

JURACI CARLOS DE CASTRO NOBREGA

SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA COM
TRANSMISSÃO ELÉTRICA PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA COM
CONTROLE DE CAMPO A FLUXO CONSTANTE

Dissertação apresentada à Coordenação dos
Cursos de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento parcial às exigências para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Elétrica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia

ORIENTADOR: Telmo Silva de Araújo, Dr. Ing.

CAMPINA GRANDE - PB
JULHO - 1989



N754s

Nóbrega, Juraci Carlos de Castro.

Sistema de conversão de energia eólica com transmissão elétrica para bombeamento de água com controle de campo a fluxo constante / Juraci Carlos de Castro Nóbrega. - Campina Grande, 1989.

139 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1989.

"Orientação : Prof. Dr. Telmo Silva de Araújo".
Referências.

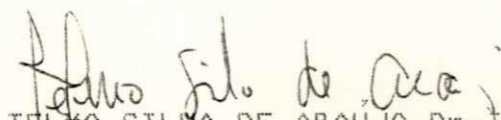
1. Sistemas de Conversão de Energia. 2. Conversão de Energia Eólica. 3. Transmissão Elétrica. 4. Bombeamento de Água. 5. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Araújo, Telmo Silva de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

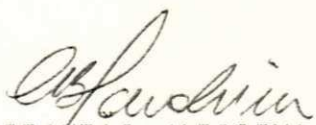
CDU 621.311(043)


SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA
COM TRANSMISSÃO ELÉTRICA PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA
COM CONTROLE DE CAMPO A FLUXO CONSTANTE

JURACI CARLOS DE CASTRO NÓBREGA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 10/07/89


TELMO SILVA DE ARAUJO, Dr. Ing., UFPB
Orientador


CURSINO BRANDAO JACOBINA, Dr. Ing., UFPB
Componente da Banca


SELENIO ROCHA SILVA, D.Sc., UFMG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
JULHO - 1989

A Deus, a minha querida
esposa Lindineide e a
meu pai

Em especial, desejo agradecer à Coordenadora do NERG/CCT/UFPB, professora Maria Solange Moroni Vidal e a toda sua equipe técnica e administrativa, por todo apoio e amizade durante todos estes anos.

RESUMO.

É apresentado um estudo em regime permanente para Sistema de Conversão de Energia Eólica (SCEE), que envolve uma Turbina Eólica, Gerador Síncrono, Linha de Transmissão, Motor Assíncrono e Bomba Centrífuga. O comportamento do sistema, quando acionado a velocidade variável, sob condição de fluxo magnético constante do motor, é examinado mediante a utilização de modelos matemáticos adequados. Um esquema de controle é proposto e testado no laboratório e em campo aberto verificando-se o desempenho através de simulação computacional e comparando com outros modelos já implementados.

ABSTRACT

The steady-state analysis of a Wind Energy Conversion Systems, consisting on a Windmill, Synchronous Generator, transmission Line and Induction Motor driving a Centrifugal Pump is developed. The performance of the system operating at variable Speed with a flux control is examined using mathematical and digital simulation. The control scheme is proposed and tested in laboratory and a test centre to be compared with simulation results.

INDICE

CAPITULO I

| | |
|------------------|---|
| I.1 - Introdução | 1 |
|------------------|---|

CAPITULO II

| | |
|----------------------------------|---|
| II.1 - Introdução | 7 |
| II.2 - Dados técnicos do sistema | 8 |

CAPITULO III

| | |
|--|----|
| III - Fundamentos teóricos | 18 |
| III.1 - Introdução | 18 |
| III.2 - O vento | 19 |
| III.2.1 - Introdução | 19 |
| III.2.2 - Regime de ventos | 20 |
| III.2.3 - Medições do vento | 21 |
| III.3 - Turbina eólica | 23 |
| III.3.1 - Introdução | 23 |
| III.3.2 - Fundamentos teóricos | 25 |
| III.3.2.1 - Tipos de turbinas eólicas existentes | 25 |
| III.3.2.2 - Princípio de funcionamento de uma turbina de eixo horizontal | 26 |
| III.3.2.3 - Coeficiente de uma turbina eólica | 33 |

| | |
|---|----|
| III.3.3 - O modelo matemático | 35 |
| III.3.4 - Ensaio e laboratórios | 37 |
| III.3.5 - Redução de dados | 40 |
| III.4 - Gerador síncrono | 44 |
| III.4.1 - Introdução | 44 |
| III.4.2 - Fundamentos teóricos | 45 |
| III.4.2.1 - Princípio de funcionamento do gerador síncrono | 45 |
| III.4.2.2 - Grandezas em regime permanente | 46 |
| III.4.2.3 - Conjugado do gerador síncrono | 48 |
| III.4.3 - O modelo matemático | 49 |
| III.4.4 - Ensaio e laboratórios | 51 |
| III.4.5 - Redução de dados | 53 |
| III.5 - Transmissão mecânica e sua modelização | 54 |
| III.5.1 - Ensaio e laboratórios | 55 |
| III.6 - Motor de indução | 56 |
| III.6.1 - Introdução | 56 |
| III.6.2 - Fundamentos teóricos | 57 |
| III.6.2.1 - Grandezas em regime permanente | 60 |
| III.6.2.2 - O conjugado do motor de indução com rotor em gaiola | 63 |
| III.6.3 - Motor de indução a fluxo constante | 65 |
| III.6.4 - O modelo matemático | 68 |
| III.6.5 - Ensaio e laboratórios | 70 |

| | |
|--|----|
| III.7 - O retificador semicontrolado | 76 |
| III.7.1 - Introdução ao estudo dos retificadores | 76 |
| III.7.2 - Princípio de funcionamento | 77 |
| III.8 - A bomba centrífuga e componentes hidráulicos | 79 |
| III.8.1 - Introdução ao estudo das bombas centrífugas | 79 |
| III.8.2 - Fundamentos teóricos | 80 |
| III.8.2.1 - Princípio de funcionamento da bomba centrífuga | 80 |
| III.8.2.2 - O modelo matemático | 81 |
| III.8.3 - Ensaio e laboratórios | 85 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|-----|
| IV.1 - Introdução | 88 |
| IV.2 - O SCEE | 88 |
| IV.2.1 - O subsistema elétrico | 89 |
| IV.2.2 - O subsistema acionante | 101 |
| IV.2.3 - O subsistema da bomba centrífuga | 102 |
| IV.3 - O SCEE a fluxo constante | 106 |
| IV.4 - Circuitos eletrônicos utilizados | 108 |
| IV.5 - Análise dos resultados obtidos | 112 |
| IV.5.1 - Obtenção do fluxo constante | 114 |
| IV.5.2 - Resultados experimentais | 115 |
| IV.5.3 - Simulação do SCEE | 117 |
| IV.5.4 - Comparação dos resultados | 120 |
| IV.5.5 - Fluxo X oc constante | 123 |

CAPITULO V

V - Conclusão

128

CAPITULO VI

VI - Bibliografia

134

Apêndice

139

AGRADECIMENTOS

A minha mais sincera gratidão ao professor Telmo Silva de Araújo, pela atenção, apoio e pelo estímulo durante a minha permanência no NERG.

Ao professor Selênio Rocha Silva, do DEE/UFMG, pelo incentivo e contribuições.

Ao professor Cursino Brandão Jacobina, participante da Comissão Examinadora, pelo incentivo e amizade.

Ao professor Evandro Fachine Alencar, pela contribuição e amizade.

Ao físico Manoel Adalberto Guedes do NERG/CCT/UFPB, pelo apoio técnico e amizade.

Ao CNPQ, CAPES e PADCT/SUEP-PB, pelo auxílio financeiro.

Aos demais professores, funcionários e alunos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPB, pela solidariedade a mim dedicada durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica do UTAM/CETIC, pelo apoio e amizade durante todos esses anos.

CAPÍTULO I

I.1. Introdução

A perspectiva do esgotamento das fontes convencionais de energia e o aumento sucessivo do consumo da mesma, assim como o crescente reajuste dos preços do petróleo e de seus derivados tem aberto novos horizontes a pesquisa envolvendo o aproveitamento de outras formas de energia até então não consideradas, como também a consideração do aproveitamento de fontes que forneçam pequenas escalas de energia. Entre estas alternativas existem três que são abundantes, não provocam poluição, e não necessitam de tecnologia importada: são as pequenas quedas de água, energia eólica e a energia foto voltaica.

O aproveitamento de energia eólica para bombeamento de água é de importância fundamental para a região semi-árida nordestina, devido a carência de recursos hídricos necessários a geração de eletricidade, contrastando com o grande potencial de energia eólica existente.

O sistema de conversão de energia eólica (SCEE) objetiva atender esta carência, utilizando a energia eólica, no bombeamento de água assim como no suprimento com eletricidade de pequenas cargas de uso doméstico.

Dentre as inúmeras aplicações, a geração de eletricidade, tendo "o vento" como fonte primária, tem requerido vários estudos não só no exterior como também dentro das universidades brasileiras. Entre estas destaca-se a UFPB/CCT/NERG, que vem desenvolvendo várias áreas de pesquisa, tendo como interesse principal o bombeamento de água. O controle da corrente da bobina de campo de um gerador síncrono, possibilita a operação com excelente rendimento numa gama razoável de velocidades, permitindo obter uma alta confiabilidade a baixo nível de manutenção. A energia gerada pelo SCEE pode ser transmitida com alta eficiência e com custo relativamente baixo comparados com outros processos, tendo em vista que a energia elétrica pode ser facilmente condicionada, modulada ou convertida em várias outras formas de energia, e ainda apresenta fácil remanejamento, devido a grande flexibilidade, do sistema de carga envolvido.

O SCEE utilizado para bombeamento direto com controle de campo, em estudo, tem ainda como finalidade buscar a máxima eficiência no acoplamento de quatro componentes distintos, que são turbina eólica, gerador síncrono, motor de indução e bomba centrífuga.

Trabalhando com sistemas compatíveis com a pesquisa aqui em andamento, existem os estudos realizados por Goezinne (1984) que objetiva o bombeamento de água utilizando turbina eólica acoplada ao gerador por intermédio de uma caixa de transmissão, um grupo motor assíncrono bomba centrífuga conectado ao gerador através de cabos elétricos. Neste sistema, foram realizados estudos teóricos e ensaios em campo que foram comparados com resultados obtidos em um grupo motor-diesel. No âmbito internacional existe um grupo que pesquisa, o mesmo objetivo, G.K.Nathan (1984), utilizando uma turbina multi-pás americana e um motor DC, analisando o comportamento em regime permanente do sistema. No Brasil, existe o trabalho de Silva e Araújo (1986) que analisa o uso de capacitores nos terminais do motor e a autoexcitação do alternador. Outro trabalho realizado pelos mesmos autores refere-se a otimização de um SCEE com transmissão elétrica direta para bombeamento centrífugo de água, onde é analisado o comportamento deste sistema, a viabilidade e as vantagens da conversão de energia eólica para elétrica, objetivando o bombeamento de água. Salientando-se, no que se refere a transmissão elétrica para bombeamento de água, os trabalhos de Memarzadeh e Barton, enfocando potência eólica para bombeamento de água com transmissão elétrica intermediária (1975), e ainda o trabalho de Silva, Araújo e Simões (1987) que analisa o desempenho de sistemas eólicos comportando bombas centrífugas.

No trabalho aqui referido, procura-se através da variação da corrente da bobina de campo do alternador, para um certo intervalo de variação de frequência, operar o motor de indução com fluxo magnético constante assegurando, dessa forma, o conjugado eletromagnético, na condição nominal ou próxima dela. Desta forma obtém-se um torque mecânico da bomba, com alta eficiência para a gama de velocidades de vento mais significativa nesta região.

O sistema em estudo comportará dos seguintes componentes, onde dividiremos em subsistemas acionantes e acionados.

Os subsistemas acionantes comportam:

- . Turbina eólica de eixo horizontal com três pás
- . Transmissão mecânica

Os subsistemas acionados comporta:

- . Gerador síncrono de campo misto
- . Motor assíncrono
- . Linha de transmissão
- . Bomba centrífuga e
- . Aparatos hidráulicos

A pesquisa deste sistema envolve um estudo experimental, que comportará os ensaios em laboratórios, ensaios de campo aberto e também a simulação através de algoritmos, buscando principalmente a obtenção de modelos que descrevem o comportamento físico o mais próximo possível do real, a nível de regime permanente.

Envolvido na filosofia da pesquisa, são relacionados os vários tipos de ensaios efetuados, para cada componente do sistema.

Na turbina eólica serão realizados os ensaios para determinação de seu coeficiente de potência C_p , assim como ensaios para determinar as suas características mecânicas e aerodinâmicas.

No gerador síncrono e motor assíncrono, foram realizados os ensaios clássicos, que visam obter seus parâmetros e características de funcionamento a vazio, em curto-circuito (ou rotor bloqueado no motor), em carga e de desaceleração e as medidas de resistência a frio e a quente.

Na bomba centrífuga foram realizados ensaios para determinação de seu comportamento, quando sujeita a diferentes rotações e para as quais, vários valores de altura estática, para obter as suas curvas características de funcionamento e conhecer o seu ponto de máximo rendimento já levando em consideração os tubos e conexões envolvidos

nos sistemas de sucção e de recalque de água, respectivamente.

Com vista a implementação do controle do fluxo magnético constante do motor de indução, desenvolveu-se o projeto e confecção de um circuito eletrônico, que atua em uma ponte SCR controlada que realimenta a bobina de campo do alternador, gerando assim o nível de E/f constante, que assegura esta hipótese.

Ao que se refere a implementação do sistema, no computador, estes foram realizados em PC'S compatíveis IBM para obtenção de resultados satisfatórios para um grande intervalo de variação da frequência, que se pode compatibilizar com os resultados colhidos dos ensaios de campo aberto e comparar com resultados de outros sistemas envolvidos, nesta mesma área de pesquisa, verificando desta forma a sua viabilidade.

CAPÍTULO II

II.1 - Introdução

Este capítulo é reservado à descrição técnica do sistema, pois um sistema de conversão de energia eólica (SCEE) envolve várias áreas técnicas. Desta maneira, tornando-se imprescindível fazer-se esta descrição, uma vez que cada área requer conhecimentos que lhes são peculiares.

O SCEE, como já foi mencionado no capítulo anterior, é

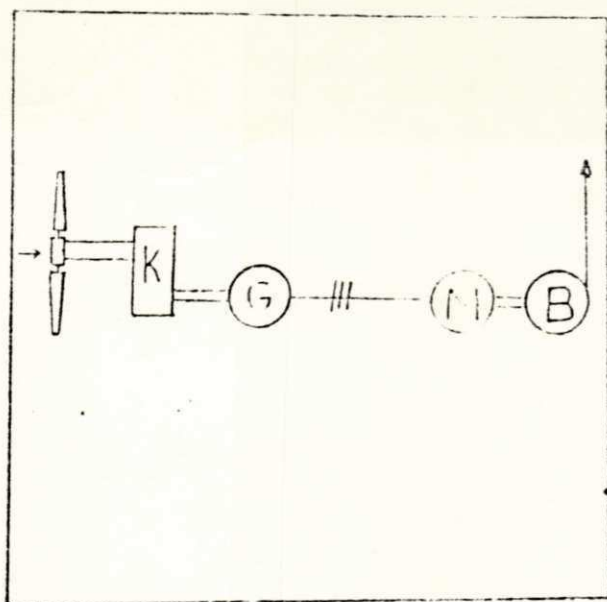


FIG.01 - O SCEE básico

o modelo Elektro WVG120 da empresa Suíça Winterthur. Fazem parte do sistema em estudo uma turbina eólica de eixo horizontal de passo variável, um multiplicador de velocidade (caixa de transmissão), um alternador trifásico, sistemas de proteção e controle, linha de transmissão, bomba centrífuga e instalação hidráulica com cisterna e caixa de água. O esquema básico representativo do sistema de conversão de energia eólica é mostrado na figura 01.

