilita confiabilidade compatível com a experimentação. A teoria monodimensional baseia-se nas seguintes hipóteses (Carvalho, 1984):

- A bomba é considerada ter um número infinito de palhetas;
- As palhetas são infinitamente delgadas.

Estas hipóteses são idealizantes e desprezam as perdas por atrito nas paredes molhadas, as perdas por choques entre os flúidos e as palhetas e, as perdas decorrentes do número finito de palhetas, relativas à variação de velocidade e pressão entre pontos localizados entre as palhetas. Pfeiderer e Petermann (1979) fornecem uma expressão relacionando altura manométrica, vazão e rotação, que possibilita um melhor representação destes efeitos. Nesta expressão tem-se :

$$H_{man} = a_1 \cdot \omega_b^2 + a_2 \cdot \omega_b \cdot Q - a_3 \cdot Q^2$$

onde os primeiros dois termos são previstos pela teoria monodimensional e o terceiro termo possibilita a representação das perdas por atrito e choque.

A variação de rotação de uma bomba altera significativamente sua característica operativa. A cada ponto  $(H_1, Q_1)$  da curva de uma bomba em uma rotação  $w_{b1}$ , corresponde, em semelhança mecânica, ao ponto  $(H_2, Q_2)$  na rotação  $w_{b2}$ , tal que :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{w_{b1}}{w_{b2}} \qquad \frac{H_1}{H_2} = \frac{w_{b1}^2}{w_{b2}^2}$$

Estas expressões, entretanto, são somente válidas para pontos de mesmo rendimento. Se forem conectados os pontos de mesma eficiência para várias rotações, obtém-se as chamadas parábolas de isoficiência (Carvalho, 1984), em que tem-se :

$$\frac{Q_1^2}{H_1} = \frac{Q_2^2}{H_2}$$

Na prática, contudo, as curvas de isoficiência se distorcem do comportamento parabólico, pelo efeito da variação do número de Reynolds e a variação das perdas mecânicas com a rotação. A operação à velocidade variável representa um funcionamento a escoamentos diversos. A eficiência da bomba se reduz em baixas velocidades em quantidade maior que em altas rotações (Pfeiderer e Petermann, 1979). As expressões utilizadas para cálculo e correção das perdas internas e mecânicas da bomba valem :

$$P_{in}|_{w_b=w_{b1}} = P_{in}|_{w_b=w_{b2}} \cdot (w_{b1}/w_{b2})^{0.71}$$

$$P_{mec}|_{w_b=w_{b1}} = P_{mec}|_{w_b=w_{b2}} \cdot (w_{b1}/w_{b2})^q$$

A modelização da característica  $\eta(Q)$  foi procedida pela expressão :

$$\eta_n = a_1 \cdot Q_n - a_2 \cdot Q_n^2$$

onde  $\eta_n$  é a eficiência para rotação nominal

$Q_n$  é a vazão equivalente para rotação nominal.

Para cada rotação, o rendimento é obtido pelo cálculo da vazão equivalente na rotação nominal e pela correção das parcelas de perdas internas e mecânicas. A partição de perdas da bomba constitui um procedimento baseado unicamente na experimentação.

As perdas de carga na tubulação e acessórios hidráulicos são expressas por :

$$\Delta H_p = K_p \cdot Q^2$$

### III.10.2. Ensaio e Redução de Dados

O levantamento das características básicas de uma bomba centrífuga é implementado por bancadas de ensaios que consistem basicamente de um circuito hidráulico fechado e de uma fonte de acionamento em velocidade variável. Para a determinação dos parâmetros e características das bombas em estudo, foi

construída uma bancada de ensaio: (Figura III.28.a) que, além dos componentes básicos, apresenta :

- um registro de gaveta para regulagem da vazão (R);
- um hidrômetro de 3000l de capacidade (H);
- um manômetro (M);
- um aparelho estroboscópio para medição da rotação (E);
- instrumentos para medições elétricas.

O acionamento das bombas é feito pelo próprio motor de indução a que está conectado, sendo este alimentado por alternador síncrono. O alternador é acionado por motor de corrente contínua a velocidade variável, Figura III.28.b. Com isto foi possível avaliar a potência cedida às bombas, de maneira indireta, por medição da potência consumida pelo motor e dedução de suas perdas. A operação em velocidade variável é obtida por variação da frequência gerada pelo alternador.

A leitura do manômetro fornece diretamente a pressão na saída da bomba, enquanto as medidas de vazão foram obtidas pela leitura do volume de água bombeada durante o período de 1 minuto.

Com os motores de indução testados isoladamente, é possível por dedução de suas perdas energéticas avaliar a potência no eixo da bomba. As perdas mecânicas são obtidas para os instantes de vazão nula (registro completamente fechado).

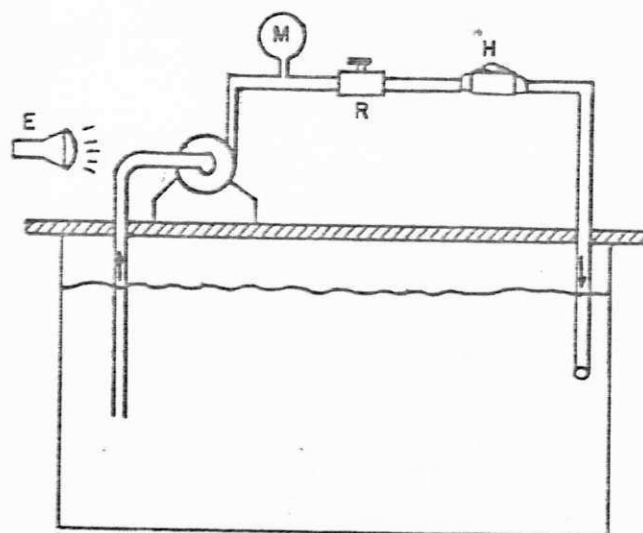


Figura III.28.a. Bancada de Testes dos Aparatos Hidráulicos.

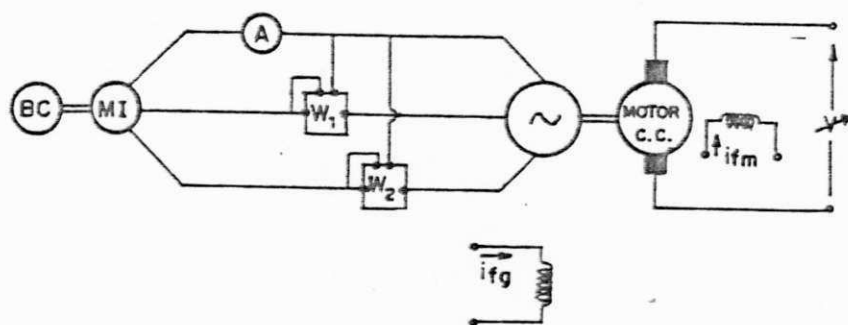


Figura III.28.b. Esquema Elétrico dos Ensaio das Bombas Centrífugas.

Os ensaios foram procedidos em quatro rotações (2000, 2500, 3000 e 3500 rpm) e, nos diversos valores de altura manométrica que ocorreram entre as condições de registro fechado e aberto. Devido ao elevado valor de perdas de carga nos hidrômetros, para vazões superiores a 3000 l/h ( $\Delta H_p > 10m$ ), não é possível obter os diversos pontos da curva  $H(Q)$ , ficando-se limitado às vazões máximas desta ordem.

É possível, nestes ensaios, testar a característica de perdas de carga dos hidrômetros.

A redução de dados, procedida por ajuste dos coeficientes dos modelos através de algoritmos dos mínimos quadrados, fornece os seguintes dados apresentados na Tabela III.7:

TABELA III.7 Parâmetros das Bombas e Aparatos  
Hidráulicos

Modelo	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3
$H = a_1.Q^2 + a_2.Q.N + a_3.N^2$ $Q(m^3/h)$ , $N(rpm)$ $H(m)$	$a_1 = 0.0404733$ $a_2 = -.366708.10^{-3}$ $a_3 = .14849.10^{-5}$	$a_1 = 0.107095$ $a_2 = -.64474.10^{-3}$ $a_3 = .17225.10^{-5}$	$a_1 = 0.04148277$ $a_2 = -.41942471.10^{-3}$ $a_3 = .1301572.10^{-5}$
$\eta = a_1.Q^2 + a_2.Q$ $\eta(\%)$ , $Q(m^3/h)$	$a_1 = -2.99305$ $a_2 = 21.17356$	$a_1 = -2.616697$ $a_2 = 16.586404$	$a_1 = -2.9460311$ $a_2 = 18.421882$
$P_{mec} = k.w_b^q$ $w_b(rad/s)$	$k = 8.95.10^{-4}$ $q = 2.00$	$k = 1,200.10^{-3}$ $q = 2.00$	$k = 8.1851.10^{-4}$ $q = 2.00$

A avaliação das parcelas de perdas indica uma partição, para as três bombas, equivalente a :



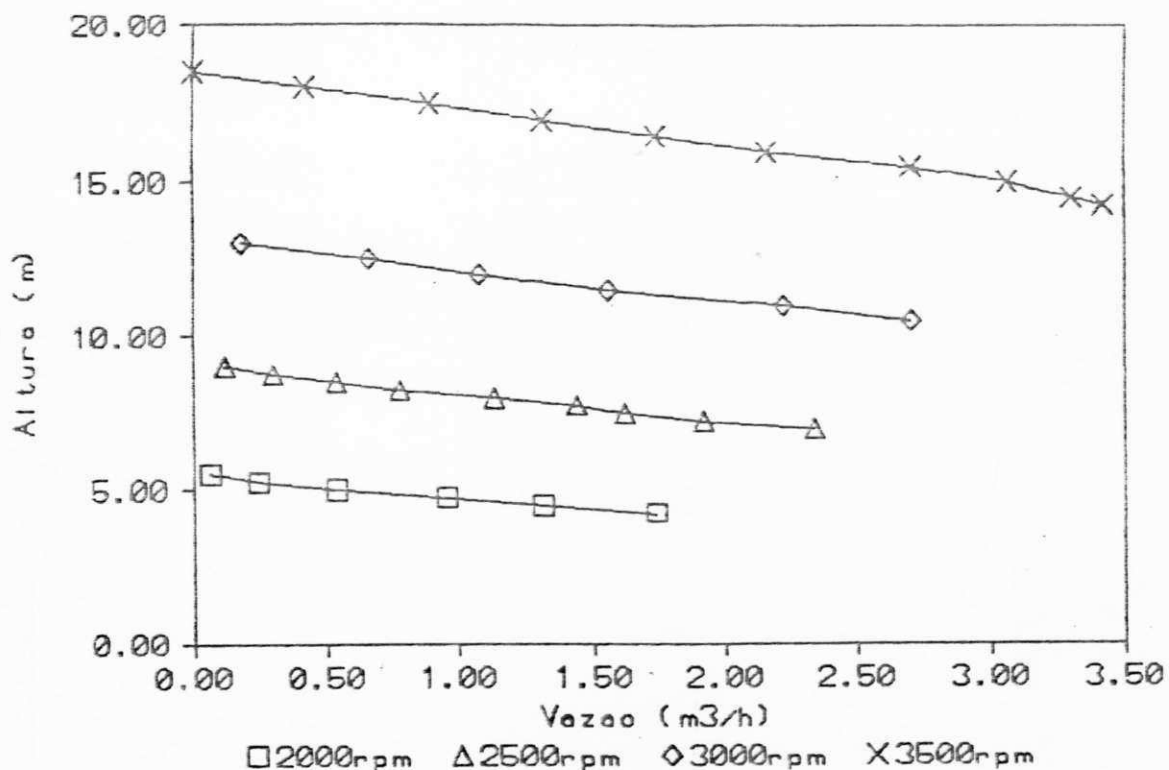


Figura III.29. Características  $H(Q)$  da Bomba 1 em Várias Rotações.

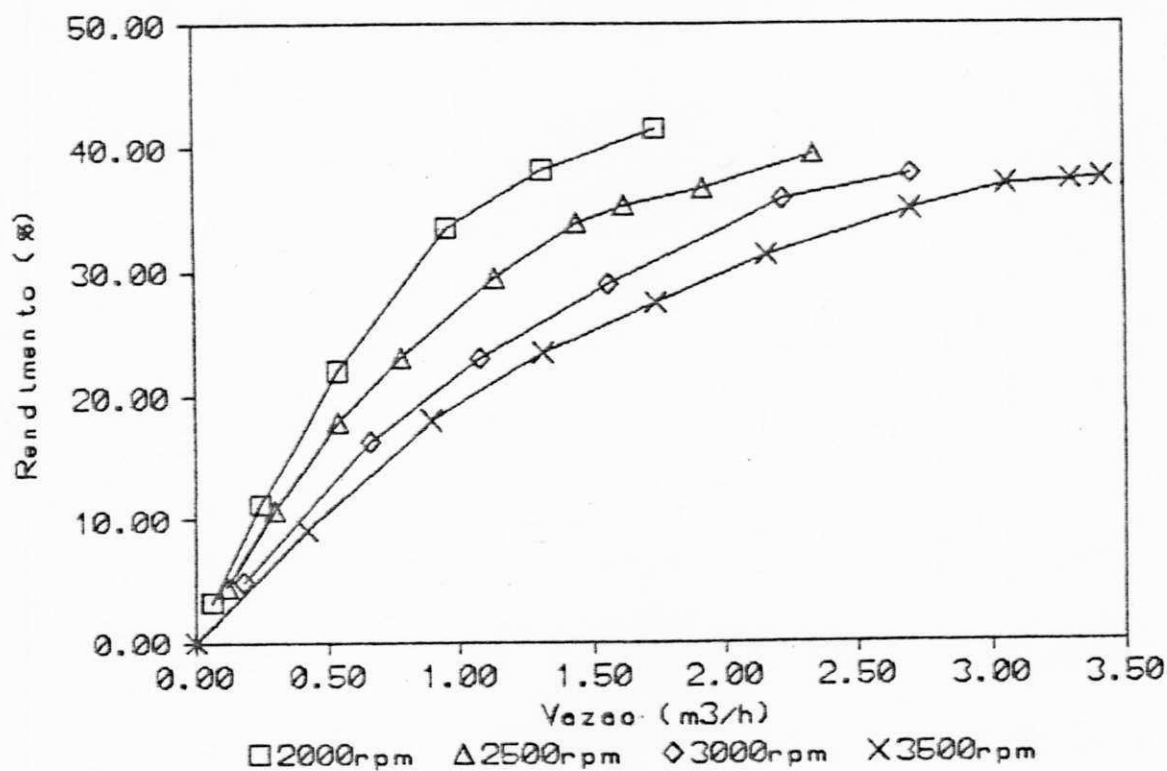


Figura III.30. Características  $\eta(Q)$  da Bomba 2 em Várias Rotações.

$$\frac{P_{int}}{P_{totais}} = 10\%$$

$$\frac{P_{mec}}{P_{totais}} = 90\%$$

As características obtidas pelos modelos e determinadas experimentalmente são confrontadas nas Figuras III.29 e III.30, onde pode-se observar uma boa precisão da modelização empregada.

### III.11. CONCLUSÃO

A metodologia de modelagem, ensaios e redução de dados é apresentada e discutida para os diversos componentes do SCEE, para fornecimento de eletricidade e para bombeamento d'água.

A modelização utilizada, nestes casos, procura representar os fenômenos físicos de importância significativa à engenharia de sistemas eólicos.

Os testes apresentados comportam os ensaios clássicos, presentes na literatura técnica e outros ensaios propostos. Para obtenção dos resultados descritos são necessários a construção de vários ambientes laboratoriais:

- Bancada de ensaios de geradores, motores e transmissão mecânica;
- Bancada de ensaios de bombas centrífugas;
- Bancada para determinação de parâmetros das pás da turbina;
- Conjunto para determinação de inércia do sistema;



- Montagem para teste de aceleração livre do rotor eólico em campo aberto.

Além dos ambientes necessários para a execução dos testes, foram desenvolvidos vários programas computacionais para tratamento dos dados obtidos destes, entre eles :

- Programa para cálculo dos coeficientes de potência do rotor eólico;
- Redução de dados para aglutinação de resultados de  $C_p(\lambda)$  em várias velocidades médias de vento;
- Interpolação linear e ajuste de dados a modelos para os diversos resultados dos diferentes ensaios efetuados.

A metodologia desenvolvida será avaliada, quando os modelos desenvolvidos forem confrontados com resultados provenientes da operação real do sistema.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (033) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

## CAPÍTULO IV - ANÁLISE E OPERAÇÃO DE SCEE

Neste capítulo são discutidos os métodos de análise teórica e experimental de Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE), onde são apresentados os detalhes construtivos dos esquemas de controle empregados.

São privilegiadas as aplicações de fornecimento de eletricidade e bombeamento d' água, em seus aspectos de acoplamento estático de cargas, otimização operativa e estabilidade do acoplamento entre seus diversos componentes.

Os algoritmos de simulação são descritos detalhadamente e os procedimentos de testes em campo aberto são apresentados, em vista a qualificar a comparação dos resultados obtidos por estes dois métodos.

A análise do desempenho do SCEE como um todo é enfocada com preocupação especial, já que sua avaliação constitui objetivo primordial deste trabalho. A integração do SCEE ao sítio de instalação é verificada e, os métodos de controle deste são discutidos.

#### IV.1. ESQUEMAS DE SCEE EM ESTUDO

##### IV.1.1. Introdução

Duas aplicações distintas do aproveitamento eólico são analisadas:

- Fornecimento de eletricidade;
- Bombeamento d'água através de conexão elétrica.

Para estes dois casos foram estudados e implementados alguns esquemas de fornecimento energético, a partir do sistema eólico Elektro WVG120, existente na Central de Testes do NERG/CCT/UFPb.

Nos esquemas de fornecimento de energia elétrica propriamente dito, a conexão do alternador em modo autoexcitado é empregada como solução prática à operação e como alternativa adequada ao acoplamento de cargas. Neste sentido, são analisadas as configurações autoexcitada, sem controle e com autoexcitação controlada, segundo realimentação de velocidade de vento e rotação.

Para o bombeamento d'água é avaliado o esquema de funcionamento autoexcitado. Neste esquema é empregado o chaveamento de motores como solução operacional ao acoplamento de cargas em ampla faixa de velocidade de ventos.

##### IV.1.2. Sistemas de Fornecimento de Eletricidade

Os sistemas eólicos de fornecimento de energia elé-

trica propriamente dito pressupõem um elo de armazenamento que é procedido por acumuladores eletroquímicos ou por conexão com grandes sistemas elétricos. O sistema eólico Elektro WVG120 utiliza um nível de armazenamento constituído de baterias de acumuladores, consistindo um elo de corrente contínua de 120 V com capacidade nominal de carga de 175 Ah.

O alternador do sistema Elektro apresenta excitação mista (bobina de campo-imã permanente), projetada para proporcionar uma operação autoexcitada isenta de problemas de inicialização ('build up'). Para controle do processo de autoexcitação foi construída uma ponte retificadora semicontrolada adequada à operação em tensão e frequência variáveis.

O controle da excitação possibilita a operação à máxima eficiência da turbina, isto é, adequada a carga às características do subsistema acionado e ao sítio de instalação.

O esquema básico do fornecimento é ilustrado na Figura IV.1, onde são identificados os diversos componentes do sistema eólico em estudo.

Exceto os circuitos de autoexcitação (retificador semicontrolado), os demais componentes compõem o sistema eólico Elektro comercializado pela Winterthur.

#### IV.1.2.1. Controle da Autoexcitação

A excitação do alternador pode ser implementada por

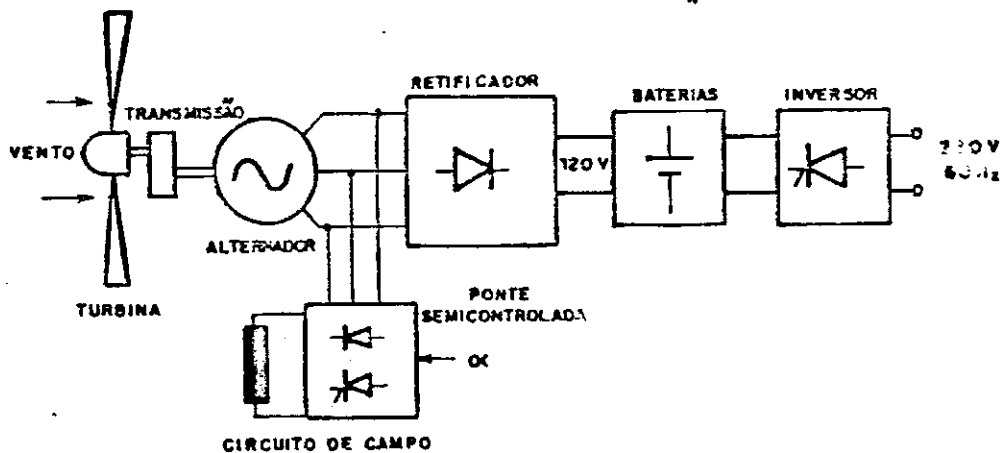


Figura IV.1. Esquema Básico do Fornecimento

retificadores controlados ou não-controlados. A retificação controlada se justifica pelo emprego de malhas de realimentação para autopilotagem do sistema. Nos casos da utilização de retificadores não-controlados, a autoexcitação do alternador pode ser ajustada pela inclusão de resistores externos no circuito de campo, adequando-o às características ótimas pretendidas para o sistema.

Do ponto de vista operacional, o emprego de resistores adicionais ou a operação a ângulo de disparo constante em uma ponte controlada, produzem efeitos similares para comportamento do sistema, afetando nestes casos apenas os aspectos de eficiência e custo.

Para representar os casos de autoexcitação ajustada e

autoexcitação controlada serão utilizados os esquemas a retificação controlada com ângulo de disparo fixo e variável, respectivamente.

Para operação a tensão e frequência variáveis é necessário que o circuito de disparo do retificador garanta um dado ângulo de gatilho constante para uma dada tensão de referência (Figura IV.2). Para que isto ocorra, tendo em vista o controle linear, as formas de onda em dente-de-serra de referência, sincronizadas com as tensões de entrada no retificador, devem ter inclinação diretamente proporcional à frequência. Isto pode ser obtido por um circuito gerador de dente-de-serra que opere adequadamente em frequência variável, isto é, garantindo sempre a mesma amplitude da onda em ampla faixa de variação da frequência. A técnica utilizada para gerar estas formas de onda emprega um circuito multiplicador de frequências com PLL ('Phase Locked Loop') e um circuito contador - conversor digital-analógico, cujo diagrama de blocos é ilustrado na Figura IV.3.

O circuito acoplador óptico promove o isolamento dos circuitos de potência e controle e, gera os pulsos sincronizados com as tensões de entrada. Um comparador e um modulador produzem um trem de pulsos defasado de dado ângulo, que é amplificado e fornecido para o gatilho dos tiristores. O circuito elétrico-eletrônico é ilustrado nas Figuras IV.4 e IV.5.

O bom funcionamento do circuito depende do ajuste adequado do circuito multiplicador de frequências, obtido através

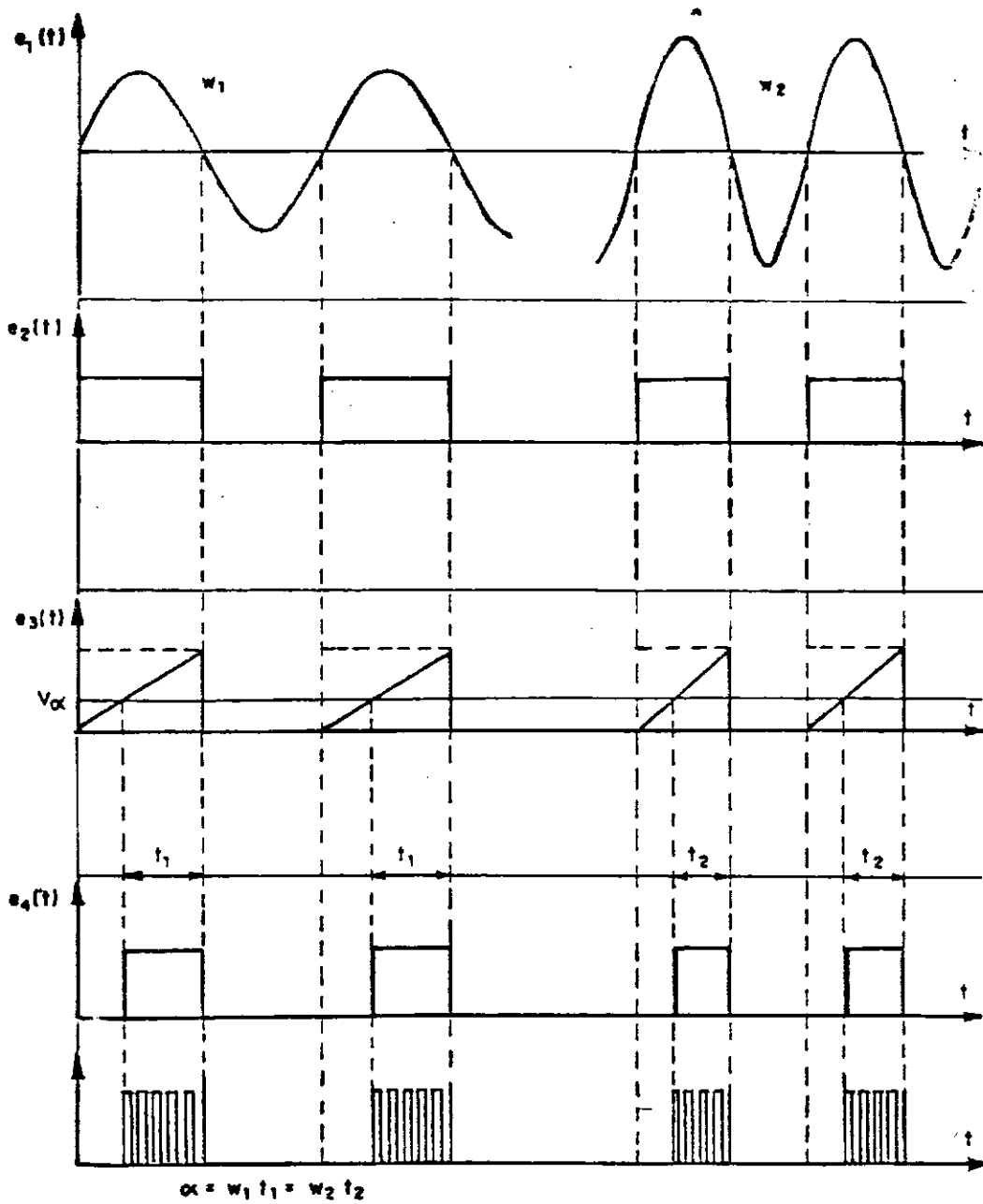


Figura IV.2. Formas de Onda do Circuito de Disparo em Duas Frequências Distintas



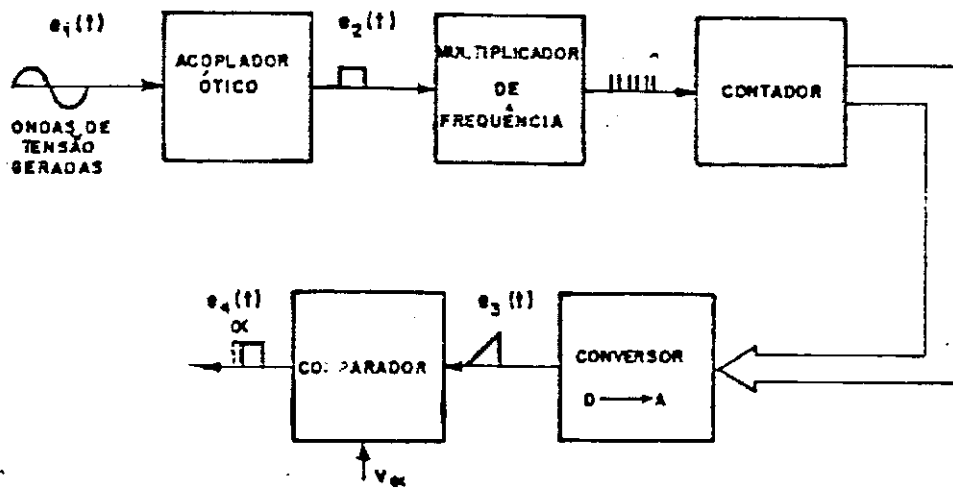
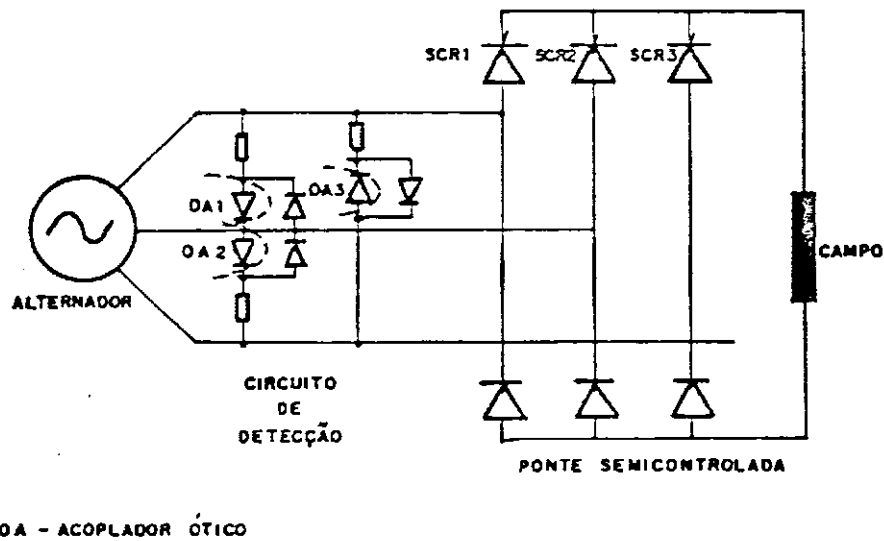


Figura IV.3. Esquema Básico do Circuito de Disparo



OA - ACOPLADOR ÓTICO

Figura IV.4. Circuito Elétrico da Ponte Semicontrolada



da escolha adequada dos componentes do oscilador do PLL e do filtro passa-baixa de realimentação. Com os parâmetros apresentados na Figura IV.5, foi obtido um bom comportamento do circuito para frequências entre 40 Hz e 80 Hz. Esta escala, que corresponde às rotações da turbina de 73 rpm e 146 rpm, é compatível com o funcionamento real do sistema eólico, para as cargas em consideração.

A operação em malha fechada foi implementada através de um controlador proporcional-integral (PI), ajustando o erro da rotação da turbina a fim de garantir o funcionamento a relação de velocidades constante. A montagem da malha de controle necessita de sinais analógicos proporcionais à velocidade de vento e à rotação da turbina. Por isto foram construídos dois circuitos eletrônicos que operam basicamente como conversores de frequência - tensão ( $V/Hz$ ) para pulsos com frequência proporcionais à rotação da turbina (Figura IV.6) e à velocidade de vento (Figura IV.7).

O circuito tacométrico utiliza a mesma técnica de geração de pulsos sincronizados com a onda de tensão do alternador, apresentada na ponte retificadora, para obtenção da frequência e, portanto, da rotação da turbina. Para isto, um circuito acoplador óptico gera os pulsos sincronizados com a rede e alimenta um conversor baseado no circuito PLL (CD4046). A relação entre a tensão da saída do conversor,  $V_w$ , e a rotação,  $N_t$ , obtida após vários testes operativos, pode ser expressa por:

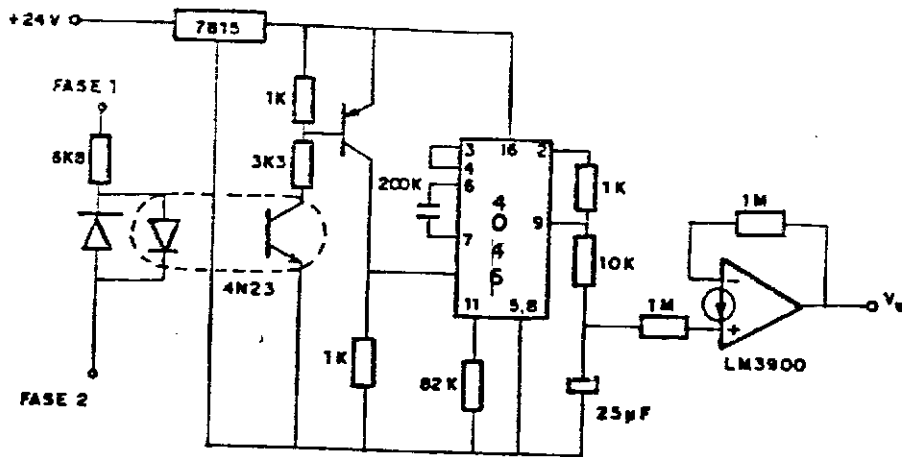


Figura IV.6. Circuito para Obtenção Analógica da Rotação da Turbina

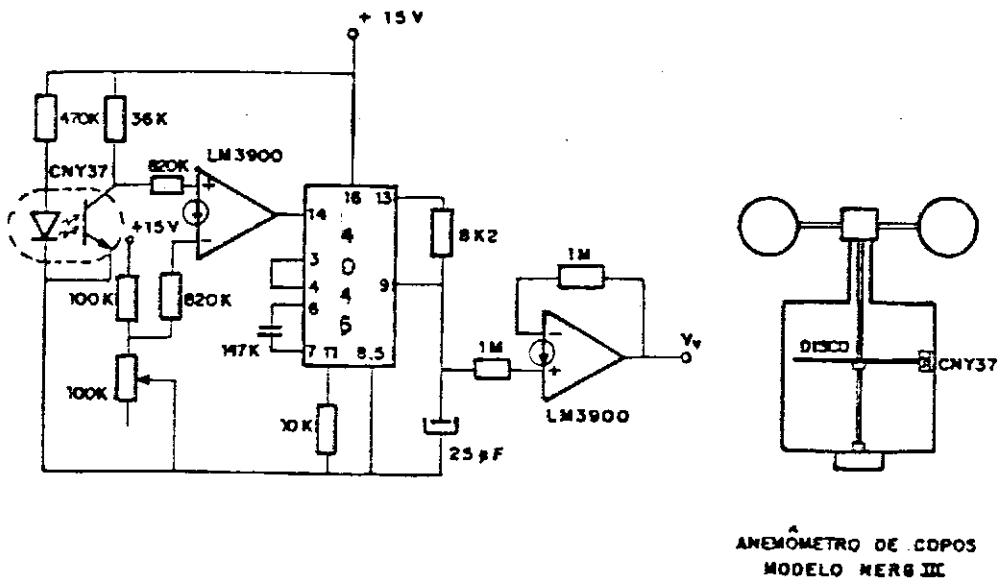


Figura IV.7. Circuito para Obtenção Analógica da Velocidade do Vento

$$V_w = 0,0714925 \cdot N_t + 0,2132$$

onde  $N_t$  é a rotação da turbina em rpm

$V_w$  é a tensão de saída do conversor V/Hz em  
Volts

A correlação linear dos resultados obtidos com este circuito é bastante satisfatória, apresentando um fator de correlação igual a 0,9996, para os dados obtidos nos ensaios.

Para a confecção do circuito anemométrico foi utilizado um anemômetro modelo NERG III, como estrutura básica, e foi alterada a parte transdutora, que anteriormente utilizava 4 pares de polos magnéticos atuando sobre um circuito operado por efeito Hall. Um disco de alumínio pintado de preto com 50 ranhuras operando em conjunto com um foto-detector foi empregado como componente de conversão. Um conversor frequência-tensão utilizando PLL, promove a adequada conversão do sinal em nível de tensão contínua, cuja relação pode ser expressa, com coeficiente de correlação igual 0,9894, por

$$V_v = 0,91331 \cdot V + 1,65723$$

onde

$V$  é a velocidade de vento em m/s

$V_v$  é a tensão de saída do conversor V/Hz em Volts.

O controlador PI utilizado na malha de realimentação de rotação é ilustrado na Figura IV.8, onde o esquema básico do

controle é apresentado.

A equação diferencial relacionando rotação da turbina com a velocidade de vento de entrada é dada por

$$J_T \frac{dw_t}{dt} = T_t(w_t, V) - T_g(w_g) \cdot K_t$$

onde  $J_T$  é a constante de inércia das partes girantes,

$T_t$  é o conjugado exercido pelo rotor eólico,

$T_g$  é o conjugado no eixo do alternador e

$K_t$  é a relação de transmissão mecânica.

Desprezando-se os transitórios eletromagnéticos no alternador, já que estes apresentam constantes de tempo pequenas comparada à dinâmica do rotor eólico, e linearizando as equações em torno de um ponto de funcionamento, obtém-se uma função de transferência de 1ª ordem em Laplace, tal como :

$$\frac{\Delta w_t(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K_{SCEE}}{1 + s \cdot \tau_{SCEE}}$$

Considerando os dados do sistema Elektro, a constante de tempo simplificada para operação com carga quadrática pode ser expressa por (Casanova e Freris, 1984):

$$\tau_{SCEE} = \frac{\lambda_0 \cdot J_T}{\frac{1}{2} \rho \pi R^4 (2 C_{q0} - C'_{q0} \lambda_0) V_0} = \frac{27,14}{V_0}$$

Para o valor da velocidade média da Central de Testes do NERG,  $V_M = 6,5 \text{ m/s}$ , a constante de tempo vale  $\tau_{SCEE} = 4,175$  segundos. Este valor representa as condições de operação com a

relação de velocidades ótima, enquanto o valor da constante de tempo do sistema em outras condições não-ótimas é normalmente maior.

A metodologia escolhida para o projeto do controlador PI é baseada em métodos simples para uma estimativa inicial e em testes experimentais para ajuste mais aprimorado. Para isto foi ajustada a constante do integrador,  $\tau_I$ , para o valor da maior constante de tempo do sistema e a constante do proporcional foi estimada em um valor tal que o ângulo de fase da função de transferência do sistema seja igual a  $-120^\circ$  quando a amplitude intercepte a origem (margem de fase de  $60^\circ$ ). Considerando o diagrama de blocos do sistema, representado na Figura IV.9, tem-se que:

$$G(s) = G_{PI}(s) \cdot G_{SCEE}(s)$$

$$G(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{s \cdot \tau_I} \right) \cdot \frac{K_{SCEE}}{1 + s \cdot \tau_{SCEE}}$$

onde

$$\tau_I = \tau_{SCEE}$$

$K_p$  é ajustado para  $|G(j\omega)| = 0$

$$\angle G(j\omega) = -120^\circ$$

Isto equivale a  $\tau_I = 4,175$  segs e  $K_p = 10$ .

Deve-se observar que um ajuste adequado do controlador tem em vista também a captação da energia contida nas rajadas de vento de curta duração. A frequência de corte do sistema autopi-

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 832 - 1-1 (083) 321-7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba



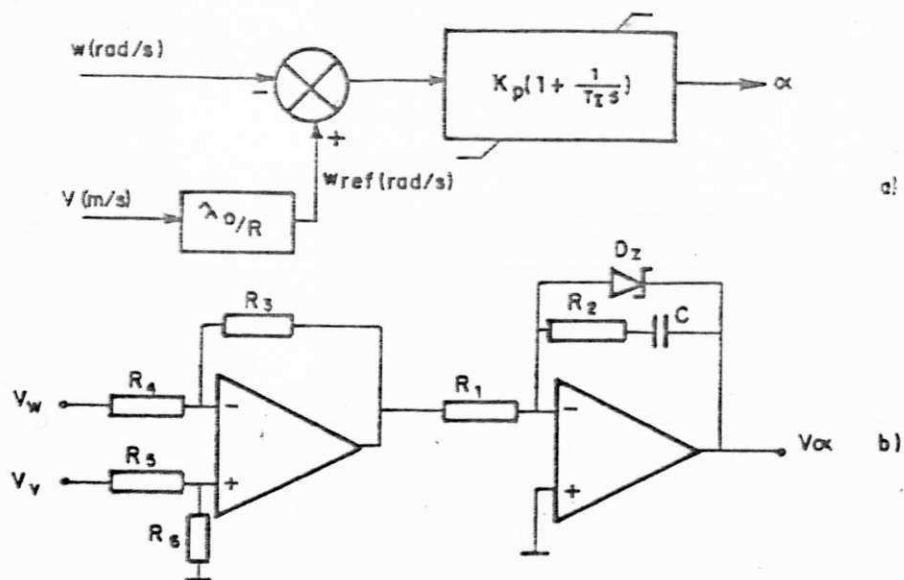


Figura IV.8. Esquemas Simbólico e Eletrônico da Malha de Realimentação

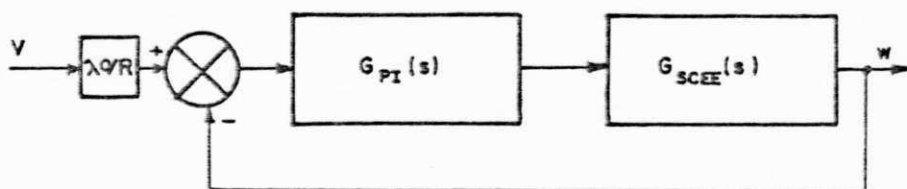


Figura IV.9. Diagrama de Blocos do Sistema com Controlador

lotado delimita as flutuações que podem ser aproveitadas como energia útil.

#### IV.1.2.2. Os Esquemas em Estudos

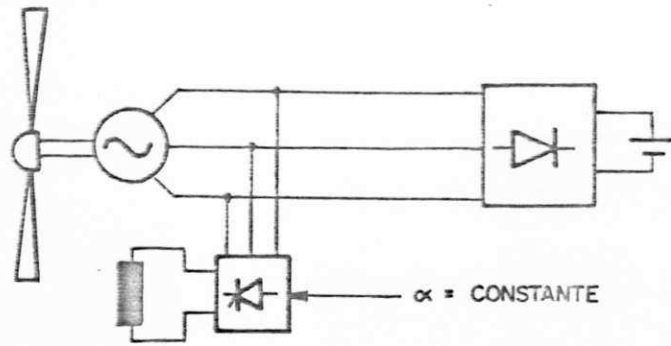
A partir das montagens apresentadas são definidos dois sistemas eólicos para fornecimento de eletricidade:

- Sistema autoexcitado, representado pela operação a ângulo de disparo constante (Figura IV.10.a);
- Sistema autopilotado, representado pelo controle da excitação através da realimentação de velocidade (Figura IV.10.b).

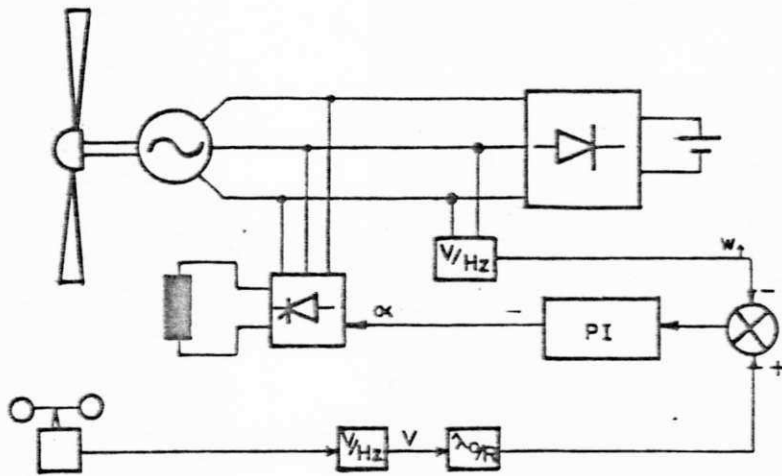
Estes dois sistemas foram postos em operação em campo aberto, por um determinado período e os resultados obtidos na medição das grandezas significativas são utilizados para comprovação de modelos teóricos desenvolvidos. A metodologia destes ensaios e da simulação destes modelos é apresentada nos próximos itens.

#### IV.1.3. Sistema Eólico de Bombeamento d' água

Os sistemas eólicos para bombeamento d'água utilizam um elo de armazenamento energético em forma de energia potencial hidráulica. A água é bombeada para um reservatório a uma determinada altura, onde é estocada para as finalidades previstas pela aplicação.



a)



b)

Figura IV.10. Esquemas em Estudo

No SCEE em estudo o bombeamento centrífugo com conexão elétrica é implementado por três conjuntos de motores de indução-bomba centrífuga acionados por comando eletrônico de contactores, a partir de sinal da rotação da turbina, como ilustrado na Figura IV.11.

A instalação hidráulica foi projetada para uma altura de elevação de 4 m, consistindo de um circuito hidráulico fechado com reservatório inferior de 1.000 l e reservatório superior de 50 l. A tubulação de sucção e recalque de cada bomba consiste de tubos de PVC de 32 mm de diâmetro e um circuito de retorno único em tubo de 4". Foram instalados em cada circuito um hidrômetro de 5 m<sup>3</sup>/h de capacidade e uma válvula de retenção. O esquema da

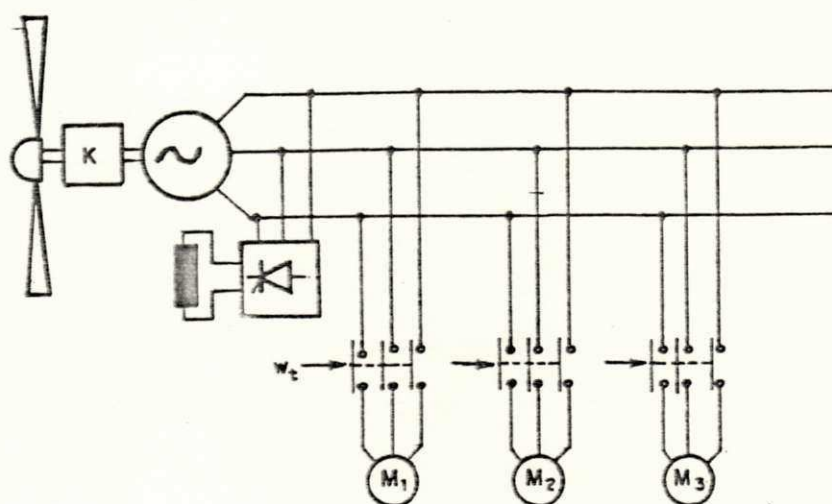


Figura IV.11. Esquema Básico do SCEE Aplicado ao Bombeamento de Água

instalação hidráulica é apresentado na Fig. IV.12, enquanto a Tabela IV.1 fornece os acessórios básicos e os dados técnicos de cada circuito.

TABELA IV.1 Dados da Instalação Hidráulica

Dados Hidráulicos	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 3
Comprimento de Tubulação(m) :			
recalque	9,96	9,95	9,92
sucção	3,51	3,22	3,08
Acessórios (No de):			
luvas	3	3	3
joelhos	12	12	10
união universal	3	3	3
conexões	4	4	4
hidrômetros (5000l/h)	1	1	1
válvula de retenção	1	1	1
ΔH perda de carga (m)	5,8622	5,8442	5,6544

A perda de carga, ΔH, para cada circuito, como indicado na Tabela IV.1, foi calculada pelo método dos comprimentos equivalentes para cada acessório (Carvalho, 1977) e considerando que um hidrômetro de  $5m^3/h$  de capacidade acumula uma perda de carga de 10 m para uma vazão igual à sua capacidade.

A estação de bombeamento encontra-se a uma distância de 100 m da torre da turbina eólica, sendo alimentada por uma linha de transmissão trifásica com cabos de  $10\text{ mm}^2$  de seção.

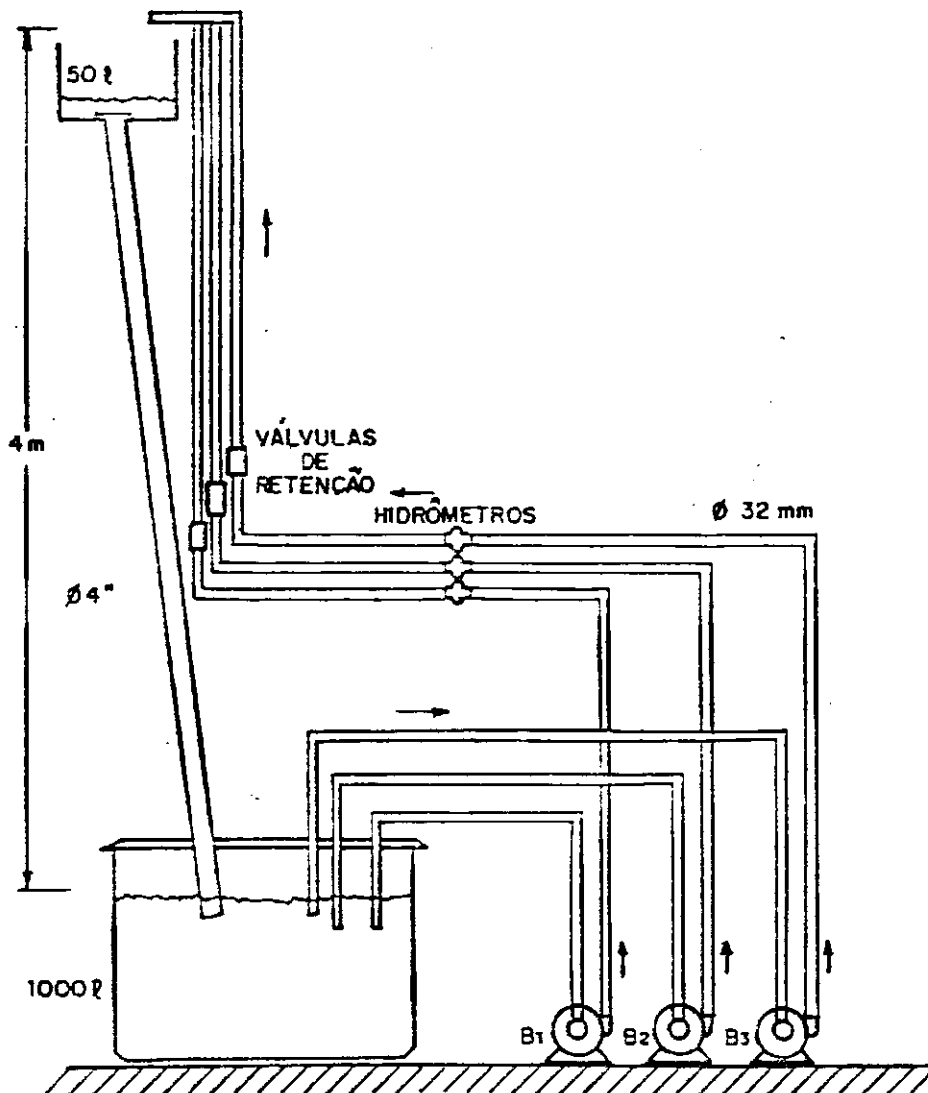


Figura IV.12. Instalação Hidráulica Construída para Testes

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321 7222-N 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

Em um quadro de comando, próximo à estação de bombeamento, estão dispostos os circuitos de chaveamento eletromecânico dos motores e o circuito eletrônico de controle (Figura IV.13). Contatores trifásicos modelo 3TB-41 da Siemens são utilizados para acionamentos dos motores. Estes contatores possuem bobinas alimentadas em 24V C.C., que são ativadas por transistores. Um circuito conversor frequência-tensão transforma pulsos sincronizados com a frequência do alternador em sinal analógico proporcional à rotação da turbina. Um comparador com histerese possibilita o ajuste das rotações de conexão de cada motor, e garante uma rotação inferior para desconexão.

Os três motores empregados são de 1CV, 3500 rpm, 110/220 V, sendo que suas velocidades de conexão e desconexão são ajustadas a partir de estudos de simulação e de experimentação.

#### IV.2. METODOLOGIA DE ANALISE

É usual na análise de sistemas físicos propor-se modelos que deverão produzir resultados compatíveis àqueles oriundos da experimentação do sistema real. Com a validação destes modelos, é possível analisar inúmeras alternativas operativas e avaliar o desempenho do sistema em diversas condições. Além disto, um profundo conhecimento dos fenômenos físicos que regem o comportamento deste sistema é resultado imediato desta metodologia. Contudo, este procedimento apresenta uma enorme diversidade de

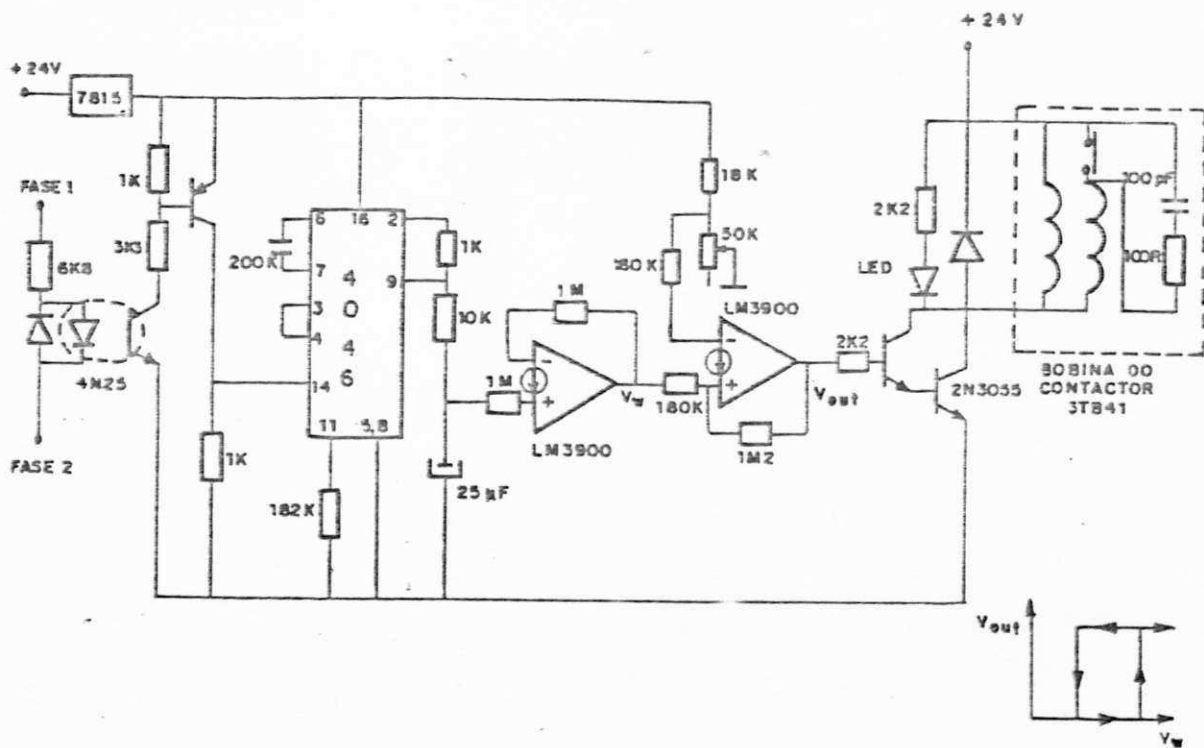


Figura IV.13. Circuito Eletrônico para Chaveamento dos Conjuntos Motor-Bomba

impecilhos à sua realização. Na definição dos modelos tem-se em conta a exequibilidade de testes para avaliação de parâmetros que o definem, isto é, laboratórios equipados com instrumental e bancadas de testes adequados. Na experimentação do sistema em condições reais de funcionamento, a avaliação de suas respostas pressupõe uma precisa captação de dados das diversas grandezas de importância significativa.

Em SCEE, que normalmente envolvem uma enorme gama de fenômenos físicos, a obtenção de parâmetros e captação de grandezas reais constituem problemas de maior complexidade. Observa-se, como exemplo a medição de grandezas elétricas (tensão, correntes



e potências) em contínua variação de frequência, características estas que os instrumentos existentes no mercado não apresentam. Além disto, o caráter aleatório do vento que conduz o sistema a uma operação em regime continuamente dinâmico torna o processo de comparação teórico-experimental mais complexo.

A metodologia empregada neste trabalho consistiu em promover medições médias em intervalos de 10 minutos e compatibilizar os dados de simulação para esta condição. Isto é, considerando-se que as variações de velocidade de vento neste período obedece uma função densidade de probabilidade gaussiana, os dados obtidos de simulação são transformados em valores médios em intervalos de 10 minutos.

Nos vários estudos a serem apresentados, as simulações foram desenvolvidas pelo acoplamento das características entre componentes, de forma a construir passo a passo a cadeia de componentes que constituem o sistema como um todo. Desta forma, para a aplicação de fornecimento de eletricidade o acoplamento entre alternador, retificador e baterias foi implementado inicialmente para dar subsídios a inclusão do efeito de autoexcitação. Logo após, o subsistema assim formado foi conectado a uma turbina a passo variável, compondo um SCEE completo. Desta forma diversos níveis de iteração são formados, aumentando a complexidade e vulnerabilidade dos algoritmos.

A complexidade dos modelos torna-se crescente, afim de atingir precisão necessária à comparação dos resultados teóricos

frente aos dados experimentais.

Os testes foram desenvolvidos em períodos de tempo definidos de forma a presenciar uma variedade de situações que fossem abrangentes em termos de corresponder a condições reais da operação contínua do sistema.

#### IV.3. SCEE PARA FORNECIMENTO DE ELETRICIDADE

##### IV.3.1. Simulação das Características

###### IV.3.1.1. Modelagem do Sistema

Neste item são desenvolvidos os modelos utilizados para representação de cada componente, identificando as lógicas de iteração do acoplamento entre estes.

Tendo em vista a operação do alternador com duas pontes retificadoras, uma não-controlada para suprir potência para as baterias e outra semicontrolada para o circuito de campo do alternador, são consideradas as seguintes hipóteses:

- A condução de corrente é sempre contínua nas duas pontes retificadoras;
- A queda de tensão por efeito da comutação é avaliada pelo cálculo de uma reatância de comutação igual à reatância transitória da máquina elétrica;
- O fator de potência da corrente de entrada na ponte não - controlada é igual a 0.96;

- ♦ A saliência síncrona é considerada tendo em vista que, na maioria dos períodos, o circuito de campo é a única carga para o alternador e opera a baixo fator de potência;
- ♦ A saturação magnética é avaliada por cálculo do coeficiente de saturação e atualização das reatâncias síncronas do alternador;
- ♦ A bateria opera sempre com carga em paralelo, devido a presença do inversor estático.

Uma ponte retificadora semicontrolada apresenta uma relação entre o valor eficaz da corrente fundamental de entrada e a corrente no elo C.C. igual a:

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} (1 + \cos \alpha)^{1/2} I_{DC}$$

$$\cos \phi = \cos \left[ \text{tg}^{-1} \left[ \frac{\text{sen } \alpha}{\cos \alpha + 1} \right] \right]$$

A relação entre as tensões do lado C.A. e C.C. valem:

$$V_{fn} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{DC} \frac{2}{1 + \cos \alpha}$$

onde  $V_{fn}$  é a tensão fase neutro em C.A.

Para a ponte não-controlada estas relações valem:

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{DC} = 0.78 I_{DC}$$

$$\cos \phi = 0.96 \text{ (considerado)}$$

$$V_{fn} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{DC}$$

A bateria é representado pelas expressões:

$$V_{DC} = E_{bat} \cdot \frac{R}{R + r_{bat}} + \frac{R \cdot r_{bat}}{r_{bat} + R} \cdot I_{DC}$$

onde R equivale à carga conectada em paralelo

$E_{bat}$  tensão na bateria

$r_{bat}$  resistência interna

O alternador é representado pelas equações do regime permanente em variáveis de Park (transformação em eixos direto e em quadratura girantes) :

$$V_{dg} = -r_g \cdot I_{dg} + \omega_g L_{qg} \cdot I_{qg}$$

$$V_{qg} = -r_g \cdot I_{qg} - \omega_g L_{dg} \cdot I_{dg} + E_g$$

$$E_g = \omega_g \cdot [g(I_m) + C_{kima}]$$

Do ponto de vista do retificador não-controlado a tensão terminal do alternador vale:

$$\begin{aligned} V_g &= \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{DC} + \frac{\omega_g \cdot L_c}{\sqrt{6}} I_{DC} \\ &= \frac{\pi}{3\sqrt{6}} E_{ebat} + \left( r_{ebat} + \frac{\omega_g \cdot L_c}{\sqrt{6}} \right) I_{DC} \end{aligned}$$

$$\text{onde } V_g = (V_{dg}^2 + V_{qg}^2)^{1/2} / \sqrt{2}$$

$$E_{\text{ebat}} = E_{\text{bat}} \cdot \frac{R}{R + r_{\text{bat}}}$$

$$r_{\text{ebat}} = \frac{r_{\text{bat}} \cdot R}{R + r_{\text{bat}}}$$

$L_c$  = indutância de comutação.

#### IV.3.1.2. Algoritmos de Simulação

A fim de calcular as correntes geradas, um método iterativo é definido baseado no cálculo do ângulo de carga ( $\delta$ ) do alternador. Para isto são definidos dois vetores de tensão. O primeiro fixando a referência na tensão terminal,  $\dot{V}_g = V_g \angle 0^\circ$ , assim tem-se:

$$\dot{E}_{q1} = \sqrt{2} \left[ \dot{V}_g + (r_g + j X_{qg}) \dot{I}_g \right]$$

$$\text{onde } \|E_{q1}\| = (E_{qr}^2 + E_{qi}^2)^{1/2}$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} [E_{qi}/E_{qr}]$$

$$E_{qi} = \sqrt{2} [X_{qg} \cos \phi - r_g \sin \phi] I_g$$

$$E_{qr} = \sqrt{2} [V_g + (r_g \cos \phi + X_{qg} \sin \phi) I_g]$$

O segundo, fixando a referência na tensão interna, isto é,  $\dot{E}_g = E_g \angle 0^\circ$ , obtém-se:

$$E_{q2} = \sqrt{2} E_g - (X_{dg} - X_{qg}) I_{dg}$$

$$I_{dg} = \sqrt{2} I_g \sin (\delta + \phi)$$

Após o cálculo destes dois valores, pode-se recalcular

a corrente estatórica por:

$$I_g = \frac{[(E_{q2} \cos \delta - V_g \sqrt{2})^2 + (E_{q2} \sin \delta)^2]^{1/2}}{\sqrt{2} [r_g^2 + X_{qg}^2]^{1/2}}$$

Por processo iterativo, até que o valor  $|E_{q1} - E_{q2}|$  seja menor que um erro estipulado, pode-se calcular a corrente gerada. O algoritmo de cálculo é ilustrado na Figura IV.14, englobando todo processo de carregamento de baterias a frequência variável, para excitação constante. Vale observar que o processo de carregamento ocorre a partir de uma velocidade rotacional do alternador, que corresponde a:

$$\omega_g > \frac{E_{bat}}{[g(I_m) + C_{kima}] 3\sqrt{6}/\pi}$$

A corrente gerada,  $I_g$ , é acrescida a corrente de excitação calculada em cada iteração, afim de considerá-la nas quedas de tensão na impedância síncrona do alternador. De maneira similar, a corrente de excitação é deduzida da corrente do ramo C.C.

Através deste algoritmo são definidos dois valores iniciais de excitação que produzem erros de sinais contrários e é calculado o novo valor de corrente de campo por interpolação linear.

Neste mesmo processo iterativo, pode-se incluir o efeito da saturação magnética, atualizando-se as indutâncias síncronas e a força eletromotriz gerada.

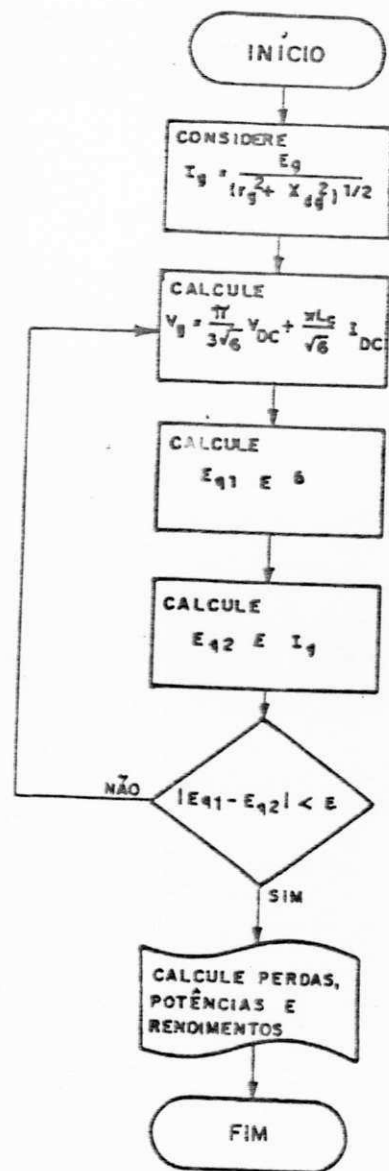


Figura IV.14. Fluxograma de Cálculo da Corrente Fornecida pelo Alternador

expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma (2\pi)^{1/2}} e^{-\frac{1}{2} (x - x_M)^2 / \sigma^2}$$

onde  $x_M$  é o valor médio e  $\sigma$  é o desvio padrão.

A probabilidade de ocorrência de um dado valor  $x = x_0$ , vale:

$$p(x = x_0) = f(x) \cdot dx$$

Se uma variável aleatória  $y$  é função de  $x$ ,  $y = g(x)$ , o valor médio desta variável pode ser obtido por:

$$y_M = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) \cdot f(x) \cdot dx$$

Em termos da distribuição da velocidade de vento num período de 10 minutos, testes efetuados mostraram que para da Central de Testes do NERG, a relação desvio padrão pelo valor médio vale  $\sigma/V_M = .285$ , valor bem próximo de  $1/3$  que foi utilizado por Goezinne (1986). Sabendo-se que o intervalo  $x_M - 3\sigma < x < x_M + 3\sigma$  contém 99,73% da área total da curva de distribuição gaussiana, pode-se calcular, com precisão, o valor médio de uma variável aleatória  $y$  pela expressão:

$$y_M = \sum_{i=1}^n (g(x_i) \cdot f(x_i) \cdot \Delta x_i)$$

onde  $i = 1, \dots, n$ .

Com isto foi possível obter a relação  $y_m = G(x_M)$  para valores  $x_M = V_M$ , entre 10 Km/h e 36 Km/h, a partir de uma



característica estática calculada entre 1 Km/h e 60 Km/h, em intervalos  $\Delta x_i = 1 \text{ Km/h}$ .

#### IV.3.2. Operação em Campo Aberto

O procedimento de ensaio dos esquemas de fornecimento de eletricidade é baseado na operação em campo aberto. Estes testes foram efetuados durante períodos ininterruptos de tempo, com o objetivo de percorrer toda a gama de variação da velocidade de vento. Neste sentido, os esquemas de SCEE foram testados em períodos de 24 hs e 12 hs. Foram obtidos diversos resultados em várias velocidades de vento, constituindo um conjunto de dados em uma dada velocidade de vento que, pela natureza dinâmica da operação, possa validar um tratamento estatístico.

Foram testados os esquemas em malhas aberta e em malha fechada com a medição das seguintes grandezas: velocidade de vento e rotação, em médias de 10 minutos, e a potência fornecida pelo gerador à carga, a corrente gerada e a corrente de campo, em valores instantâneos. Durante os testes foram verificados os níveis de tensão no ramo C.C., afim de avaliar o carregamento das baterias e definir sobre a inclusão ou retirada de cargas (lâmpadas incandescentes) na saída do inversor estático.

Os ensaios com o esquema em malha aberta foram efetuados em dois ângulos distintos de disparo ( $30^\circ$  e  $90^\circ$ ) para qualificar melhor a comparação dos resultados práticos e teóricos.

A operação em malha fechada foi efetuada para uma relação de velocidades inferior à de máximo rendimento da turbina eólica, garantiu-se, assim, um funcionamento distante da faixa de operação do mecanismo centrífugo de controle de passo e dentro de uma faixa de frequência, que o circuito de disparo opera convenientemente.

Os testes com o sistema autopilotado foram realizados a  $\lambda = 1.0$ , sendo que a relação de velocidades ótima,  $\lambda_0$ , vale 6,35.

A primeira dificuldade no processo de ensaios foi definir como as medições elétricas seriam efetuadas e por quais instrumentos. A não existência de um sistema de aquisição de dados automatizado exigiu o uso de oscilógrafos para medição de potência e corrente. Deste modo, foram utilizados um wattímetro oscilográfico trifásico da EKM para as medições de potência e outros dois wattímetros monofásicos com bobinas de tensão alimentadas por fonte C.C. para medição da corrente gerada e corrente de campo, conforme Figuras IV.16.

Pelo ajuste adequado das tensões contínuas fornecidas às bobinas de tensão dos wattímetros, foi possível regular uma escala de corrente. Tendo em vista os aspectos construtivos dos instrumentos ferrodinâmicos utilizados, pode-se concluir que apesar da robustez e elevado conjugado de deflexão, estes apresentam baixa precisão, erro considerável com as variações de frequência e dependência da escala com a forma de onda da quanti-

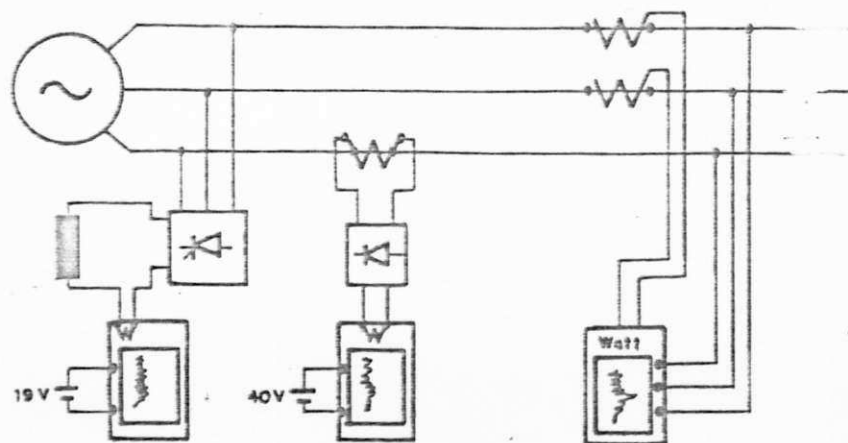


Figura IV.16. Esquemas das Medições Elétricas

dade medida. Em vista à operação em frequência variável, não foi possível avaliar a precisão global das medidas em todas as condições dos ensaios, contudo, alguns testes efetuados apresentaram bons resultados, apesar da perda sensível de precisão em baixas frequências.

A medição de velocidade de vento e rotação foi realizada por equipamento de aquisição de dados já existente no NERG, onde foram efetuadas alterações para obter-se a rotação. Neste caso, utilizou-se circuito similar àquele desenvolvido no circuito de disparo do retificador, para detecção da frequência gerada pelo alternador, com um divisor de frequências e contador ajustado para fornecer valores médios de rotação em Hz, a cada 10 minutos.

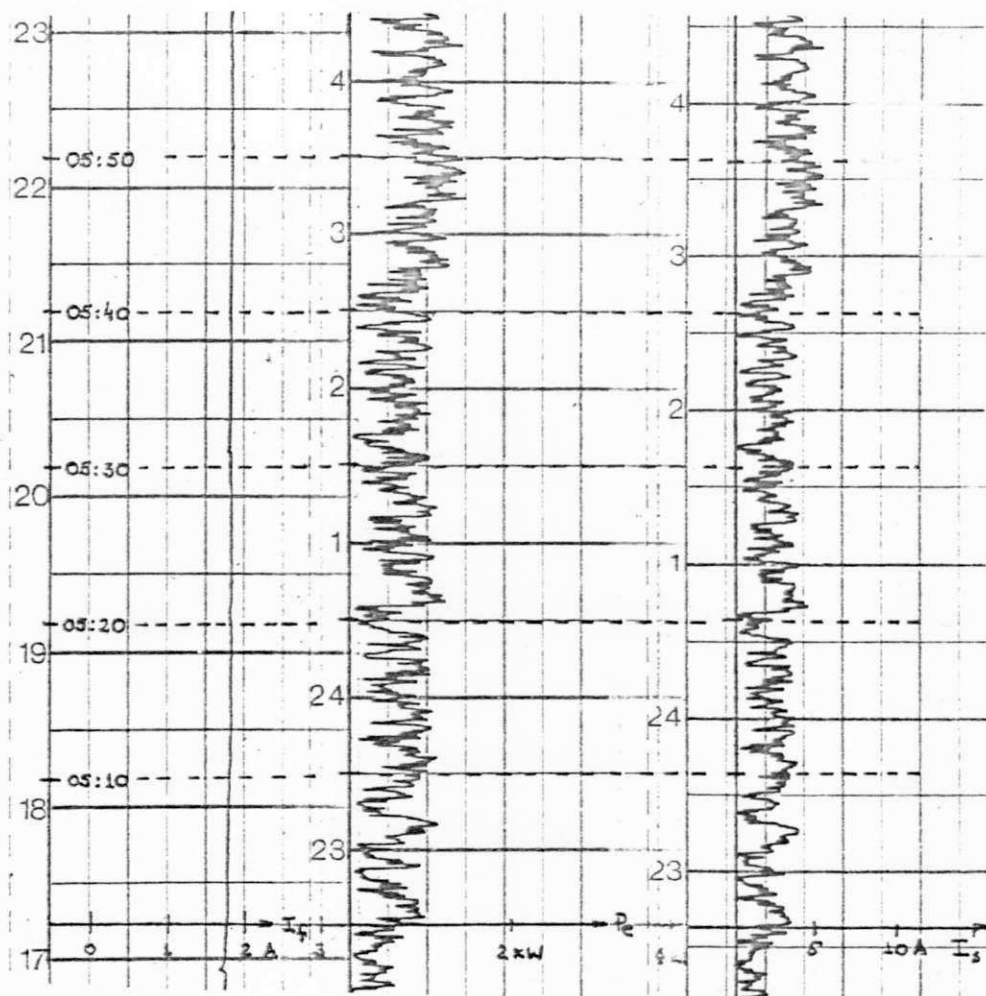
Uma amostra dos resultados obtidos em uma hora de ensaio, para os três casos testados é apresentada nas Figuras IV.17, IV.18 e IV.19, onde podem ser observados os transitórios elétricos gerados pela rajadas de vento ocorridas nestes intervalos.

Destes três casos, a operação  $\alpha = 90^\circ$  apresenta maiores valores de potência para um mesmo valor de velocidade de vento, em vista de redução da excitação, o que conduz a uma melhor acoplamento turbina-carga.

Em termos do tratamento de dados, foram escolhidos 12 intervalos de velocidades de vento entre 10 Km/h e 34 Km/h, ou entre 14 Km/h e 38 Km/h, dependendo da frequência de ocorrência destes valores e foram selecionados de 6 a 4 resultados para cada intervalo. O objetivo, neste caso, foi criar um conjunto de dados que pudesse ser tratado estatisticamente.