II.2 - Dados técnicos do sistema

A turbina eólica possui três pás de 6,5 m de diâmetro, com passo variável por acionamento centrífugo, com comando

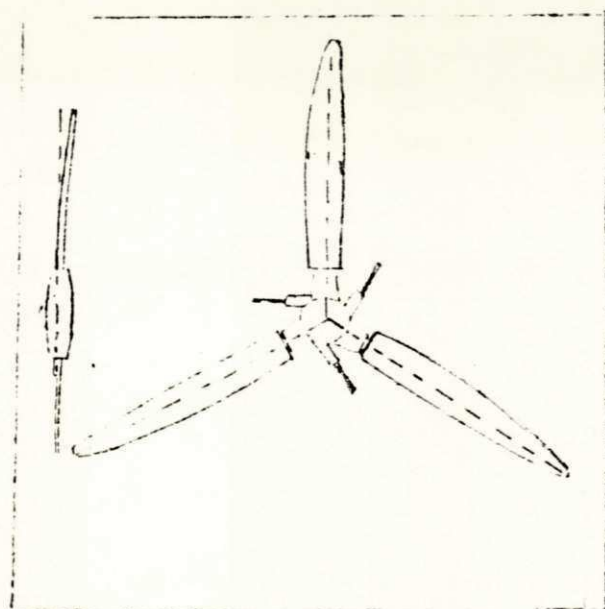


FIG.02 - Turbina eólica Elektro vista de frente e perfil, salientando o sistema de controle de passo da pá

manual ou automático do leme. As pás são construídas com elemento central de madeira maciça, ladeadas por chapas metálicas para garantir maior rigidez mecânica, combatendo desta forma os momentos que tendem a torcer ou cisalhar a peça. As dimensões da pá são de 2,75 m de comprimento e com uma corda constante de 20,15 cm. As pás apresentam uma torção que varia de 5° a -3° da raiz à ponta e uma geometria geométrica com os perfis aerodinâmico padronizados Gottingen, correspondendo aos tipos Go622, Go623 e Go624 respectivamente na raiz, centro e ponta da pá, (Silva,1988). O sistema de controle de passo da pá, é constituído de três conjuntos massa-mola que funcionam com o princípio

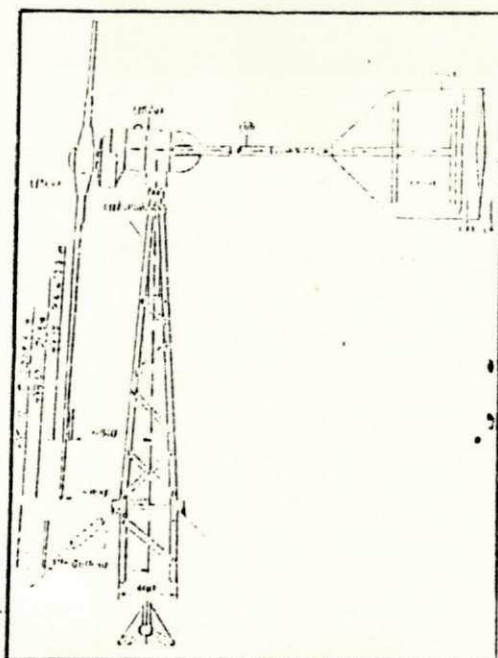


FIG.03 - Gerador eólico WVG 120 detalhe de instalação e da cauda

da manivela, acionada por força centrífuga e distribuídas 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 59° . Outros dados técnicos de bastante significado são os referentes à estrutura da torre que irá suportar o aerogerador, tendo em vista a robustez não só do gerador como das pás e cauda do catavento que representam um peso bastante considerável. A respeito a estrutura da torre outro fator importante é a velocidade máxima que o vento chega a atingir no local da instalação destes equipamentos, pois se não for levado em consideração

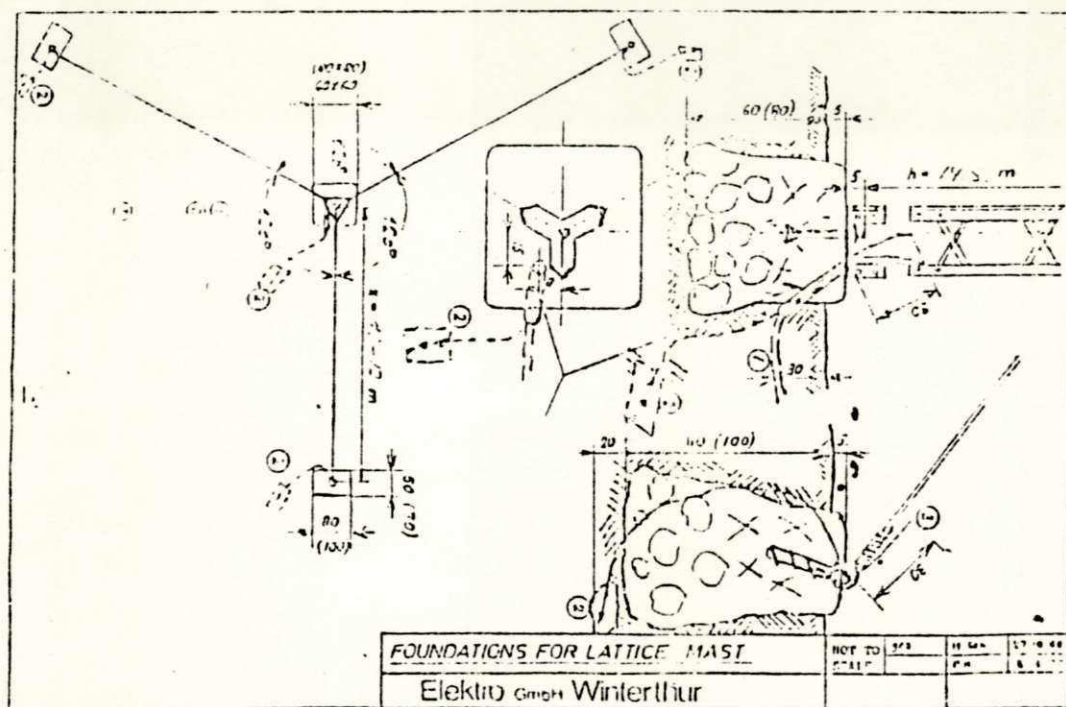


FIG.04 - Detalhes da base da torre do catavento e sapatas para estajo da mesma

todos estes fatores, é colocar em risco todo o equipamento assim como o pessoal envolvido na pesquisa. A figura 04 mostra alguns detalhes das bases da torre e das fundações exigidas pelo fabricante, (Manual Winterthur).

A caixa de multiplicação de velocidades do SCEE, é do tipo engrenagens retas e apresentam uma relação de transmissão $R_t = 4,1176$, esta é responsável pelo acoplamento mecânico entre a turbina e o alternador.

O alternador do Elektro WVG 120, é do tipo síncrono, possuindo 16 pólos e uma estrutura especial de rotor com excitação mista comportando imã permanente mais bobina de campo. O estator desta máquina apresenta um projeto convencional com oito bobinas por fase, com 56 espiras cada uma, conectadas em paralelo. O rotor é constituído em configuração imbricada, comportando quatro estágios de excitação. Cada estágio rotórico possui duas peças magnéticas, com oito sapatas polares cada, e um elemento central de excitação cuja magnetização se processa axialmente. O circuito de rotor, portanto, contém dois estágios com imãs permanentes e dois estágios com bobinas de excitação, (Silva,1988). Originalmente o sistema foi projetado para que o alternador funcione autoexcitado, assim justificando-se a presença dos imãs permanentes na estrutura, facilitando o processo de partida da excitação

O detalhe de instalação do gerador na torre pode ser realizado com o auxílio de um guindaste apropriado, ou utilizando sistemas de roldanas, a figura 05 fornece uma noção de como se faz este acoplamento.

O leme do sistema eólico Elektro tem a finalidade de orientar a turbina na direção preferencial de vento e também exerce o papel de proteção e inicializador de operação do sistema, podendo ele ser deslocado na direção preferencial total ou parcial do vento, através de acionamento manual feito através de uma manivela ou remoto realizado através de um acionamento automático utilizando um motor elétrico de corrente contínua.

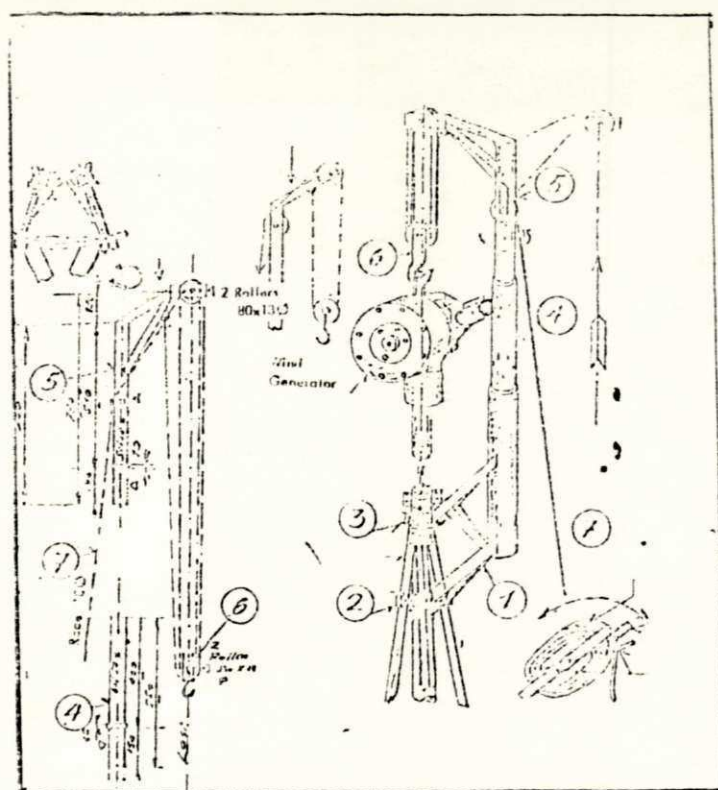


FIG.05 - Instalação do gerador elétrico na torre

Este sistema possui proteção contra sobrecorrente no alternador, sobrecorrente nos barramentos C.A. ou C.C. e sobrevelocidade de vento, que resultam em ação sobre o leme.

A proteção contra sobrecorrente é ajustável entre 55 A e 72 A e é realizada em uma única fase do alternador, através de transformador de corrente e relé eletromecânico, sendo possível também o ajuste da tensão máxima admissível nos barramentos de carga, proporcionando adequada proteção contra excesso de carga nos acumuladores, no caso de sistemas que o utilizem. A proteção contra ventos elevados é feita por lâminas metálicas, que se deslocam sob ação de velocidades de vento superior a 72 Km/h, fechando os contatos elétricos acionando desta forma o circuito de travamento do leme. A liberação automática do leme é feita através de um relé temporizador que é ajustado para operar em um intervalo de 6 a 12 horas, religando desta forma o sistema sem a necessidade de um operador.

Uma torre de medição contendo três anemômetros de copo e um diretor de vento, instalados a uma distância aproximadamente duas vezes o diâmetro do rotor eólico e tendo os instrumentos localizados à mesma altura do eixo do catavento, proporciona adequado sistema de aquisição de dados do regime de vento incidente sobre o SCEE, é válido salientar que esta torre possui três estaios feitos com cabos de aço de maneira a evitar que a torre venha a fletir

devido a ação do vento sobre a mesma.

O grupo moto-bomba, utilizado neste trabalho de pesquisa, é composto de um motor assíncrono de dois pólos possuindo o rotor em gaiola. As características deste grupo moto-bomba, dadas pelo fabricante são : potência nominal de 1 CV, tensão nominal 220/380 Volts, rotação nominal 3430 RPM, estando instalados em conexão direta com o aerogerador através de uma linha de transmissão de 100 metros de comprimento. Tendo em vista o acoplamento de cargas, o motor assíncrono foi rebobinado para funcionar em regime nominal de carga com as tensões de 110/220 V. Também é válido salientar que a linha de transmissão que conecta o grupo moto-bomba aos terminais do aerogerador é feita em instalações subterrâneas dentro de eletrodutos de PVC.

A instalação hidráulica, utiliza tubos e conexões de PVC de 32mm de diâmetro de acordo com as condições nominais de trabalho. A não utilização de uma tubulação com diâmetro inferior ao especificado pelo fabricante é devido o sistema trabalhar sob regime variado de vazão, podendo atuar acima ou bem abaixo das condições nominais de carga. A tubulação é perfeitamente vedada, para impedir a entrada de ar na sucção, devendo esta ser feita por intermédio de fitas apropriadas para este tipo de vedação. A válvula de pé deve ser situada a 20 centímetros do fundo do poço ou a 10 centímetros do fundo se caso for uma cisterna. A montagem da

bomba é feita após a montagem dos equipamentos. É importante que a bomba seja instalada próxima para evitar que o peso da mesma venha a causar danos aos equipamentos. Bem próximas aos bocais de sucção e recalque é instalada uma União com a finalidade de facilitar a remoção da bomba para uma eventual manutenção. O local escolhido para localização da bomba e de fácil acesso e protegido das intempéries do tempo, assim como o mais próximo possível do ponto de captação de água, observando-se um pequeno declive nesse sentido ligeiramente acima do nível do solo para evitar que o motor se molhe. É importante a instalação, na linha de recalque, de uma válvula de retenção para evitar o golpe de ariete.

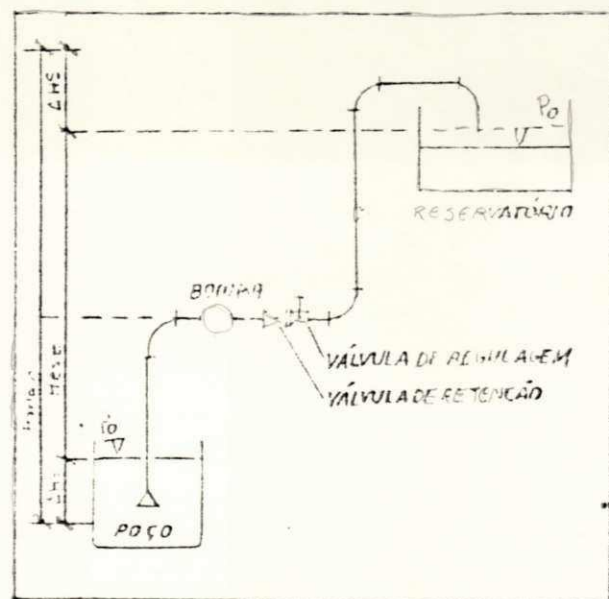


FIG.06 - Esquema hidráulico típico para bombeamento de água

Para início de funcionamento da bomba, antes de dar partida ao motor, enche-se de água o tubo de sucção e a carcaça da bomba (escorvamento). A bomba não deve operar a seco, sob riscos de danos a vedação do eixo. No caso da cisterna ficar acima da bomba (sucção afogada), a mesma estará permanentemente escorvada, podendo ser o caso aqui em estudo. Ainda no processo de partida, ou na instalação do sistema de bombeamento hidráulico verifica-se o eixo do grupo moto-bomba, girando-o através de um alicate para destravá-lo. O mesmo procedimento é recomendado quando as bombas ficarem longo tempo sem funcionarem. A figura 06 mostra um esquema típico de instalação de um grupo moto-bomba para bombeamento de água. As dimensões dos acessórios do circuito hidráulico são os seguintes: cisterna possui um reservatório de 1000×1 , caixa de água possui reservatório de 50×1 , circuito hidráulico de retorno feito com um tubo de PVC de 4". Para medição do volume de água bombeado utilizou-se hidrometros de $5 \frac{m^3}{h}$ de capacidade e uma válvula de retenção. O comprimento da tubulação de recalque é de 9,96 m e de sucção é de 3,51 m. O número de acessórios utilizados foram 3 luvas, 12 joelhos, 3, unioões e 4 conectores, todos levados em consideração no cálculo da perda de carga equivalente.

O circuito de chaveamento do motor é composto de um contator trifásico modelo 3TB-41 da Siemens. Ele é aqui acionado a 24 VCC, onde a chave de partida para sua bobina é

feita por intermédio de um circuito analógico de histerese utilizando transistores, (Silva,1988).

O circuito eletrônico gerador da forma de onda dente de serra de referência, emprega um circuito multiplicador de frequência com PLL ("Phase Locked Loop"), um circuito contador e conversor digital-analógico. Existem ainda os circuitos acopladores óticos que funcionam como circuitos isoladores do circuito de potência e controle, e enviam informações através de pulsos sincronizados com a tensão de saída do alternador. Para os circuitos conversores (V/Hz) utilizou-se o PLL CD4046. Os amplificadores operacionais que foram utilizados nos diversos circuitos eletrônicos são em sua maioria o LM3900. Estes dados técnicos são melhores visualizados nos diagramas elétricos dos circuitos em questão que serão todos vistos no capítulo IV.

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 oito metros.

CAPITULO III

III - Fundamentos teóricos

III.1 - Introdução

Neste capítulo será enfatizada a teoria necessária à compreensão, do funcionamento dos subsistemas acionantes e acionados que compõe o sistema de conversão de energia eólica (SCEE), e os métodos utilizados para obtenção dos parâmetros que estão envolvidos no comportamento característico destes.

No desenvolvimento de modelos matemáticos representativos dos modelos físicos que descrevem o comportamento de qualquer sistema, juntamente com a realização de ensaios visando a busca de características e parâmetros são algumas fases indispensáveis para se fazer uma boa análise de engenharia de sistemas. Em modelos que se deseje uma precisão, com pequena margem de erro, é necessário que obtenham-se, na determinação de parâmetros do modelo, resultados muito próximos daqueles obtidos experimentalmente. Na análise de modelos complexos, que envolvem um grande número de variáveis, é normal a presença de uma série de fenômenos físicos, que irá influenciar no comportamento do sistema.

Do que foi escrito, pode-se dizer que é necessário haver uma conciliação entre a complexidade dos fenômenos com uma representação direcionada às características do sistema e seus sub-sistemas envolvidos. Desta forma mostraremos, para cada uma das parcelas envolvidas, seus modelos matemáticos, os ensaios implementados e os métodos de tratamento de dados, assim como as principais bibliografias onde são encontradas os assuntos abordados neste trabalho.

III.2 - O vento

III.2.1 - Introdução

Para implementação, estudo ou avaliação de um projeto envolvendo a utilização de energia eólica, é imprescindível o conhecimento prévio do comportamento de aspectos relacionados com o relevo, clima e regime de ventos existentes. Desta forma, alguns conceitos básicos sobre regime de vento serão enfocados neste capítulo.

Existem vários estudos realizados sobre regime de vento, salientando-se o trabalho de Nick Papadopoli (1981), que estuda a instalação passo a passo de um SCEE, o trabalho da equipe de meteorologia da UFPB, Juan C. Ceballos (1978), onde são desenvolvidos os nomogramas de potência eólica para Campina Grande, e ainda o trabalho de Medeiros (1986) que se

baseia em dados mais recentes do regime de ventos da cidade de Campina Grande. O tratamento do regime dos ventos será efetuado de forma resumida mas que permitirá uma completa visualização para o nível de entendimento deste estudo.

III.2.2 - Regime de ventos

O regime de ventos é um estudo realizado com o objetivo de avaliar o potencial eólico, assim como a escolha do local para instalar a turbina eólica, por intermédio do registro da velocidade e direção dos ventos através de equipamentos adequados para isto.

A ocorrência de ventos obedece a uma distribuição estatística que varia diariamente, mensalmente e anualmente. Essas distribuições possuem uma certa velocidade média (\bar{V}) e uma variância (σ^2), sendo estas as características mais importantes do regime de ventos. Existem outros elementos que não tem a mesma importância que os já citados, mas merecem serem mencionados, que são a frequência e a amplitude da variação da velocidade e de sua direção devidos estes influenciarem no comportamento dinâmico da turbina, ou ainda podem ser justificados quando houver ocorrência de flutuações rápidas da velocidade ou da direção. Podendo causar certa vibração nas pás da turbina, também a velocidade máxima esperada do vento é um dado importante para projeto no aspecto estrutural da torre do gerador eólico.

Para fazer-se uma análise de vento é necessário que se faça o estudo de alguns aspectos que caracterizam o potencial eólico do local, onde estas características são mostradas e por intermédio de curvas que são distribuição da velocidade do vento no tempo, distribuição de direcção de velocidade, distribuição de duração cumulativa da velocidade, distribuição de frequência da velocidade e a rosa dos ventos, Medeiros (1986) e outros.

O método utilizado para obtenção de dados do regime de ventos é feito da seguinte forma: em intervalos padronizados de 10 minutos realiza-se as medidas de velocidade de vento, o local destas medições são obrigatoriamente abertos sem qualquer obstáculo nas imediações, a uma altura de 10 metros do solo, é recomendado que a torre do anemômetro esteja a uma distância mínima de 10 vezes a altura do obstáculo mais próximo, caso exista.

III.2.3 - Medições do vento

A medida da velocidade de vento pode ser realizada através de vários tipos de anemômetros os três principais são:

Anemômetro de Concha: apresenta 3 ou 4 conchas de forma semi-esférica (ou elíptica) igualmente defasadas. Sua rotação (W) relaciona-se com a velocidade do vento (V)

através da equação da reta: $V = a.W + b$, onde a e b são constantes.

Anemômetro de tubo de pressão: o valor de V é função da pressão dinâmica ($\rho \cdot V^2/2$) causada pelo fluxo de ar contra o sensor do instrumento. Tem a desvantagem da medida depender da densidade do ar (ρ).

Anemômetro a fio quente: muito prático e preciso, mede simultaneamente os três componentes da velocidade do vento, pouco utilizado.

Os anemômetros de concha pode utilizar várias formas de envio de informações sobre o regime de vento, onde preferencialmente todas estas informações utilizam a forma eletromagnética, que pode ser gerada em AC, em DC, em forma ótica ou gerador de pulsos magnéticos.

Para termos acesso a direção do vento, é necessário instrumentos dotados de aletas que posicionam-se paralelamente ao fluxo de ar. Utilizando-se de um transdutor de ângulo posicionado ao eixo do aparelho obtém-se o sinal da posição em andamento.

As perturbações nos valores obtidos das medidas realizadas pelos aparelhos descritos acima são devido as mudanças bruscas do comportamento de regime de vento. Essas

perturbações podem ser causadas por vários parâmetros existentes, onde os tipos mais importantes destas perturbações são as causadas pela redução da velocidade do vento V devido a rugosidade do solo, as turbulências causadas pelas árvores, prédios, torres, pontes, etc. A aceleração ou retardamento que ocorre devida a canalização ou ao passar pela crista de serras, montes, etc.

III.3 - Turbina eólica

III.3.1 - Introdução

O aproveitamento da energia eólica, como fonte primária, para conversão em energia mecânica, supõe-se seu início como força motriz na impulsão de barcos a vela. O aparecimento suposto do primeiro catavento, foi datado a sua construção à quatro milênios pelos " chineses " para bombeamento de água, em 1700 A.C. , Hamurabi, rei da Babilônia, planejou a irrigação da Mesopotâmia através de cataventos, onde os primeiros a utilizarem o catavento foram a China, Egito, Pércia e o Irã, sendo todos de eixo horizontal.

A grande inovação dos cataventos de eixo horizontal e vertical iniciou-se com o seu desenvolvimento em projeto, construção e operação como fonte primária de geração de energia elétrica, onde este modelo era chamado de turbina eólica ou aerogerador.

Os aerogeradores segundo Medeiros (1986), chegam a extrair, em termos de potência média anual, até 1000 Watts por metro quadrado de área de pá com ventos médios de 6.0 metros/segundo. No nordeste brasileiro, é comum o uso de cataventos multipás, tipo fazendeiro, aplicados para bombeamentos de água através de bombas alternativas de simples efeito. Esses modelos são apresentados em 18 e 24 pás, com 3,2 metros de diâmetro apresentando uma alta solidez, comparado com o aqui em estudo, e conseqüente baixa eficiência aerodinâmica, justificando assim o emprego de aerogeradores de números reduzidos de pás, logo com baixa solidez como o Elektro, que apresentam grande eficiência para este tipo de aplicação.

Existem atualmente vários trabalhos publicados, principalmente no exterior, que buscam mostrar o comportamento de turbinas eólicas diversas, onde as mais utilizadas são as de eixo horizontal, onde podem-se destacar os trabalhos de Buehring e Freris (1981) e Casanova e Freris (1982) que vem estudando estratégias de controle para otimização da energia contida nos ventos, Memarzadeh e Barton (1975) que estudam a aplicação ao bombeamento de água via eletricidade e outros. No Brasil, salientam-se o trabalho de Silva (1988) que fornece uma ampla visão do levantamento de características para sistemas já instalados, Medeiros (1986) que faz uma análise da modelagem de uma turbina tipo multipás para bombeamento de água.

Outros trabalhos existentes utilizando outros tipos de rotor eólico a destacar são os trabalhos com rotor eólico tipo Savonius de Simões (1985) e Araújo (1987), onde o primeiro faz o estudo da otimização de um sistema eólico de bombeamento de água (SEBA) e o segundo faz o estudo da aplicação do rotor Savonius de três estágios acoplado a um gerador para alimentar um sistema de bateria. A turbina tipo Darrieus também vem sendo estudada tanto no exterior como no Brasil, onde destacamos o trabalho publicado de R. Nolan Clark (1984) no Texas (E.U.A) que estuda a irrigação feita através do bombeamento de água direto, através de acoplamento mecânico, e também estudos vem sendo realizados no CCT/UFPB/NERG por Simões e Araújo, utilizando um rotor de eixo vertical de pás retas, em andamento.

III.3.2. Fundamentos teóricos

III.3.2.1. Tipos de turbinas eólicas existentes

Uma turbina eólica, pode ser classificada principalmente, através da força predominante que realiza trabalho, isto é pelas forças de sustentação ou arraste, assim como pela posição do seu eixo de rotação, horizontal ou vertical.

Os tipos classificados de acordo com o seu eixo, podem ser: as de eixo horizontal de uma pá ou monóptero, duas ou

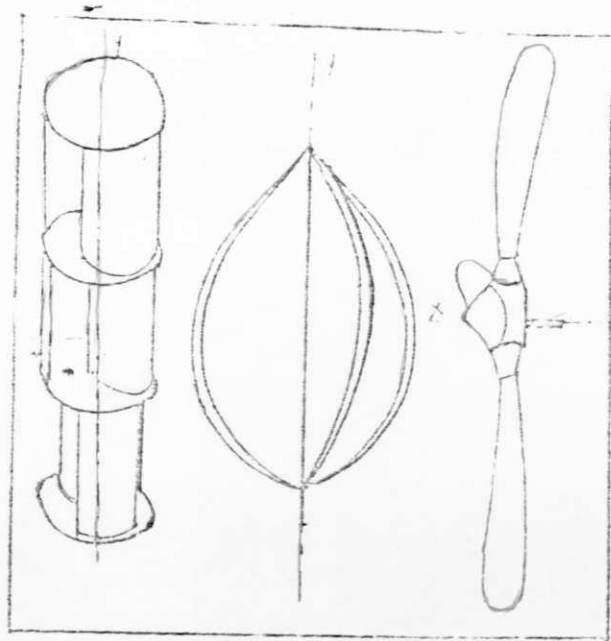


FIG.07 - Rotores eólicos Savonius, Darrieus e de eixo horizontal.

três pás e a turbina tipo multipás; as de eixo vertical classificadas de acordo com a força predominante, sendo do tipo arrasto "Savonius " ou do tipo sustentação, "Darrieus ".

A figura 07 mostra os três tipos de turbinas que são básicas para o projeto dos outros tipos.

III.3.2.2. Princípio de funcionamento de uma turbina de eixo horizontal

Para compreensão do funcionamento de uma turbina eólica, do tipo eixo horizontal, é necessário que se conheça as forças aerodinâmicas envolvidas no sistema.

A teoria da asa de sustentação, mostra algumas noções sobre a sustentação de uma asa, logo é imprescindível à sua compreensão.

Nos últimos sessenta anos foi desenvolvida a teoria do vôo que se preocupa somente com uma pá isolada, a asa do avião, denominada asa de sustentação. Esta teoria da asa de sustentação foi aplicada a partir de 1940 no cálculo das máquinas de fluxo que possuem poucas pás, que podem ser, turbinas, bombas e ventiladores axiais, apresentando uma boa compatibilidade com a teoria da hélice.

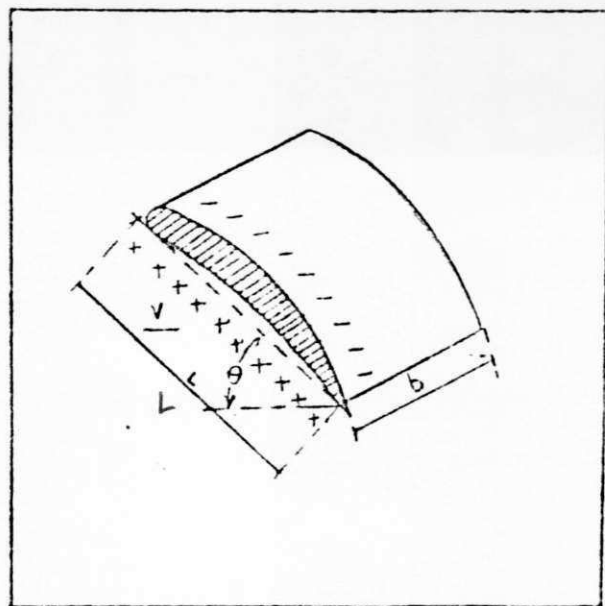


FIG.08 - Asa de sustentação

Seja a figura 08, o desenho representativo de um perfil de asa de profundidade b e comprimento L .

Admitindo uma direção horizontal para a corrente não perturbada, este perfil, ou melhor a direção de sua corda forma com a direção da corrente um ângulo θ , denominado ângulo de ataque. A direção de corrente não perturbada é dada pela direção da velocidade V_{∞} , onde o símbolo ∞ representa a não influência do perfil sobre a direção de corrente. Devido a variação da pressão entre as partes inferior e superior do perfil, nasce uma circulação em torno da asa. Na figura 08 representa-se com sinais "+" na parte inferior ou lado de estagnação da asa, e, com sinais "-" o lado superior ou lado de sucção da asa. Esta circulação provoca o aparecimento de uma força normal à asa, que por sua vez pode ser decomposta em duas, uma normal a V_{∞} , denominada de "força de sustentação F_s ", e outra na direção de V_{∞} denominada de "força de arraste F_a ". Correspondentemente, pelo princípio de ação e reação, a asa atua sobre o fluido com as forças de reação F'_s e F'_a .

$$P_e = \rho \cdot V_{\infty}^2 / 2 \quad (3.01)$$

P_e - pressão de estagnação dinâmica

assim temos

$$F_s = C_s \cdot L \cdot b \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 / 2 \quad (3.02)$$

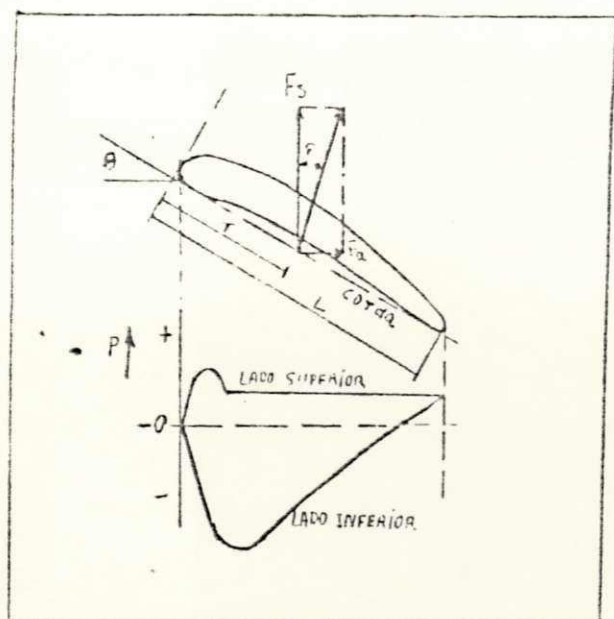


FIG.09 - Forças e distribuição de pressão em uma asa de sustentação.

$$F_a = C_a \cdot L \cdot b \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 / 2 \quad (3.03)$$

Onde

C_s - coeficiente de sustentação

C_a - coeficiente de arraste

Para determinarmos o ponto de aplicação das forças, usamos a equação do momento relativamente a um eixo pré-fixado, normalmente passando por θ , veja figura 09.