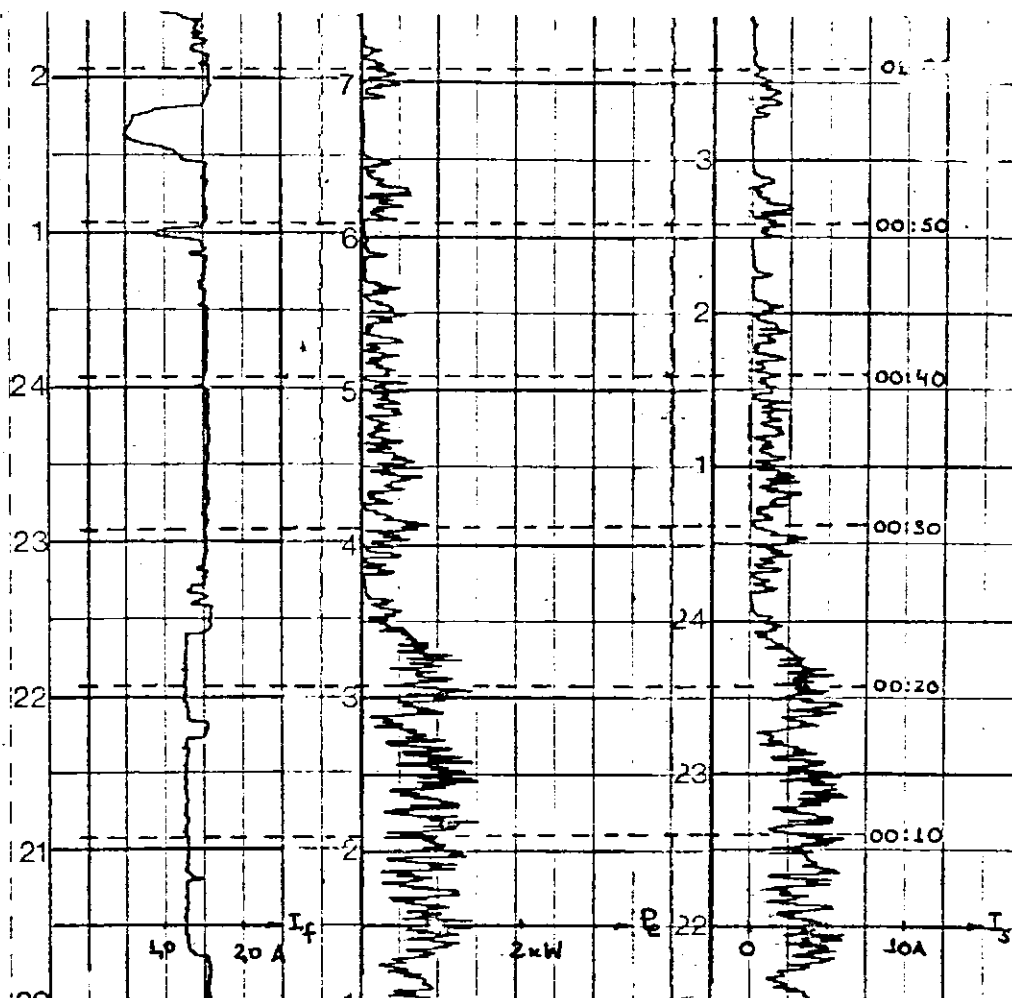
O processo de seleção dos dados baseou-se na qualidade do traçado das curvas pelo oscilógrafo, eliminando os instantes em que os oscilogramas ficaram prejudicados por motivos técnicos ou operacionais, por exemplo, falta de tinta, caneta mal localizada, desligamentos de emergência, entre outros.

Definidos os conjuntos de dados, optou-se pela planimetria dos oscilogramas a fim de obter-se os valores médios em 10 minutos. Para isto, foi utilizado um planímetro polar e desprezados os picos mais agudos das curvas traçadas, medindo-se apenas o valor médio do traçado. Pelo cálculo das áreas sobre as curvas,



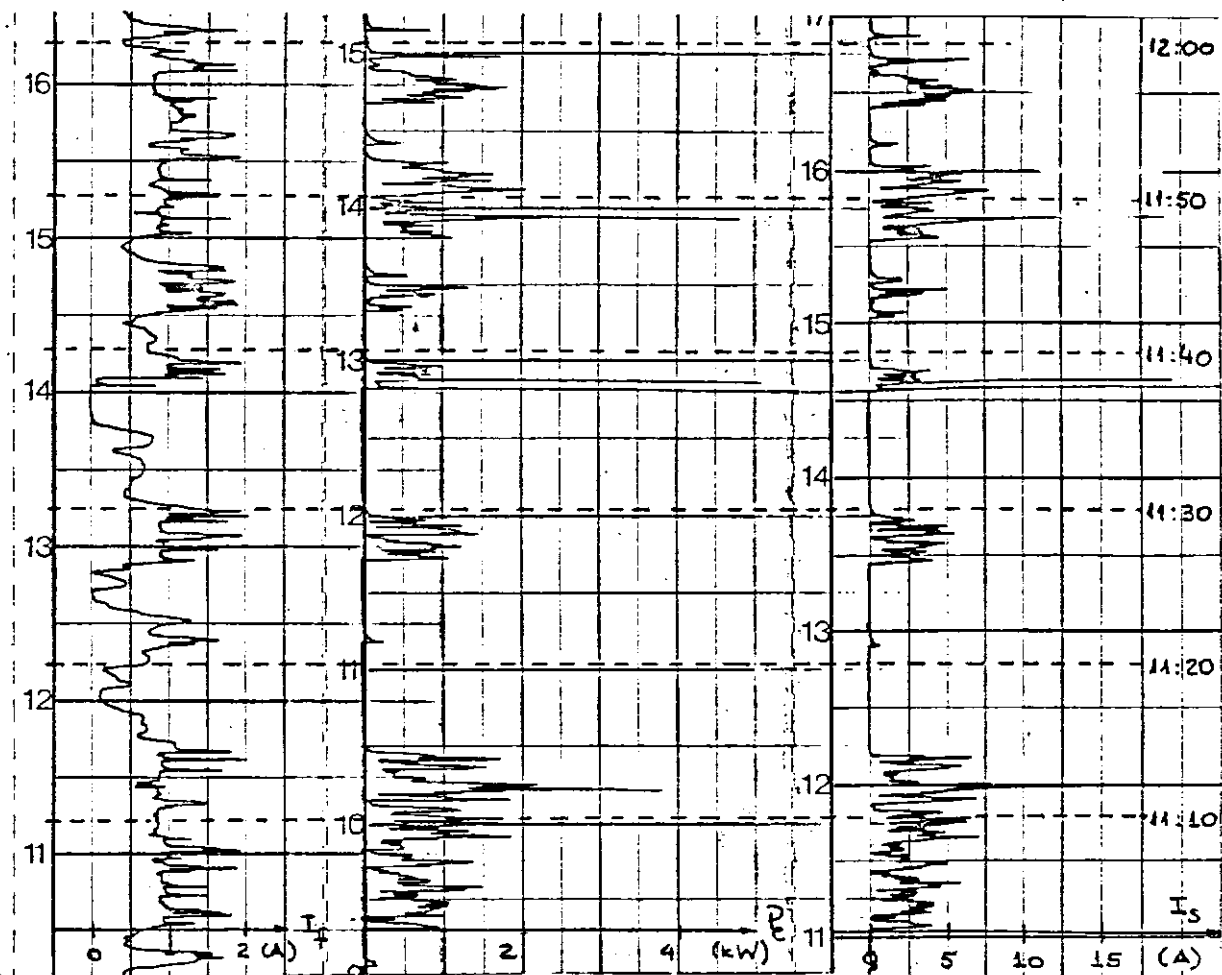
Intervalo	05:00	05:10	05:20	05:30	05:40	05:50
	05:10	05:20	05:30	05:40	05:50	06:00
$W_t$ (rpm)	87	89	91	89	93	93
$V_H$ (km/h)	22	23	23	23	28	29

Figura IV.17. Resultados Experimentais para  $\alpha = 30^\circ$   
( 05:00 às 06:00 do dia 24/10/87)



Intervalo	00:00 00:10	00:10 00:20	00:20 00:30	00:30 00:40	00:40 00:50	00:50 01:00
$w_t$ (rpm)	93	93	80	80	75	69
$V_H$ (km/h)	24	23	18	16	15	14

Figura IV.18. Resultados Experimentais para  $\alpha = 90^\circ$   
( 00:00 às 01:00 do dia 29/10/87)



Intervalo	11:00 11:10	11:10 11:20	11:20 11:30	11:30 11:40	11:40 11:50	11:50 12:00
$w_t$ (rpm)	75	62	55	55	64	80
$v_H$ (km/h)	21	19	20	15	19	20

Figura IV.19. Resultados Experimentais do Sistema em Malha Fechada ( 11:00 às 12:00 do dia 10/11/87).

foi possível obter os valores médios de potência, corrente gerada e corrente de campo, para os três testes propostos e realizados. Portanto, para cada velocidade média de vento obteve-se um conjunto de pontos, cujo valor médio espelha com melhor precisão as quantidades medidas.

#### IV.3.3. Comparação de Resultados

Durante os testes foram verificadas imperfeições nas ondas dente-de-serra do circuito de disparo que apresentavam valores de pico constantes em estreita faixa de variação de frequências ( de 40 a 60 Hz). Os valores médios do ângulo de disparo nos testes em malha aberta correspondem, portanto, a  $34,5^\circ$  e  $77,5^\circ$ . Procedendo as simulações para estes valores obteve-se os resultados apresentados na Figuras IV.20, IV.21, IV.22 e IV.23, para rotação, potência, corrente gerada e corrente de excitação, respectivamente.

Nestas figuras, pode-se observar a boa concordância dos resultados experimentais e teóricos, apesar das dificuldades apresentadas na tentativa de qualificar esta comparação. "A priori", pode-se verificar que uma boa correlação entre os resultados experimentais e teóricos ocorre na comparação entre as grandezas mecânicas. As grandezas elétricas apresentaram distorções devido aos seguintes fatores:

- Precisão dos instrumentos em vistas à operação a frequência variável;

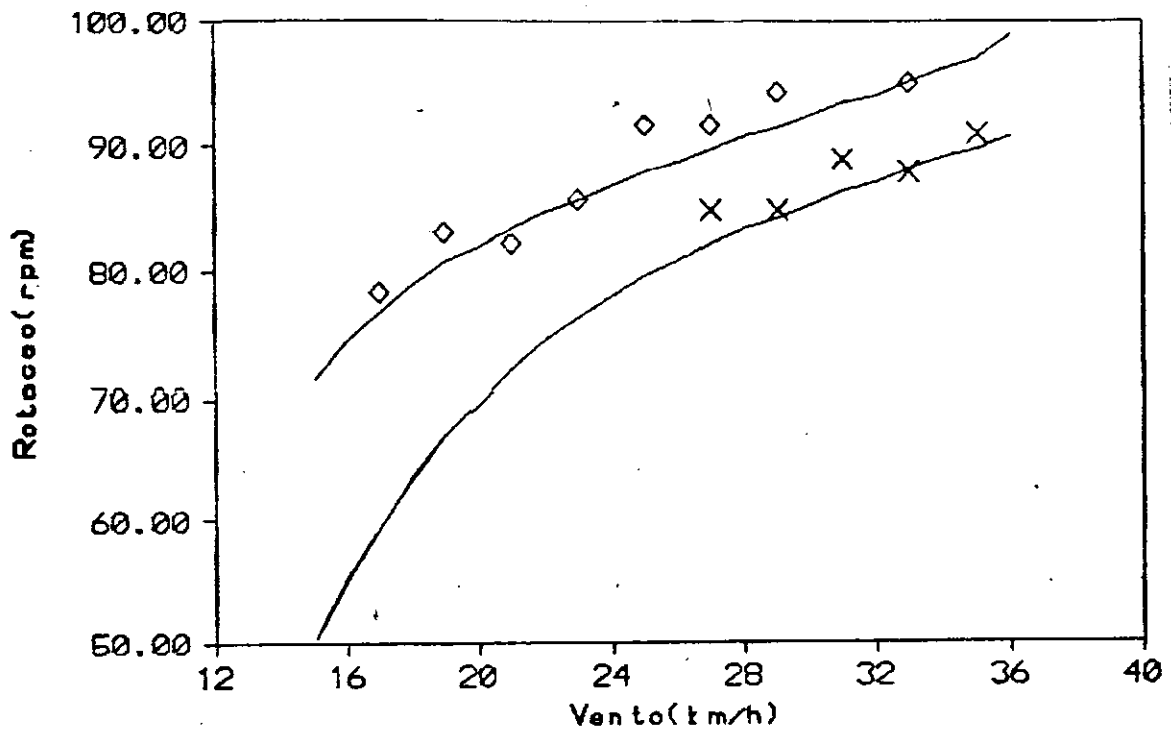


- Restrito funcionamento do circuito de gatilho;
- Dificuldades do processo de planimetria das curvas oscilografadas.

Para a operação em malha fechada, as Figuras IV.24, IV.25, IV.26 e IV.27 apresentam a comparação entre resultados teóricos e experimentais. Neste caso, devido aos picos de corrente e potência ocorridos pela rápida variação do ângulo de gatilho obedecendo as rajadas de vento, o processo de planimetria tornou-se menos eficaz e mais sujeitos a erros, mesmo assim boa correlação foi obtida em algumas velocidades de vento.

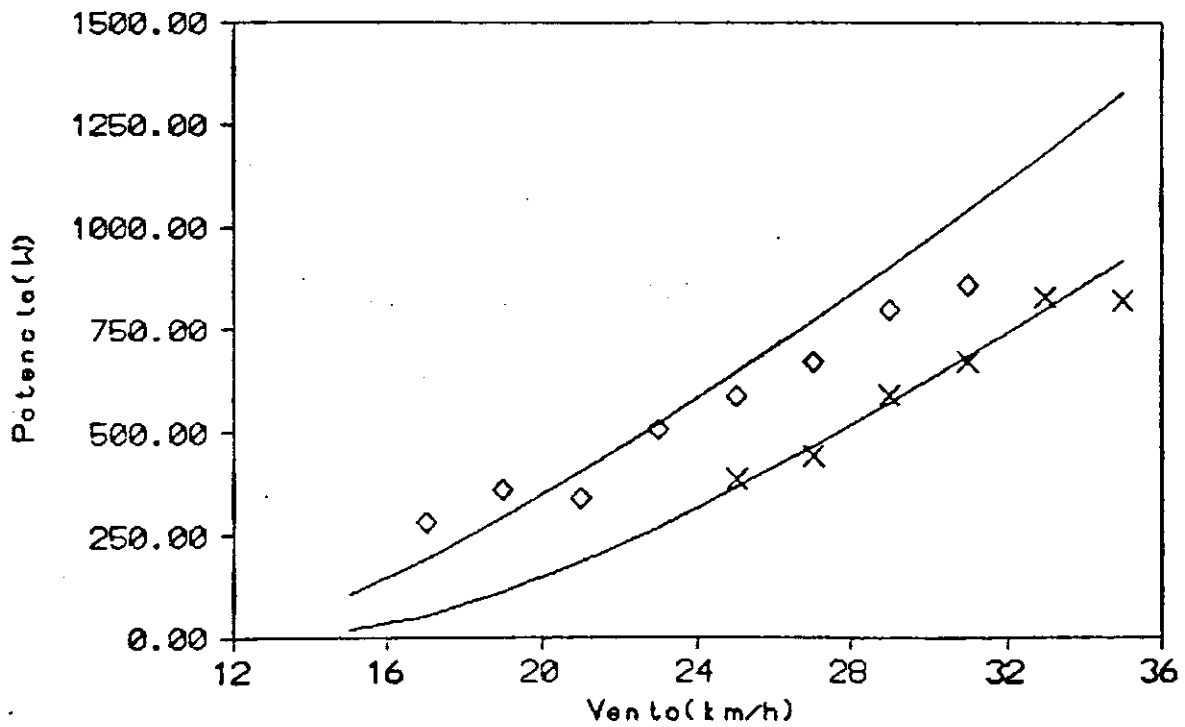
Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que a metodologia de modelagem e ensaios empregada é bastante complexa em comparação com a qualidade dos resultados experimentais obtidos. Deve-se verificar, contudo, que modelagens mais simples incorrem em erros na representação dos fenômenos. Os resultados foram qualitativamente úteis para validar a metodologia empregada. Desde modo, é possível a obtenção de resultados confiáveis de simulação em diversas condições, nas quais as particularidades do sistema em estudo e dos circuitos desenvolvidos dificultam sua perfeita realização prática.

A inclusão da saturação magnética na modelagem do alternador foi essencial para a boa concordância de resultados em vistas às sensíveis alterações na característica de potência do alternador. Por uma modelagem simplificada pode-se deduzir que a máxima potência gerada estabiliza-se em um valor, para altas rota



◇ $d_{lepero} = 74.5$  X $d_{lepero} = 34.5$

Figura IV.20. Relações Teóricas e Experimentais entre Rotação e Vento em Médias de 10 minutos.



◇ $d_{lepero} = 74.5$  X $d_{lepero} = 34.5$

Figura IV.21. Relações Teóricas e Experimentais entre Potência e Vento em Médias de 10 minutos.

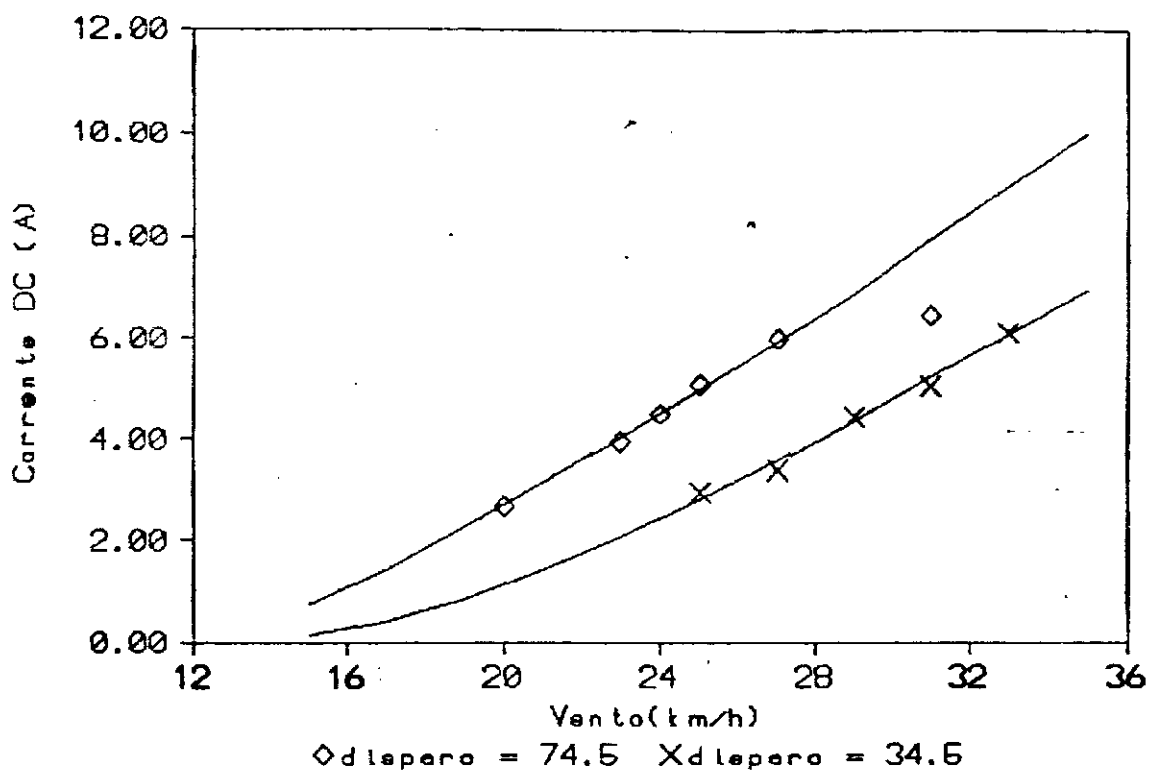


Figura IV.22. Relações Teóricas e Experimentais entre Corrente e Vento em Médias de 10 minutos.

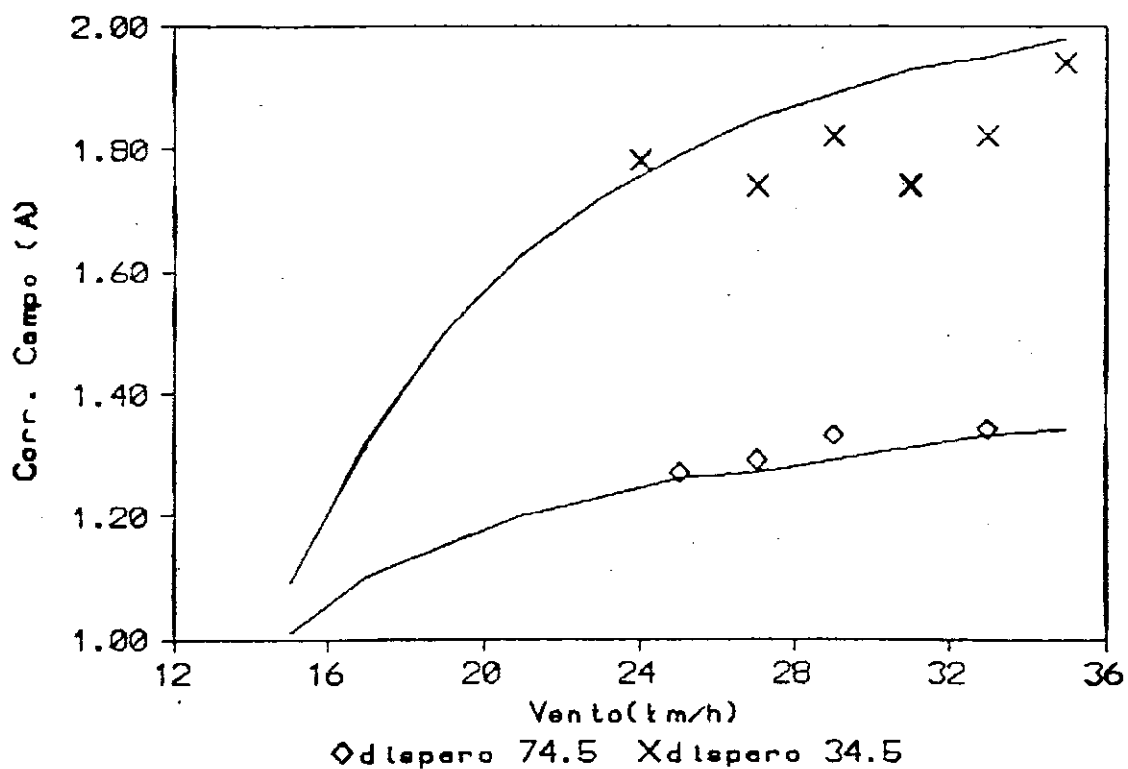


Figura IV.23. Relações Teóricas e Experimentais entre Excitação e Vento em Médias de 10 minutos.

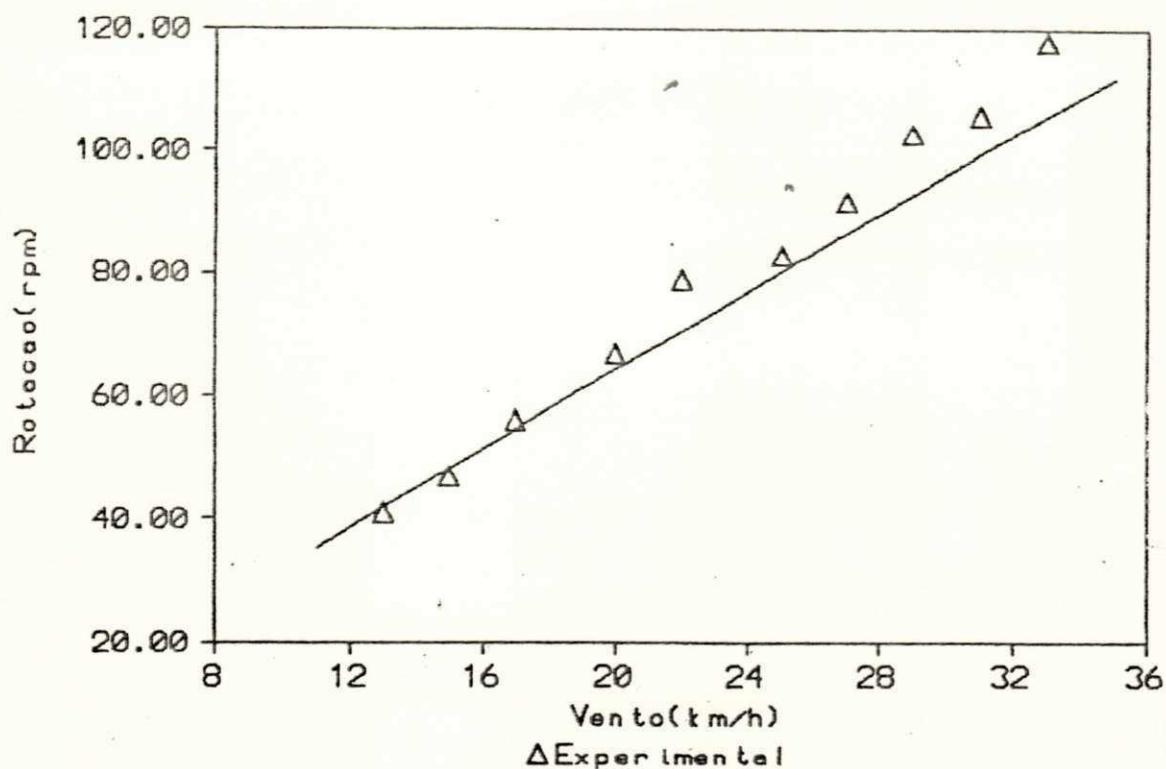


Figura IV.24. Relações Teóricas e Experimentais entre Rotação e Vento em Médias de 10 minutos

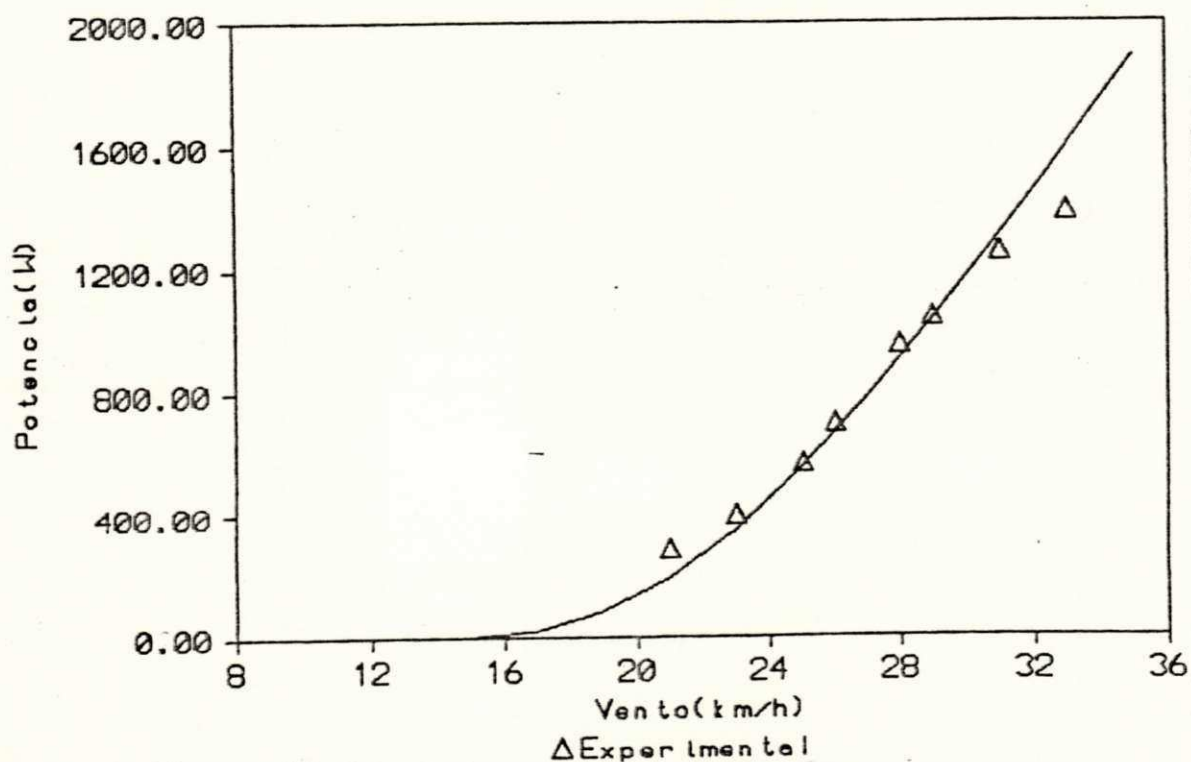


Figura IV.25. Relações Teóricas e Experimentais entre Potência e Vento em Médias de 10 minutos Sistema Autopilotado.

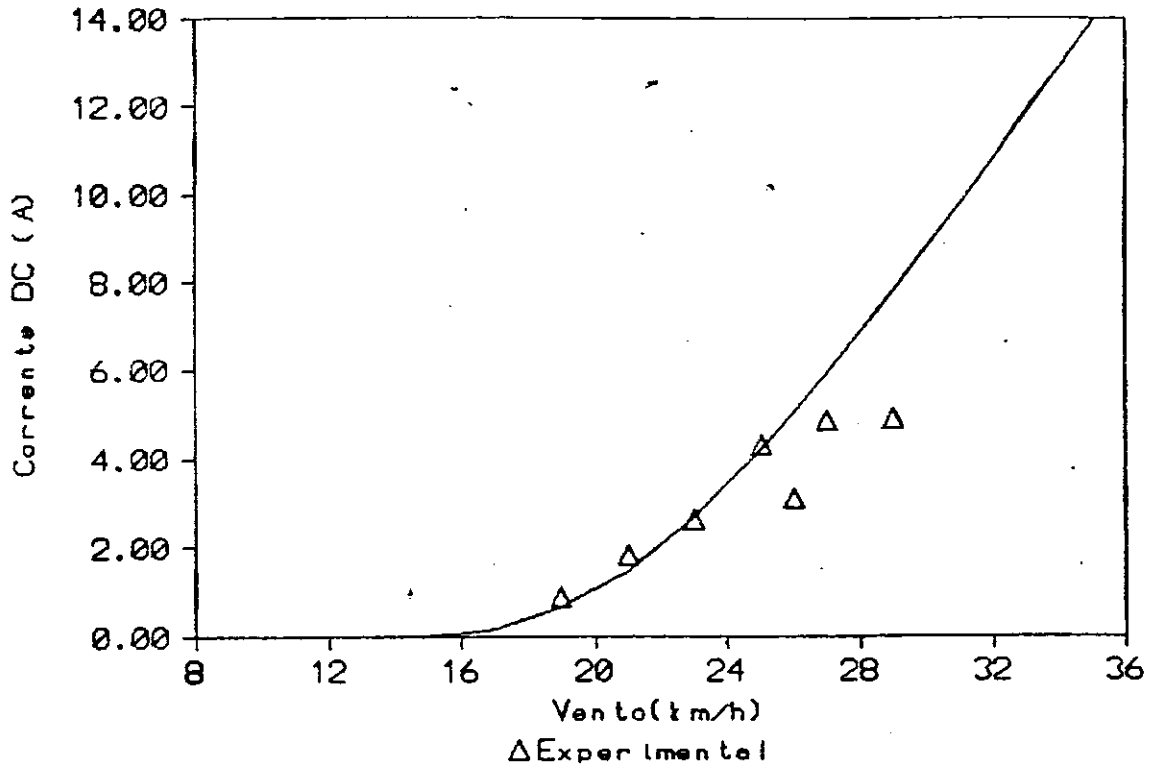


Figura IV.26. Relações Teóricas e Experimentais entre Corrente e Vento em Médias de 10 minutos

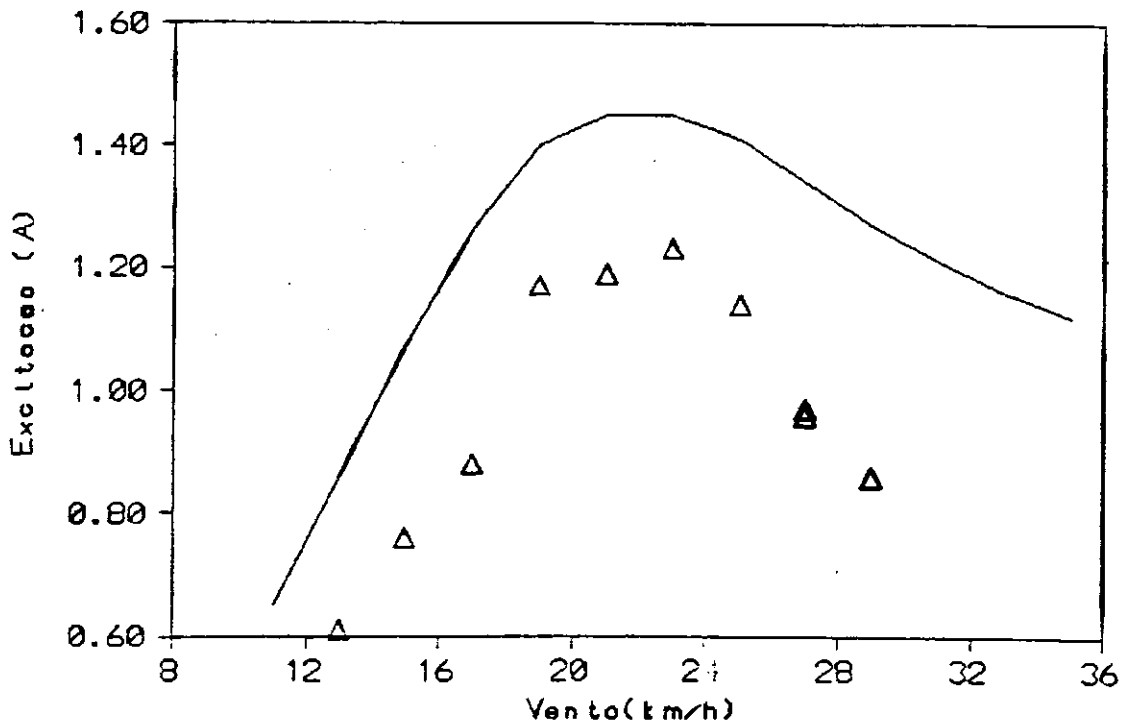


Figura IV.27. Relações Teóricas e Experimentais entre Excitação e Vento em Médias de 10 minutos

Sistema Autopilotado.

ções, que depende do inverso da reatância síncrona da máquina. Assim, pode-se deduzir a influência da saturação na variação de potência em altas rotações.

#### IV.3.4. Avaliação da Operação

Tendo em vista a comparação dos resultados teóricos e experimentais pode-se analisar a operação do SCEE em outras condições de operação e avaliar o próprio projeto do sistema em estudo.

O sistema Elektro foi projetado para operar em modo autoexcitado com excitação plena. Pelos resultados obtidos verifica-se que nesta condição a eficiência da conversão é baixa, em virtude do funcionamento em baixa relação de velocidades. Durante os testes pode-se verificar que a corrente de campo constitui carga significativa em baixas velocidades de vento, dificultando o processo de aceleração da turbina. Assim a turbina consome considerável tempo na aceleração, reduzindo em termos médios a captação energética. Um desempenho adequado foi obtido para ângulos de disparo elevados, pois reduz a excitação em baixos ventos e possibilita um melhor acoplamento em regime estável de ventos.

As eficiências globais da conversão para diversos ângulos de disparo são apresentadas na Figura IV.28, justificando esta análise.

A operação a relação de velocidades ótima repre-

senta o melhor desempenho que se pode-se esperar do sistema. Nestas condições a excitação seria ajustada a cada variação de velocidade de vento, sendo esta relação ilustrada na Figura IV.29. Observa-se, neste caso, os elevados ângulos de disparo ótimos necessários a esta operação na região de carregamento efetivo. Como já discutido, existe dois patamares de carregamento do rotor eólico neste caso: a corrente de excitação, em baixas velocidades de vento e a bateria de acumuladores, em médias e altas velocidades de vento. Portanto, o ângulo ótimo de disparo varia de maneira diferente nestes dois intervalos.

Uma avaliação do aproveitamento pode ser observada na distribuição da taxa de variação da energia extraível, como ilustrada na Figura IV.30, considerando os valores do coeficiente

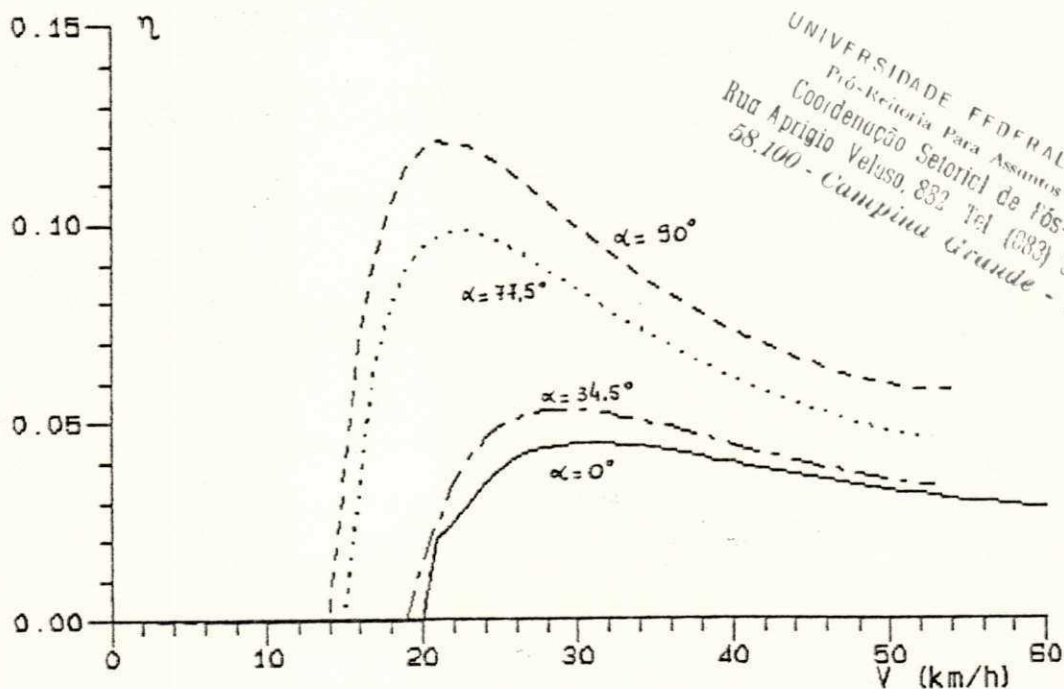


Figura IV.28. Características Estáticas de Rendimento Global da Conversão em Ângulos de Disparo de  $0^\circ$ ,  $34,5^\circ$ ,  $77,5^\circ$  e  $90^\circ$ .