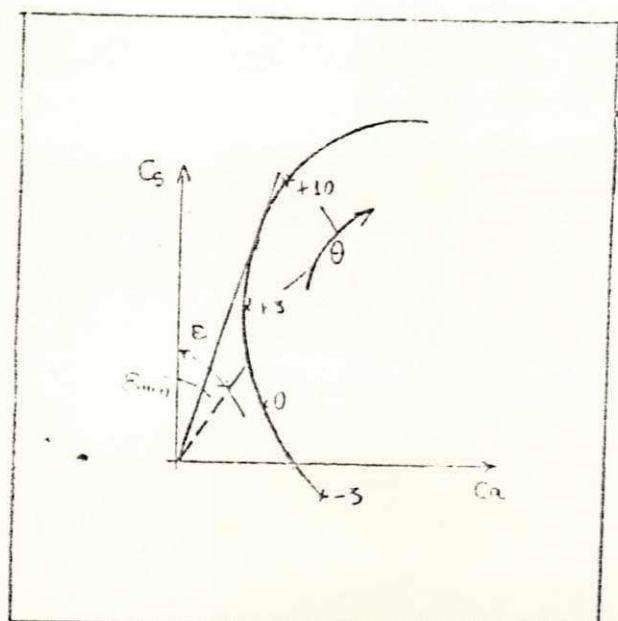


FIG.10 - Curva polar

A curva $C_s = f(C_a)$ para vários ângulos de ataque denomina-se curva polar. Define-se como coeficiente de escorregamento a relação

$$\operatorname{tg} \varepsilon \cong \varepsilon = F_a / F_s = C_a / C_s \quad (3.04)$$

Na figura 10 representamos a curva polar e o valor do coeficiente de escorregamento mínimo E_{\min} , correspondente a tangente, a curva passando pela origem.

Na figura 12 é mostrado o esquema da geometria de uma hélice sujeita a uma velocidade de vento não perturbada V_{00} onde o movimento de rotação é perpendicular também a direção não perturbada de vento V_{00} . O corte em uma das pás da hélice, mostrado a partir de uma vista lateral, indica uma vista do perfil da hélice dando todos os detalhes

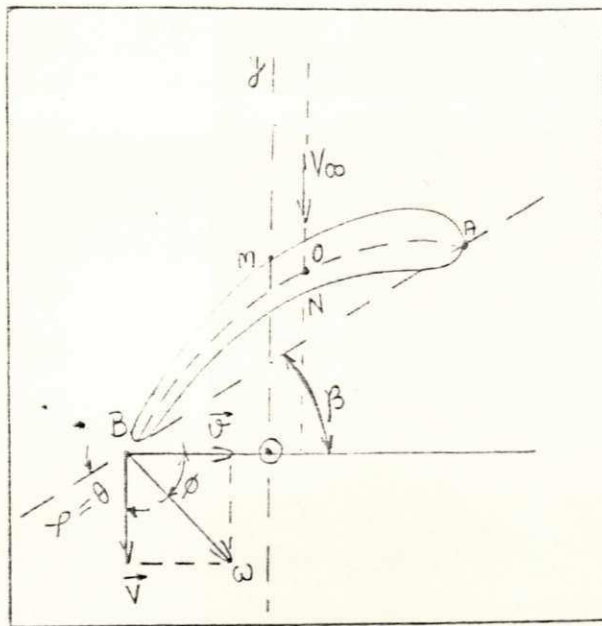


FIG.11 - Perfil de uma asa

construtivos e de projeto da mesma. Na figura 12 tem-se este corte mostrado em parte rachurada, e a figura 13 mostra o desenho deste perfil de pá.

De acordo com a figura 11, tem-se que

- A - borda de ataque
- B - borda de fuga
- \overline{AB} - corda de referência do perfil
- \widehat{AMB} - extrado do perfil
- \widehat{ANB} - intrado do perfil
- \widehat{AOB} - mediana do perfil
- β - ângulo geométrico da pá
- ϕ - ângulo de aproximação
- α - ângulo de ataque

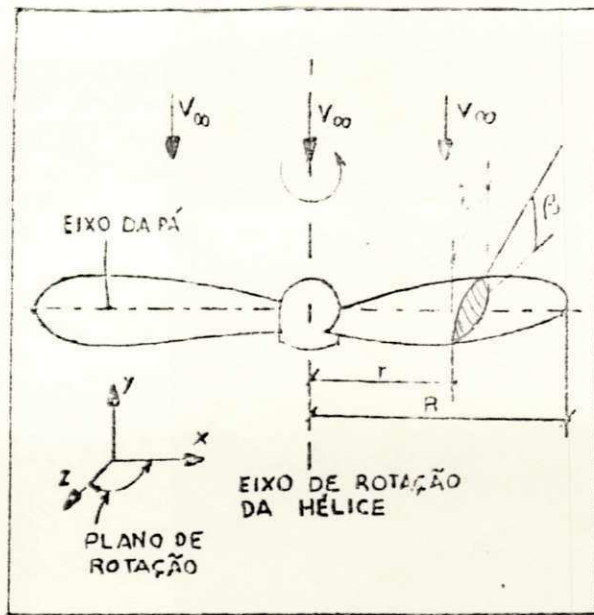


FIG.12 - Esquema aerodinâmico de uma hélice

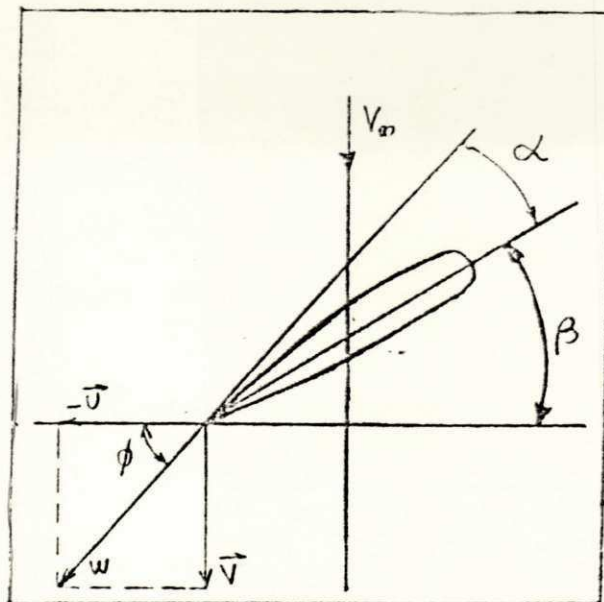


FIG.13 - Obtenção de velocidade resultante referente ao perfil

Como pode-se observar, através da figura 13, existe uma ampla compatibilidade entre o desempenho aerodinâmico de uma hélice e um perfil de asa de envergadura limitada. Desta forma algumas turbinas eólicas apresentam dispositivo de variação do ângulo de passo da pá, afim de controlar a velocidade, e portanto, a potência, reduzindo-se o ângulo de ataque pelo aumento do ângulo de passo.

III.3.2.3 - Coeficiente de uma turbina eólica

A turbina eólica, em estudo, é do tipo rápida, que como já sabemos se caracteriza por operar por sustentação apresentando elevadas velocidades e altos rendimentos aerodinâmicos.

Como a potência desenvolvida por uma turbina eólica depende diretamente da velocidade do vento e da velocidade rotacional, a relação com essas grandezas, será expressa através de coeficientes adimensionais. Dois parâmetros adimensionais que descrevem estas relações são a relação de velocidade λ e o coeficiente de potência C_p , onde.

$$\lambda = \omega \cdot R / V \quad (3.05)$$

R - raio do rotor eólico

ω - velocidade angular do eixo do rotor eólico

V - velocidade do vento

λ - relação de velocidade

O coeficiente de potência ou rendimento aerodinâmico é dado por:

$$C_p = P_{\text{eixo}} / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3) \quad (3.06)$$

E o coeficiente de conjugado é

$$C_q = T / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V^2) \quad (3.07)$$

Onde

P_{eixo} - potência no eixo da turbina

T - conjugado desenvolvido pelo rotor eólico

A - área varrida pela turbina

V - velocidade do vento

ρ - densidade relativa do ar

As características $C_p(\lambda)$ e $C_q(\lambda)$ de uma turbina eólica serão ilustradas mais a frente, cujo valor de operação, a rendimento aerodinâmico máximo, $C_{p\text{max}}$ é obtido em um valor intermediário de λ , denominado λ_0 , ou valor ótimo. Da mesma maneira o valor de $C_{q\text{max}}$, é obtido para um valor λ_t onde $\lambda_t < \lambda$ determina a região de estabilidade na operação da

turbina. Para obter os valores da relação de velocidade caracterizase a região de estolamento da pá, onde haverá perda de sustentação que ocorre das seções externas da pá (ponta) para as internas.

Um parâmetro bastante significativo nos projetos de turbinas eólicas, é a solidez que é a relação entre a área total das pás do rotor e a área varrida por essa, num perímetro correspondente a 70% do raio das pás (Silva (1988), uma vez que estas regiões é que estão sujeitas aos maiores esforços sendo expressa de acordo com a equação abaixo.

$$\sigma = n.C / (0,7 . \pi . D) \quad (3.09)$$

Onde

n - número de pás

C - corda a 0,7 do raio das pás

D - diâmetro do rotor

σ - solidez

A referência de 0,7 do raio é devido esta região estar sujeita aos maiores esforços

III.3.3 - O modelo matemático

1) Coeficiente de potência do movimento aerodinâmico

Como visto no item anterior, é uma função dependente da relação de velocidade λ e do ângulo de passo β . Várias expressões tem sido elaboradas para fazer esta representação, onde o modelo matemático que mais se adequou ao sistema físico existente do rotor eólico, foi proposto por Power (1988) para turbinas a passo fixo, como mostrado abaixo.

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=1}^{2n+1} b(i-1) \cdot \lambda^{1+(i-1)/n} \quad (3.10)$$

Onde

$b(i-1)$ - são coeficientes constantes

n - é a ordem do modelo

Devido aos modelos de ordem superior a 2^a ($n > 2$), envolverem grande números de coeficientes, tornam-se desaconselháveis devido a complexidade envolvida para sua obtenção. Em seguida é mostrado o modelo de segunda ordem com o qual foram feitas as simulações no algoritmo.

$$C_p(\lambda) = b_0 \cdot \lambda^{3/2} + b_1 \cdot \lambda^2 + b_2 \cdot \lambda^{5/2} + b_3 \cdot \lambda^3 \quad (3.11)$$

$$C_q(\lambda) = b_0 \cdot \lambda^{1/2} + b_1 \cdot \lambda^{3/2} + b_2 \cdot \lambda^2 + b_3 \cdot \lambda^3 \quad (3.12)$$

Como a turbina eólica em estudo, pode ser feita a variação no ângulo de passo " β ", então para cada valor de

Ângulo de passo existirá novos valores dos coeficientes constantes $b(i-1)$.

A relação existente entre o ângulo de passo e os valores dos $b(i-1)$ respectivos é mostrado na expressão abaixo.

$$b(i-1) = a_0 + a_1 \cdot \beta + a_2 \cdot \beta^2 \quad (3.13)$$

Onde

a_j - são coeficientes obtidos experimentalmente.

Com estas expressões foi possível compatibilizar o modelo matemático com o comportamento físico do sistema visando obedecer a faixa de operação do sistema de interesse do estudo.

III.3.4 - Ensaios e laboratórios

Apartir do conhecimento prévio da geometria do perfil aerodinâmico da pá de um rotor eólico, é possível conhecer-se o conjugado em seu eixo, através de métodos, tais como a teoria do elemento da pá ou a teoria do ventilador.

A melhor solução para sistemas eólicos já instalados Silva (1988), é o de campo aberto pois não é necessário a

desmontagem e deslocamento de peças assim como não necessitam de equipamentos e instalações especiais. Compõe este ensaio a técnica de aceleração livre, Simões (1986) e Musgrove (1979), que tem o objetivo de obter o momento de inércia, onde este é ilustrado pela seguinte expressão.

$$I_{pa} = P_{pa} \cdot L_c^2 / W \quad (3.14)$$

Onde

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

L_c - é a distância do centro de gravidade da pá ao eixo
($L_c = 1,275 \text{ m}$)

W - é a frequência de oscilação ($W = 2,384 \text{ rad/seg}$)

Para as três pás

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

O momento de inércia do resto do sistema é obtido através do método da aceleração a conjugado constante, descrito por Simões (1986), onde a expressão abaixo ilustra este parâmetro.

$$I_{sr} = D.P. [(tq)^2 / (8.h)] \quad (3.15)$$

Onde

P - é a força do peso aplicado

D - é o diâmetro do cilindro

h - é a altura da queda

tq - é o tempo da queda

Com estes dois ensaios, obteve-se a inércia total do sistema, rotor eólico, alternador e transmissão mecânica que vale:

$$I_t = 79,64 \text{ Kg.m}^2$$

Para determinação do coeficiente de potência $C_p(\lambda)$, utilizou-se o ensaio da aceleração livre, Simões e outros (1986). As etapas utilizadas neste método são as seguintes:

. Inicia-se o ensaio, com um conhecido ângulo de passo e libera-se a turbina para acelerar a partir do repouso, sem carga

. Registra-se a velocidade rotacional da turbina conjuntamente com a velocidade do vento

. O limite para esses registros é até que a rotação da turbina se estabilize.

Os equipamentos utilizado para esta medição podem ser de qualquer tipo, mais de preferência registradores gráficos do tipo X-Y que facilitam na visualização do comportamento da aceleração.

Com os resultados obtidos dos testes citados acima, o coeficiente de potência é expresso por.

$$C_p(\lambda) = \frac{(I_t \cdot W \cdot dW/dt)}{1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (3.16)$$

III.3.5 - Redução de dados

O ensaio citado no item anterior deve ser realizado várias vezes para obter-se o maior número de resultados práticos, pois isto irá garantir que, através da redução de dados, uma melhor aproximação ao comportamento real do sistema físico expresso matematicamente.

Com os dados colhidos, é indicado o método da diferenciação numérica por interpolação polinomial para obter-se a expressão matemática da aceleração angular.

Com o valor da aceleração angular obtida pelo método citado, é possível calcular-se o valor de $C_p(\lambda)$ por intermédio da expressão.

$$C_p(\lambda) = \frac{\int \sum_{i=1}^{n_W} W_i \cdot dW_i / dt}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_j^3} \quad (3.17)$$

Para

$$1 \leq i \leq n_W$$

$$1 \leq j \leq n_V$$

Onde

n_W - número de pontos da curva $W(t)$

n_V - número de registros de vento

Com as características $C_p(\lambda)$ obtidas, dos diversos testes, faz-se o tratamento de dados que resultará em um único conjunto de pontos necessários a gerar a curva $C_p(\lambda)$ que caracteriza, mais aproximadamente o sistema, Silva (1988).

Como visto o modelo de Power é indicado somente para as turbinas com passo fixo, logo para outros valores de β , o

| β | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | ERRO QUADRÁTICO |
|---------|---------|----------|----------|---------|----------|-----------------------|
| 15° | 0.00475 | 0.004 | 0.00281 | 0.01154 | -0.00388 | 22,4.10 ⁻⁴ |
| 20° | 0.00811 | -0.01503 | 0.02021 | 0.00056 | -0.00231 | 17,9.10 ⁻⁴ |
| 25° | 0.01106 | 0.01461 | -0.04612 | 0.04861 | -0.01426 | 6,7.10 ⁻⁴ |
| 30° | 0.01897 | 0.00079 | -0.02492 | 0.03366 | -0.01195 | 8,0.10 ⁻⁴ |
| 35° | 0.01362 | 0.01136 | -0.02611 | 0.03045 | -0.01246 | 3,44.10 ⁻⁴ |
| 40° | 0.01125 | 0.04970 | -0.13993 | 0.14873 | -0.05327 | 4,34.10 ⁻⁴ |
| 45° | 0.01308 | 0.01463 | -0.03934 | 0.06413 | -0.03586 | 4,85.10 ⁻⁴ |

TAB.01 - Coeficiente do polinômio de Power para n=2 em função do ângulo de passo (β) (Silva, 1988).

| β | $C_q(0)$ | C_{pmax} | C_{Tmax} | λ_0 | λ_t | max λ |
|---------|----------|------------|------------|-------------|-------------|---------------|
| 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° | 0,013615 | 0,0275 | 0,01685 | 2,00 | 1,00 | 3,04 |
| 40° | 0,011254 | 0,0233 | 0,01715 | 1,65 | 1,15 | 2,34 |
| 45° | 0,013078 | 0,0175 | 0,01777 | 1,20 | 0,70 | 1,80 |

TAB.02 - Parâmetros básico das características (Silva, 1988)

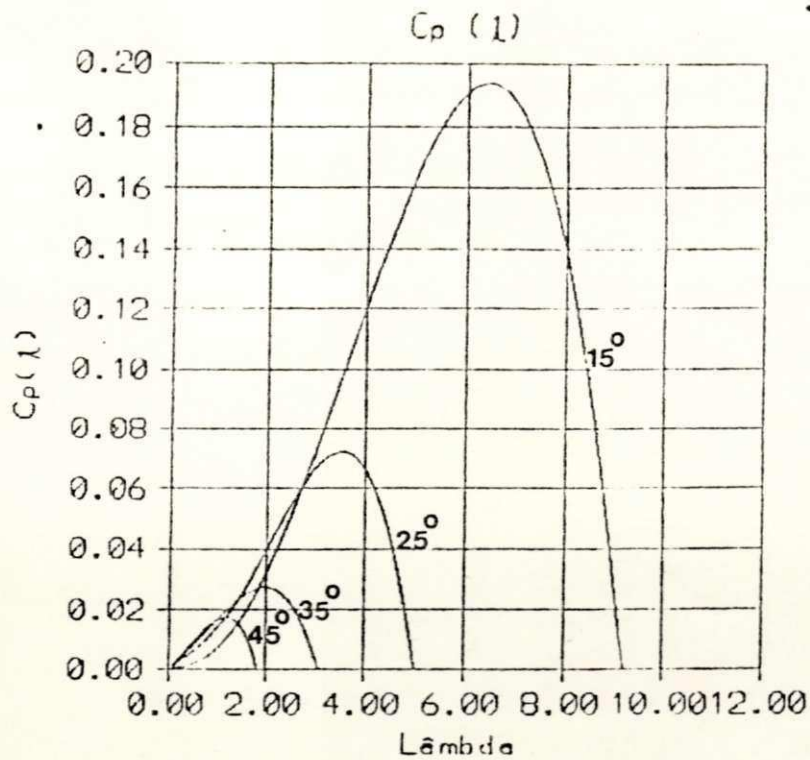


FIG.14 - Características $C_p(\lambda, \beta)$ para valores de ângulo de passo (β).

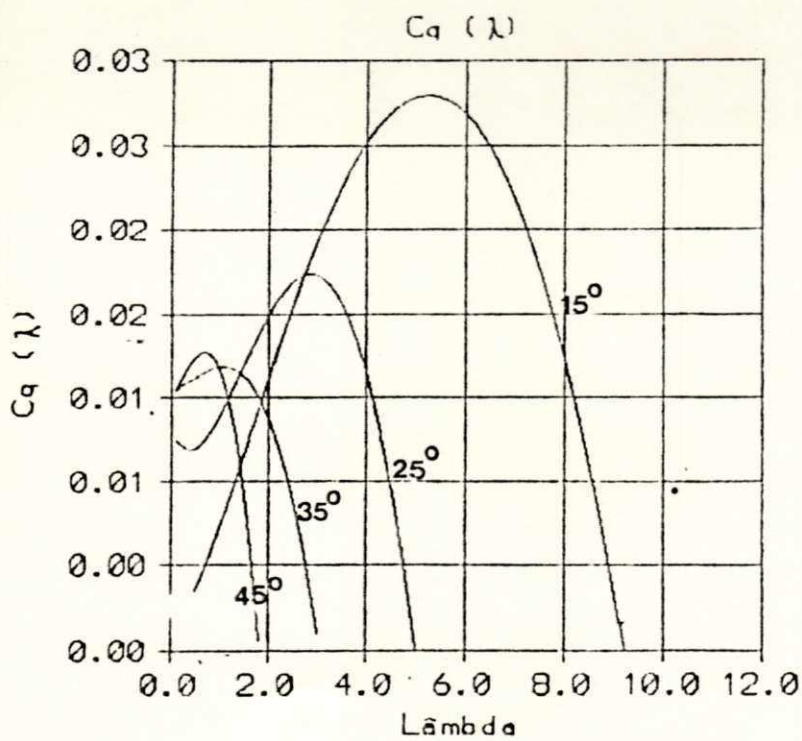


FIG.15 - Característica $C_q(\lambda, \beta)$ para vários ângulos de passo (β).

ensaio terá que ser repetido, então para cada ângulo de passo β , teremos uma curva característica $C_p(\lambda, \beta)$.

De acordo com Simões (1986), o mecanismo centrífugo do controle do ângulo de passo da pá possui um limite de variação entre 15° e 25° . Partindo-se destes dados fez-se a regressão linear para obter-se os coeficientes $b(i-1)$ para três valores de ângulos que foram 15° , 20° e 25° . Para o restante dos ângulos encontrados nas duas tabelas que seguem foram ajustadas para representar a curva $C_p(\lambda, \beta)$ para $\beta = 15^\circ$, a figura 14 mostra o comportamento de $C_p(\lambda, \beta)$ para vários valores do ângulo de passo β , e é verificado que o máximo valor de C_p é na faixa de 20% a um valor de $\lambda_{otimo} = 6.35$.

III.4 - Gerador síncrono

III.4.1. Introdução

O modelo representativo da máquina síncrona, tem sido alvo de muitos estudos de pesquisa, com a finalidade de encontrar diferentes formas de sua representação. No presente estudo, o modelo escolhido foi o que melhor se adaptou ao trabalho aqui realizado, no qual o sistema opera com frequência variável em uma escala de velocidade bastante ampla.

III.4.2 - Fundamentos teóricos

III.4.2.1 - Princípio de funcionamento do gerador síncrono

Suponha que se tenha um enrolamento trifásico, com as suas três fases ligadas em delta ou estrela, e com seus terminais de linha em aberto. Excitando-se o enrolamento rotórico com corrente contínua I_f e girando-se o rotor com velocidade ω_{rg} , a configuração espacial N-S de f.m.m. , e conseqüentemente, o fluxo, produzido pelo rotor induzirá f.e.m. nas bobinas das três fases estatóricas senoidais e defasadas entre si de um ângulo de 120° . Conectando-se uma resistência de carga nos terminais da linha, aparecerão as correntes trifásicas $I_{g1}(t)$, $I_{g2}(t)$ e $I_{g3}(t)$ defasadas entre si de 120° .

A circulação dessas três correntes, produzirá um campo rotativo, que girará a uma dada velocidade síncrona.

$$\omega_{sg} = 2 \cdot \pi \cdot n_{rg} \quad (3.18)$$

Como a velocidade relativa é nula entre o campo e o rotor, então manifesta-se um conjugado desenvolvido, constante, desde que os valores eficazes das correntes estatóricas permaneçam constantes. No funcionamento da máquina síncrona como gerador, o conjugado desenvolvido é resistente, sendo o conjugado externo, aplicado ao eixo de forma motora em vez de resistente, resultando no ângulo

entre as linhas centrais do campo girante e do rotor em avanço, isto é, o rotor caminhará na frente, sendo continuamente acompanhado e atraído pelo campo rotativo.

III.4.2.2 - Grandezas em regime permanente

A máquina síncrona de indutor cilíndrico liso não tem direção preferencial de relutância, oferecidas aos fluxos magnéticos, logo não há variação das impedâncias próprias dos enrolamentos segundo qualquer eixo.

A tensão nos terminais da máquina síncrona, com corrente de fase I_g , é dada por:

$$V_g = E_g - (R_g + jX_g) \cdot I_g \quad (3.19)$$

Onde

R_g - é a resistência do gerador

X_g - é a reatância síncrona do gerador.

Esta expressão pode ser vista no circuito da figura 16, chamado de circuito equivalente, por fase, da máquina síncrona de indutor liso em regime permanente senoidal.

Esses circuitos são de parâmetros concentrados e servem

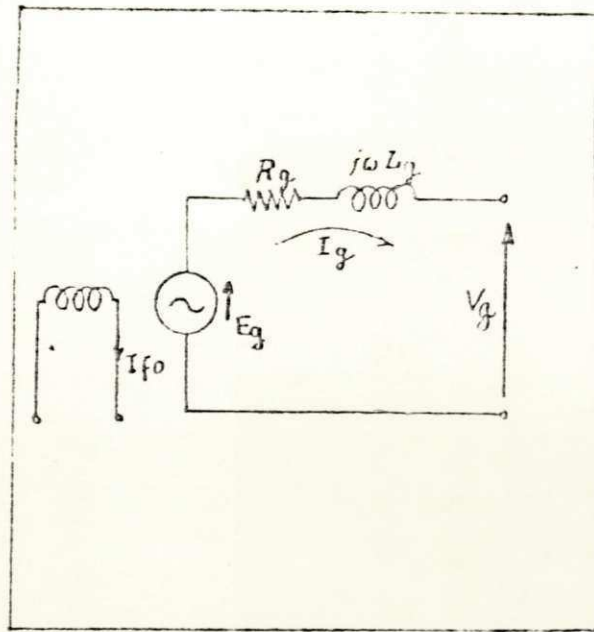


FIG.16 - Circuito equivalente, por fase, da máquina síncrona de indutor cilíndrico, em regime permanente senoidal, convenção gerador.

para traduzir, ou simular, do ponto de vista elétrico, o funcionamento da máquina vista de seus terminais.

O circuito equivalente envolve tensões, correntes e potências, por fase, de uma máquina síncrona simétrica, equilibrada, em regime permanente senoidal.

A característica de magnetização, para o alternador em estudo, tendo em vista o campo misto, formado por bobinas de campo mais ímã permanente, é expressa por Araújo e Silva (1988), onde.

$$E_g = W_{sg} \cdot (K_t + K_g \sqrt{3} I_f) \quad (3.20)$$

III.4.2.3 - Conjugado do gerador síncrono

De acordo com a figura 16, não levando em consideração a resistência de armadura R_g . A equação da corrente, por fase, da armadura é dada por.

$$I_g = \frac{(E_g - V_g)}{jX_g} = \frac{-j(E_g - V_g)}{X_g} \quad (3.21)$$

As potências elétricas, ativa, reativa e aparente, fornecidas à linha serão

$$P = V_g \cdot I_g \cdot \cos \theta_g \quad (3.22)$$

$$Q = V_g \cdot I_g \cdot \sin \theta_g \quad (3.23)$$

$$N = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_g \cdot I_g \quad (3.24)$$

A potência mecânica, sem considerar as perdas é dada por

$$P_{mec} = P \quad (3.25)$$

e o conjugado

$$Capl = P / W_{sg} \quad (3.26)$$

A modelagem das perdas mecânicas a serem consideradas na simulação, do sistema será mostrada no item a seguir.

III.4.3 - O modelo matemático

O modelo matemático representativo, do gerador síncrono, funcionando em regime permanente, é um modelo simplificado que no entanto serve perfeitamente aos objetivos deste estudo.

Para simular a máquina síncrona em estudo, em condições de regime permanente, o modelo envolve as equações básicas mostradas no item anterior, acrescidas dos modelos das perdas envolvidas no sistema.

Para representarmos as perdas dissipadas pelo alternador, quando este estiver operando, em condições de velocidade variável é necessário que se faça um estudo bastante minucioso, começando por se definir quais os tipos de perdas envolvidas, que segundo Levi (1985), são:

Perdas joulicas nas resistências dos enrolamentos estatóricos e rotóricos

Perdas no ferro, correspondentes as perdas por histerese e por correntes parasitas (Foucault)

Perdas adicionais, que estão relacionadas aos efeitos de corrente estatórica produzindo perdas na superfície dos pólos e nos dentes, perdas por pulsação de fluxo e nas terminações das bobinas.

Perdas mecânicas por atrito e ventilação.

As perdas por histerese e corrente de Foucault, apresentam um comportamento bastante conhecido, representadas pelas seguintes expressões matemáticas, segundo Silva (1988)

$$P_h = K_h \cdot B^2 \cdot f \quad (3.27)$$

$$P_f = K_f \cdot B^2 \cdot f^2 \quad (3.28)$$

B - densidade de fluxo magnético

f - frequência das grandezas elétricas

K_h e K_f - Coeficientes de proporcionalidade

As perdas globais no ferro é dada pela expressão, conforme Kostenko (1975)

$$P_{fe} = K_{fe} \cdot E^2 \cdot f^{(p-m)} \quad (3.29)$$

m, K_{fe} e K_p - são coeficientes constantes

As perdas mecânicas segundo Silva (1988) e Levi (1984), podem ser expressas por uma equação que aglutine todos os efeitos referentes a velocidade rotacional como a vista abaixo.

$$P_{mec} = K_m \cdot W^p \quad (3.30)$$

Onde

K_m e p - são coeficientes

W - rotação do alternador em rad/seg

Onde p pode variar entre 1.0 e 2.0 dependendo das superfícies de contato. Desta forma, representando cada parcela de perdas é possível avaliar o rendimento da conversão eletromecânica.

III.4.4 - Ensaio e Laboratórios

Para obtenção de parâmetros de máquina elétrica em geral é comumente empregados os ensaios ditos clássicos, tendo em vista que esses são mais facilmente empregados e os resultados obtidos da sua utilização garantem uma boa aproximação das características. Dentre esses estão os ensaios a vazio, em curto circuito, em carga e a fator de potência nulo.

Para avaliarmos os parâmetros e características em uma dada máquina elétrica de projeto especial, cuja estrutura comporta ímãs permanentes, haverá, certas dificuldades na implementação desses ensaios clássicos de acordo com Abdelaziz (1982).

Consta nos objetivos dos ensaios de máquinas síncronas a obtenção do seu rendimento em regime permanente através das medidas necessárias realizadas em laboratório Silva (1988) e Falcone (1979).

O ensaio a vazio realizado em uma máquina síncrona tem em seu objetivo o levantamento do modelo matemático do comportamento da curva de magnetização, ou seja, $E_0 = f(I_{exc.})$, sendo também chamado de curva de saturação em vazio.

O ensaio em curto-circuito tem em seu objetivo principal a determinação da reatância síncrona da máquina. Esse ensaio consta do comportamento da curva da corrente de curto-circuito do gerador, ou seja, $I_{gcc} = f(I_{exc.})$, a partir dos ensaios a vazio e curto-circuito pode-se conhecer o comportamento físico da curva reatância síncrona de uma máquina de rotor cilíndrico para toda e qualquer condição de excitação, isto é para todo e qualquer valor de corrente de campo I_f .