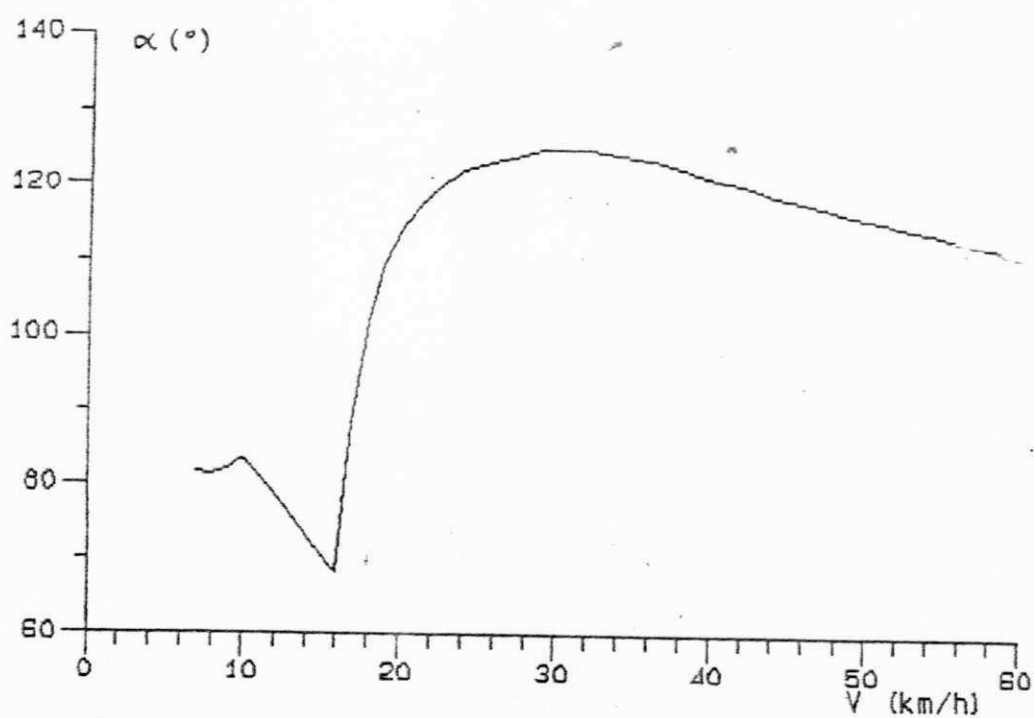


Figura IV.29. Lei Ótima de Disparo

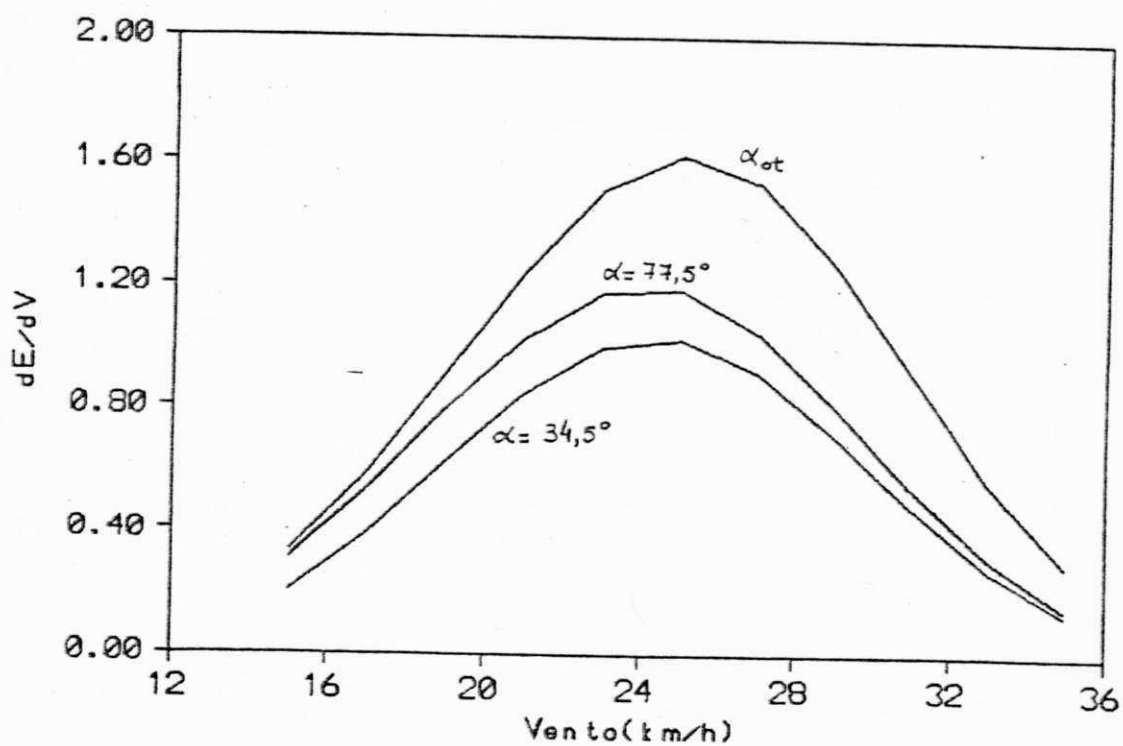


Figura IV.30. Densidade de Energia Extraível para os Vários Esquemas Estudados



de potência obtidos em médias de 10 minutos. Nesta figura são plotados os casos com ângulo de disparo ótimo,  $34,5^\circ$  e  $77,5^\circ$ .

Do ponto de vista prático, a operação em malha aberta pode fornecer desempenho satisfatório, evitando a complexidade de um circuito de gatilho e malhas de controle. Neste caso, o ajuste de autoexcitação pode ser implementado por inclusão de resistores adicionais ao circuito de campo, projetados de tal forma a garantir a maior área sobre a curva  $dE/dV$ .

#### IV.4. SCEE PARA BOMBEAMENTO D' AGUA

##### IV.4.1. Simulação das Características

A metodologia escolhida para simulação deste sistema obedece aos seguintes critérios:

- Proceder o acoplamento entre as características dos componentes que representem fenômenos físicos análogos, como bomba centrífuga - instalação hidráulica e motores de indução alternador;
- Proceder o acoplamento os entre subsistemas mecânico-elétrico;
- Incluir finalmente o subsistema acionante (turbina eólica), a fim de explicitar as características físicas em função da velocidade de vento.

O acoplamento bomba centrífuga - instalação hidráulica

foi implementado por equacionamento analítico, facilmente solucionável pelo algoritmo de Newton. Assim obteve-se as características mecânicas, vazão e conjugado da bomba, em função da rotação da mesma.

O acoplamento alternador-motor de indução, em vista das complexidades inerentes do modelo autoexcitado, conduz a uma solução possível apenas por meios numéricos. O equacionamento básico utilizado pode ser descrito pelas expressões:

Equações de Tensão do Alternador:

$$V_{dg} = -r_g \cdot I_{dg} + \omega_g \cdot L_{qg} \cdot I_{qg}$$

$$V_{qg} = -r_g \cdot I_{qg} - \omega_g \cdot L_{dg} \cdot I_{dg} + E_g$$

Equações de Tensão dos Motores:

$$V_{dmi} = r_{si} \cdot I_{dmi} - \omega_g \cdot L_{ssi} \cdot I_{qmi} - \omega_g \cdot M_{smi} \cdot I_{qri} \\ - \omega_g \cdot M_{smi} \cdot I_{qri}$$

$$V_{qmi} = r_{si} \cdot I_{qmi} + \omega_g \cdot L_{ssi} \cdot I_{dmi} \\ + \omega_g \cdot M_{smi} \cdot I_{dri}$$

$$0 = r_{ri} \cdot I_{dri} - (\omega_g - \omega_{mi}) \cdot L_{rri} \cdot I_{qri} - (\omega_g - \omega_{mi}) \cdot M_{smi} \cdot I_{qmi}$$

$$0 = r_{ri} \cdot I_{qri} + (\omega_g - \omega_{mi}) \cdot L_{rri} \cdot I_{dri} + (\omega_g - \omega_{mi}) \cdot M_{smi} \cdot I_{dmi}$$

onde  $i$  identifica o  $i$ -ésimo motor conectado.

Equações da linha de transmissão elétrica:

$$V_{dg} = r_L \cdot I_{dg} - \omega_g \cdot L_L \cdot I_{qg} + V_{dmi}$$

$$V_{qg} = r_L \cdot I_{qg} + \omega_g \cdot L_L \cdot I_{dg} + V_{qmi}$$

para qualquer  $i$ , onde  $r_L$  e  $L_L$  constituem a resistência e indutância da linha de transmissão.

Equações da autoexcitação semicontrolada:

$$I_{dg} = \sum_{i=1}^n I_{dmi} + I_{df}$$

$$I_{qg} = \sum_{i=1}^n I_{qmi} + I_{qf}$$

$$\text{onde } I_{df} = C_{kret} \cdot I_{fo} \cdot \cos(\delta + \phi)$$

$$I_{qf} = C_{kret} \cdot I_{fo} \cdot \sin(\delta + \phi)$$

$$\text{onde } C_{kret} = \frac{\sqrt{3}}{r} \cdot (1 + \cos \alpha)^{\frac{1}{2}}$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} (V_{qg} / V_{dg})$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} [\sin \alpha / (1 + \cos \alpha)]$$

Foram definidas rotações de conexão de cada conjunto motor-bomba, de modo que quando a turbina gira a rotações inferiores às rotações de conexão de todos os motores, a única carga no eixo do alternador é aquela relativa à corrente de excitação e perdas. À medida que o acoplamento turbina-carga proporciona, para crescentes valores de velocidade de vento, rotações maiores, inicia-se o processo de conexão dos motores 1, 2...n sucessivamente. O algoritmo de cálculo procede a montagem de uma matriz  $Z$  ( $4n \times 4n$ ) e resolve, por eliminação de Gauss sem pivotagem e por regressão sucessiva, o sistema de equações algébricas lineares:

$$\tilde{Z} \cdot \tilde{x} = \tilde{b}$$

onde:

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{12} & \dots & Z_{13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{21} & \dots & Z_{22} & \dots & Z_{23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{31} & \dots & Z_{32} & \dots & Z_{33} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{Z}_{ii} = \begin{bmatrix} (r_L+r_g+r_{mi}) & -(L_{qg}+L_L+L_{ssi}) \cdot w_g & 0 & -w_g \cdot M_{smi} \\ (L_{dg}+L_L+L_{ssi}) \cdot w_g & (r_g+r_L+r_{mi}) & w_g \cdot M_{smi} & 0 \\ 0 & -M_{smi} \cdot (w_g-w_{mi}) & r_{ri} & -(w_g-w_{mi}) \cdot L_{Tri} \\ M_{smi} \cdot (w_g-w_{mi}) & 0 & L_{Tri} \cdot (w_g-w_{mi}) & r_{ri} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{Z}_{ij} = \tilde{Z}_{ji} = \begin{bmatrix} (r_g+r_L) & -(L_{qg}+L_L) \cdot w_g & 0 & 0 \\ (L_{dg}+L_L) \cdot w_g & (r_g+r_L) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{x}^T = [ I_{dmi} \ I_{qmi} \ I_{dri} \ I_{qri} \ \dots \ I_{dmi} \ I_{qmi} \ I_{dri} \ I_{qri} \ \dots ]$$

$$\tilde{b}^T = [ k_1 \ k_2 \ 0 \ 0 \ \dots \ k_1 \ k_2 \ 0 \ 0 \ \dots ]$$

$$\text{onde } k_1 = - (r_g+r_L) \cdot I_{df} + (L_{qg}+L_L) \cdot w_g \cdot I_{qf}$$

$$k_2 = - (r_g+r_L) \cdot I_{qf} + (L_{dg}+L_L) \cdot w_g \cdot I_{df} + E_g$$

e o superescrito T indica transposição da vetor.

Com a inclusão da saturação e também devido à autoexcitação alguns termos das matrizes  $\tilde{Z}$  e  $\tilde{b}$  são atualizados a cada iteração do processo de convergência do algoritmo. Para o cálculo

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria para Assuntos de Inscricao  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Arraio Veloso, 832 Tel. (083) 321-7222-M 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

da corrente de excitação é utilizado o algoritmo de "regula-falsi" sobre a equação que rege o fenômeno da autoexcitação, tal como:

$$I_{fo} \cdot \left( r_{fd} + \frac{3}{\pi} L_c \cdot \omega_g \right) - \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} (1 + \cos\alpha) V_g \leq \text{Erro}$$

$$\text{onde } V_g = (V_{dg}^2 + V_{qg}^2)^{1/2} / \sqrt{2}$$

O algoritmo de cálculo é ilustrado na Figura IV.31, através do fluxograma da lógica de simulação. Como entrada deste algoritmo, são definidas as grandezas de rotações da turbina e dos motores. Como saída, tem-se os conjugados nos eixos do alternador e motores, além das eficiências da conversão eletromecânica.

A cada iteração são atualizados os valores das correntes nos motores pela inclusão de uma parcela de perdas relativa às perdas mecânicas, no ferro e adicionais. De certo modo é forçada ao algoritmo a solução de três problemas distintos: a autoexcitação, a saturação e a representação das perdas nos motores. O conjugado eletromagnético fornecido ao eixo das bombas centrífugas vale:

$$T_{emi} = 0,75 \cdot P_{mi} \cdot (V_{qri} \cdot I_{dri} - V_{dri} \cdot I_{qri})$$

onde  $V_{qri}$  e  $V_{dri}$  são os enlaces de fluxo rotóricos do motor  $i$ .

$P_{mi}$  é número de polos.

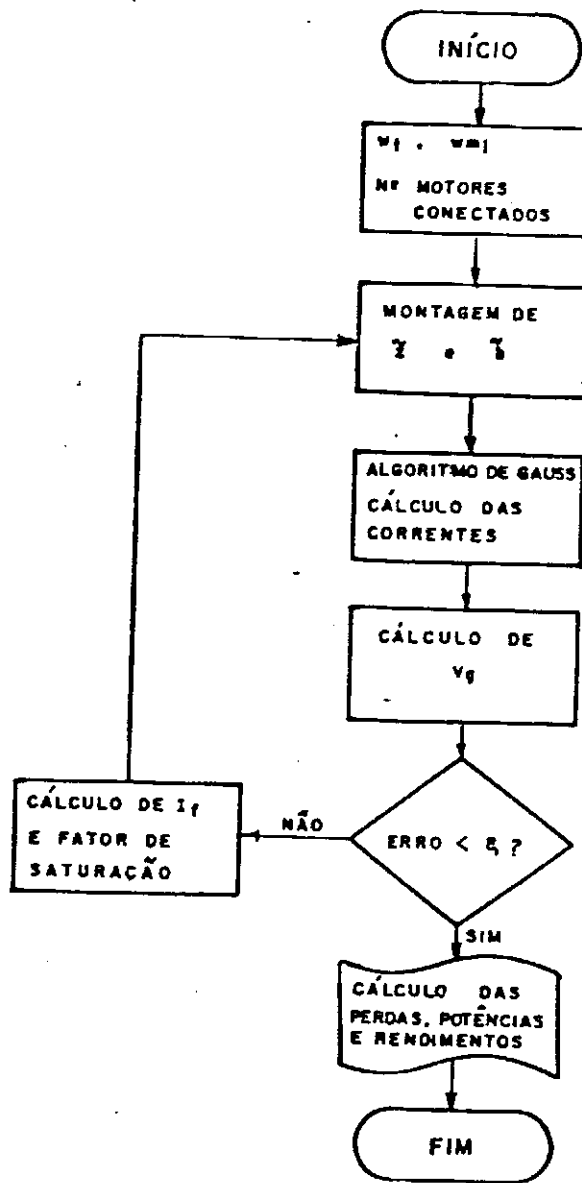


Figura IV.31. Fluxograma de Cálculo da Acoplamento Alternador - Motor

O conjugado no eixo do alternador é calculado pela soma de potência fornecida aos motores acrescida das perdas no alternador.

Os acoplamentos motor de indução-bomba centrífuga e turbina eólica-alternador são calculados através do algoritmo de "regula-falsi", pela comparação entre os níveis de conjugado destes componentes.

Devido à histerese de rotação na conexão dos motores, necessária ao perfeito funcionamento do sistema, a simulação foi implementada nas rotações de conexão e de desconexão dos motores, a fim de obter-se um comportamento médio desejado para a comparação com resultados experimentais.

Um programa de tratamento de dados calcula os valores médios de todas as grandezas em concordância com as medições de velocidade de vento médias em 10 minutos, utilizando uma distribuição gaussiana, como já discutido anteriormente.

#### IV.4.2. Resultados Experimentais

Foram feitos diversos testes prévios ao ensaio operativo, no intuito de checar o funcionamento, eliminando pequenos problemas que poderiam ocorrer nos circuitos elétrico, eletrônico e hidráulico. Foram ajustadas as velocidades de conexão de cada motor e a histerese necessária ao bom comportamento dinâmico do sistema.

Em vista do objetivo inicial de conectar três motores ao sistema, verificou-se que independentemente dos níveis de rotação da turbina e da manutenção de um nível elevado de velocidade de vento, o sistema não suporta a operação dos três motores simultaneamente. Isto é, os níveis de queda de tensão ocasionados pela entrada do terceiro conjunto motor-bomba, conduziam a parada completa de todas as outras unidades. Levando em conta este fato e o bom desempenho do sistema, foram escolhidos os dois conjuntos motor-bomba de melhor eficiência para a operação, ficando o terceiro conjunto servindo como reserva.

As velocidades de conexão e desconexão dos dois conjuntos foram ajustadas de modo que garantiu-se uma histerese maior para a entrada do segundo conjunto em vista do maior impacto que este representa sobre a turbina. Deste modo, tem-se que:

- Conexão do 1° motor: 71,74 rpm
- Desconexão do 1° motor: 59,43 rpm
- Conexão do 2° motor: 102,5 rpm
- Desconexão do 2° motor: 80,96 rpm
- Terceiro motor desconectado permanentemente.

Os ensaios operativos foram efetuados em três períodos ininterruptos de 24 horas, de forma ao sistema funcionar em diversos regimes de vento, com ângulo de disparo da ponte retificadora igual a 0°.

Foram feitas medições de velocidade média de vento,



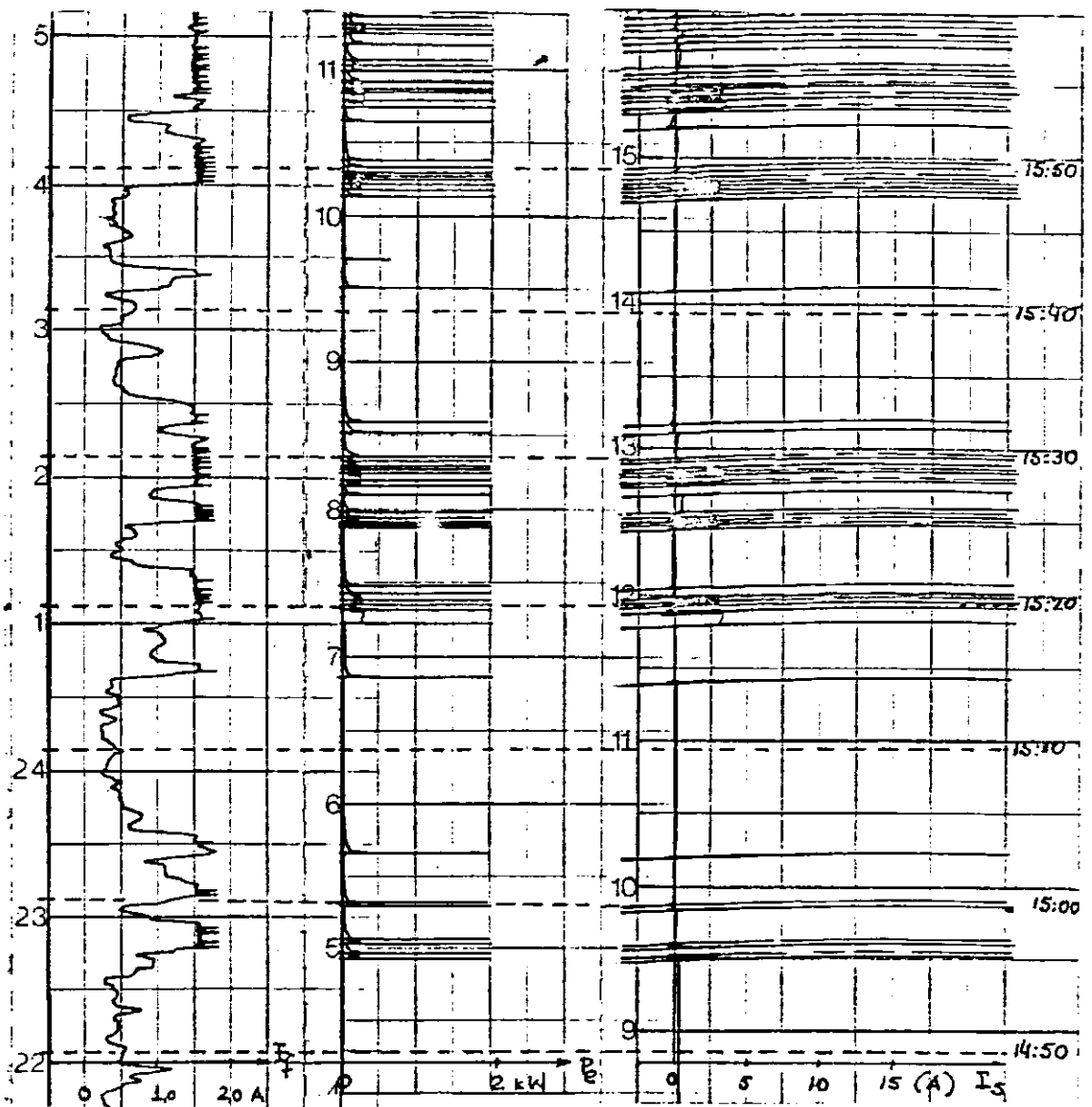
rotação média e volumes de água bombeada em períodos de 10 minutos, sendo registradas por oscilógrafos as variações instantâneas de potência gerada, corrente total dos motores e corrente de excitação, utilizando metodologia análoga à apresentada anteriormente.

Através dos volumes de água bombeada, medidos pelos hidrômetros, foram calculadas as vazões de cada bomba e a vazão total.

Uma amostra dos oscilogramas de potência, corrente gerada e corrente de excitação obtidos durante os ensaios são apresentados na Figura IV.32 para um período de 01 hora de funcionamento, identificando-se em cada intervalo de 10 minutos os valores médios de vento, rotação e vazão total.

O procedimento de redução dos dados experimentais já foi apresentado anteriormente, onde definiu-se os intervalos de velocidade de vento e constituiu-se conjuntos de dados obtidos em um dado valor de velocidade de vento.

As medições instantâneas oscilografadas foram tratadas através de planimetria, sendo neste caso bastante prejudicada pelos transitórios de chaveamento dos motores, o que conduziu a significativa imprecisão nos resultados. A comparação teórico-experimental será apresentada a seguir onde estes problemas serão tratados qualitativa e quantitativamente.



Intervalo	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50
	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00
$w_t$ (rpm)	36	38	51	36	38	55
$V_H$ (km/h)	17	18	22	18	18	23
$Q_1+Q_2$ (l/h)	22	96	225	33	84	246

Figura IV.32. Resultados Experimentais em 01 hora de Operação ( 15:00 às 16:00 do dia 30/10/87)

#### IV.4.3. Comparação de Resultados

Procedendo à simulação do sistema de bombeamento para ângulo de disparo da ponte retificadora de autoexcitação igual a  $0^\circ$  e checando com os resultados obtidos experimentalmente, observou-se uma boa compatibilidade entre as características mecânicas (rotação e vazão). As Figuras IV.33, IV.34, IV.35, IV.36, IV.37, ilustram a comparação teórica experimental para grandezas de rotação, vazão, corrente nos motores, potência e corrente de campo, respectivamente.

As grandezas elétricas apresentam distorções significativas em relação aos resultados experimentais, em vista das dificuldades no tratamento das medições oscilografadas. Os transtórios elétricos durante os chaveamentos impedem uma perfeita estimação destas grandezas e perturbam significativamente a precisão dos instrumentos, conduzindo a deslocamentos no nível zero e distorcendo os resultados.

Apesar destas discrepâncias apresentadas nos dados das grandezas elétricas, os resultados validam a metodologia empregada com erros inferiores a  $10\%$ , nas vazões bombeadas.

Além dos resultados quantitativos a simulação comprova a impossibilidade da operação dos três conjuntos motor-bomba simultaneamente, identificando a instabilidade estática verificada nos testes.

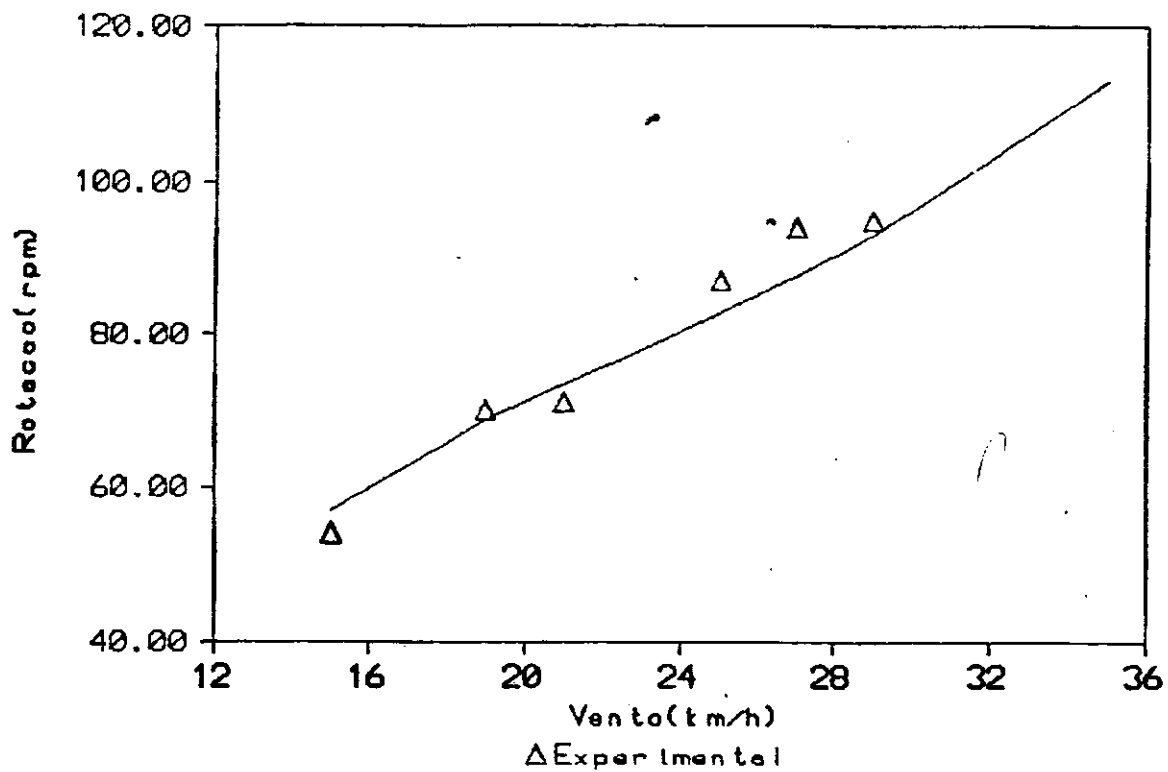


Figura IV.33. Relação Teórica e Experimental entre Rotação e Vento em Médias de 10 minutos.

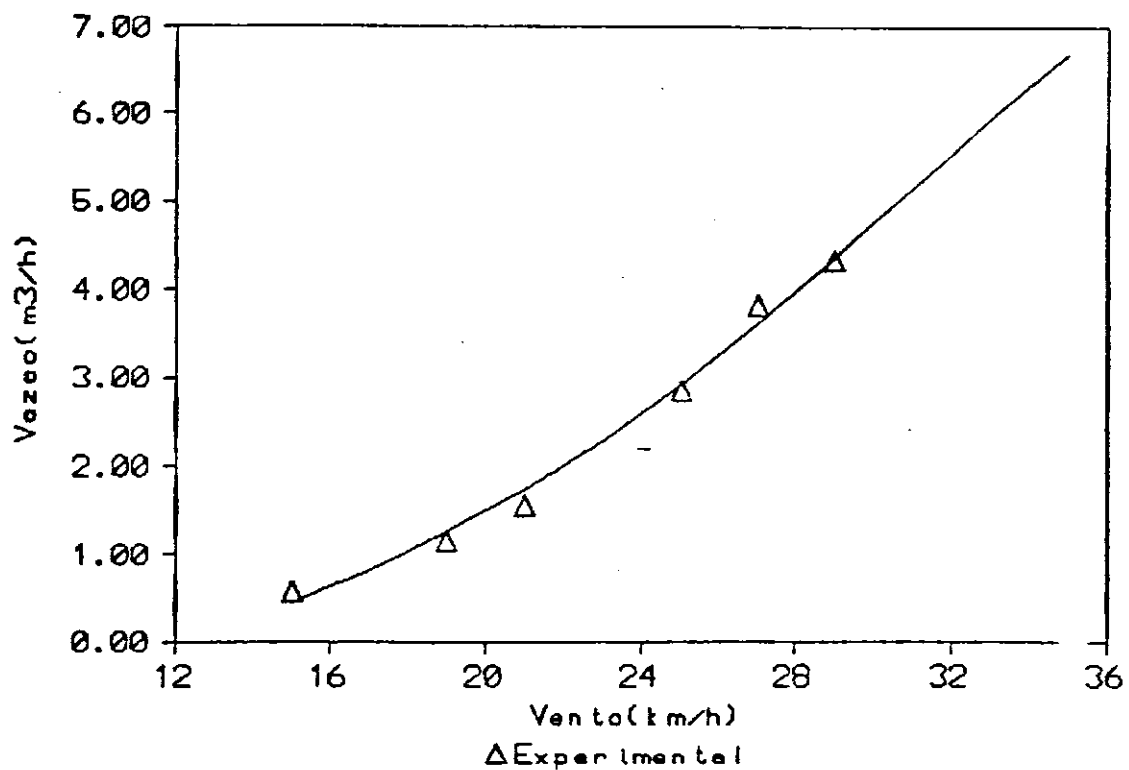


Figura IV.34. Relação Teórica e Experimental entre Vazão e Vento em Médias de 10 minutos.

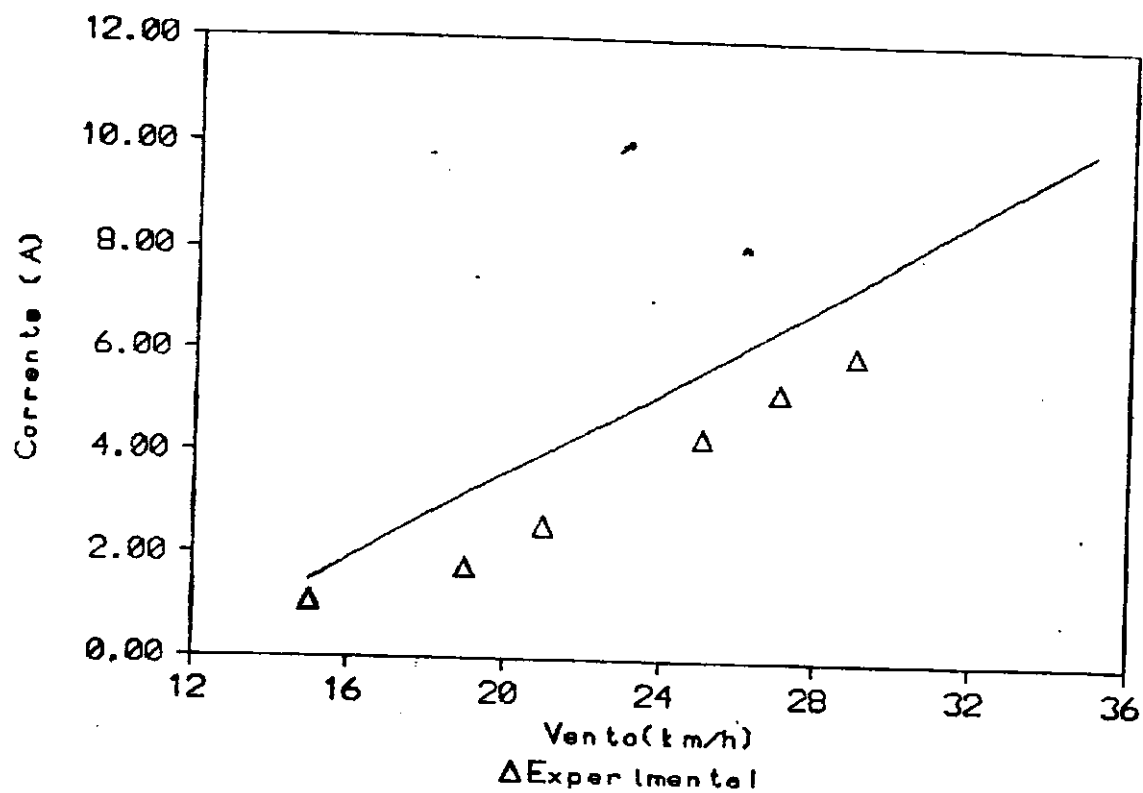


Figura IV.35. Relação Teórica e Experimental entre Corrente e Vento em Médias de 10 minutos.

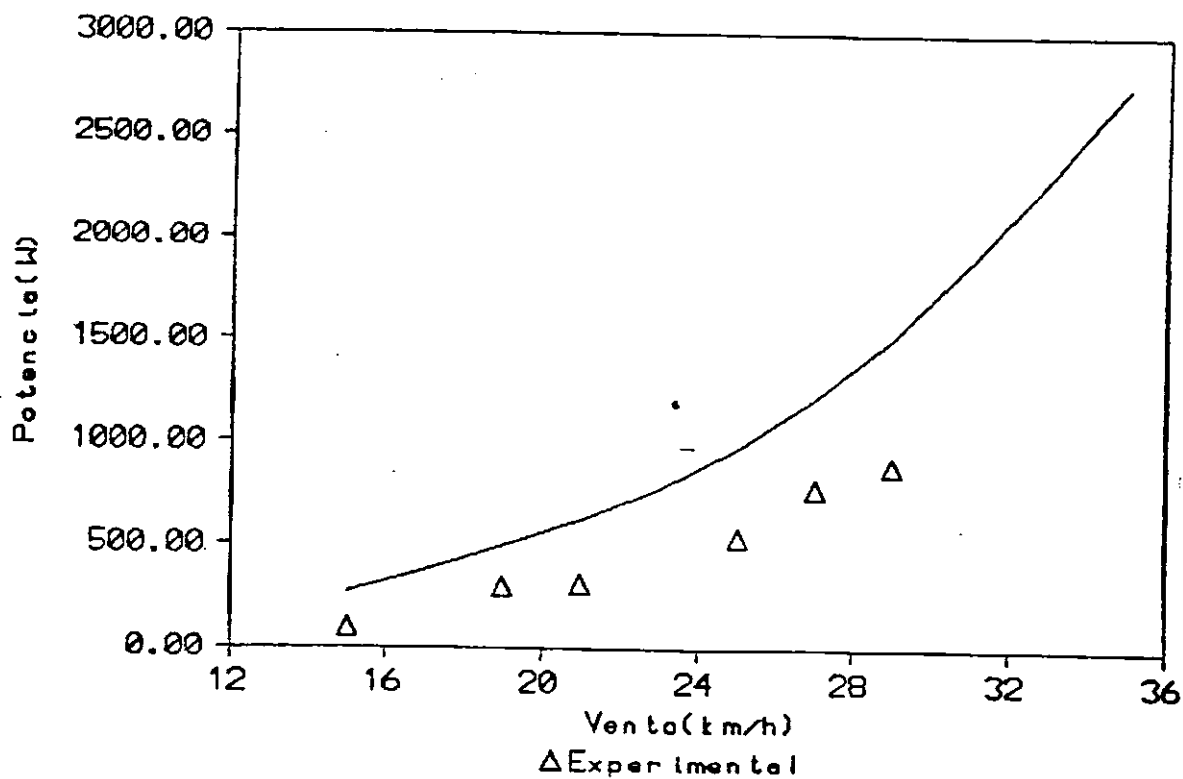


Figura IV.36. Relação Teórica e Experimental entre Potência e Vento em Médias de 10 minutos.