As perdas dissipadas pela máquina elétrica são obtidas do ensaio em carga, que consta do levantamento da curva característica de potência, variando-se os valores das cargas existentes nos terminais da máquina, e mantendo-se constante os valores nominais de tensão e frequência.

No ensaio do alternador a fator de potência nulo, utilizou-se um motor síncrono subexcitado, representando a carga reativa. Neste ensaio, procura-se conseguir a equivalência ampere-espira entre campo e armadura.

Finalmente, para conseguir-se encontrar valores compatíveis com os dados de placa do fabricante, fez-se nas resistências elétricas medidas a quente e a frio, no início e término dos ensaios de curto-circuito e ensaio a vazio respectivamente.

III.4.5 - Redução de dados

As perdas no ensaio a vazio, são designadas como perdas no ferro e mecânicas, podendo-se utilizar o método dos mínimos quadrados, Silva (1988), para obtenção dos coeficientes da equação que descreve o comportamento dessas perdas, Kostenko (1975).

$$P_{feg} = 0.1061 \cdot E_g \cdot \sqrt{f} \quad (3.31)$$

$$P_{mec} = 27.61 \text{ Watts}$$

Neste modelo é suposto que essas perdas sempre sejam função da rotação.

As perdas no ensaio em curto-circuito, são devidas as dissipações joulicas nas resistências de armadura, assim como, devido as perdas mecânicas adicionais, onde esta é obtida de acordo com a expressão abaixo.

$$P_{ad} = 16,28 \cdot 10^{-3} \cdot P_g \quad (3.33)$$

$$P_{mec} = 24,5 \text{ Watts}$$

No estudo realizado por Silva (1988), é encontrado os valores das partições de perdas do gerador Elektro WVG 120 :

| | |
|--|--------|
| Rendimento..... | 88,00% |
| Perdas no ferro/Perdas totais..... | 13,00% |
| Perdas cobre-estator/Perdas totais..... | 26,60% |
| Perdas no cobre-campo/Perdas totais..... | 34,80% |
| Perdas mecânicas/Perdas totais..... | 5,00% |
| Perdas adicionais/Perdas totais..... | 20,60% |

III.5 - Transmissão mecânica e sua modelização

A transmissão mecânica é um componente de grande importância, pois ela funciona como um amplificador de ganho que varia de valores, teoricamente, entre 0 e ∞ , sendo

ela responsável pelo melhor acoplamento das características envolvidas da turbina eólica e sua respectiva carga. A transmissão mecânica dissipa uma certa quantidade de energia que transfere de eixo a eixo, onde o seu rendimento característico nunca é superior a 95%.

O modelo das perdas na transmissão mecânica pode ser realizado através da expressão, Levi (1984), que é mostrada abaixo, onde o primeiro termo corresponde as perdas nos

$$P_t = K_1.W + K_2.P + K_3.W^{2,8} \quad (3.34)$$

mancais e componentes hidrodinâmicos, o segundo termo envolve as perdas por atrito e o terceiro termo representa as perdas por ventilação. Outra maneira de obter-se a característica de perda, é utilizando-se, um freio de Prony como carga.

III.5.1 - Ensaio e Laboratórios

O ensaio que realiza-se neste tipo de máquina é feito em duas etapas distintas, permitindo, desta forma, avaliar as perdas com e sem transferência de potência. Desta maneira, determina-se o efeito da variação de velocidade, e o comportamento da potência transferida.

Para obter-se a representação da característica das perdas, como função da velocidade de rotação, basta aciona-

la através de um motor de corrente contínua e medir o conjugado requerido por intermédio de um dinamômetro. Para obter-se as medidas das características de perdas, em função da potência transferida utiliza-se um freio de Prony. Realizando essa medida de conjugado diversas vezes, a característica obtida após redução de dados pode ser mostrada graficamente ou numericamente. A critério da avaliação que se queira fazer, a análise gráfica é mais indicada pois esta fornece uma visualização melhor de como se comporta o valor médio da curva, permitindo uma aproximação para um modelo mais próximo do comportamento real.

III.6 - Motor de indução

III.6.1 - Introdução

A maioria dos motores elétricos, monofásicos e polifásicos, são do tipo assíncrono chamados, também, motores de indução. A sua grande procura é devido suas grandes qualidades, como construção simples, custo reduzido, vida útil longa, fácil manobra e manutenção.

O enrolamento do rotor do motor de indução não possui ligação elétrica externa. As correntes rotóricas são geradas pela indução eletromagnética por isto o nome motor de indução.

Muitos trabalhos podem ser encontrados envolvendo os motores de indução. No entanto a maioria deles estuda o seu comportamento ao ser submetido a variação de velocidade através de inversores. Outras publicações existentes sobre motores de indução tratam dos tipos de ensaios e laboratórios para obtenção de seus parâmetros de circuitos e de medidas de grandezas elétricas envolvidas. No que tange a obras direcionadas ao bombeamento de água através de bombas centrífugas existem poucas contribuições literárias, tanto no exterior como no Brasil, na bibliografia encontra-se as que melhor contribuem para um estudo deste nível.

III.6.2 - Fundamentos teóricos

O motor de indução tem o seu princípio de funcionamento idêntico ao de um transformador com os terminais de secundário em curto-circuito, onde os enrolamentos primário, ou indutor, é o estator da máquina e o secundário, ou induzido, é o seu rotor.

Definindo W_r como velocidade angular do rotor e W_s velocidade angular do campo girante do enrolamento estatórico, pode-se dizer que:

$$S_a = W_s - W_r \quad (3.35)$$

Onde

ω_s - escorregamento absoluto em rad/s

e o escorregamento relativo será

$$S = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s \quad (3.36)$$

Como

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n_s \quad (3.37)$$

e

$$\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot n_r \quad (3.38)$$

n_s e n_r - frequência de rotação síncrona de estator do motor e frequência de rotação do rotor do motor ambas em hz.

Teremos

$$S = (n_s - n_r) / n_s \quad (3.39)$$

Colocando n_s em função do número de pólos do enrolamento estatórico e da frequência de linha, teremos.

$$S = (f/p - n_r) / (f/p) \quad (3.40)$$

Como a máquina assíncrona funciona com conjugado médio não nulo, a velocidade angular do campo girante rotórico "

ω_{cr} ", será igual à diferença entre a velocidade angular do campo girante estatórico e a velocidade do próprio rotor.

$$\omega_{cr} = \omega_s - \omega_r \quad (3.41)$$

Substituindo em (3.36), teremos

$$s = \frac{\omega_{cr}}{\omega_s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{cr}}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \quad (3.42)$$

Onde

n_{cr} - frequência de rotação do campo girante rotórico relativo ao rotor.

Multiplicando numerador e denominador pelo número de pares de pólos, teremos.

$$s = p \cdot n_{cr} / p \cdot n_s = f_2 / f_1 \quad (3.43)$$

f_1 - frequência do enrolamento de estator

f_2 - frequência do enrolamento de rotor

Esta expressão indica o escorregamento relativo, simplesmente chamado de escorregamento. Este assume, teoricamente, valores entre $-\infty$ a $+\infty$. Nas regiões onde n_r é negativo, região de freio assíncrono, o escorregamento é positivo e maior que 1.

Na região entre $0 < n_r < n_s$, região de motor assíncrono o escorregamento será $1 > S > 0$. Na região onde $n_r > n_s > 0$, região de gerador assíncrono, o escorregamento será negativo $S < 0$. Casos particulares: rotor bloqueado, $S = 1$; e rotor em sincronismo, $S = 0$.

Nas pequenas máquinas assíncronas o escorregamento nominal, funcionando a plena carga mecânica, está usualmente entre 2% e 5% em caso de construção normal. Nos médios e grandes motores, S , está entre 2% e 0,5% ou menos.

III.6.2.1 - Grandezas em regime permanente

O circuito da figura 17, representa o equivalente por fase, referido ao primário, com potência secundária igual a toda potência transferida do estator para o rotor, de um motor de indução com rotor em gaiola.

Por intermédio da figura 17, podemos verificar que as perdas joulicas envolvidas no enrolamento de rotor é dada por.

$$P_{e2} = (R_{rm} / S) \cdot I_{ro}^2 \quad (3.44)$$

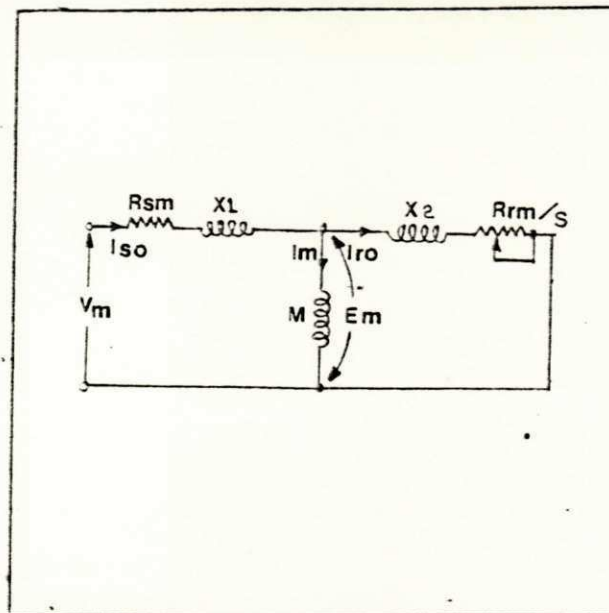
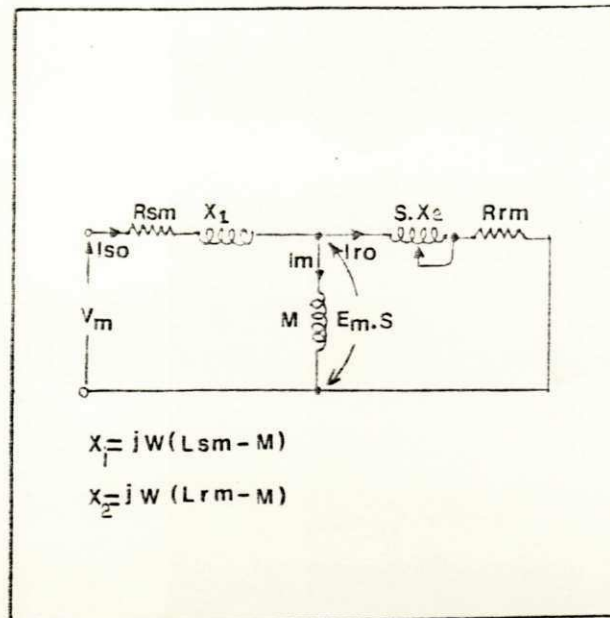


FIG.17 - Circuito equivalente clássico de um motor de indução com rotor em gaiola

e a potência reativa será

$$Q = X_{rm} \cdot I_{ro}^2 \quad (3.45)$$

Fazendo

$$R_{rm} / S = R_{rm} + R_{rm} \cdot (1 - S) / S \quad (3.46)$$

Onde o primeiro termo do segundo membro fornecerá o valor da potência elétrica de perdas envolvida, enquanto que, o segundo termo do segundo membro, irá fornecer o valor da potência convertida em forma mecânica.

$$P_{mec} = (R_{rm}/S - R_{rm}) \cdot I_{ro}^2 = (1 - S) / S \cdot R_{rm} \cdot I_{ro}^2 \quad (3.47)$$

A corrente do rotor do motor, de acordo com a figura 17 é expressa por:

$$I_{ro} = \frac{E_m}{\frac{R_{rm}}{S} + jX_2} \quad (3.48)$$

e em função de I_{so}

$$I_{ro} = \frac{j X_m}{\frac{R_{rm}}{S} + jX_2} \cdot I_{so} \quad (3.49)$$

Onde

$$X_2 = W_s \cdot (L_{rm} - M) \quad (3.50)$$

O circuito equivalente da máquina assíncrona pode ser apresentado sob outras formas, ditada pela natureza de sua utilização.

III.6.2.2 - O conjugado do motor de indução com rotor em gaiola.

O conjugado necessário para o acionamento do motor de indução pode ser expresso segundo a equação matemática.

$$C = P_{mec} / W_r \quad (3.51)$$

Para um motor trifásico, teremos

$$C = 3 \cdot (P_{mec} / W_r) \quad (3.52)$$

que de acordo com a equação (3.47), pode-se escrever

$$C = (3 / W_r) \cdot P_{mec} = (3 / W_r) \cdot I_{ro}^2 \cdot R_{rm} \cdot [(1 - S) / S] \quad (3.53)$$

Este é o conjugado interno do motor superior ao conjugado do eixo representando a potência eletromecânica, P_{mec} , que vai suprir as perdas rotacionais P_{rot} e a potência mecânica do rotor.

Reescrevendo a equação (3.36)

$$W_r = W_s \cdot (1 - S) \quad (3.54)$$

Substituindo na equação (3.53)

$$C = (3/S) \cdot I_{ro}^2 \cdot (R_{rm}/W_s) \quad (3.55)$$

Substituindo $W_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1/p$ na equação (3.55), tem-se

$$C = \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{p}{f_1} \cdot I_{ro}^2 \cdot \frac{R_{rm}}{S} \quad (3.56)$$

p - número de pares de pólos do motor

Obtendo-se o módulo de I_{ro} na equação (3.48)

$$I_{ro} = E_m / \sqrt{(R_{rm}/S)^2 + X_2^2} \quad (3.57)$$

Substituindo na equação (3.56)

$$C = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{E_m}{f_1}\right)^2 \cdot \frac{S \cdot R_{rm}}{[R_{rm}^2 + (S \cdot X_2)^2]} \quad (3.58)$$

Desenvolvendo (3.58), tem-se

$$C = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{E_m}{f_1}\right)^2 \cdot R_{rm} \cdot f_2 \cdot \frac{1}{[R_{rm}^2 + (S \cdot X_2)^2]} \quad (3.59)$$

III.6.3 - motor de indução a fluxo constante

O motor de indução é normalmente projetado para trabalhar com uma densidade de fluxo tal, que a operação ocorra próximo, ou nas imediações, ao joelho da curva de magnetização. Isto é feito para obter o máximo conjugado de utilização do circuito magnético.

Em qualquer circuito magnético, a tensão induzida é proporcional ao fluxo e à frequência pois $V = d\phi/dt$. Desta forma, para manter o fluxo no nível projetado para o motor é desejável obter-se.

$$V_m / f_i = K = \text{constante}$$

Uma outra razão para manter o fluxo em um nível máximo, abaixo da saturação, é a redução da corrente da fonte, uma vez que o conjugado é proporcional ao produto fluxo X corrente.

Na equação do conjugado, podemos observar que se a impedância do estator for pequena, $E_m \approx V_m$: Assim, se o motor for excitado mantendo-se a relação V_m / f_i constante, é satisfeito as condições acima discutidas.

Em baixas frequências, a resistência do estator é a componente predominante havendo um decréscimo do fluxo e, conseqüentemente, uma redução no conjugado do motor. Desta

forma, para manter o fluxo, a relação V_m/f_1 deve ser aumentada para baixas frequências.

A equação do conjugado, pode ser reescrita em termos apenas da frequência da tensão induzida no rotor, resultando.

$$C = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi} \left(\frac{E_m}{f_1} \right)^2 \frac{R_{rm} \cdot f_2}{\left[R_{rm}^2 + \left[2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot (L_{rm} - M) \right]^2 \right]} \quad (3.60)$$

Esta expressão admite o valor máximo do conjugado para

$$f_{2max} = \frac{R_{rm}}{2 \cdot \pi \cdot (L_{rm} - M)} \quad (3.61)$$

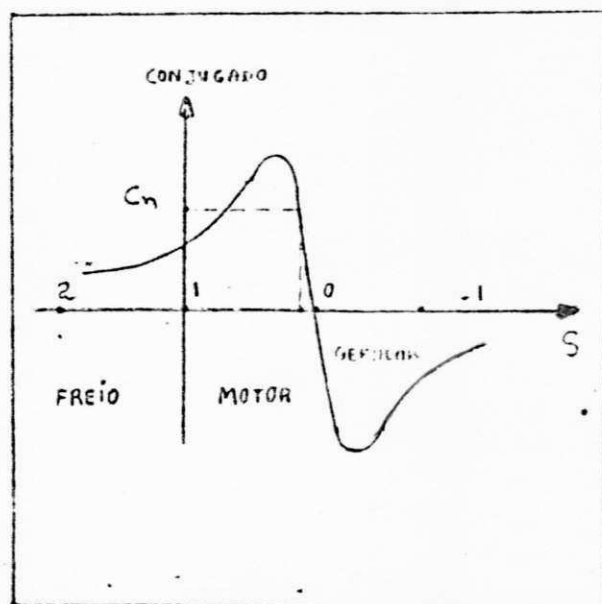


Fig.18 - Característica conjugado velocidade para motores de indução acionados a frequência variável

Onde (L_{rm-M}) é a indutância de dispersão do rotor e o sinal "-" significa a operação como gerador. Substituindo-se f_{cmax} na equação do conjugado tem-se :

$$C_{max} = \frac{3.p}{2.\pi} \left(\frac{E_m}{f_1} \right)^2 \frac{1}{4.\pi.(L_{rm-M})} \quad (3.62)$$

Na figura 18, é apresentada a curva característica da máquina de indução. Nela pode-se visualizar as condições estudadas no item (III.6.2), onde é mostrado as faixas de operação: como gerador assíncrono, motor assíncrono e freio motor.

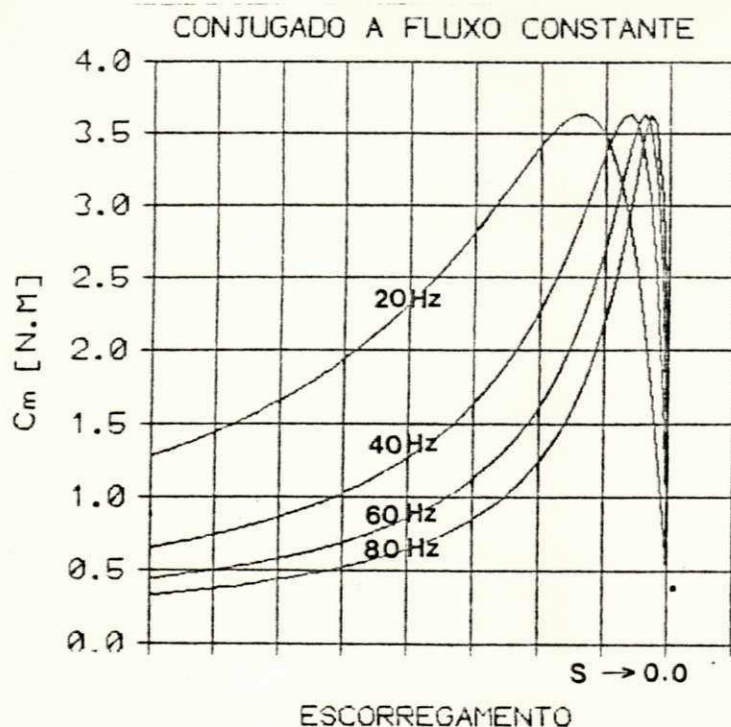


FIG.19 - Características do conjugado X escorregamento do motor de indução trabalhando a fluxo constante. As curvas correspondem aos valores de 20, 40, 60 e 80 Hz

No funcionamento do motor a fluxo constante o valor do conjugado máximo não se altera com a mudança da frequência da rede, em regime permanente. Outro aspecto que pode ser destacado é que o conjugado de partida é maior em todas as frequências que o apresentado em tensão e frequência nominal. Da mesma maneira para as altas frequências, o conjugado é maior para o mesmo escorregamento, Almeida (1986) e Murphy (1978).

Caso o fluxo do motor não se mantenha constante, o conjugado irá variar proporcionalmente com o quadrado do fluxo ou provocará o aumento da corrente do estator a valores que poderão causar um sobreaquecimento no motor.

III.6.4 - O modelo matemático

A modelagem do motor de indução, proposta neste trabalho, visa somente o comportamento da máquina trabalhando em regime permanente o fenômeno transitório que envolve este sistema, pode ser visto em outro trabalho que trata com profundidade o assunto, como Silva (1988). Desta forma, a teoria apresentada, sobre motores de indução é suficiente para o presente estudo, os parâmetros elétricos necessários para obtenção dos modelos são obtidos por intermédio dos ensaios a vazio, com rotor bloqueado e por medida direta de resistências elétricas

Para modelagem das perdas envolvidas na operação de um motor de indução, necessárias para avaliação de seu comportamento, é preciso que se represente cada parcela de perdas separadamente, processo denominado de partição de perdas. A partição de perdas segundo Levi (1984), Kostenko (1975), dão uma contribuição insignificante para as perdas adicionais, em torno 6% da perda total. As expressões que simulam o comportamento destas perdas, mecânicas e no ferro são mostradas a seguir, conforme Silva e Araújo (1986).

$$P_{fe} = 0.0862 \cdot E_m \cdot f_i \quad (3.63)$$

$$P_{mec} = 0.0926 \cdot (W_{cr})^{1,3} \quad (3.64)$$

$$P_{ad} = 9.8995 \cdot 10^{-3} \cdot P_{elm} \quad (3.65)$$

Onde

E_m - f.e.m do motor de indução

P_{elm} - potência elétrica do motor

É conveniente salientar que a modelagem de um sistema físico, através de expressões matemáticas, são feitas de forma a se conseguir a máxima aproximação da característica teórica com a prática. Devido a isso a modelagem das perdas, tanto utilizada no gerador síncrono como no motor de

indução, foram as que melhor se aproximaram da realidade do trabalho aqui desenvolvido.

III.6.5 - Ensaios e Laboratórios

Em uma máquina de indução tipo gaiola funcionando como motor é bastante comum a realização dos ensaios a vazio, ensaio com rotor bloqueado e medição direta da resistência ôhmica, para determinação de seus parâmetros para obter-se boa visualização da característica de seu desempenho.

A resistência elétrica do estator do motor R_{sm} , foi medida em duas etapas distintas, correspondentes as medidas de resistência a quente e a frio, sendo efetuadas após o ensaio a rotor bloqueado, garantindo, desta maneira, o aquecimento nominal das bobinas, e as medidas da resistência antes e depois do ensaio a vazio, onde as correntes envolvidas nesse tipo de ensaio não proporcionam um aquecimento significativo. O efeito pelicular nos condutores do estator, normalmente é corrigido por um fator que tem seu valor em torno de 1,1, Jones (1965), isto é, um acréscimo de 10 % no valor da resistência.

O ensaio a vazio realizado em um motor de indução permite a determinação da indutância própria de estator e das perdas mecânicas, correspondentes ao atrito e ventilação, utilizando-se do processo de segregação de

perdas nos vários resultados colhidos nos ensaios de laboratório.

O procedimento deste ensaio, consta basicamente em aplicar-se uma fonte alternada de tensão variável, e fixar-se um valor de frequência. Apartir da variação de valores de tensão, entre 20 à 120% do valor da tensão nominal, mede-se os valores de corrente conjuntamente com os valores correspondentes da tensão e potência fornecida. Com isto, obtem-se a curva de corrente e potência em função da tensão. Com a redução da tensão, dentro do intervalo indicado, o fluxo magnético diminui aproximadamente na mesma proporção e as perdas magnéticas reduzem com o quadrado do fluxo. Quando a tensão aplicada for nula, a potência medida não será nula pois ela deverá tender para um valor igual as perdas mecânicas, que dependem da velocidade e não da tensão. Para o cálculo dos parâmetros e constantes envolvidas no circuito do motor, utiliza-se os valores medidos, no ensaio, como entrada no programa motor em Apêndice. Esse ensaio foi realizado para dois valores de frequência de fornecimento que foram de 50 e 60 Hz.

Como foi dito no parágrafo anterior, a variação da potência elétrica fornecida ao motor como função da tensão aplicada permite obter, separadamente, as perdas mecânicas e perdas no ferro. Por intermédio do algoritmo dos mínimos quadrados, para promover o ajuste das expressões matemáticas do modelo de perdas, isola-se as perdas

mecânicas utilizando-se as seguintes expressões a frequência constante.

$$P_{\text{vazio}} = P_{\text{rot}} + 3 \cdot R_{\text{sm}} \cdot I_{\text{so}}^2 \quad (3.66)$$

Onde

$$P_{\text{rot}} = P_{\text{fem}} + P_{\text{mecm}} = P_{\text{vazio}} - 3 \cdot R_{\text{sm}} \cdot I_{\text{so}}^2 \quad (3.67)$$

Logo, conhecendo P_{vazio} , R_{sm} e I_{so} pode-se traçar a curva das perdas rotacionais em função da tensão aplicada, e extrapolando-se os valores de potência para tensão nula, determina-se as perdas mecânicas.

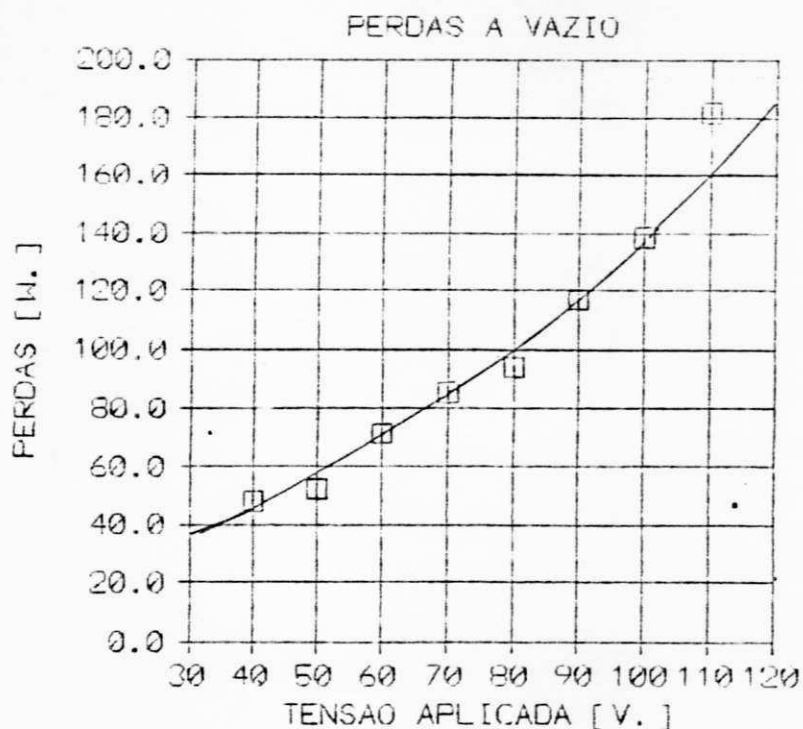


FIG.20 - Segregação de perdas no ensaio a vazio

A impedância da máquina de indução a vazio é obtida pela relação entre tensão de fase e sua variação em função da tensão aplicada é vista na figura 21. Devido ao escorregamento, neste ensaio, ser muito pequeno, o termo R_{rm}/S torna-se muito grande, podendo-se considerar o secundário como um circuito aberto. Neste caso, a impedância própria do estator é a mesma impedância da máquina, e a variação dita anteriormente da impedância nada mais é que a saturação da indutância do estator.

O ensaio a rotor bloqueado, dá informações a respeito das indutâncias de dispersão e resistências rotóricas.

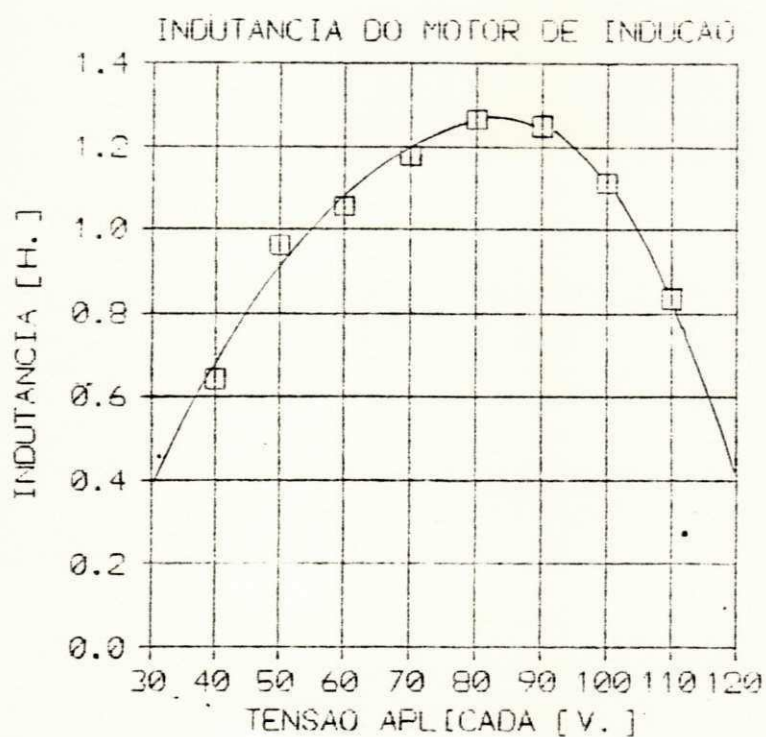


FIG.21 - Efeito da saturação sobre a indutância da máquina

Para efetuar-se um ensaio deste gênero é necessário o seguinte procedimento básico o eixo do motor é travado e a máquina é alimentada com tensão reduzida. O ensaio é executado com corrente nominal de estator, na frequência nominal deste, isto é, varia-se a tensão até ser atingido o valor de corrente nominal do motor. A (AIEE,1937) sugere, para motores cuja frequência nominal de operação é de 60 Hz, que o ensaio seja efetuado a 15 Hz. Destes ensaios obteve-se os seguintes parâmetros elétricos e mecânicos mostrados na tabela 03.

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

Efetuando este ensaio para as rotações referentes às duas frequências de alimentação propostas e considerando as perdas mecânicas, a constante de inércia pode ser obtida por.

$$I_m = P_{mec} (\bar{\omega}) / (\bar{\omega} \cdot \Delta\omega / \Delta t) \quad (3.68)$$

Onde $\bar{\omega}$ é a velocidade média entre ω_1 e ω_2

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$$

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

Onde

t_1 - tempo de desaceleração para ω_1

t_2 - tempo de desaceleração para ω_2

$P_{mec}(\bar{\omega})$ - perdas mecânicas para $\bar{\omega}$

Caso $\Delta\omega$ seja relativamente pequena com relação à ω_1 a precisão do método fica garantida conforme Silva (1988). No presente caso, trabalha-se com $\Delta\omega/\omega = 18\%$, que fornece um valor bastante próximo ao da constante de inércia para cada um dos três motores ensaiados.

| MOTORES ENSAIADOS | | | |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| PARAMETROS | MOTOR 1 | MOTOR 2 | MOTOR 3 |
| R_{sm} (Ohm) | 0,530 | 0,530 | 0,530 |
| R_{rm} (Ohm) | 0,775 | 0,768 | 0,729 |
| L_{sm} (mH) | 0,674 | 1,500 | 0,674 |
| L_{rm} (mH) | 1,012 | 2,255 | 1,012 |
| MH (mH) | 42,850 | 47,340 | 40,190 |
| J_m (Nms ²) | 1,671E-3 | 1,543E-3 | 1,799E-3 |

TAB.03 - Parâmetros elétricos e mecânicos dos motores de indução

III.7 - O retificador semicontrolado

III.7.1 - Introdução ao estudo dos retificadores

Existem várias maneiras de se classificar um conversor, sendo a mais comum em conversores de meia-onda e de onda completa.