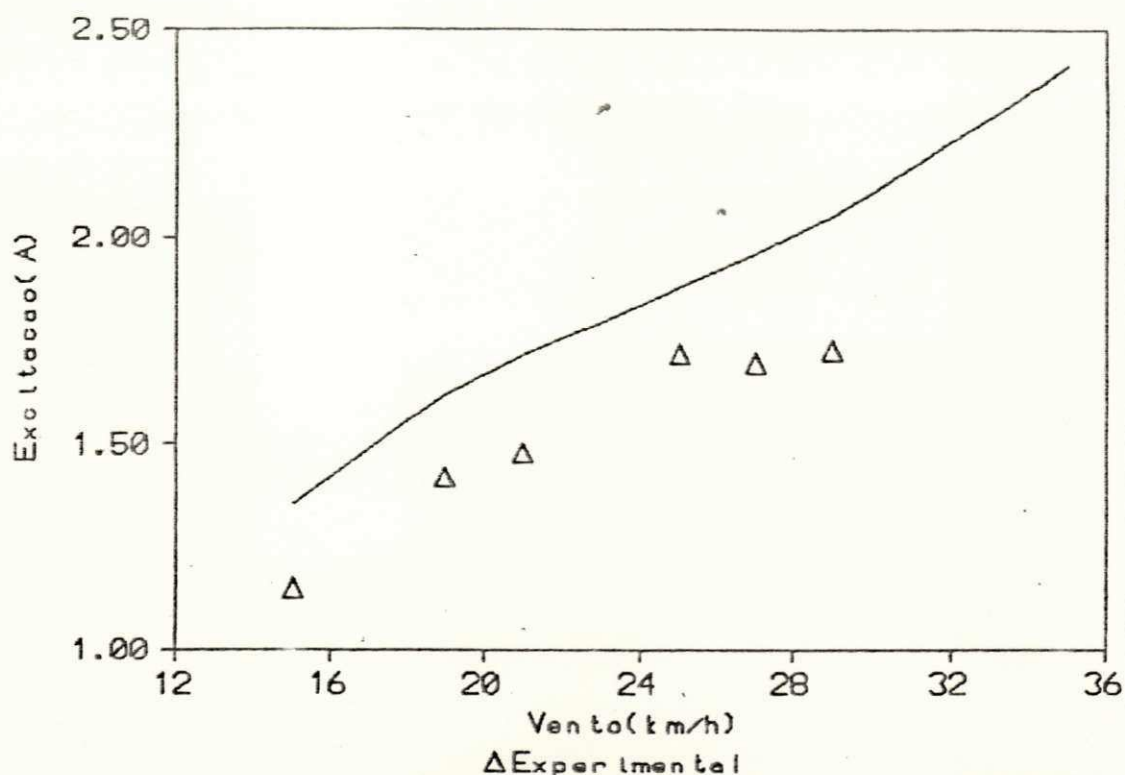


Figura IV.37. Relação Teórica e Experimental entre Excitação e Vento em Médias de 10 minutos.

#### IV.4.4. Avaliação da Operação

Tendo em vista as características dos componentes que constituem o sistema, verificou-se que este não opera a  $\lambda = \lambda_0$ , possível de ocorrer se houver concordância das características naturais da carga e da turbina eólica. Nesta perspectiva, as características das bombas foram decisivamente responsáveis pela operação a baixa relação de velocidades em regiões onde a turbina funciona com  $dT_t/dw_t$  negativos e, portanto, instáveis estaticamente. Este fenômeno gerou, dependendo da evolução da velocidade de vento, um aumento significativo no chaveamento dos conjuntos.

O controle do passo da turbina mostrou-se eficiente na garantia da estabilidade dos conjuntos motor-bomba, não ocorrendo, dentro do período de testes, problemas relativos a este fenômeno. A simulação também não prevê a ocorrência desta instabilidade quando a turbina opera a passo variável e o alternador autoexcitado.

A histerese do chaveamento dos motores mostrou-se adequada ao bom funcionamento do sistema e a escolha do conjunto de melhor eficiência para operação contínua (1º conjunto a ser chaveado) garante uma melhoria no desempenho do sistema como um todo. Contudo, os baixos rendimentos apresentados pelas bombas (inferiores a 40%) e dos motores (inferiores a 75%), conduziram a um rendimento global da conversão significativamente reduzido. A Figura IV.38 ilustra, para distintos ângulo de disparo, o pouco efeito do gatilho na melhoria da eficiência global. Além disto deve-se considerar o baixo rendimento da instalação hidráulica, devido à presença de hidrômetros e válvulas de retenção, sendo estes acessórios responsáveis por aproximadamente 65% da perda de carga global da instalação.

A fim de justificar os baixos rendimentos da carga, são apresentados, na Figura IV.39, as características de rendimento dos motores, alternador, bombas e instalações.

Como alternativa operativa o chaveamento dos conjuntos motor-bomba mostrou-se bastante versátil para o funcionamento do sistema, com amplas vantagens em termos de acoplamento, desempe-



nho e manutenção.

A vazão de água bombeada é apresentada na Figura IV.40, tendo em vista a distribuição de velocidades do vento na Central de Testes do NERG.

As vazões obtidas em diferentes ângulos de disparo são apresentadas na Figura IV.41, justificando o controle da excitação como um dos procedimentos de otimização do sistema.

#### IV.5. CONCLUSÃO

Foram desenvolvidos e implementados diversos circuitos para controle da operação de um SCEE para carregamento de baterias e bombeamento d'água. Nestes dois casos, alguns esquemas de aproveitamento foram testados em campo aberto e seus resultados comparados com simulação numérica.

A metodologia desenvolvida para tratamento dos dados experimentais e para simulação dos modelos propostos, mostrou-se satisfatória, apresentando um bom nível de concordância entre os resultados, apesar do conhecimento dos diversos fatores que poderiam provocar em distorções.

Para o carregamento de baterias foram testados esquemas em malha aberta e em malha fechada, onde pode-se verificar um melhor desempenho do sistema quando opera a autoexcitação ajustada e controlada. Como discutido, é possível obter boa eficiência



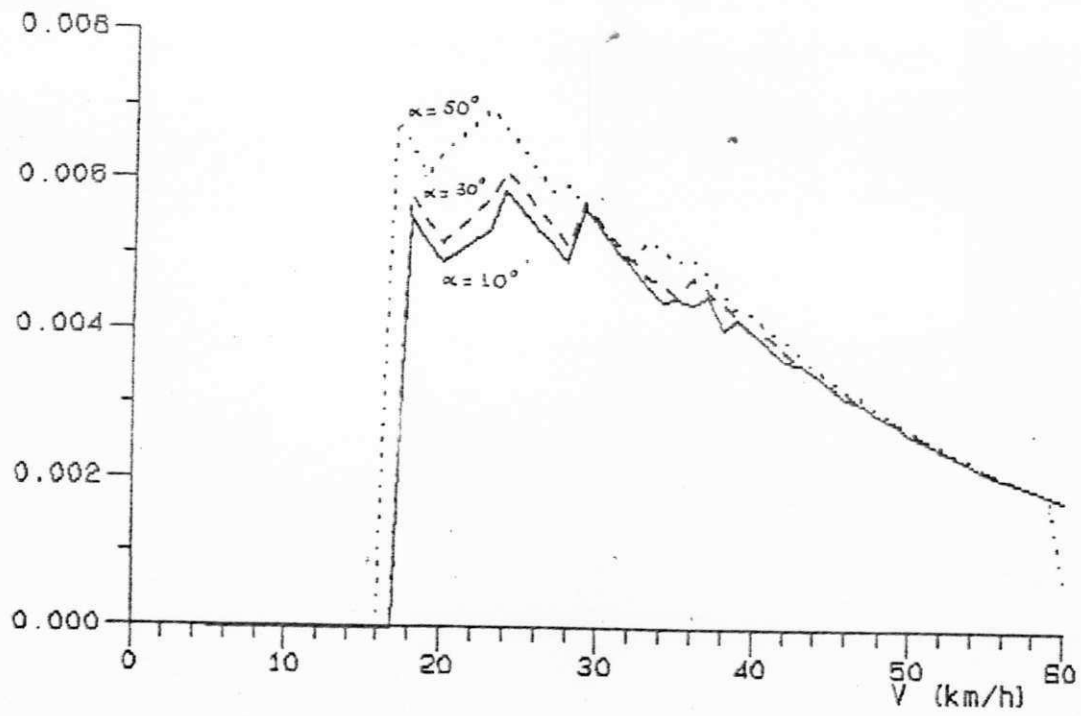


Figura IV.38. Rendimento Global da Conversão para Disparos em 10°, 30° e 50°.

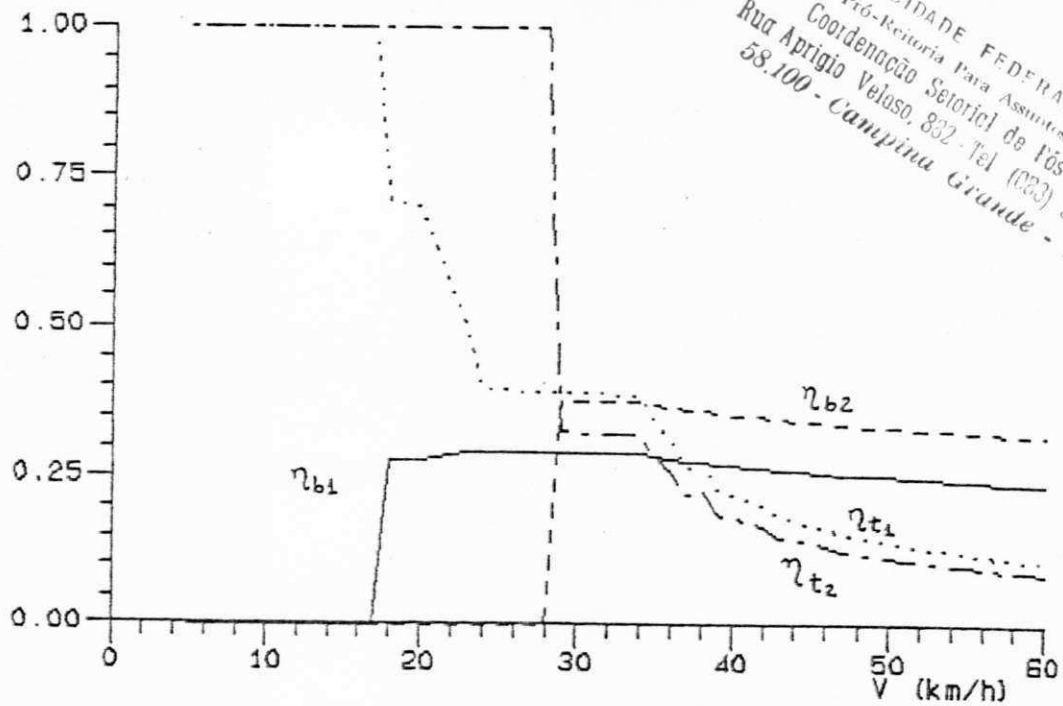


Figura IV.39. Eficiências dos Componentes do SCEE.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 832 - Tel. (033) 321-7222-N. 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

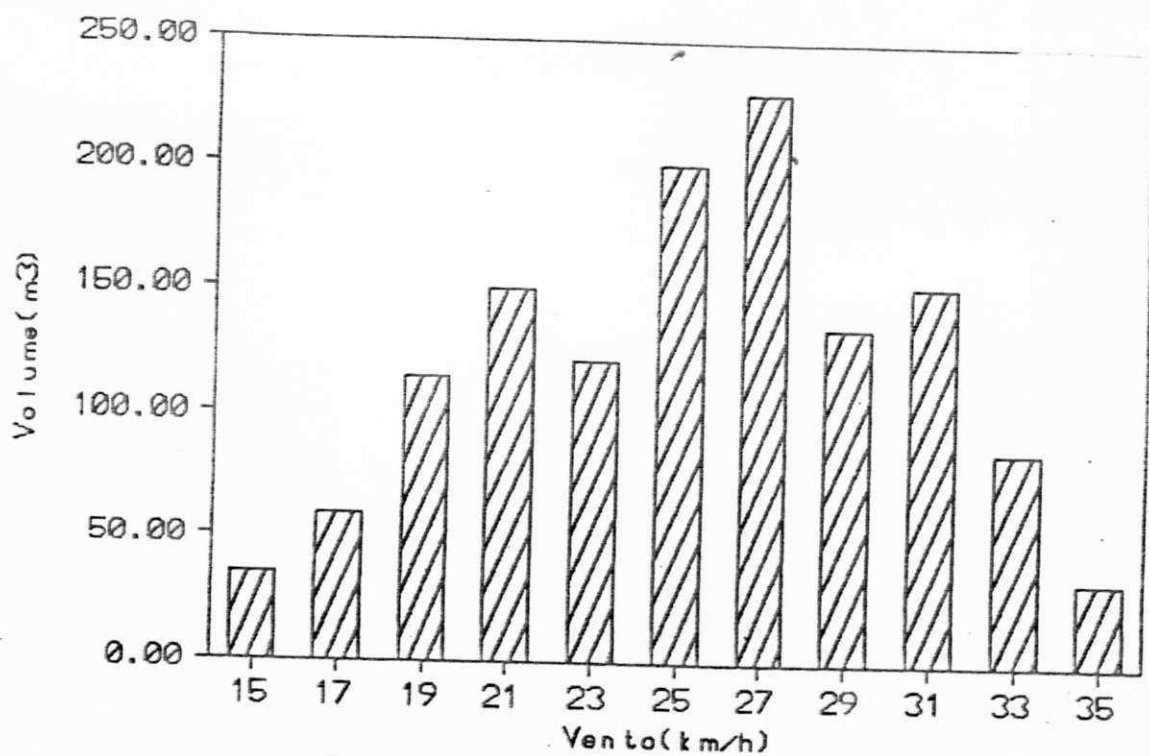


Figura IV.40. Volume de Água Bombeada em 1 Mês de Operação.

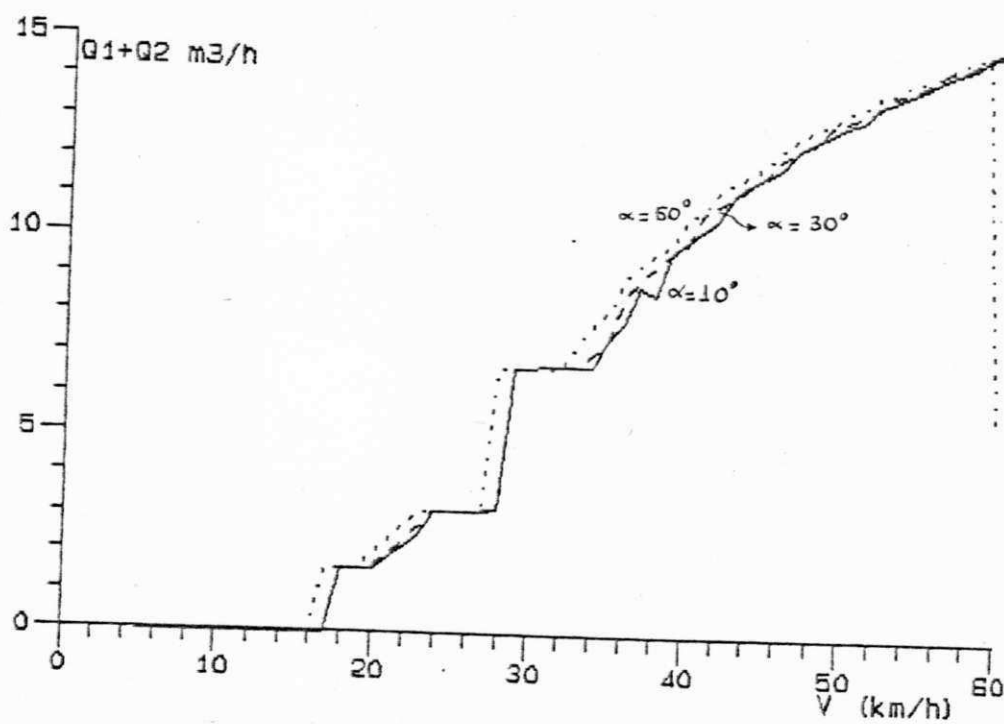


Figura IV.41. Vazão Total Bombeada em Vários Ângulos de Disparo.

com simples ajuste da excitação, de tal forma que o sistema opera a malha aberta mas conduzindo o rotor eólico a um funcionamento próximo a  $\lambda = \lambda_0$ . A operação em malha fechada foi implementada, sem maiores preocupações com um ajuste correto nos parâmetros do controlador PI. Contudo, este apresentou bons resultados mesmo perante as limitações dos circuitos eletrônicos construídos.

O sistema de bombeamento centrífugo mostrou sua viável realização física, com o controle do passo e a autoexcitação servindo de soluções adequadas aos problemas da instabilidade dos conjuntos motor-bomba. Neste sentido, o chaveamento dos conjuntos justificou-se como alternativa de controle e pela versatilidade apresentada. Apesar da baixa eficiência global encontrada, oriunda da escolha de componentes disponíveis no mercado, o sistema operou conforme previsto pela simulação, comprovando as perspectivas de um elevado desempenho que a conexão elétrica proporciona ao bombeamento eólico de água.

A modelagem desenvolvida apresenta elevado grau de complexidade, sendo esta, contudo, necessária à boa representação dos fenômenos físicos e uma adequada comprovação de resultados experimentais. A inclusão da saturação magnética e da saliência síncrona no alternador são justificáveis neste caso. E, contudo, possível descrever o comportamento médio das grandezas mecânicas com modelos simples, onde os fenômenos elétricos são desprezados em quase toda totalidade.

## CAPÍTULO V. DINÂMICA DE UM SISTEMA EÓLICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Neste capítulo são analisados os fenômenos transitórios elétricos e mecânicos de um sistema de bombeamento de água comportando diversos conjuntos motor de indução-bomba centrífuga.

A modelagem dinâmica dos diversos componentes do sistema físico, desde o regime de vento até a dinâmica da água bombeada, é desenvolvida, preservando os aspectos significativos destes transitórios.

A análise é conduzida considerando os parâmetros determinados através das técnicas apresentadas no Capítulo III. Os algoritmos de simulação são desenvolvidos levando em conta a saturação magnética do alternador e a histerese no chaveamento dos motores, utilizando uma técnica de programação modular.

Os resultados de simulação são avaliados em diversas condições de funcionamento e quando ocorrem rajadas de vento de diversas frequências.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321 7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

## V.1. INTRODUÇÃO

A simulação dinâmica de sistemas físicos em computador tem sido metodologia usual e eficaz para a melhor compreensão de fenômenos e previsão da competência do sistema em suportar condições de operação específicas previsíveis de ocorrer na prática.

Em Sistemas de Conversão de Energia Eólica, certos fenômenos transitórios ocorrem continuamente, oriundos do regime aleatório de vento a que estão sujeitos, quando operando em campo aberto.

No caso da geração de energia elétrica para fins de bombeamento centrífugo, os transitórios eletromagnéticos de chaveamento (conexão e desconexão) de conjuntos motor-bomba, o aproveitamento de energia de rajadas de vento, o processo de autoexcitação de alternadores e os transitórios hidráulicos nas bombas e mecânicos na turbina eólica, mapeiam uma quantidade significativa de fenômenos físicos que justificam o presente estudo.

## V.2. MODELOS DINAMICOS

A turbina eólica é modelada através de sua característica básica de coeficiente de conjugado,  $C_q(\lambda, \beta)$  e, o mecanismo centrífugo de variação do passo da pá é representado por sua equação dinâmica:

$$F_a = K_{mola} \cdot (Ax + x_0) + D \cdot dx/dt = m \cdot d^2x/dt^2$$

onde

Ax é o deslocamento do cilindro acionador;

D é o coeficiente de atrito viscoso, estimado em 200 Ns/m, correspondendo a um amortecimento supercrítico de oscilações;

m é a massa do cilindro acionador;

K<sub>mola</sub> é a constante de mola;

F<sub>a</sub> é a força centrífuga no eixo do cilindro;

$$F_a = m r \omega^2 \cos[\sin^{-1}(d/r)]$$

$$\beta = \beta_0 + 2\sin^{-1}(Ax/2b)$$

sendo b, d e r dimensões do mecanismo.

O conjugado fornecido pelo rotor eólico vale :

$$T_t = \frac{1}{2} \rho A R C_q(\lambda, \beta) V^2$$

A modelagem dinâmica de um gerador síncrono constitui assunto bastante analisado (Concordia, 1951; Anderson e Fouad, 1977) e, a representação através das equações em eixos direto e quadratura, girando na velocidade do rotor (modelo de Park), tem sido a mais comumente utilizada. As expressões básicas do modelo dinâmico utilizado são :

$$v_{dg} = -r_g \cdot i_{dg} - \omega_g \cdot \Psi_q + d\Psi_d/dt$$

$$v_{qg} = -r_g \cdot i_{qg} + \omega_g \cdot \Psi_d + d\Psi_q/dt$$

$$v_{fd} = r_{fd} \cdot i_f + d\Psi_{fd}/dt$$

onde

$$\Psi_d = -L_{dg} \cdot i_{dg} + L_{afd} \cdot i_f + C_{kima}$$

$$\Psi_q = -L_{qg} \cdot i_{qg}$$

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} \cdot i_f - 3/2 L_{afd} \cdot i_{dg}$$

O conjugado eletromagnético e a equação mecânica são expressas por :

$$J_T \frac{dw_t}{dt} = T_t - T_g \cdot K_t$$

$$T_g = 3/4 \cdot p_g \cdot (\Psi_d \cdot i_{qg} - \Psi_q \cdot i_{dg})$$

onde  $K_t$  é a relação de transmissão;

$p_g$  é o número de polos;

$J_T$  é o momento de inércia do conjunto alternador-turbina, referido ao eixo do rotor eólico;

$w_t = 2 \cdot w_g / (p_g \cdot K_t)$  é a velocidade mecânica do rotor eólico em rad/s.

Na representação do alternador foram desprezados os efeitos de enrolamentos amortecedores, que no caso do gerador de SCEE Elektro, consiste da indução de corrente no circuito magnético sólido do rotor. As dificuldades da determinação precisa dos parâmetros destes enrolamentos e a complexidade do aumento no número de variáveis são as razões da utilização de um modelo mais simples.

A autoexcitação, provida por retificador em ponte completa semicontrolada, é representada pelo cálculo iterativo da tensão no circuito de campo e das componentes de corrente de

campo em eixo direto e quadratura, através da determinação do ângulo de carga do alternador. O conversor estático, como não representa carga principal ao alternador, é modelado simplificada-mente através de suas características estáticas:

$$v_{fd} = \frac{3\sqrt{6}}{2\sqrt{2}\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) [v_{dg}^2 + v_{qg}^2]^{1/2}$$

$$i_{df} = C_{kret} \cdot i_f \cdot \cos(\delta + \phi)$$

$$i_{qf} = C_{kret} \cdot i_f \cdot \sin(\delta + \phi)$$

$$\text{onde } C_{kret} = \sqrt{3} \cdot (1 + \cos \alpha)^{1/2} / \pi$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} [\sin \alpha / (1 + \cos \alpha)]$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} [v_{qg} / v_{dg}]$$

A fim de implementar o processo de autoexcitação, um modelo para a saturação magnética do alternador é desenvolvido, através do cálculo do fator de saturação, calculado através da relação entre a característica de saturação e a curva de entreferro, como apresentado no Capítulo III.

A corrente do alternador, em variáveis transformadas, é calculada pela soma das correntes dos motores e a corrente de campo.

$$i_{dg} = i_{df} + \sum i_{dmi}$$

$$i_{qg} = i_{qf} + \sum i_{qmi}$$

Os motores de indução são representados pelas equações em variáveis em eixo direto e quadratura, com velocidade dos eixos de referência igual à velocidade do rotor do alternador e,



portanto, expressas para o i-ésimo motor da seguinte forma :

$$V_{dg} = r_{si} \cdot i_{dmi} - w_g \cdot \Psi_{qmi} + d\Psi_{dmi}/dt$$

$$V_{qg} = r_{si} \cdot i_{qmi} + w_g \cdot \Psi_{dmi} + d\Psi_{qmi}/dt$$

$$0 = r_{ri} \cdot i_{dri} - (w_g - w_{mi}) \cdot \Psi_{qri} + d\Psi_{dri}/dt$$

$$0 = r_{ri} \cdot i_{qri} + (w_g - w_{mi}) \cdot \Psi_{dri} + d\Psi_{qri}/dt$$

onde

$$\Psi_{dmi} = L_{ssi} \cdot i_{dmi} + M_{smi} \cdot i_{dri}$$

$$\Psi_{qmi} = L_{ssi} \cdot i_{qmi} + M_{smi} \cdot i_{qri}$$

$$\Psi_{dri} = L_{rri} \cdot i_{dri} + M_{smi} \cdot i_{dmi}$$

$$\Psi_{qri} = L_{rri} \cdot i_{qri} + M_{smi} \cdot i_{qmi}$$

Sendo a equação mecânica dos motores expressa por :

$$\frac{2 \cdot J_{mi}}{P_{mi}} \cdot \frac{dw_{mi}}{dt} = T_{mi} - T_{bi}$$

onde  $T_{mi} = 3 \cdot P_{mi} \cdot (\Psi_{qri} \cdot i_{dri} - \Psi_{dri} \cdot i_{qri})/4$

$T_{bi}$  é o conjugado da i-ésima bomba;

$J_{mi}$  é o momento de inércia do conjunto motor-bomba;

$P_{mi}$  é o número de polos do i-ésimo motor.

A impedância da linha de transmissão elétrica é acrescentada à impedância de dispersão do alternador a fim de representar adequadamente os 100 m de fiação elétrica que separam o aerogerador e a instalação hidráulica.

A bomba centrífuga é modelada através de suas características estáticas  $H(Q, w_m)$  e  $\eta(Q, w_m)$ , sendo suas perdas mecânicas

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
 Instituto de Física  
 Caixa Postal 118  
 Rio Grande, RS  
 96201-900  
 Telefone (51) 321-7222  
 Fax (51) 321-7222  
 E-mail: ifis@ufrgs.br  
 Rua Augusto Veloso, 882 - Val (083) 321-7222 - FURVIBH  
 58100 - Campinas Grande

e internas calculadas como apresentado no Capítulo III. Assim, o conjugado no eixo da bomba vale :

$$T_{bi} = P_{mec i} / \omega_{mi}$$

$$P_{bi} = 736 \cdot h_{mi} \cdot q_{mi} / 270 + P_{perdas}$$

onde  $P_{bi}$  é a potência mecânica no eixo da bomba  $i$ ;

$h_{mi}$  é a altura manométrica da bomba  $i$  (m);

$q_{mi}$  é a vazão da bomba  $i$  ( $m^3/h$ );

$P_{perdas}$  representam as perdas mecânicas e internas da bomba.

O acoplamento instalação hidráulica-bomba centrífuga é expresso pela equação diferencial que representa a dinâmica da água na tubulação, tal como :

$$\frac{d q_{mi}}{dt} \cdot \frac{L_t}{g \cdot \pi \cdot d_t^5} = h_{mi} - \Delta h_i - H_{esti}$$

onde  $q_{mi}$  é a vazão na  $i$ -ésima bomba em  $m^3/h$ ;

$L_t$  é o comprimento da tubulação (m);

$g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 m/s^2$ );

$d_t$  é o diâmetro interno da tubulação (m);

$h_{mi}$  é a altura manométrica, correspondendo à pressão fornecida pela bomba (m);

$\Delta h_i$  é a perda de carga na tubulação

$$= K_p \cdot q_{mi}^2 \text{ (m);}$$

$H_{esti}$  é a altura geométrica de bombeamento (m).

Desta forma, ficam representados os fenômenos mais

significativos do comportamento transitório deste SCEE, onde as características e os parâmetros destes modelos propostos estão apresentados nos Capítulos III e IV.

Uma representação eficiente para o regime de vento, foi apresentada por Anderson e Bose (1983), onde a velocidade de vento é composta por quatro componentes : velocidade média constante, rajada cossenoidal, rampa e ruído aleatório. As expressões deste modelo são :

$$V = V_M + V_{gust} + V_{ra} + V_{no}$$

onde  $V$  é a velocidade de vento instantânea;

$V_M$  é um valor constante médio de vento;

$$V_{gust} = \frac{V_{gmax}}{2} \cdot \{1 - \cos[2\pi \cdot (t - t_{gi}) / t_g]\}$$

onde  $t_g$  é o período da rajada de modo que

se  $t < t_{gi}$ ,  $V_{gust} = 0$

se  $t > t_{gi} + t_g$ ,  $V_{gust} = 0$

$$V_{ra} = V_{rmax} \cdot [1 - (t - t_{rf}) / (t_{ri} - t_{rf})]$$

onde se  $t < t_{ri}$ ,  $V_{ra} = 0$

se  $t > t_{rf}$ ,  $V_{ra} = V_{rmax}$

$$V_{no} = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^n [S_V(w_i) \cdot \Delta w]^{1/2}} \cdot \cos(w_i \cdot t + \phi_i)$$

onde  $w_i = (i - .5) \cdot \Delta w$

$\phi$  = variável aleatória com densidade de probabilidade uniforme no intervalo de 0 a  $2\pi$ ;

$S_v(w_i)$  é a função densidade espectral definida por:

$$S_v(w_i) = \frac{2 \cdot K_D \cdot F^2 \cdot |w_i|}{w^2 \cdot \{1 + [F \cdot w_i / (V_M - V)]^2\}^{4/3}}$$

onde  $K_D$  é o coeficiente de arrasto da superfície = 0.004 .

F é a escala da turbulência  
500 m

Vários estudos tem demonstrado que os valores de  $n = 50$  e  $\Delta w = 0.5$  a  $2.0$  rad/s, proporcionam resultados com excelente precisão na modelagem de ruídos de vento, ( Anderson e Bose, 1983).

A Figura V.1 ilustra este modelo, identificando os quatro componentes citados e a versatilidade de sua representação.

### V.3 SIMULAÇÃO DINÂMICA

#### V.3.1. Algoritmos Utilizados

O programa de simulação digital, para análise do comportamento dinâmico do SCEE, foi implementado em linguagem Fortran para microcomputadores IBM-PC, baseada na metodologia do S.O.S.I.E. ( Simulation Organiséé de Systemes Interconnectés Electriques), desenvolvida no L.E.E.I. do Institut National Polytechnique de Toulouse, (Grandpierre, 1987).

As principais características da metodologia

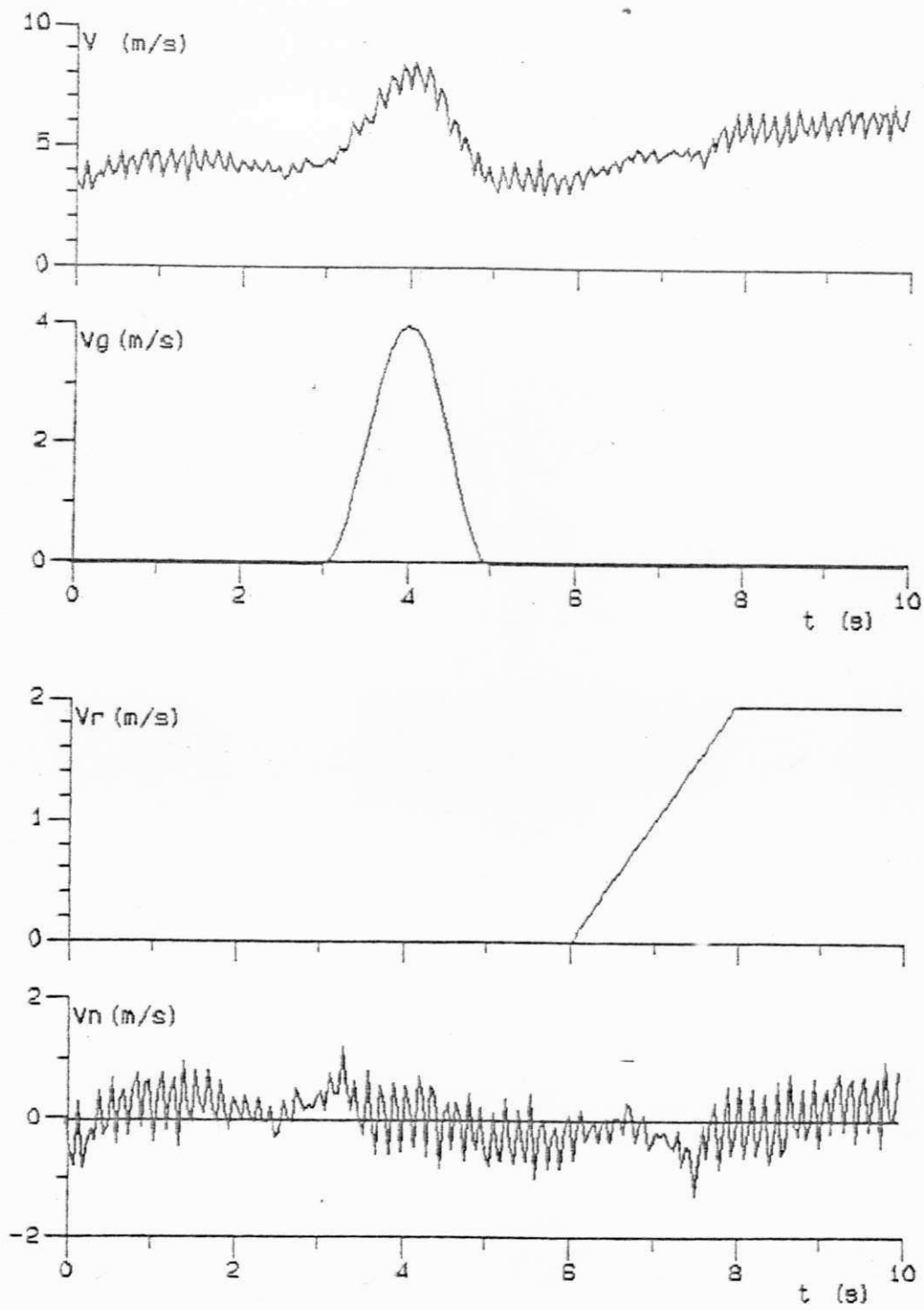


Figura V.1. Componentes do Modelo de Vento

S.O.S.I.E. são modularidade, paralelismo de execução e a definição de uma sintaxe de programação.

No estudo de um sistema, é usual a decomposição deste em seus diversos componentes mais simples. Na metodologia S.O.S.I.E., o princípio da modularidade é aplicado a nível funcional; assim, cada módulo, correspondente a uma entidade física, se comunica com outros módulos através de variáveis de entrada e saída, determinando uma dinâmica de execução própria. As variáveis de cálculos intermediários não são acessíveis.

É criado um módulo de gestão, que sincroniza as diversas tarefas dentro do programa. Assim, no módulo de gestão são definidas quais tarefas serão executadas, isto é, quais módulos terão suas equações resolvidas, num determinado instante do relógio-base.

Uma sintaxe de programação rígida orienta a confecção do programa em três partes :

- A parte pré-processadora, onde são declaradas e inicializadas as variáveis e definidos os parâmetros de cada módulo;
- A parte processadora, que consiste do módulo de gestão e a simulação propriamente dita em todos os módulos;
- A parte pós-processadora, responsável pela exploração, armazenamento e tratamento de resultados.

Seguindo esta estrutura de programação, o sistema eólico de bombeamento foi dividido, em termos de seu equacionamento, em 6 módulos físicos que representam: o regime de vento (módulo 1), a turbina eólica (módulo 2), o gerador elétrico (módulo 3), o circuito de excitação (módulo 4), os motores de indução (módulo 5) e as bombas centrífugas (módulo 6). Um módulo adicional foi criado para representar o processo iterativo, onde são recalculadas as equações elétricas, a fim de considerar o efeito da saturação magnética e da autoexcitação. A utilização deste módulo iterativo foi necessária, apesar de constituir uma ruptura na modularidade da estrutura S.O.S.I.E..

No módulo 1, é calculado cada componente de interesse do regime de vento, sendo possível selecionar os componentes desejados e atualizar seus parâmetros.

O módulo 2 comporta as equações para cálculo do coeficiente de conjugado do rotor eólico, a dinâmica do sistema massa-mola do mecanismo centrífugo de controle do passo e a equação mecânica de rotação da turbina, sendo suas equações diferenciais resolvidas numericamente através do algoritmo de Runge-Kutta de 2a. ordem.

As equações elétricas da armadura do alternador são resolvidas no módulo 3, definindo-se as tensões terminais que aparecem no circuito de campo e barramento dos motores. Estão incluídas, portanto, as impedâncias da linha de transmissão no cálculo das tensões terminais dos motores.

O processo de autoexcitação estática do alternador é calculado no módulo 4, através das equações do circuito de campo e as expressões que representam o retificador semicontrolado, utilizando-se o algoritmo de Runge-Kutta de 4a. ordem.

As equações elétricas dos motores de indução são resolvidas no módulo 5, utilizando-se o algoritmo de Runge-Kutta de 4a. ordem. O chaveamento destes motores é obtido pela definição de uma variável lógica que vale :

$$l_{chav}(J) = 1 \text{ se } w_t \geq w_{tcon}(J)$$

$$l_{chav}(J) = 0 \text{ se } w_t \leq w_{tdesc}(J)$$

onde  $l_{chav}(J)$  é a variável lógica do motor  $J$ ;

$w_t$  é a rotação da turbina;

$w_{tcon}(J)$  é a rotação de conexão do motor  $J$ ;

$w_{tdesc}(J)$  é a rotação de desconexão do motor  $J$ .

Assim é possível definir quais motores estão ligados ao sistema e solucionar a operação no intervalo  $w_{tdesc} < w_t < w_{tcon}$ , que depende do histórico do funcionamento do sistema.

As equações hidráulicas e mecânicas dos conjuntos motor-bomba são solucionadas no módulo 6, através do algoritmo de Runge-Kutta de 2a. ordem. O processo de cálculo independe dos acontecimentos do módulo 5, isto é, quais motores estão conectados, possibilitando o conhecimento do transitório de desaceleração dos motores e de ruptura do bombeamento.

Os módulos 2 e 6, por representarem dinâmicas lentas,



são calculados utilizando-se intervalos de integração maiores que  $1.10^{-3}$ . Os intervalos de integração dos módulos 3, 4 e 5 são iguais, já que estão interrelacionados no módulo iterativo, e normalmente inferiores a  $1.10^{-3}$ , dependendo do fenômeno a se analisar.

Na implementação do módulo iterativo (módulo 7), a atualização das indutâncias do alternador, utilizada para representar o efeito de saturação magnética e, o cálculo da corrente gerada tornam o processo de resolução das equações de tensão terminal praticamente insolúvel pelos métodos de integração, devido à estrutura específica das equações. A solução proposta consiste em calcular a 1ª estimativa das tensões terminais por diferenciação dos termos  $d\psi/dt$ , tal como :

$$v_{dg}^{k+1} = -r_g \cdot i_{dg}^k - w_g \cdot \psi_{qg}^k + \frac{\psi_{dg}^k - \psi_{dg}^{k-1}}{h_m(3)}$$

$$v_{qg}^{k+1} = -r_g \cdot i_{qg}^k + w_g \cdot \psi_{dg}^k + \frac{\psi_{qg}^k - \psi_{qg}^{k-1}}{h_m(3)}$$

onde  $h_m(3)$  é o intervalo de integração do módulo 3  
 $k$  indica o instante de cálculo

Após os cálculos de todas as correntes dos motores, da excitação e a atualização das indutâncias do alternador, os enlaces de fluxo futuros (instante  $k+1$ ) são obtidos e novas estimativas das tensões terminais são feitas através das expressões :

$$v_{dg}^{k+1} = -r_g \cdot i_{dg}^k - w_g^k \cdot v_{qg}^k + \frac{v_{dg}^{k+1} - v_{dg}^{k-1}}{2 \cdot h_m(3)}$$

$$v_{qg}^{k+1} = -r_g \cdot i_{qg}^k + w_g^k \cdot v_{dg}^k + \frac{v_{qg}^{k+1} - v_{qg}^{k-1}}{2 \cdot h_m(3)}$$

O processo iterativo continua pelo cálculo das novas estimativas de enlaces de fluxo e tensões terminais, terminando quando a diferença entre as amplitudes das tensões terminais entre duas estimativas consecutivas, for inferior a um erro estipulado.

### V.3.2. Avaliação dos Algoritmos

Os algoritmos utilizados no módulo iterativo apresentam comportamentos divergentes em termos numéricos. Toda integração torna-se mais precisa quanto menor o intervalo de cálculo utilizado, enquanto a diferenciação numérica é divergente em intervalos muito reduzidos, já que tende a reforçar pequenas oscilações nas variáveis envolvidas. O compromisso de conciliar estas tendências contrárias torna-se difícil de se obter em transitórios mais severos, como na conexão do 1º motor e, principalmente, na entrada do 2º motor.

Considerando que os transitórios de armadura do alternador apresentam constantes de tempo muito rápidas em relação à dinâmica das outras variáveis elétricas do sistema, os termos  $dV/dt$  podem ser desprezados sem perda significativa de precisão

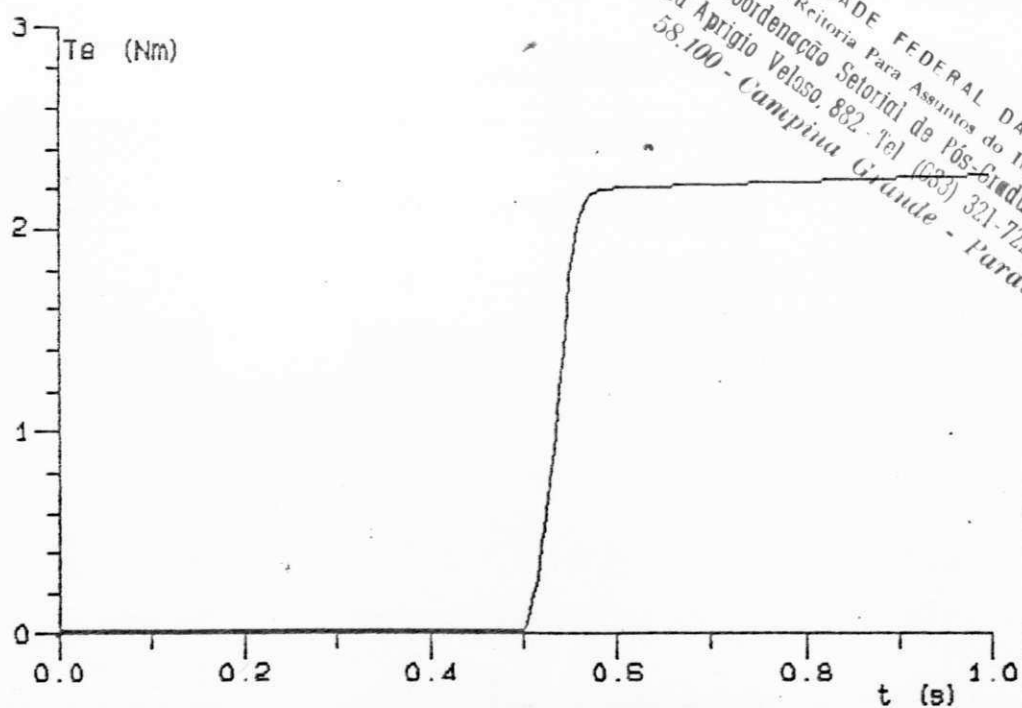


Figura V.2. Transitório de Conjugado Eletromagnético na Partida da Autoexcitação com  $d\psi/dt$ .

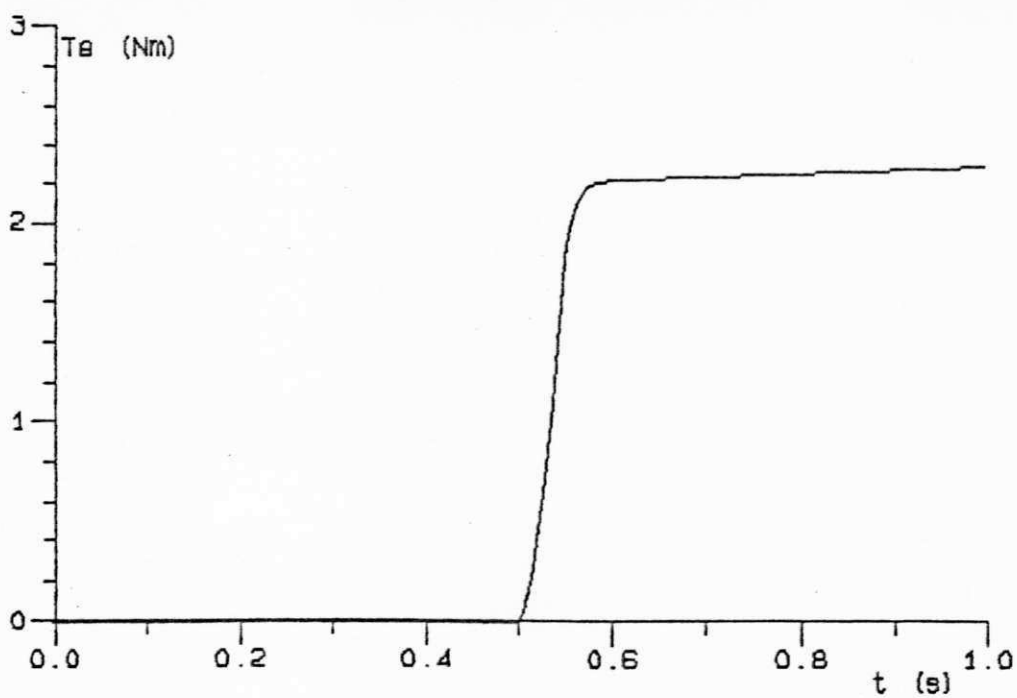


Figura V.3. Transitório Conjugado Eletromagnético na Partida da Autoexcitação sem  $d\psi/dt$ .

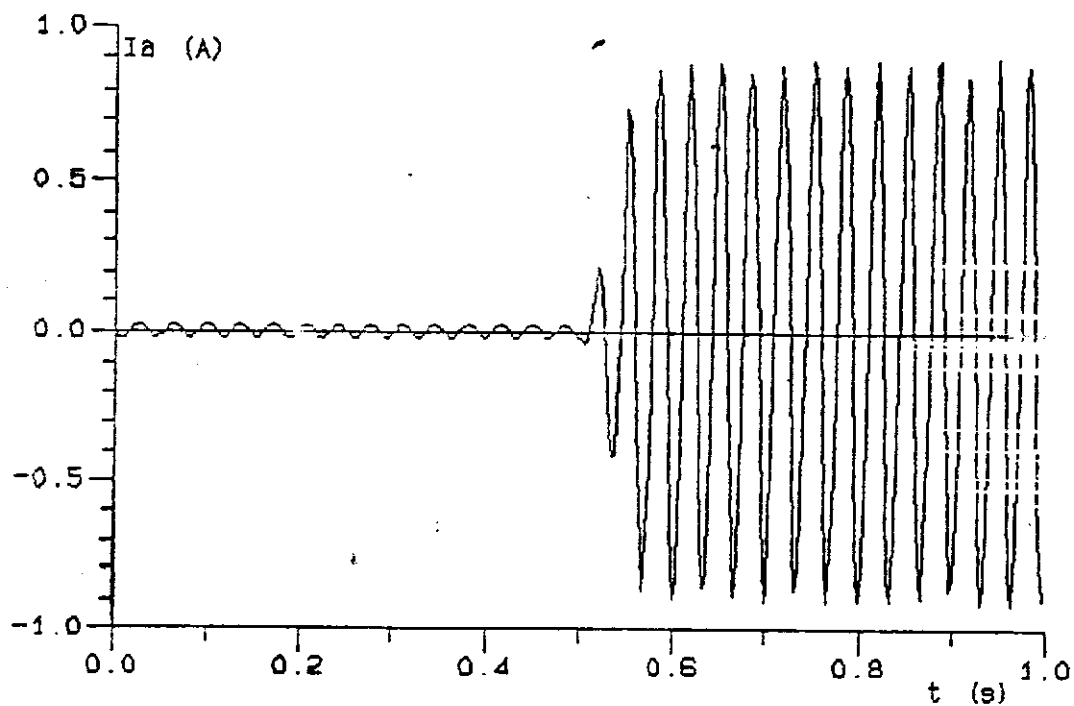


Figura V.4. Transitório de Corrente de Excitação  
Repercutida na Fase, com  $d\Psi/dt$ .

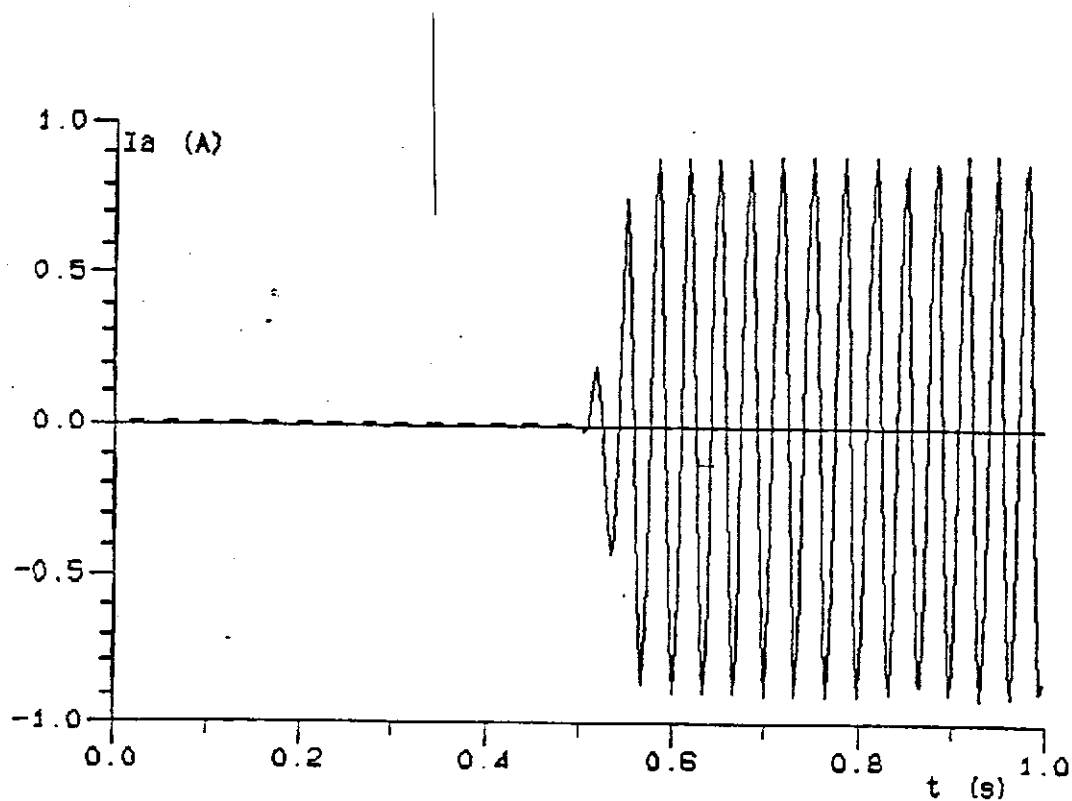


Figura V.5. Transitório de Corrente de Excitação  
Repercutida na Fase, sem  $d\Psi/dt$ .

dos demais resultados. Neste caso, o conjugado do alternador comporta-se em termos médios sem grandes oscilações. As Figuras V.2, V.3, V.4 e V.5 ilustram os transitórios de partida do processo de autoexcitação em ventos de 4 m/s, para os dois algoritmos propostos. As Figuras V.6, V.7, V.8 e V.9 repetem esta comparação para o transitório de entrada do 1º motor em ventos de 6m/s. Nestas figuras pode-se identificar os problemas de convergência do algoritmo com  $d\psi/dt$ , que desaconselham sua utilização. Este algoritmo não converge na simulação da entrada do 2º motor, sendo portanto, substituído, na análise do comportamento dinâmico deste sistema, pelo algoritmo sem  $d\psi/dt$ .

#### V.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO

##### V.4.1. Transitórios de Chaveamento dos Motores

A conexão de um motor elétrico aos terminais de um aerogerador representa instantaneamente uma brusca variação de carga no eixo da turbina. Os elevados valores do conjugado eletromagnético transitório provocam uma redução momentânea na rotação da turbina, podendo causar, em baixas velocidades de vento, a conseqüente desconexão deste motor. Após passado o transitório de conexão, o conjugado eletromagnético se estabiliza em valor menor, sendo que a dinâmica subsequente depende das variações de velocidade de vento. A Figura V.10 ilustra o transitório de conexão do 1º motor, em termos da rotação e conjugado da turbina e, as Figuras V.11 e V.12 apresentam as variações na tensão

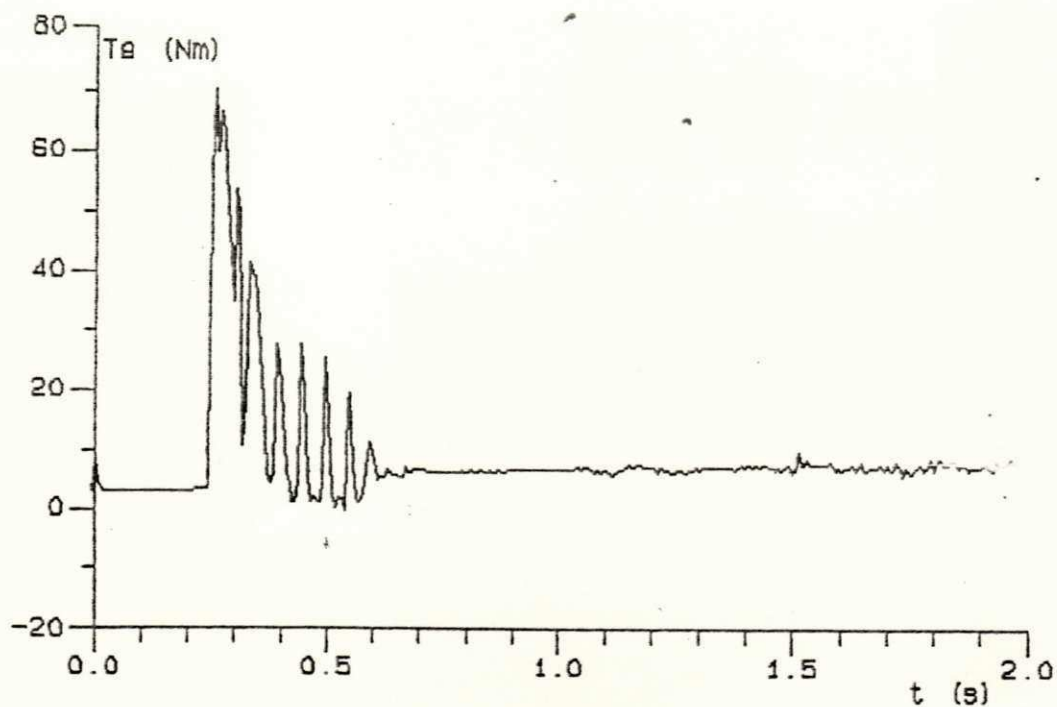


Figura V.6. Transitório de Conjugado Eletromagnético na Entrada do 1º Motor, com  $d\psi/dt$ .

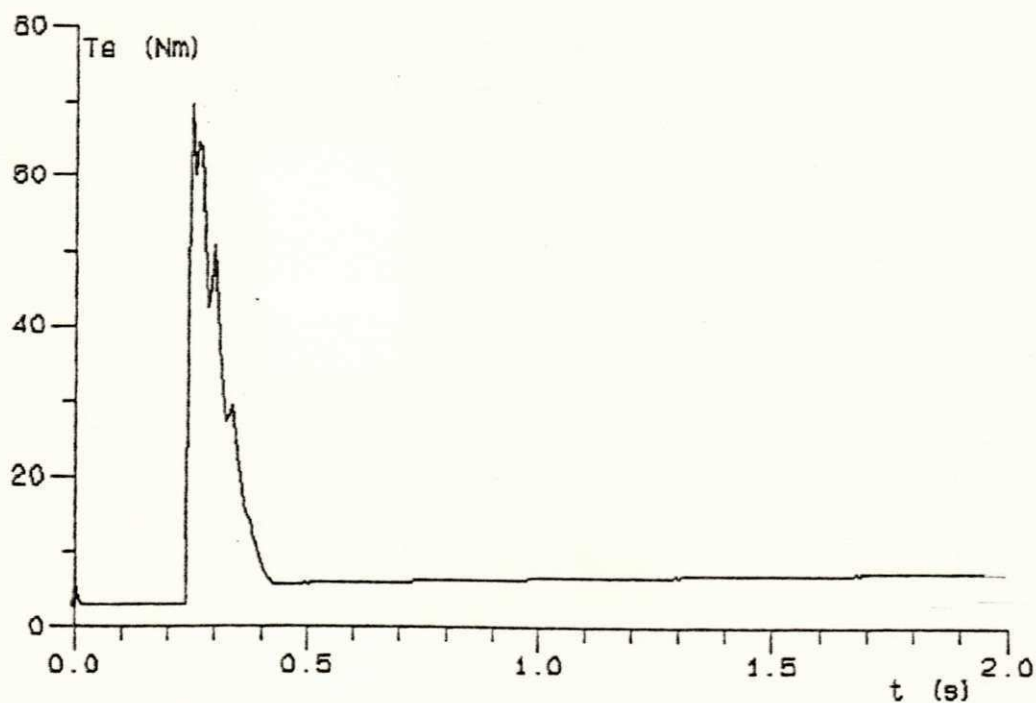


Figura V.7. Transitório de Conjugado Eletromagnético na Entrada do 1º Motor, sem  $d\psi/dt$ .

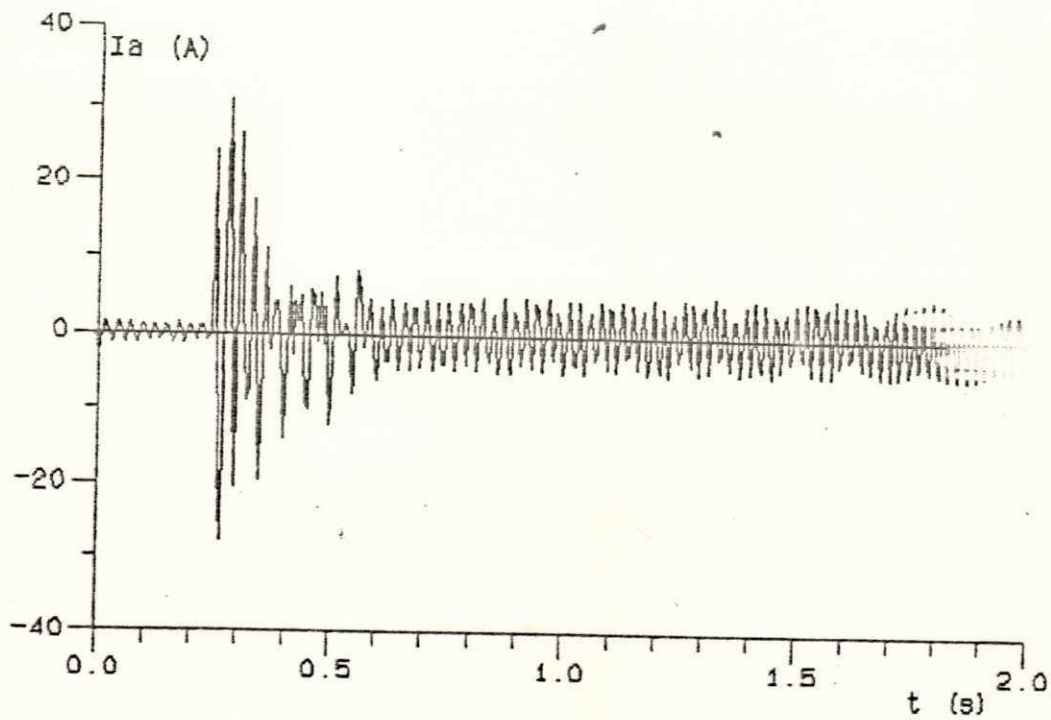


Figura V.8. Corrente de Fase do Alternador na Partida do 1º Motor, com  $d\Psi/dt$ .

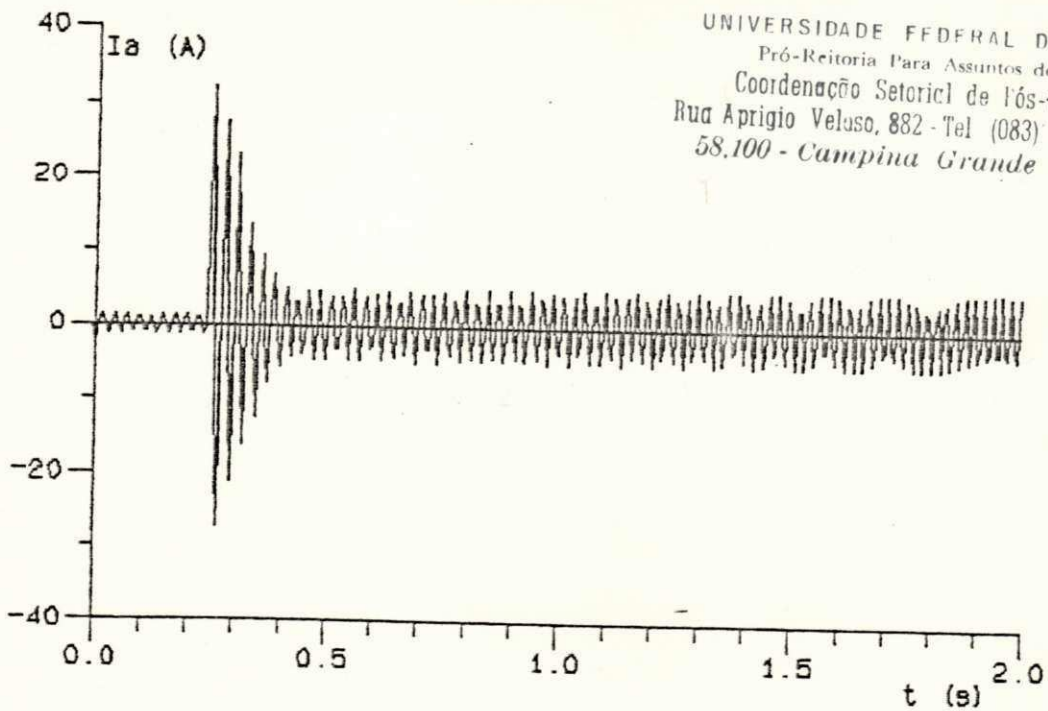


Figura V.9. Corrente de Fase do Alternador na Partida do 1º Motor, sem  $d\Psi/dt$ .

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321-7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

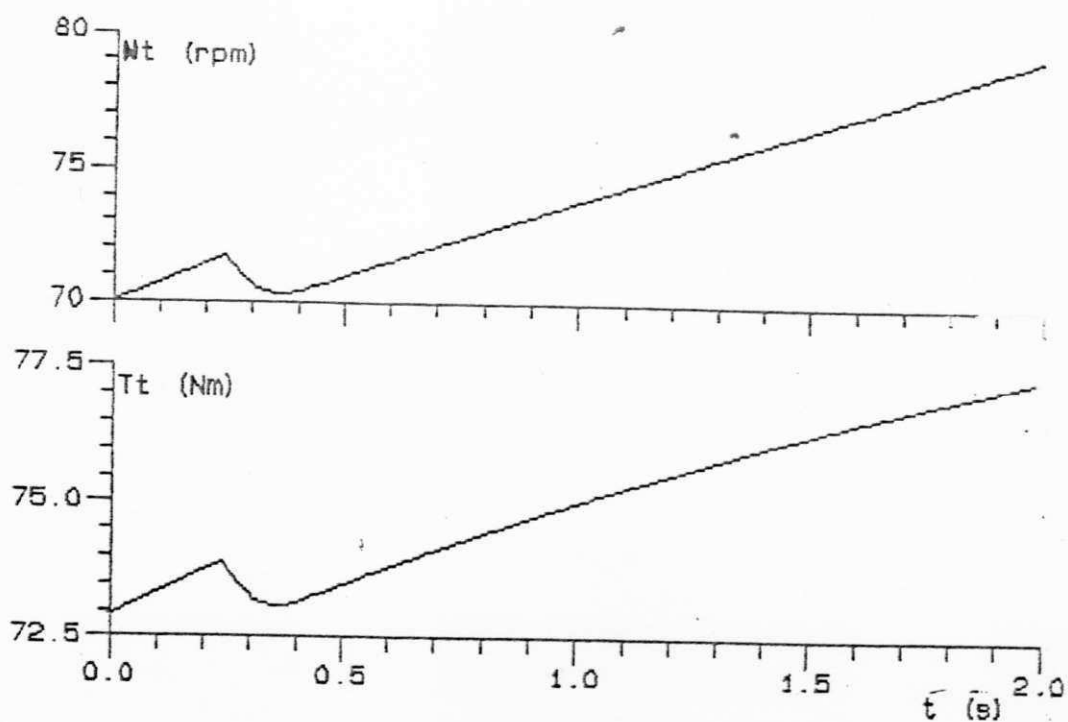


Figura V.10. Transitórios de Rotação e Conjugado no Rotor Eólico na Partida do 1º Motor.

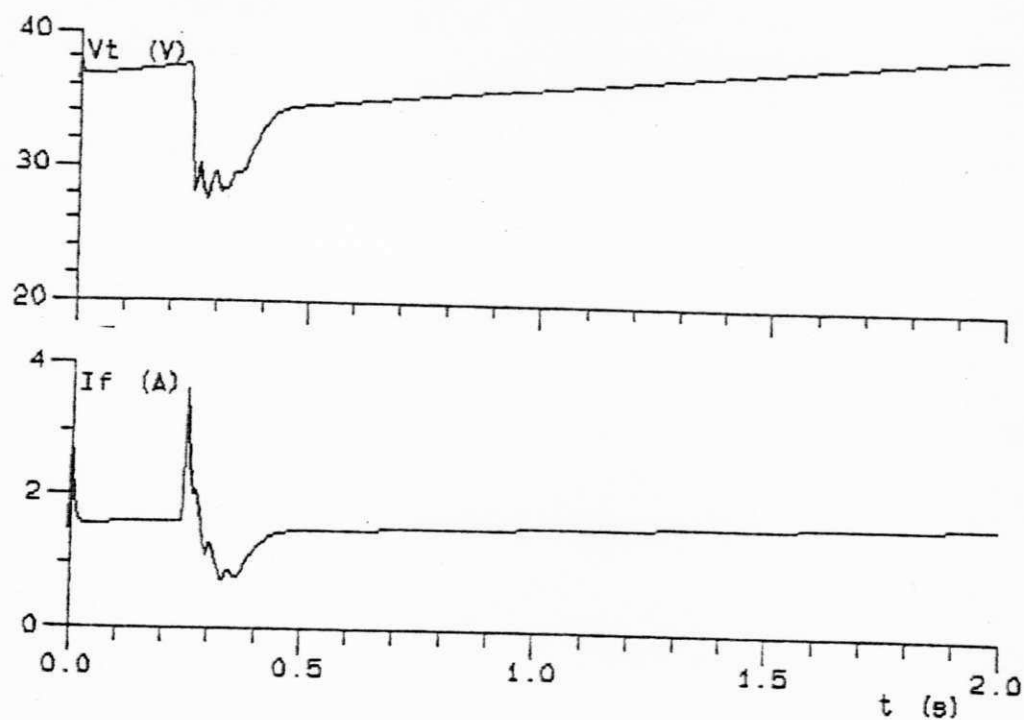


Figura V.11. Transitórios de Tensão Terminal e Corrente de Excitação na Partida do 1º Motor.



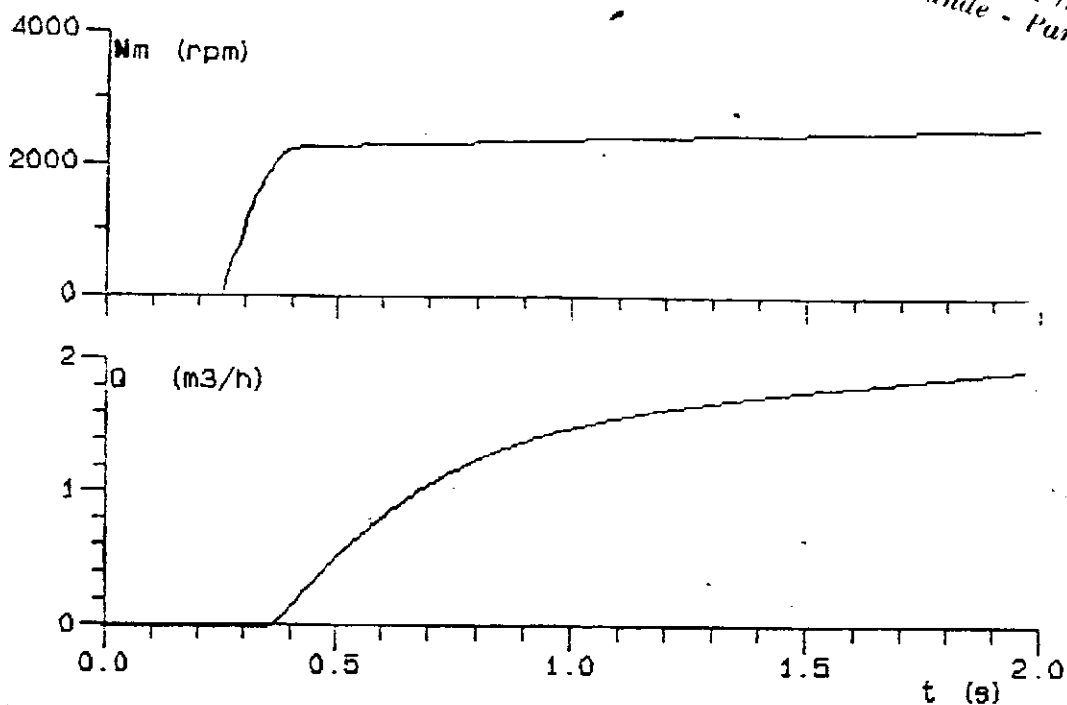


Figura V.12. Transitórios de Rotação e Vazão  
no 1º Conjunto Motor-Bomba.

terminal, corrente de excitação, rotação do motor conectado e vazão bombeada neste processo, a vento constante igual a  $6\text{ m/s}$ .

A conexão do 2º motor provoca transitórios mais severos já que ocorrem quedas bruscas de tensão, que provocam oscilações da corrente de excitação e variações de corrente no 1º motor. Os transitórios eletromagnéticos produzem uma reação mais sensível na rotação da turbina, obrigando a uma histerese maior do chaveamento. Ocorre redução na vazão da 1ª bomba, devido as variações de frequência e, conseqüentemente, de rotação da bomba. As Figuras V.13, V.14, V.15 e V.16 apresentam os transitórios da conexão do 2º motor.

Observando os enlaces de fluxo rotóricos dos motores de indução, na Figura V.17, pode-se verificar a eficácia da

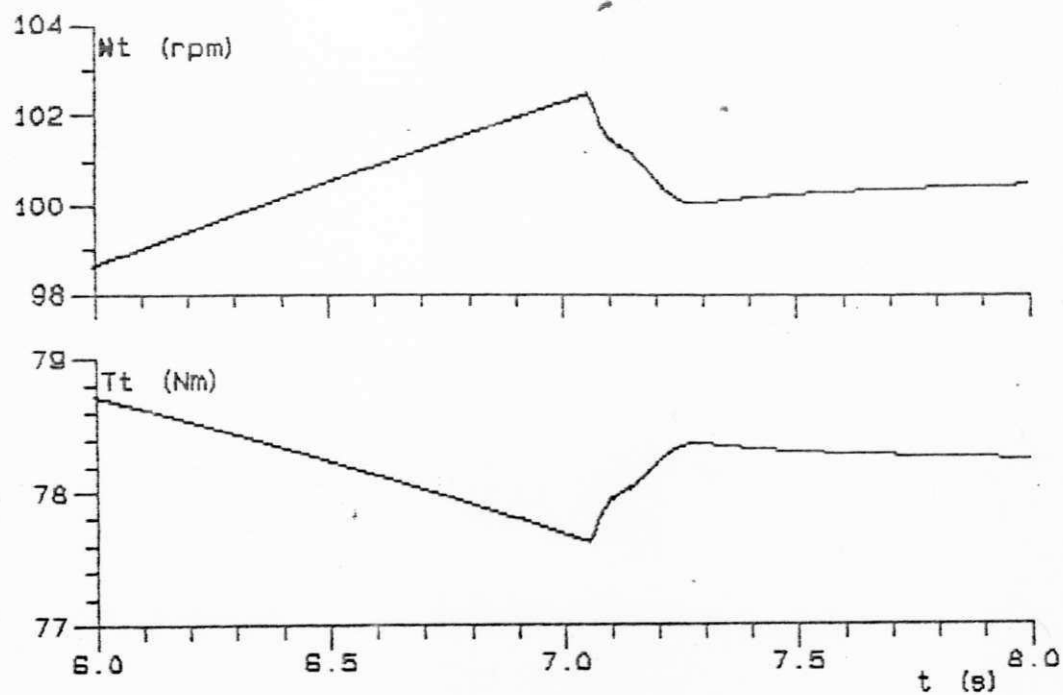


Figura V.13. Transitórios de Rotação e Conjugado do Rotor Eólico na Partida do 2º Motor.

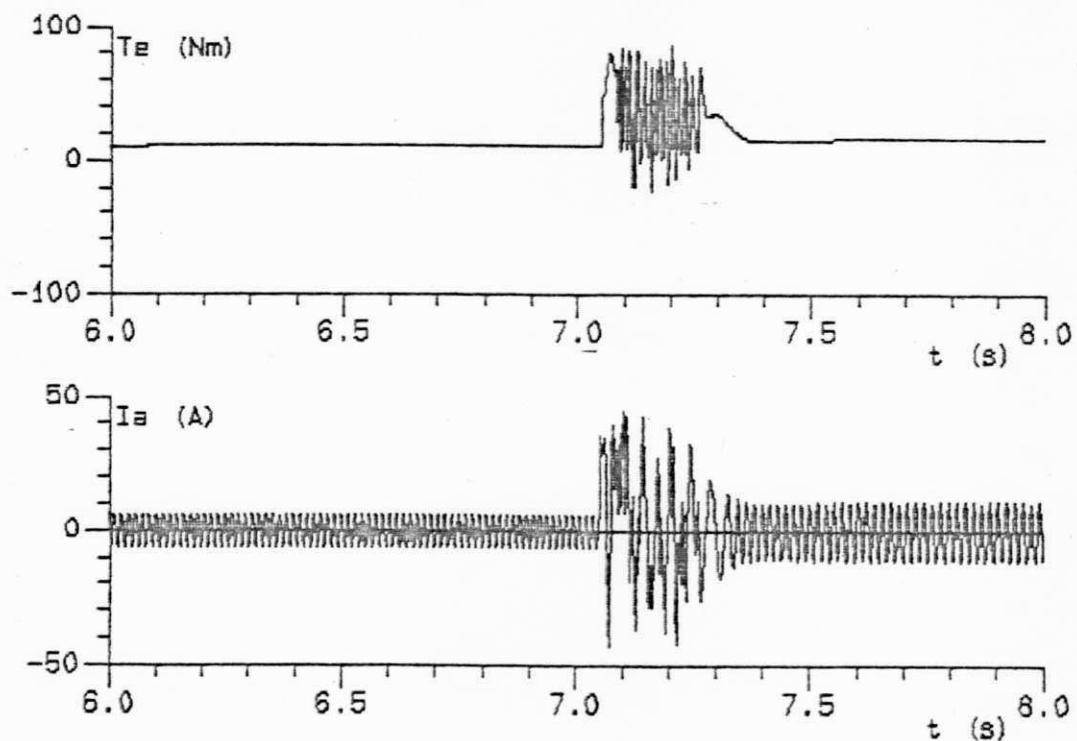


Figura V.14. Conjugado Eletromagnético e Corrente de Fase na Partida do 2º Motor.

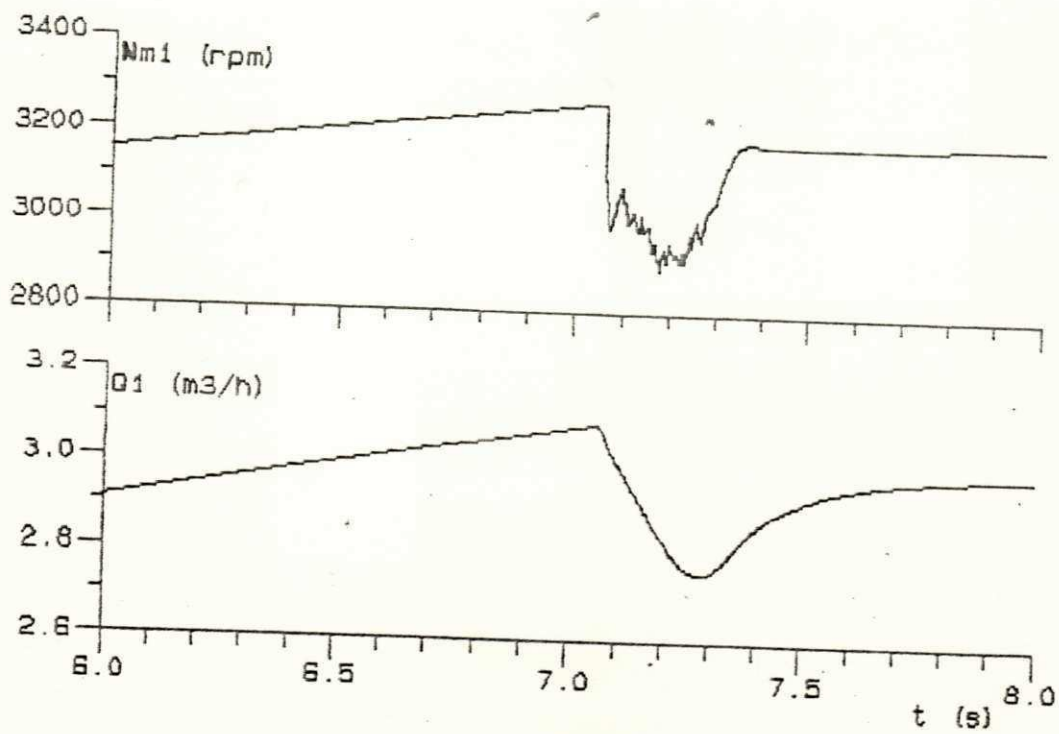


Figura V.15. Rotação e Vazão do 1º Motor-Bomba  
na Partida do 2º Motor.

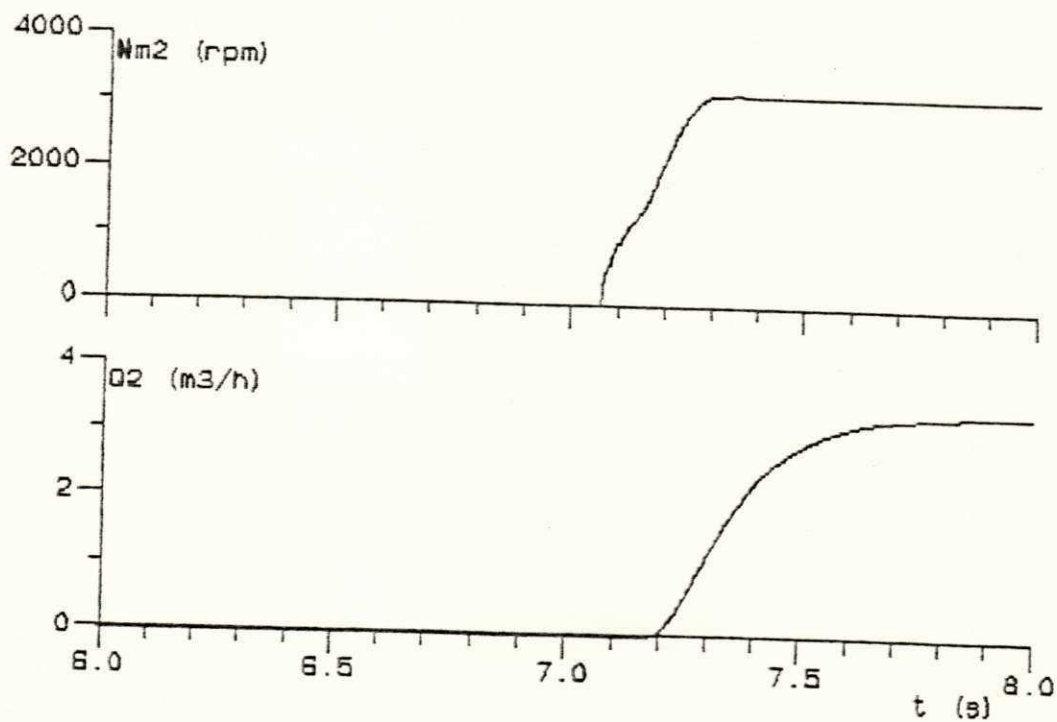


Figura V.16. Rotação e Vazão da 2ª Motor-Bomba  
na Partida do 2º Motor.

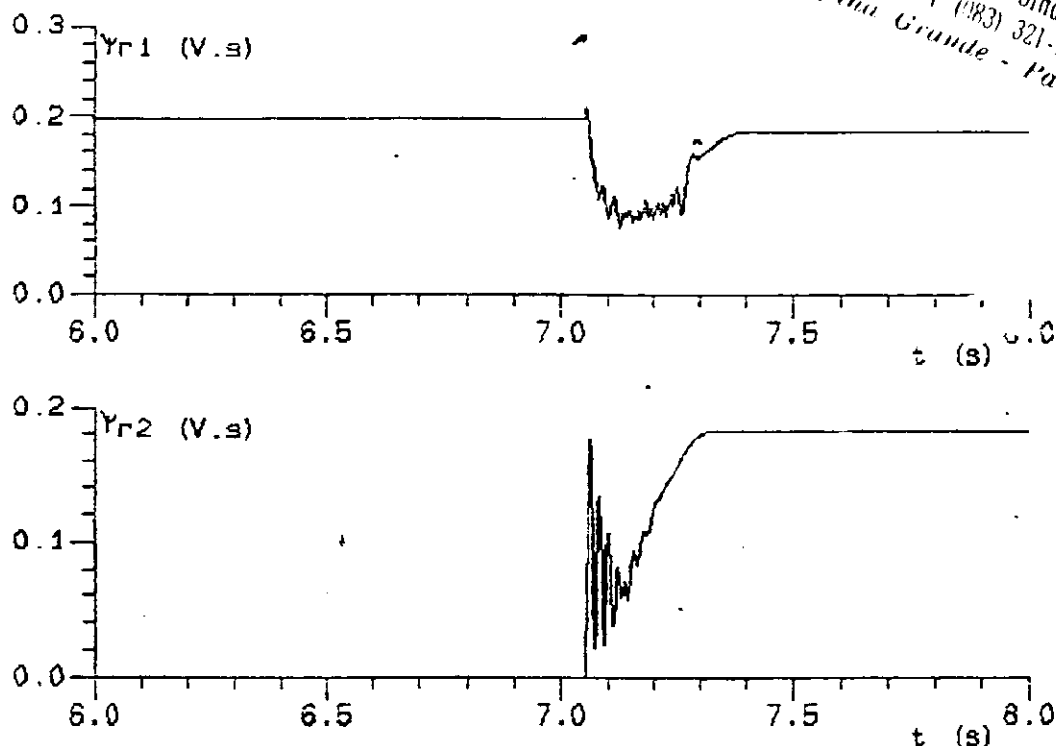


Figura V.17. Enlaces de Fluxo Rotóricos dos 1º e 2º Motores na Partida do 2º Motor.

autoexcitação em garantir fluxo aproximadamente constante para variações de frequência, sem contudo conseguir manter estes níveis na variação brusca de carga, como na entrada do 2º motor. Isto pode conduzir a um comprometimento da estabilidade do acoplamento motor-bomba em ventos e rotações mais elevadas, se o sistema centrífugo de controle do passo não for ajustado convenientemente para operar.

#### V.4.2. Transitórios de Rajadas de Vento

O comportamento do sistema eólico, quando sujeito a rajadas de vento de frequências diversas, tem sido objeto de muitos trabalhos (Kinderen, Van Heel e Smulders, 1977; Kirchhoff e Hannwell, 1985), em vista da determinação da capacidade do

sistema em absorver a energia contida nestas flutuações. Diversas metodologias tem sido empregadas para esta análise, sendo a simulação dinâmica uma ferramenta muito eficaz.

No sistema eólico pode-se identificar variáveis de dinâmica lenta (rotações e vazões) e variáveis de dinâmica rápida, representadas pelas quantidades elétricas. Em termos de variações de velocidade de vento, a inércia do conjunto turbina-alternador funciona como um filtro passa-baixa, onde apenas as rajadas de frequências mais baixas repercutem, significativamente, na dinâmica do sistema como um todo. Perante o transitório de rotação do rotor eólico, as demais variáveis mecânicas apresentam resposta mais rápida. Entretanto, sua dinâmica é importante em vista do ganho real em termos de volume de água bombeado

A simulação de rajadas de amplitude constante ( $4\text{m/s}$ ), a partir de uma velocidade média de  $6\text{m/s}$ , e em frequências diversas, no caso, correspondentes a períodos de 0,5, 1,0, 2,0 e 4,0 segundos, é apresentada nas Figuras de V.18 a V.25, identificando os transitórios de vento, rotação da turbina e vazões de água bombeada nas unidades hidráulicas.

O levantamento da densidade de potência espectral em um determinado local possibilita o conhecimento da ocorrência de rajadas de vento de determinadas frequências, avaliando-se a máxima eficiência do sistema em aproveitar a energia contida nestas flutuações de vento.

A medida que a frequência da rajada se reduz, maior

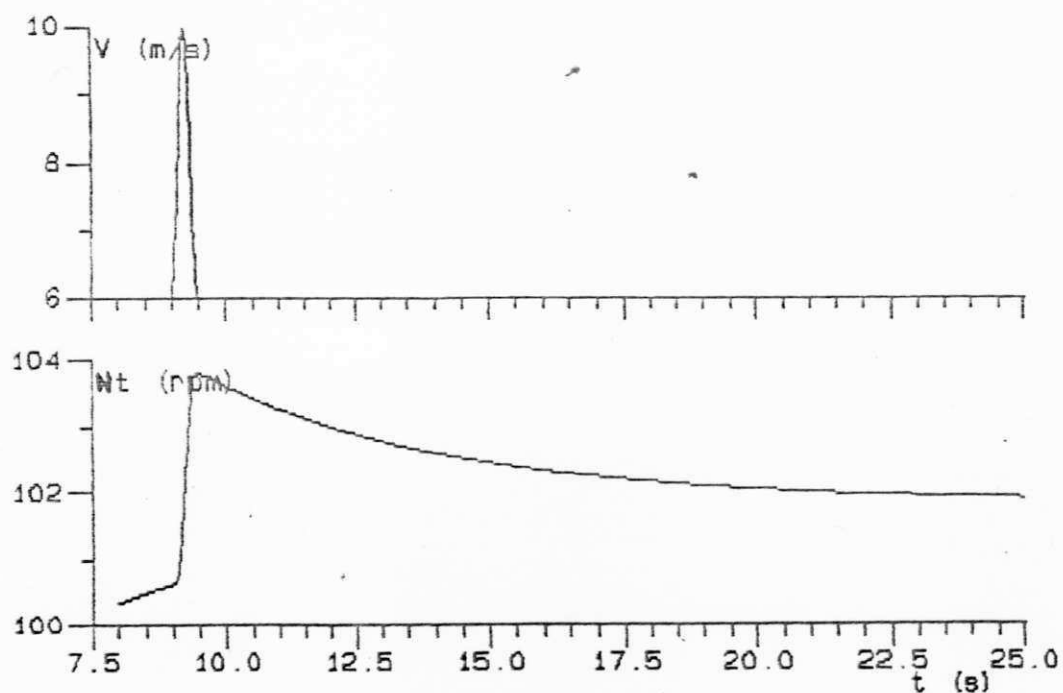


Figura V.18. Velocidade de Vento e Rotação da Turbina em Rajada Cossenoidal de 0,5 segundos.

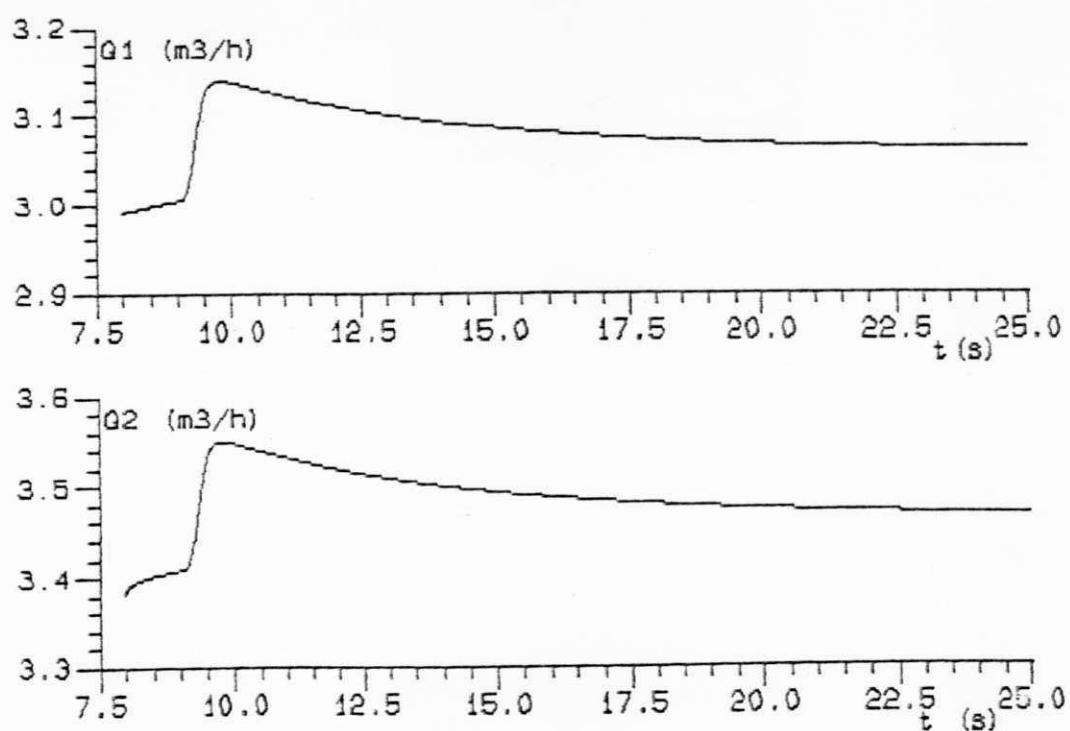


Figura V.19. Vazões das 1a. e 2a. Bombas em Rajadas de 0,5 segundos de período.

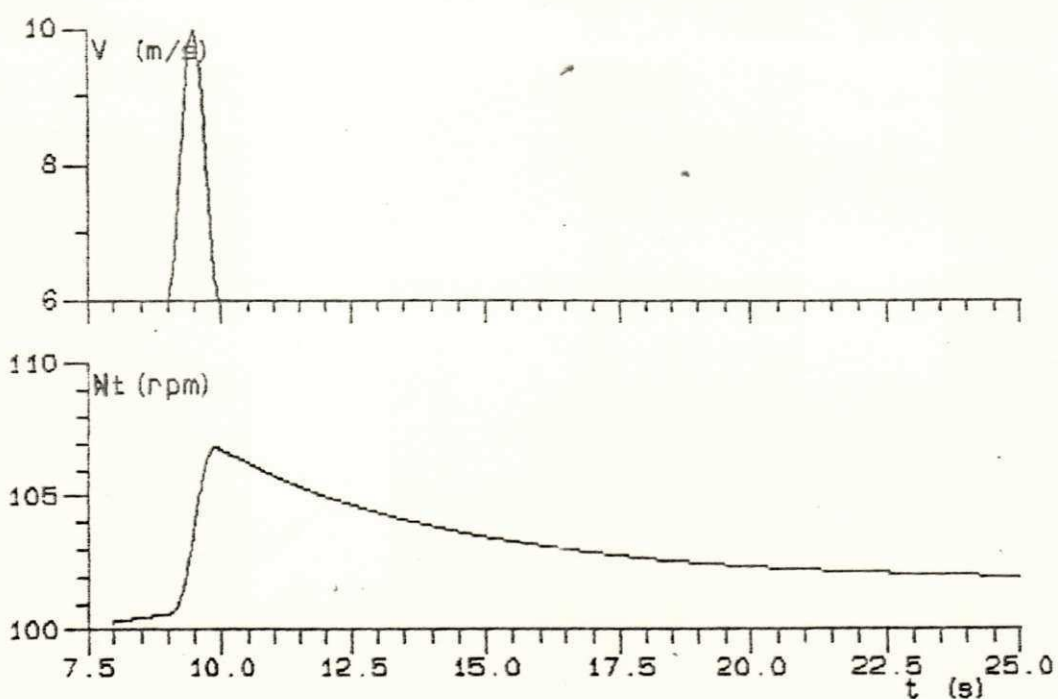


Figura V.20. Velocidade de Vento e Rotação da Turbina em Rajada Cossenoidal de 1,0 segundos.

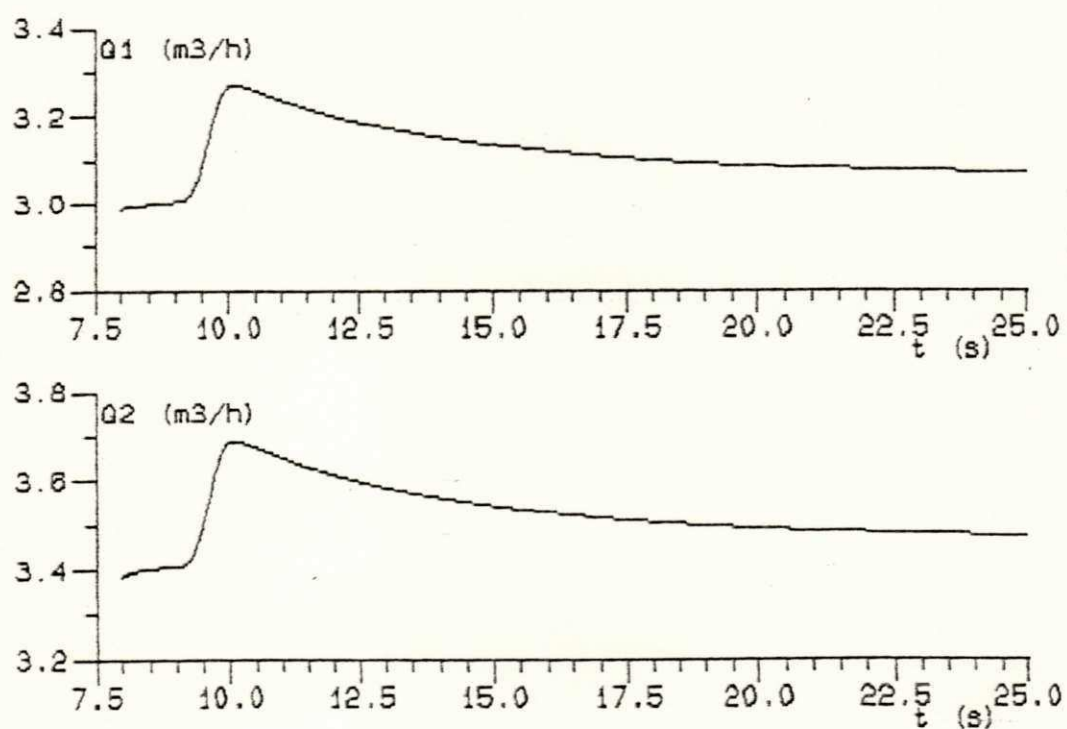


Figura V.21. Vazões das 1a. e 2a. Bombas em Rajadas de 1,0 segundos de período.

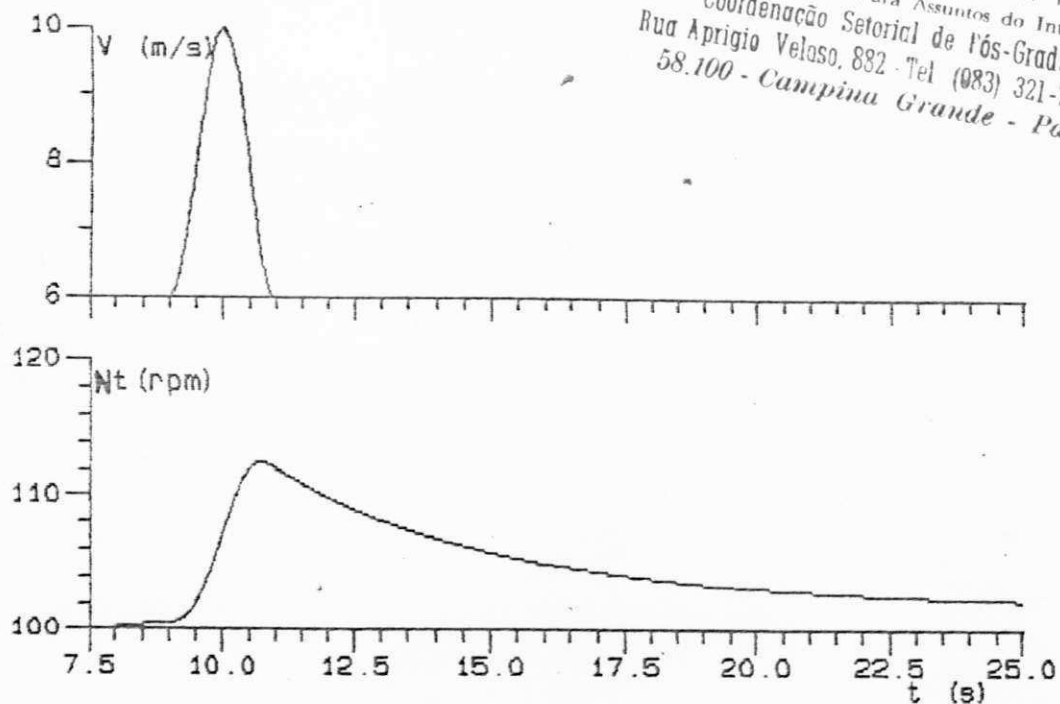


Figura V.22. Velocidade de Vento e Rotação da Turbina em Rajada Cossenoidal de 2,0 segundos.

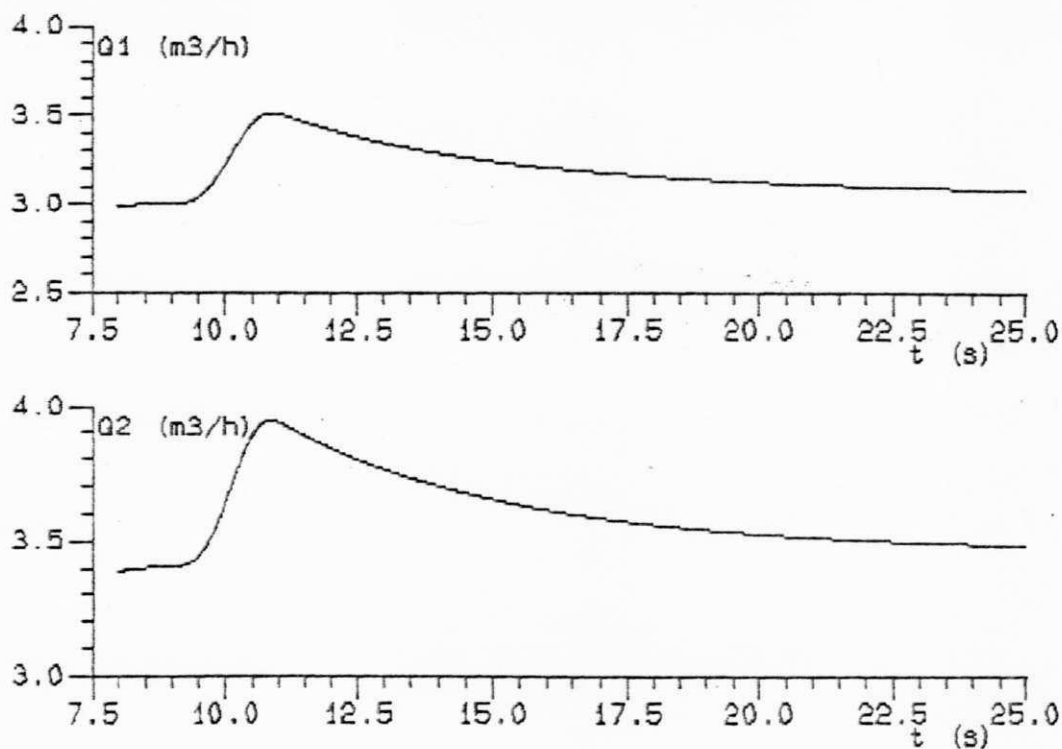


Figura V.23. Vazões das 1a. e 2a. Bombas em Rajadas de 2,0 segundos de período.



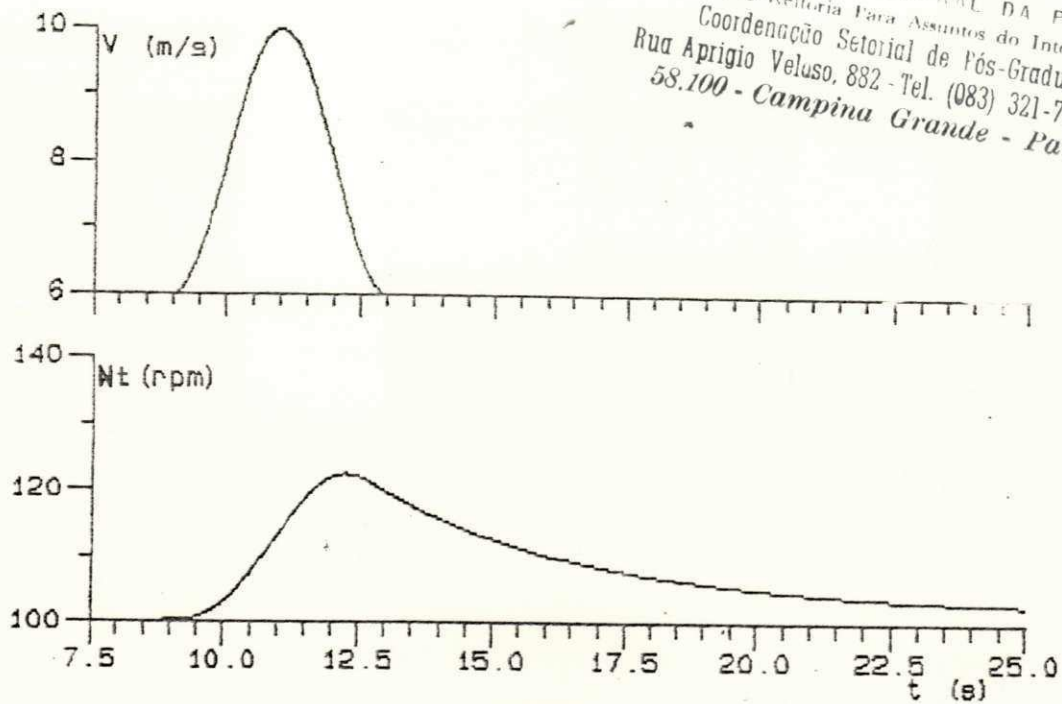


Figura V.24. Velocidade de Vento e Rotação da Turbina em Rajada Cossenoidal de 4,0 segundos.

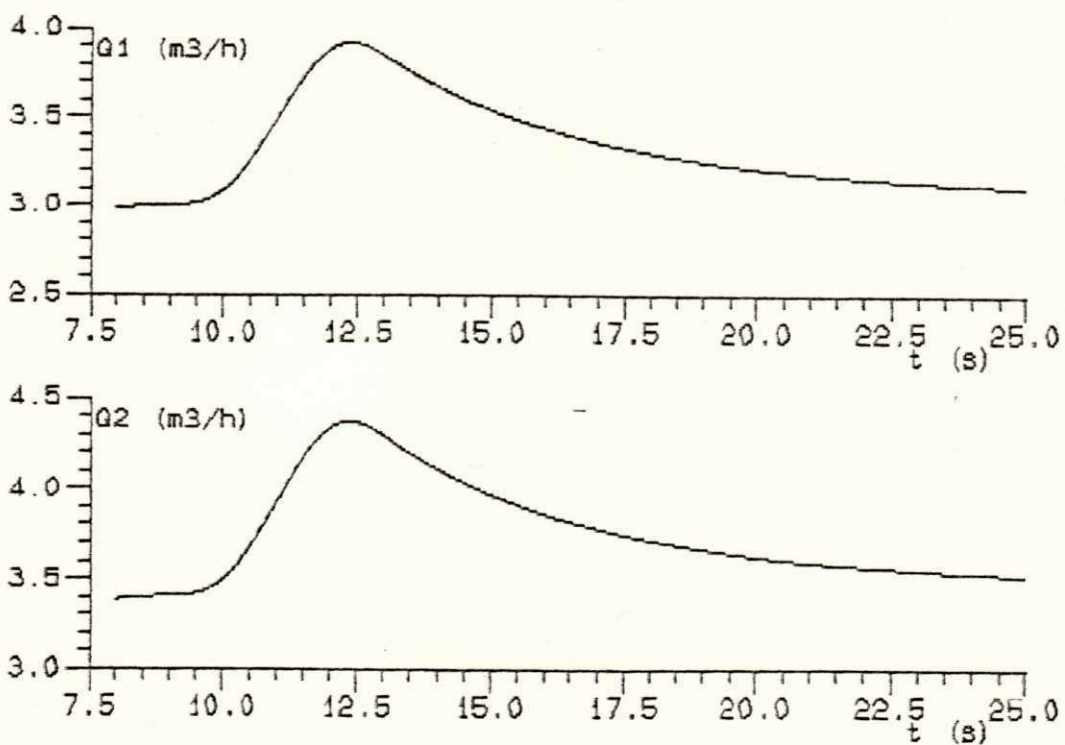


Figura V.25. Vazões das 1a. e 2a. Bombas em Rajadas de 4,0 segundos de período.

volume de água é bombeada, identificando a capacidade do sistema em absorver estas variações.

#### V.4.3. Transitórios em Regime de Vento Real

As variações instantâneas de velocidade de vento (ruídos aleatórios) são normalmente filtrados pela inércia do rotor eólico, contudo sua repercussão no conjugado desenvolvido pela turbina, principalmente em baixas velocidades médias de vento, são amplificadas pela relação quadrática entre estas grandezas. Os fenômenos que ocorrem em um sistema eólico quando sujeito a rápidas elevações e reduções de velocidade de vento, dependem fortemente do ponto de operação, justificando-se uma análise mais apurada.

Quando a velocidade de vento aumenta rapidamente, se a turbina está girando lentamente, o rotor passa a operar a baixa relação de velocidades, apresentando menor conjugado de aceleração e, portanto, uma dinâmica mais lenta, (Figura V.26). Porém, quando a turbina está girando em maior rotação, a queda na relação de velocidades pode ser suficiente para leva-la a operar a maiores coeficientes de conjugado e, conseqüentemente, apresentar uma maior rapidez na resposta, como ilustrado nas Figuras V.27 a V.31.

De outro modo, a redução rápida de velocidade de vento, quando a turbina gira em maior rotação, conduz a uma operação em alta relação de velocidades, conduzindo a turbina a

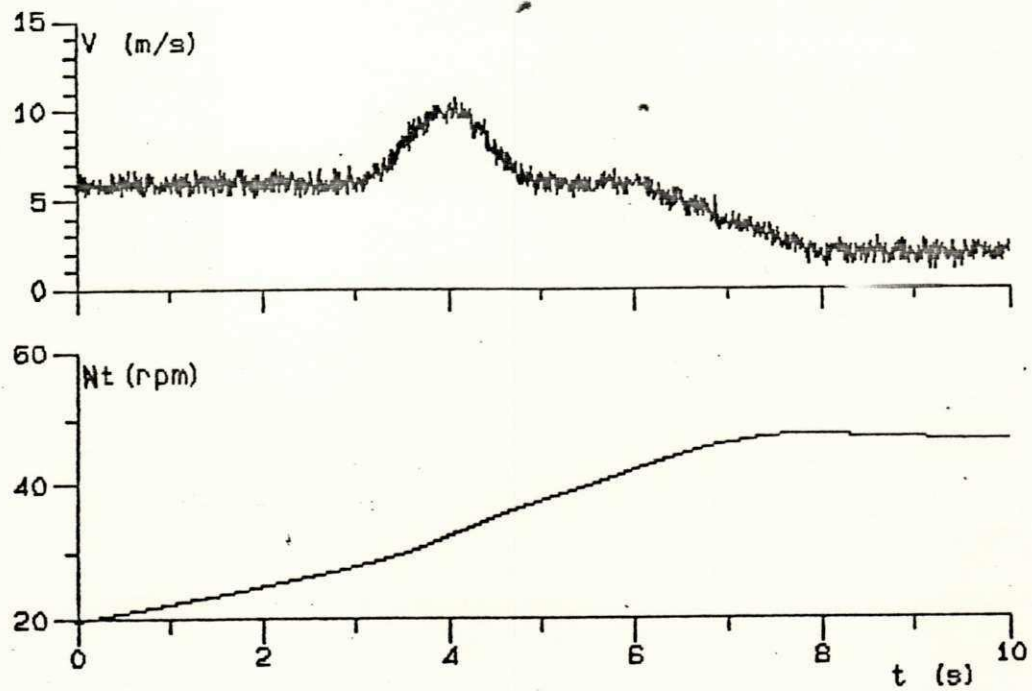


Figura V.26. Transitórios de Vento e Rotação da Turbina em Regime Real, com Baixa Rotação.

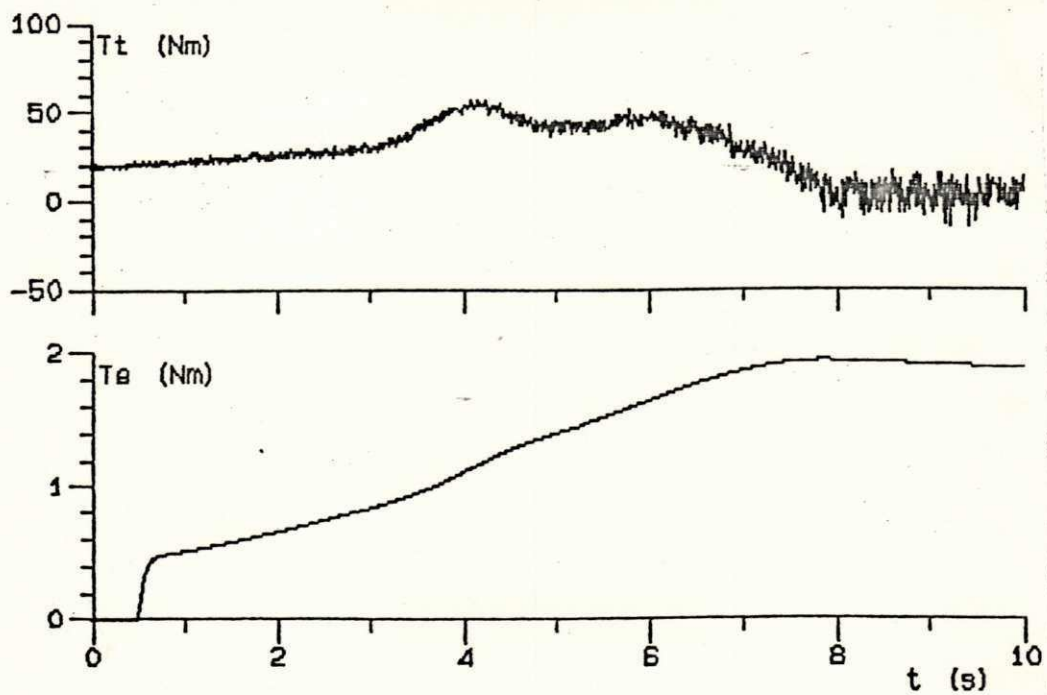


Figura V.27. Transitórios de Conjugados Eletromagnético e do Rotor Eólico.

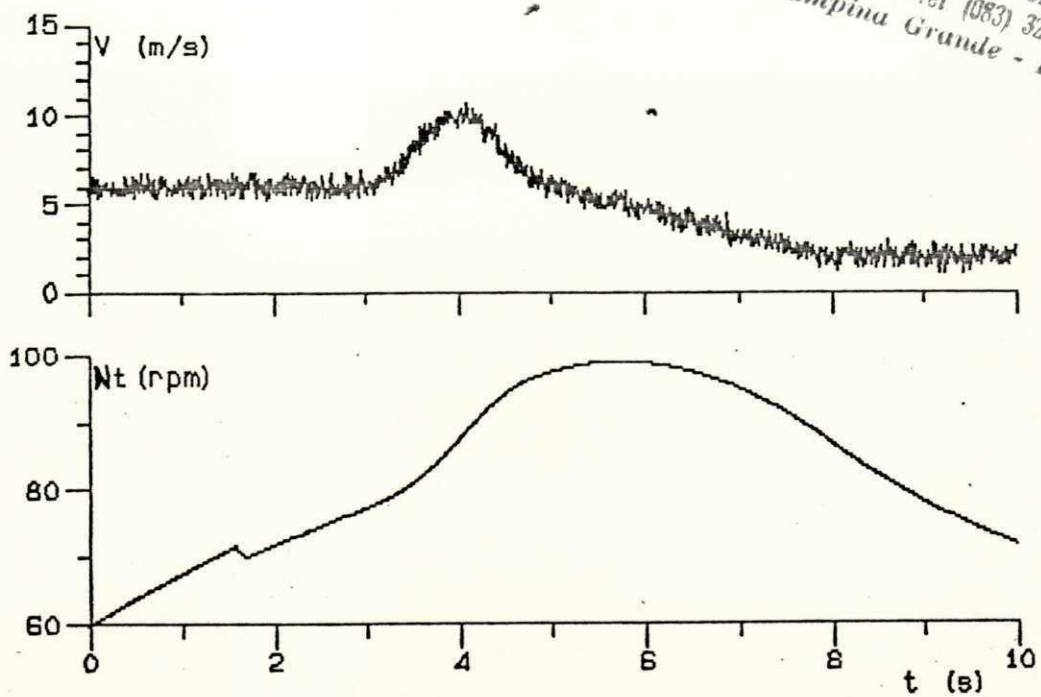


Figura V.28. Transitórios de Vento e Rotação da Turbina em Regime Real, com Média Rotação.

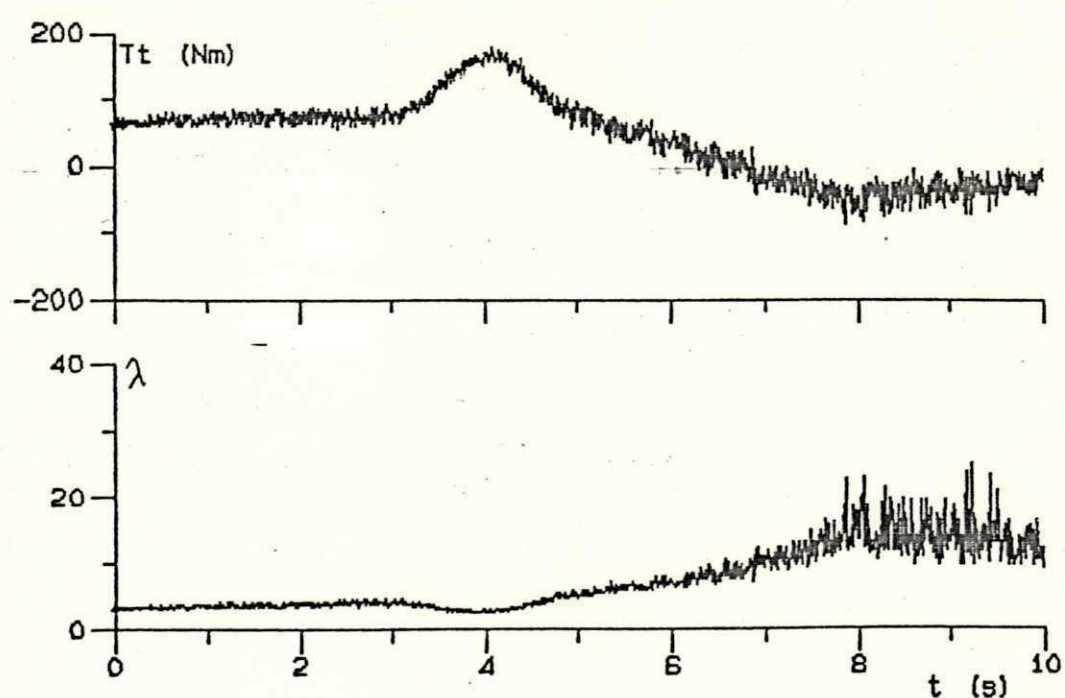


Figura V.29. Conjugado da Turbina e Relação de Velocidades em Regime de Vento Real.



operar com coeficientes de conjugado negativos, reforçando o processo de frenagem.

A análise linearizada de um sistema eólico operando a relação de velocidades ótima, apresentada por Casanova e Freris (1984), identifica uma constante de tempo mecânica que depende do inverso da velocidade de vento. Assim, em baixas ventos a dinâmica é lenta, enquanto em altos valores de vento a dinâmica é mais rápida. Este comportamento satisfaz, em parte, os resultados apresentados e a análise procedida, contudo, a operação em pontos diferentes da relação de velocidades ótima, em vista da não-linearidade das características de coeficiente de conjugado, é mais complexa e o desempenho dinâmico do sistema depende da história anterior do funcionamento.

#### V.5. CONCLUSÃO

A análise do comportamento dinâmico de um sistema eólico de bombeamento de água é introduzida, justificando-se através dos diversos aspectos significativos que podem ser elucidados. A variedade de condições de operação real pressupõe a utilização de modelos completos que satisfaçam a análise dos transitórios elétricos e mecânicos.

Os transitórios elétricos e mecânicos do chaveamento (conexão e desconexão) de motores elétricos compreendem os esforços mais severos ao sistema e, em contrapartida, repercutem na convergência dos algoritmos desenvolvidos. Neste caso, a histerese do chaveamento deve ser suficiente para suportar a conexão

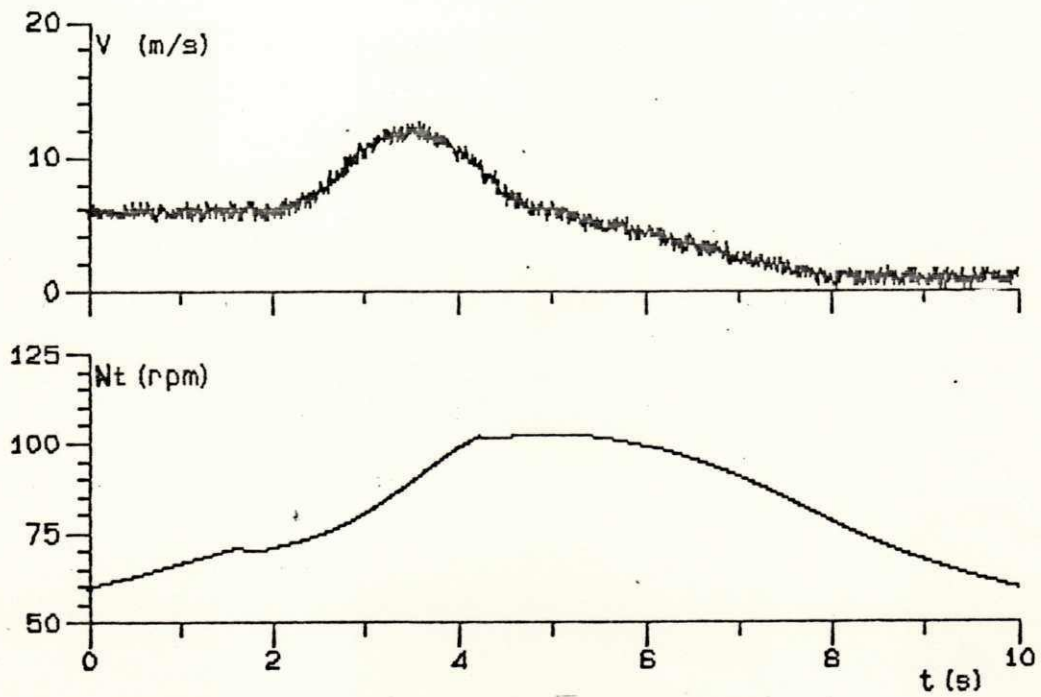


Figura V.30. Transitórios de Vento e Rotação da Turbina em Regime de Vento Real.

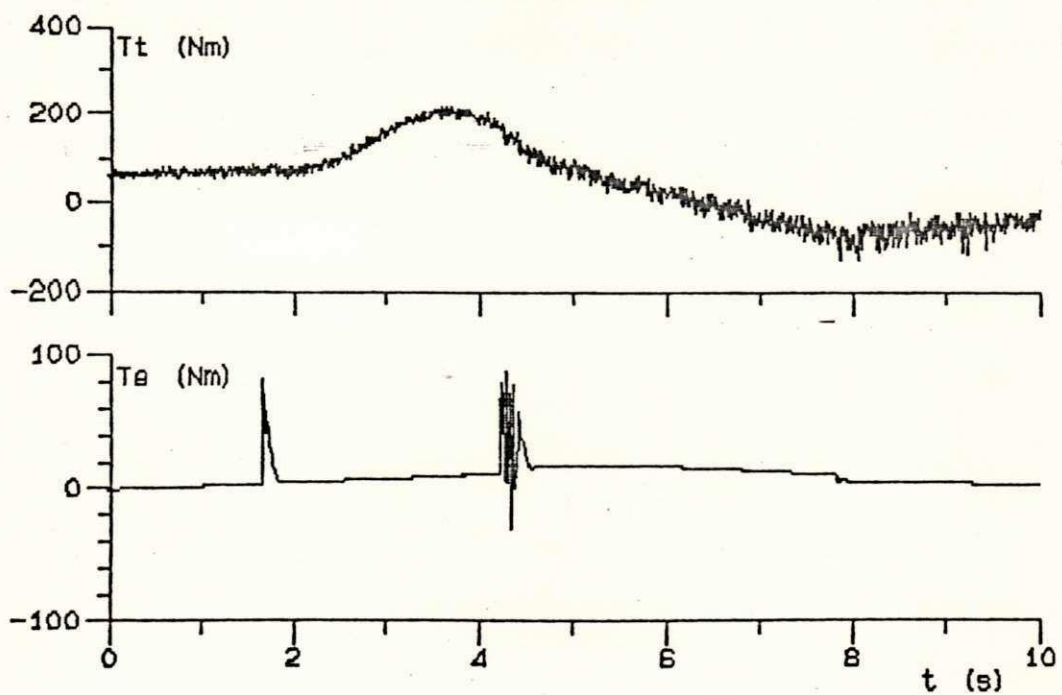


Figura V.31. Transitórios de Conjugados da Turbina e Eletromagnético em Vento Real.

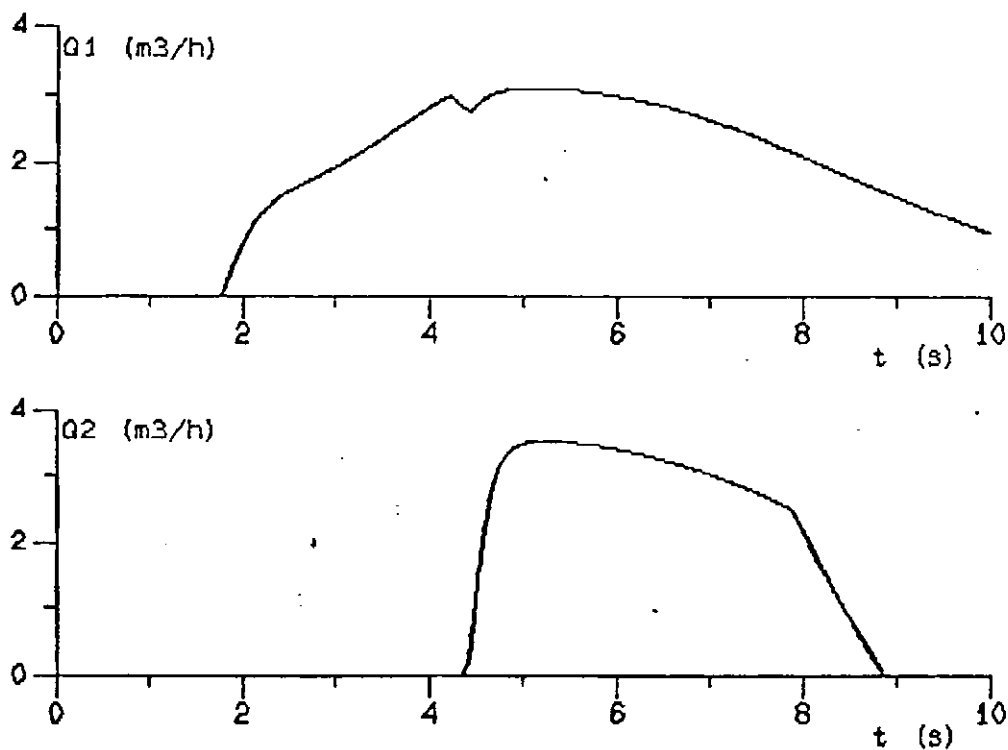


Figura V.32. Vazões Bombeadas em Regime de Vento Real.  
 $Q_1$  - 1ª Bomba       $Q_2$  - 2ª Bomba

do motor, quando o sistema está sujeito a uma velocidade de vento média, evitando um acréscimo no número de conexões e desconexões, com redução na eficiência do sistema como um todo. Além disto, como a magnitude destes impactos aumenta com o número de motores conectados, a histerese deve ser ajustada para valores crescentes com este número. Estes transitórios promovem quedas significativas de tensão que repercutem em regime permanente na redução dos fluxos rotóricos dos motores e, conseqüentemente, na capacidade de conjugado destes.

A análise do aproveitamento de rajadas de vento foi procedida, sendo verificada a influência da dinâmica própria do rotor eólico em filtrar transitórios em maiores frequências.

O comportamento do sistema em vento aleatório, com súbitas elevações e reduções na velocidade instantânea de vento foi estudado, enfatizando as características não-lineares do conjugado da turbina e a dependência do ponto de funcionamento.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprigio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba



## CAPÍTULO VI. CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou a análise de um Sistema de Conversão de Energia Eólica a partir da ótica da engenharia de sistemas, isto é, enfocando detalhadamente as características de cada componente com o intuito de proceder ao conhecimento mais profundo de todos os fenômenos físicos, que regem o comportamento do sistema como um todo.

Em primeira análise, foram avaliadas as características do acoplamento de SCEE, as estruturas usuais e destacados os problemas básicos do projeto de sistemas aplicados ao carregamento de baterias e ao bombeamento de água.

Escolhidas as estruturas que seriam analisadas e postas em operação, procurou-se identificar, através de testes laboratoriais e em campo aberto, os parâmetros necessários à implementação dos modelos propostos.

Foi promovida a montagem de circuitos elétricos e eletrônicos adequados ao funcionamento dos esquemas estudados, de acordo com as premissas delineadas. O desenvolvimento de testes operativos constituiu procedimento necessário à validação dos modelos e ao conhecimento do comportamento real dos sistemas. Diversos testes foram desenvolvidos com vários esquemas de funcionamento no sentido de garantir a validação dos resultados

em modos distintos de operação.

A simulação dinâmica do sistema de bombeamento de água se justifica pela compreensão dos fenômenos transitórios inerentes (flutuação da velocidade de vento) e dos fenômenos forçados, isto é, aqueles incluídos ao sistema na tentativa de viabilizar um melhor acoplamento de cargas independentemente das características implícitas dos componentes (chaveamento de motores elétricos).

Em termos gerais, foi desenvolvida uma metodologia geral de análise, solucionando diversos problemas do estudo de um sistema complexo, e privilegiando aplicações efetivas do aproveitamento eólico no Brasil, especificadamente para regiões rurais.

#### VI.1. CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS

Entre as diversas estruturas de Sistemas de Conversão de Energia Eólica, que se caracterizam pela geração de eletricidade, a estratégia da autoexcitação do alternador apresenta-se como alternativa efetiva ao bom acoplamento de cargas.

Neste aspecto, o ajuste da autoexcitação (operação em malha aberta) ou o seu controle (operação em malha fechada) são soluções viáveis, onde o custo e as vantagens decorrentes de cada esquema determinam sua utilização.

Em termos da modelagem empregada pode-se identificar a profunda preocupação com a representação adequada das perdas

energéticas em todos os níveis de conversão, o que contribuiu para a complexidade dos modelos desenvolvidos. Contudo, a representação precisa de certos fenômenos conduz a um bom conhecimento das características dos componentes, colaborando para a avaliação do comportamento do sistema e suas propostas de melhoria operativa. Neste aspecto, diversos problemas foram solucionados, como a representação das características de turbinas a passo variável e a modelagem de bombas centrífugas operando a velocidade variável, além dos modelos de perdas e testes efetuados nas máquinas elétricas.

A operação em campo aberto alocou considerações práticas ao estudo, com montagens efetivas de circuitos de potência, circuitos de controle e instrumentação. Do ponto de vista das montagens e recorrendo aos resultados obtidos verificou-se que a operação a relação de velocidades ótima, implementada por realimentação de velocidade, não acrescenta vantagens suficientes para justificar sua aplicação em sistemas de pequeno porte. Bons resultados podem ser obtidos pelo ajuste da autoexcitação, através de resistores adicionais ao circuito de campo, de modo a acoplar as características turbina-carga em ventos de maior conteúdo energético.

A boa concordância entre resultados teóricos e experimentais se justifica não apenas pela baixa margem de erros, geralmente difícil de se obter, mas pela boa correlação de tendências de resultados, a qual identifica a possibilidade de erros sistemáticos em medição de certas grandezas. Obtida uma compro-

vação adequada de resultados, a simulação garante o acompanhamento da operação, sua otimização, a avaliação da operação em circunstâncias diversas e a identificação da ocorrência de condições inadequadas à operação.

No sistema de carregamento de baterias, a comprovação teórico-experimental foi procedida em diversas condições, a fim de validar os modelos básicos. No caso do sistema de bombeamento, observou-se as dificuldades na garantia de uma determinada precisão de medição das quantidades elétricas em virtude dos severos transitórios de chaveamento dos conjuntos. De um modo geral, identificou-se a boa concordância dos resultados relativos às grandezas de variação lenta, isto é, as quantidades mecânicas.

A simulação dinâmica forneceu conhecimentos necessários à compreensão dos fenômenos transitórios. Nestes verificou-se que as rápidas variações de velocidade de vento levavam a turbina a operar em altas ou baixas relações de velocidades, originando frenagens e acelerações constantes. O sistema opera continuamente em transitório, regido principalmente pela constante de tempo mecânica, já que os transitórios elétricos apresentam constantes de tempo rapidísimas e podem ser considerados instantâneos em vistas à dinâmica do rotor. A autoexcitação constitui carga efetiva em baixas velocidades de vento, dificultando a evolução da rotação da turbina e, portanto, o processo de bombeamento. Assim, o sistema apresenta uma dinâmica lenta, que possibilita a captação energética a partir de uma dada frequência de rajadas.

No sistema de bombeamento de água, o acoplamento adequado entre turbina e carga não foi obtido, devido às características inerentes das bombas selecionadas e ao processo de medição de vazão adotado. Para o bom acoplamento seria necessário a alteração da caixa de transmissão para uma menor relação de velocidades. Assim, a estratégia do chaveamento de conjuntos motor-bomba não foi suficiente para garantir o acoplamento em ampla faixa de velocidades de vento, fornecendo contudo, versatilidade e robustez ao sistema.

Os modelos desenvolvidos e testes individuais realizados nos componentes do SCEE, a operação em campo aberto e a metodologia de tratamento de dados apresentou-se como ferramenta adequada à análise destes sistemas nas aplicações apresentadas.

## VI.2. PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABALHOS

Este trabalho identificou diversos problemas e gerou inúmeros caminhos de análise, que não puderam ser desenvolvidos em vista das diretrizes propostas. Com o objetivo de contribuir para a orientação de futuros trabalhos, alguns tópicos são relacionados a seguir.

Quanto ao sistema de bombeamento centrífugo, o acoplamento de cargas pode ser obtido com o uso do chaveamento de diversos conjuntos motor-bomba ou pelo uso de um único conjunto, se a relação de transmissão for projetada para conciliar as

características implícitas das bombas com aquelas da turbina operando a relação de velocidades constante. O problema proposto, então, se equaciona em uma otimização não-linear.

A operação de motores de indução a fluxo magnético constante possibilita capacidade de conjugado a velocidade variável, o que garante operação em ampla faixa de velocidades de vento. Através da atuação sobre a excitação do alternador é possível garantir este funcionamento, compensando as quedas de tensão nas impedâncias do alternador e da linha de transmissão elétrica.

A utilização de geradores de indução em sistemas eólicos, acoplados a grandes sistemas elétricos, tem sido bastante explorada em artefatos de médio e grande porte. Em baixas potências contudo, o suprimento de reativos e seu controle têm restringido sua aplicação. Com os crescentes avanços tecnológicos em eletrônica de potência e circuitos eletrônicos, a utilização de geradores de indução tem sido progressivamente proposta. Para sistemas de carregamento de baterias, o acionamento eólico de geradores de indução foi avaliada em alguns trabalhos, necessitando de montagens e estudos para melhor qualifica-la economicamente. Nas aplicações relativas ao bombeamento centrífugo, tem predominado o uso de geradores síncronos com bobina de campo ou a imã permanente, onde a compensação de quedas de tensão pode ser obtido via ajuste da corrente de excitação ou pelo uso de capacitores terminais. Para esta aplicação, o uso de geradores de indução retorna problemas diversos, tais como : suprimento de

reativos, faixa de operação estável, acoplamento de cargas, entre outros.

O funcionamento de sistemas eólicos em malha fechada, para aplicações bem determinadas, pressupõe um adequado projeto de controladores analógicos ou digitais, que garantam o melhor aproveitamento da energia contida em rajadas de curta duração. Neste aspecto do controle, maior ênfase tem sido dada a sistemas ligados à redes elétricas ou em aplicações relativas ao aquecimento resistivo, devendo portanto, ser direcionada maior atenção a esquemas típicos ao fornecimento de eletricidade para aplicações isoladas. Neste sentido, a simulação dinâmica de sistemas de carregamento de baterias se justifica na melhor avaliação da eficácia do controle.

O projeto de rotores eólicos de eixo horizontal deve ser implementado, bem como a construção de outros tipos de rotor, como da turbina de eixo vertical tipo "V", que apresenta características bastante interessantes para a geração elétrica. É necessário a montagem de um sistema mais adequado à aquisição de dados e tratamento destes, e o desenvolvimento de instrumentação para medição e monitoramento de variáveis elétricas, mecânicas e hidráulicas.

O projeto de bombas centrífugas e a alteração de características de bombas comercialmente disponíveis deve ser pesquisada afim de obter-se um melhor acoplamento.

É imprescindível a continuação de estudos nestas apli-

cações, principalmente no bombeamento centrífugo, que representa atualmente uma das aplicações mais importantes da energia eólica para a faixa das baixas potências.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba



## BIBLIOGRAFIA

01. ABDELAZIZ, H.E. Permanent magnet synchronous machines. Thèse de Docteur es Sciences Techniques, EPF de Lausanne, 1982.
02. ANDERSON, P.M. and BOSE, A. Stability simulation of wind turbine systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 102 (12), December 1983, 3791 - 3795.
03. ANDERSON, P.M. and FOUAD, A.A. Power Systems Control and Stability. AMES, The Iowa State University Press, 1977.
04. ALENCAR, E.F. e HAZENC, M.L. Cálculo e realização de um gerador a imã permanente para utilização em turbina eólica de baixa potência. IV Congresso Brasileiro de Energia, 1987, Rio de Janeiro, p. 257 - 266.
05. ARAUJO, T.S. Potencial energia eólica. Workshop - Potencial de Mercado para Fontes Não Convencionais de Energia no Brasil - 2000, COPPE - FINEP, Rio de Janeiro, 1983.
06. ARAUJO, T.S. Novas estruturas de dispositivos eletromagnéticos associadas ao aproveitamento eólico. Relatório de Pesquisa para CNPq, 1985.
07. ARAUJO, T.S. Energia Eólica no Brasil. Programa Geral de capacitação para tomada de decisões em energia, FINEP- /PNUD/UNESCO, 1985, p. 154 - 177.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 832 - Tel. (083) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

08. ARAÚJO, T.S.; SIMÕES, F.J.; SILVA, S.R. e SILVA, M.C. Projeto e estudo de um gerador de pequeno porte. IV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1987, p. 167 - 276.
09. BANNAS, U.F. and SULLIVAN, W.N. Engineering of wind energy systems. Sandia Laboratories, SAND 75-05... 1976, 25 p.
10. BINNS, K.J. and KURDALI, A. Permanent magnet alternators. Proceedings IEE, Vol. 126, No 7, 1979, p. 690 - 696.
11. BONWICK, W.J. Voltage waveform distortion in synchronous generators with rectifier loading. IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No 1, January 1980, p. 13-19.
12. BOLTON, H.R. and NICODEMOU, V.C. Operation of self excited generators for Windmill application. Proceedings IEE, Vol. 126, No 9, September 1979, p. 815 - 820.
13. BUEHRING, I.K. and FRERIS, L.L. Some aspects of small aerogenerator design and testing. BHRA 3rd. International Symposium on Wind Energy Systems, Copenhagen, Agosto 1980.
14. BUEHRING, I.K. and FRERIS, L.L. Control policies for wind energy conversion systems. IEE Proceedings. Vol. 128, Pt. C, No 5, September 1981, p. 253 - 261.
15. BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION. Wind energy for the eighties, Peter Peregrinus Ltd., UK, 1982, 372 p.
16. CASANOVA, V.H. and FRERIS, L.L. Control policies for maximizing energy extraction from wind turbines. BHRA 4th Inter-

- national Symposium on Wind Energy Systems, Cranfield, September 1982. p. 233 - 245.
17. CASANOVA, V.H. and FRERIS, L.L. Dynamics and control of wind energy conversion systems. 5o Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande, Setembro 1984, p. 1123 - 1129.
  18. CARVALHO, D.F. Instalações elevatórias - bombas. 3a. edição, PUC, Belo Horizonte, 1977. 353 p.
  19. CEBALLOS, J.C. BASTOS, E.J.B. e LUCENA, G.H. Nomogramas de potência eólica para Campina Grande, período 1978. XXXI Reunião da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Fortaleza, 1978.
  20. CUNTY, G. Eoliennes et aérogénérateurs. 2a. édition, Edisud, Paris, 1982, 165 p.
  21. CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A. and WILKES, J.O. Applied numerical methods, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969, 604p.
  22. CONCORDIA, C. Synchronous Machines. John Wiley & Sons, 1951.
  23. DIXON, J.C. Load matching effects on wind energy converter performance. The Open University, UK, 1979, p. 418 - 421.
  24. FRERIS, L.L. e Outros. Discussion on "Permanent magnet A. C. generators" and "Operation of self-excited generators for windmill application". IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No 4, July 1980, p. 240 - 243.

25. GIMPEL, G. and STODHART, A.H. Windmills for electricity supply in remote areas. The Electrical Research Association, Technical Report C/T 120, Surrey, 1958.
26. GOLDING, E.W. The generation of electricity by wind power. P & F Spon Ltd., London, 1976.
27. GOEZINNE, F. Performance of wind electric pumping systems. European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Italy, 1986, p. 431 - 436.
28. GRANDPIERRE, M. Commande numérique de machines à commutation électronique - automates de commandes rapprochée (A.C.R.) - méthode de simulation numérique (S.O.S.I.E.). Thèse de Docteur ès Sciences, INP Toulouse, junho 1987.
29. HIRATA, M.H.; ABREU, L.H.B. e PIRES Jr., F.C.M. Sistema Vento : um procedimento para a especificação de sistemas eólicos. IV Congresso Brasileiro de Energia, 1987, Rio de Janeiro, p. 226 - 236.
30. HLADIK, J. Energétique Eolienne. Masson, Paris, 1984.
31. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Test procedures for synchronous machines, No 115, New York, March 1965, 77 p.
32. JONES, C.V. The unified theory of electrical machines. Butterworths, London, 1967, 542 p.
33. JADAYADEV, T.S. Windmills stage a comeback. IEEE Spectrum, Novembro, 1976, p. 45 - 49.

34. JOHNSON, C.C. and SMITH, T.R. Dynamics of wind generators on electric utility networks. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES - 12, No 4, July 1976, p.483 - 493.
35. JUFER, M. L'énergie éolienne. Bulletin ASE L'OSE T. 75, N° 05, 1984. p. 245 - 249.
36. JUFER, M. Permanent magnet synchronous generator for windmill applications. International conference on Small and Special Machines. Budapest, 1983, p. 608 - 611.
37. JUSTUS, G.G. Winds and Wind System Performance. The Franklin Institute Press, Philadelphia - Pa, 1978.
38. KINDEREN. W.J.G.J., VAN MEEL, J.J.E.A and SMULDERS, P.T. Effects of wind fluctuations on windmill behaviour. Wind Engineering, Vol. 1, No 2, 1977, p. 126 - 140.
39. KOSTENKO, M.P. e PIOTROVSKI, L.M. Máquinas Electricas Vol.1 e 2, Editorial Mir, Moscou, 1975.
40. LEVI, E. Polyphase motors. John Wiley & Sons Inc, USA, 1984, 438 p.
41. LOPES, M. Sistemas de energia elétrica. Curso de Planejamento Energético, NERG/UFPA, Campina Grande, 1985.
42. MAHMOUD, A.M.A. and MENZIES, R.W. A complete time domain model of induction motor for efficiency evaluation. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-1, No 1, March 1986, p. 68-75.

43. MATTATIA, S. L'énergie éolienne. Helios - Energies Nouvelles, Vol. 1/83, 1983, p. 01 - 28.
44. KIRCHHOFF, R.H. and MANNWELL, J.F. Wind energy from turbulence constant tip speed ratio operation. Wind Energy, Vol. 34, No 1, 1985, p. 59 - 67.
45. MEDEIROS, A. Otimização de sistemas de conversão de energia eólica para bombeamento d'água. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPb, João Pessoa, 1986, 242 p.
46. MEMARZADEH, M.A. and BARTON, T.H. Windmill power pumps with intermediate electrical power transmission. Technical Report T. 95, Brace Research Institute, Quebec, Canadá, April 1975, 14 p.
47. MENZIES, R.W. MATHUR, R.M. and BULLOCK, W.R. Alternador design for direct coupling to remote wind energy systems. BHRA 3rd International Symposium on wind energy systems, Copenhagen, 1980, p. 269 - 278.
48. MILBORROW, D.J. Performance prediction methods for horizontal axis wind turbines. Wind Engineering, Vol. 2, No 3, 1978, p. 166 - 172.
49. MURDOCH, A., WINKELMAN, J.R., JAVID, S.H. and BARTON, R.S. Control design and performance analysis of a 6 MW wind turbine generator. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 5, 1983.
50. MUSGROVE, P.J. Wind energy conversion and introduction.

IEE Proceedings, Vol. 130, Pt. A, No 9, December 1983, p.  
506 - 516.

51. MURPHY, J.M.D. Thyristor control of A.C. motors. Pergamon Press, New York, 1974.
52. NERG. Relatório de Atividades - SUDENE. Relatório Técnico NERG H001-R, 1986.
53. NICODEMOU, V.C. and BOLTON, H.R. Permanent magnet alternator for small wind systems. Proceedings of BWEA Conference, Cranfield, 1979, p. 165 - 170.
54. PAPADOPOLI, N. Installation of a commercial wind-electric generator with battery storage. Technical Report T.127, Brace Research Institute, July 1981, p. 30.
55. PFLEIDERER, C. and PETERMANN, H. Máquinas de fluxo. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1979.
56. POWER, H.M. A simulation model for wind turbines. Applied Energy, Vol. 6, 1980, p. 395 - 399.
57. SEHEDO, G.M., SLUIS, W.V., DIEPENS, J. and VAN DER SPEK, H.F. Matching on electrical centrifugal pump to a variable speed wind turbine. European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Italy, 1986, p. 267 - 270.
58. SHACKSHAFT, G. General purpose turbo-alternator model. Proceedings IEE, Vol. 110, No 4, April 1963, p. 703 - 713.
59. SILVA, S.R. Uma contribuição ao acionamento elétrico in-



dustrial - Concepção e projeto de estimadores de velocidade e conjugado para a máquina de indução. Dissertação de Mestrado, CPgEE-UFMG, Belo Horizonte, 1984.

60. SILVA, S.R., ARAUJO, T.S. e SIMOES, F.J. Alternativas de acoplamento de bombas centrífugas em conexão direta com aerogeradores. 6o Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986, p. 724 - 730.
61. SILVA, S.R.; ARAUJO, T.S. e SIMOES, F.J. Análise do desempenho de sistemas eólicos comportando bombas centrífugas. IV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1987, p. 277 - 286.
62. SILVA, S.R.; ARAUJO, T.S.; FECHINE, E. e SIMOES, F.J. Modelização e estudo de acoplamento ótimo de carga em sistemas de conversão de energia eólica. 2o Congresso Latinoamericano de Control Automático / 10o Simpósio Nacional de Control Automático, Buenos Aires, 1986.
63. SILVA, S.R.; ARAUJO, T.S.; FECHINE, E. e SIMOES, F.J. Modelling and optimal load coupling of Wind Energy Conversion Systems. European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC'86), Italy, 1986, p. 267 - 270.
64. SIMOES, F.J.; ARAUJO, T.S.; LOPEZ, J.E.J.S. e SILVA, S.R. Determinação e modelamento das características de conversão de turbinas eólicas a partir de testes em campo aberto. 6o Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte,



#### TRABALHOS COMPLETOS PUBLICADOS PELO AUTOR

- Silva, S.R.; Araújo, T.S.; Fachine, E. e Simões, F.J. - "Modelling and Optimal Load Coupling of a Wind Energy Conversion System". European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC'86), 1986, Roma, Itália, pp. 251-257.
- Silva, S.R.; Araújo, T.S.; Fachine, E. e Simões, F.J. - "Modelização e Estudo de Acoplamento Ótimo de Carga em Sistemas de Conversão de Energia Eólica". Anais do 20 Congresso Latino Americano de Automática e 10o Simposio Nacional de Automática, 1986, Buenos Aires, Argentina, pp. 640-645.
- Silva, S.R.; Araújo, T.S. e Simões, F.J. - "Alternativas de Acoplamento de Bombas Centrifugas em Conexão Direta com Aerogeradores". Anais do VI Congresso Brasileiro de Automática, 1986, Belo Horizonte, pp. 724-730.
- Simões, F.J.; Araújo, T.S.; Lopez, J.E.J.S. e Silva, S.R. - "Determinação e Modelamento de Características de Conversão de Turbinas Eólicas a Partir de Testes em Campo Aberto". Anais do VI Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986, pp. 731-736.
- Silva, S.R. e Outros - "Estudo de Estratégias de Controle em Sistemas de Conversão de Energia Eólica". Anais do VI Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986,

## APÊNDICE

### Método da Corrente para Determinação de $K_{dq}$

Os métodos convencionais de testes para a determinação de parâmetros de máquinas síncronas podem, em alguns casos, não ser aplicados devido à presença de imã permanente em sua estrutura magnética. O fato da excitação a imã permanente não poder ser variada ou eliminada, durante um determinado ensaio, dificulta a execução dos testes de escorregamento e curto-circuito.

Um novo método baseado na combinação do ensaio em carga e de algum desenvolvimento analítico é proposto por Abdela-ziz (1982) para determinação das reatâncias síncronas de eixo direto e quadratura em uma máquina síncrona.

Se os testes em carga são desenvolvidos pela aplicação de cargas resistivas equilibradas trifásicas, as equações do regime permanente podem ser expressas por:

$$V_{dg} = -r_g \cdot I_{dg} + X_{qg} \cdot I_{qg} = r_{ch} \cdot I_{dg}$$

$$V_{qg} = -r_g \cdot I_{qg} - X_{dg} \cdot I_{dg} + E_g = r_{ch} \cdot I_{qg}$$

onde  $r_{ch}$  é a resistência de carga.

Resolvendo as equações anteriores, obtém-se :

$$I_{qg} = -r_{sh} \cdot E_g / (r_{sh}^2 + X_{dg} \cdot X_{qg})$$

$$I_{dg} = -X_{qg} \cdot E_g / (r_{sh}^2 + X_{dg} \cdot X_{qg})$$

onde  $r_{sh} = r_g + r_{ch}$

A corrente de estator do alternador vale :

$$I_g = (I_{dg}^2 + I_{qg}^2)^{1/2} / \sqrt{2}$$

$$I_g = [ (r_{sh}^2 + X_{qg}^2) \cdot E_g^2 / (r_{sh}^2 + X_{dg} \cdot X_{qg}) ]^{1/2}$$

Definindo-se a relação  $K_{dq} = X_{qg} / X_{dg}$  e substituindo

na equação anterior, obtém-se :

$$K_{dq}^2 \cdot X_{dg}^n + (2 \cdot K_{dq} \cdot r_{sh}^2 - (K_{dq} \cdot E_g^2 / I_g^2)) X_{dg}^2 + (r_{sh}^n - (r_{sh}^2 \cdot E_g^2 / I_g^2)) = 0$$

onde  $n = 4$

Esta equação constitui um polinômio de quarta ordem, cuja solução pode ser expressa por :

$$X_{dg} = [ (-b \pm (b^2 - 4 \cdot a \cdot c)^{1/2}) / (2 \cdot a) ]^{1/2}$$

onde  $a = K_{dq}^2$

$$b = 2 \cdot K_{dq} \cdot r_{sh}^2 - (K_{dq} \cdot E_g / I_g)^2$$

$$c = r_{sh}^n - (r_{sh} \cdot E_g / I_g)^2$$

O procedimento de cálculo de  $K_{dq}$  e  $X_{dg}$ , consiste de :

- Escolher dois pontos próximos da característica em carga :  $(P_{g1}, I_{g1})$  e  $(P_{g2}, I_{g2})$
- Determinar o valor de  $E_g$  na curva de carga  $V_g(I_g)$  para  $I_g = 0$ , em uma determinada rotação do alternador
- Calcular o valor da resistência de carga por  $r_{ch} = P_g / (3 \cdot I_g^2)$
- Testar um valor de  $K_{dq}$  e calcular  $X_{dg}$  para os dois

pontos de entrada.

- Utilizar algoritmo iterativo para obter os valores de  $X_{dg1}$  e  $X_{dg2}$  aproximadamente iguais.