Os circuitos de meia onda possuem um retificador, diodo ou SCR, em cada fase da fonte de alimentação, sendo o retorno da corrente de carga conectado ao neutro da fonte C.A. .

Os circuitos de onda completa pode ser entendidos como a associação série de dois circuitos de meia-onda, um para conectar uma das linhas à carga e outro para retornar a corrente de carga a outra linha da fonte C.A. , eliminando a necessidade do neutro. Assim, a denominação " ponte " seja frequentemente utilizada.

De acordo com as características de controle, os conversores podem ser classificados em não controlados, totalmente controlados e semicontrolados.

No caso em estudo, emprega-se o circuito com a configuração semicontrolada para fazer o controle da corrente do enrolamento do campo do alternador. Este tipo

de conversor é constituído pela associação de diodos e tiristores que impedem que a tensão na carga tenha valores negativos. Assim o fluxo de potência é unidirecional.

III.7.2 - Princípio de funcionamento

De acordo com a figura 22, verifica-se que pode-se fazer o controle do valor médio da tensão na carga apenas com três SCR'S e três diodos.

A figura 23, mostra as formas de onda de interesse para um baixo valor do ângulo de disparo. Observe-se que neste instante tem-se três pulsos de tensão na carga, ou seja, o período da tensão na carga é $1/3$ do período da tensão de

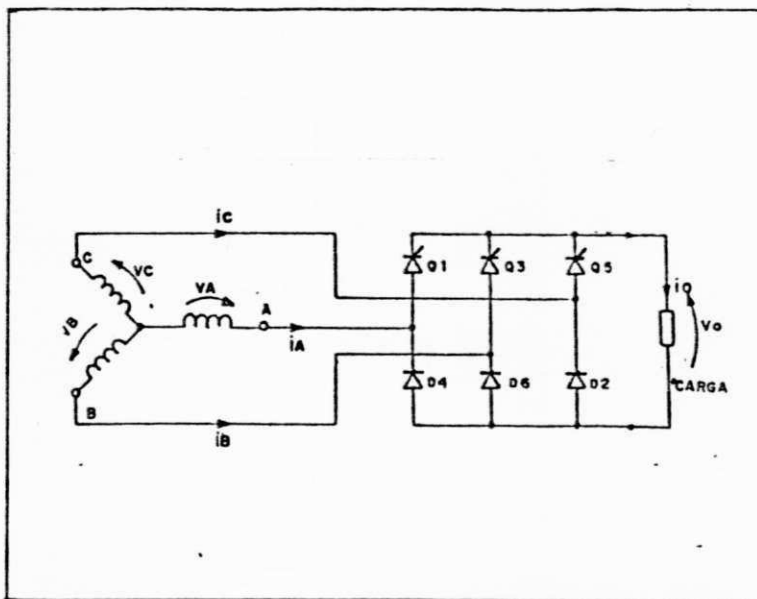


FIG.22 - Retificador trifásico semicontrolado

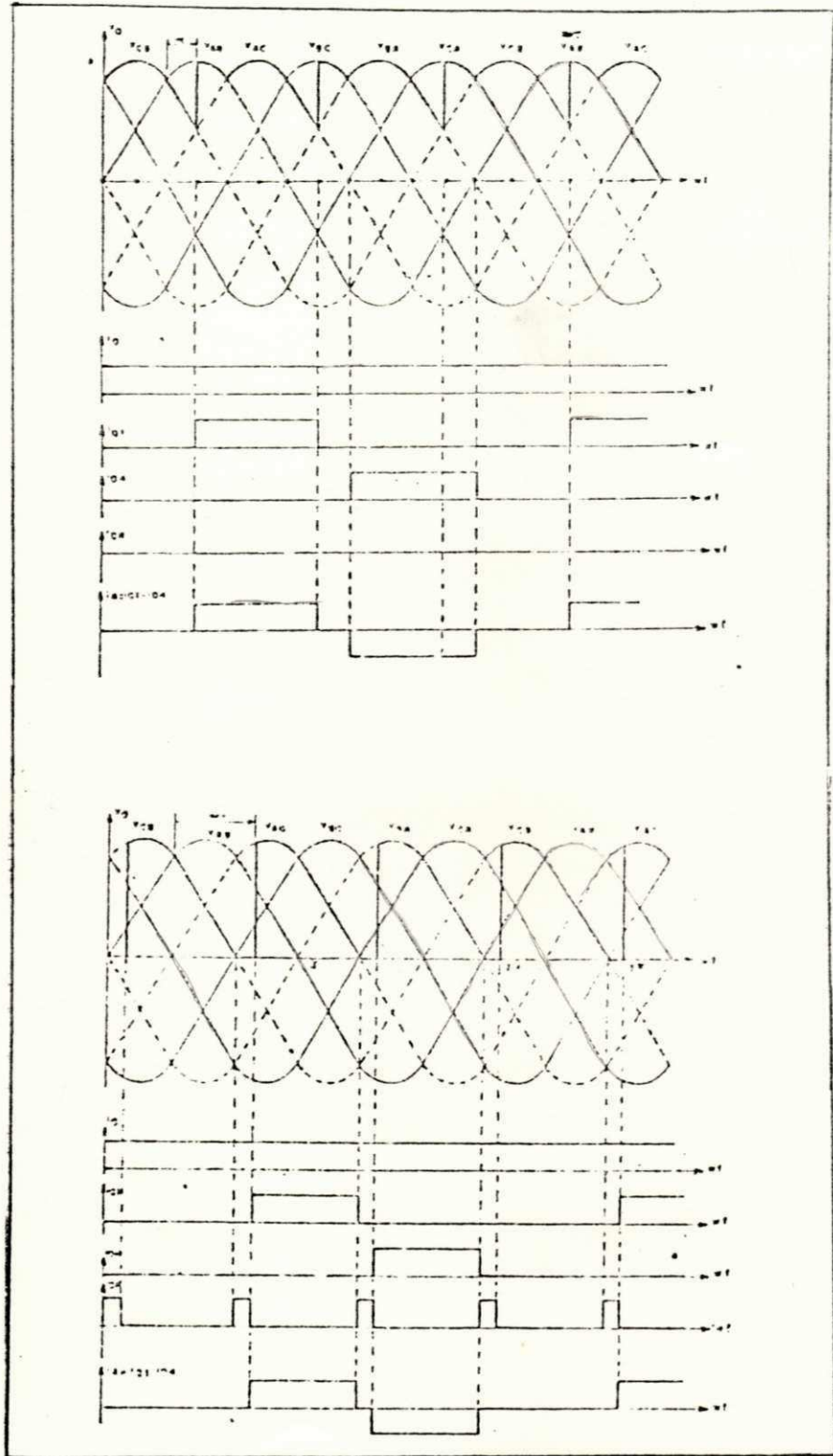


FIG.23 - Formas de onda para o retificador trifásico semicontrolado

trabalha. Nesta forma, a modulação na tensão tem uma frequência fundamental que é três vezes a frequência da alimentação.

O valor médio da tensão de saída é obtido por integração da curva de V_o , que é mostrada na figura 23

$$V_o = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left[\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen } \omega t \cdot d\omega t - \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi + \alpha} \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen } [\omega t - (4 \cdot \pi / 3)] \cdot d\omega t \right] \quad (3.69)$$

O sinal "-" aparece na segunda integral pois a curva a ser integrada é VAC que pode ser expressa por,

$$VAC = - VCA = -\sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen } [\omega t - (4 \cdot \pi / 3)] \quad (3.70)$$

Integrando resulta

$$V_o = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi} \cdot V \cdot (1 + \cos \alpha) \quad (3.71)$$

ou

$$V_o = \frac{3}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot V \cdot (1 + \cos \alpha) \quad (3.72)$$

III.8 - A bomba centrífuga e componentes hidráulicos

III.8.1 - Introdução ao estudo das bombas centrífugas

A bomba centrífuga é classificada como uma máquina de fluxo, tendo em vista que possui as características que definem uma máquina deste gênero que é o rotor girante com

uma coroa de pás que são permanentemente percorridas por um fluido portador de energia. A pressão resultante de fluxo nas pás exerce um trabalho, que depende principalmente do efeito inercial da massa de fluido devido ao seu desvio pelas pás. Tem a mesma origem que a sustentação em uma asa de avião, que é o princípio básico do funcionamento das turbinas eólicas, hélice de avião ou de navio.

As bombas rotativas tem frequentemente a finalidade de transportar um fluido (água) de um local de baixa pressão para outro de alta pressão, transformando energia em sentido contrário ao das turbinas. A força exercida pelas pás no fluxo transmite trabalho ao fluido de maneira semelhante às já citadas. A teoria para compreensão de estudo da modelagem matemática das bombas centrífugas podem ser vistas no item (III.3.2.2) na teoria da asa de sustentação.

As literaturas existentes que ajudam no estudo dessas máquinas são os apresentados por Silva e Araújo (1986), e Carvalho (1984).

III.8.2 - Fundamentos teóricos

III.8.2.1 - Princípio de funcionamento da bomba centrífuga

Como já foi descrito no capítulo (III.3.2.2) e comentado no item anterior, o entendimento das forças que

uma coroa de pás que são permanentemente percorridas por um fluido portador de energia. A pressão resultante de fluxo nas pás exerce um trabalho, que depende principalmente do efeito inercial da massa de fluido devido ao seu desvio pelas pás. Tem a mesma origem que a sustentação em uma asa de avião, que é o princípio básico do funcionamento das turbinas eólicas, hélice de avião ou de navio.

As bombas rotativas tem frequentemente a finalidade de transportar um fluido (água) de um local de baixa pressão para outro de alta pressão, transformando energia em sentido contrário ao das turbinas. A força exercida pelas pás no fluxo transmite trabalho ao fluido de maneira semelhante às já citadas. A teoria para compreensão de estudo da modelagem matemática das bombas centrífugas podem ser vistas no item (III.3.2.2) na teoria da asa de sustentação.

As literaturas existentes que ajudam no estudo dessas máquinas são os apresentados por Silva e Araújo (1986), e Carvalho (1984).

III.8.2 - Fundamentos teóricos

III.8.2.1 - Princípio de funcionamento da bomba centrífuga

Como já foi descrito no capítulo (III.3.2.2) e comentado no item anterior, o entendimento das forças que

água, representam as cargas efetivas do sistema eólico de bombeamento, requerem uma perfeita representação de suas características, pois estas irão garantir uma perfeita simulação do desempenho do sistema e uma clara avaliação da eficiência global.

Normalmente, as bombas centrífugas são representadas pelas suas curvas $H_{man}(Q)$, altura manométrica em função da vazão, e $\eta(Q)$, eficiência em função da vazão. Para conseguir-se estas representações, é necessário a realização de ensaios de laboratórios para a obtenção dos parâmetros que envolvem esse sistema e destes dependem a perfeita seleção e escolha dos aparatos hidráulicos adequados a realização do projeto.

Os fenômenos físicos existentes, quando na operação de uma bomba centrífuga sujeita a velocidade variável, constitui um problema de alto grau de complexidade, onde se pode verificar uma má compatibilidade entre o desenvolvimento analítico com os resultados obtidos experimentalmente, Silva (1988), levando-se em consideração o baixo valor da potência dos grupos moto-bomba envolvidos nesses ensaios.

Em estudo detalhado do funcionamento de uma bomba centrífuga, é necessário o conhecimento prévio da teoria monodimensional que leva em consideração que:

A bomba tem um número infinito de palhetas

As palhetas são infinitamente delgadas

Essas hipóteses são referidas a operação da bomba centrífuga em condições ideais, onde não é considerada as perdas nas paredes molhadas, as perdas por choque entre fluido e palhetas, perdas decorrente devido ao número finito de palhetas, relativas a operação sob velocidade variável e pressão entre pontos localizados entre as palhetas. Para representarmos o comportamento das bombas centrífugas, em uma única equação que envolve altura manométrica, vazão e rotação, pode-se utilizar a expressão de Pfleiderer e Petermann (1979) que é dada por.

$$H_{mam} = a_1 \cdot W_r^2 + a_2 \cdot W_r \cdot Q - a_3 \cdot Q^2 \quad (3.73)$$

Onde

a_1, a_2, a_3 - são coeficientes

W_r - velocidade angular do rotor da bomba centrífuga

Q - vazão

Os primeiros dois termos da equação anterior já são previstos pela teoria monodimensional, enquanto que o

terceiro termo representa as perdas por atrito e choque das partículas com a parede.

A bomba centrífuga quando submetida a variação de velocidade em seu eixo, tem as suas características operativas bastante alteradas. A cada ponto da altura manométrica a vazão para, uma mesma velocidade de rotação, irá corresponder, em semelhança mecânica, a outro ponto de operação da bomba de altura manométrica e vazão para uma nova velocidade do eixo do rotor. Desta forma podemos escrever que.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (3.74)$$

e

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 \quad (3.75)$$

Estas expressões, entretanto, são somente válidas para pontos de mesmo rendimento. Para os pontos em que a bomba funciona com mesma eficiência, pode-se obter as chamadas parábolas de isoefficiência, como mostra Carvalho (1984), bastando para isso conectar-se esses pontos, assim pode-se escrever que.

$$\frac{Q_1^2}{H_1} = \frac{Q_2^2}{H_2} \quad (3.76)$$

Na prática no entanto essas curvas se distorcem do comportamento parabólico, devido a influência na variação do número de Reynolds e a dependência das perdas mecânicas com a rotação.

A operação da bomba centrífuga, a velocidade variável, é próxima ao seu funcionamento a vários tipos de fluidos onde a eficiência da bomba diminui nas baixas velocidades numa taxa bem maior que nas altas rotações, Pfeleiderer e Petermann (1979). Para cálculo e correção das perdas internas e mecânicas da bomba, utiliza-se as seguintes expressões Silva (1988).

$$P_{in} \Big|_{W=W_1} = P_{in} \Big|_{W=W_2} \cdot (W_1/W_2)^{0,1} \quad (3.77)$$

$$P_{mec} \Big|_{W=W_1} = P_{mec} \Big|_{W=W_2} \cdot (W_1/W_2)^9 \quad (3.78)$$

As perdas de carga nos tubos e conexões da instalação hidráulica é dada através da seguinte expressão:

$$AHP = K_p \cdot Q^2 \quad (3.79)$$

Onde K_p é determinado pelo tipo e diâmetro da conexão utilizada na instalação.

III.8.3 - Ensaios e laboratórios

Os parâmetros para composição do modelo matemático das expressões que caracterizam o sistema, foram obtidos através de ensaios em bancadas, que se constituem basicamente de um sistema hidráulico fechado e de uma fonte para acionamento da bomba para diversos valores de velocidades, como mostrados em Silva (1988).

Nos ensaios realizados, as grandezas medidas são, a potência fornecida para a bomba, os diversos valores de velocidade do eixo da bomba, as leituras de pressões referentes a cada valor de velocidade e o volume de água bombeado para cada minuto de funcionamento da bomba em uma dada velocidade. Para computar as perdas mecânicas elas são

| Modelo | Bomba 1 | Bomba 2 | Bomba 3 |
|---|---|---|--|
| $H = a_1 Q^2 + a_2 Q N + a_3 N^2$ $Q(m^3/h), N(rpm)$ $H(m)$ | $a_1 = 0.0404733$ $a_2 = -.366708 \cdot 10^{-3}$ $a_3 = .14849 \cdot 10^{-5}$ | $a_1 = 0.107095$ $a_2 = -.54474 \cdot 10^{-3}$ $a_3 = .17225 \cdot 10^{-5}$ | $a_1 = 0.04148277$ $a_2 = -.41942471 \cdot 10^{-3}$ $a_3 = .1301572 \cdot 10^{-5}$ |
| $\eta = a_1 Q + a_2 Q$ $\eta(\%) Q(m^3/h)$ | $a_1 = -2.99305$ $a_2 = 21.17356$ | $a_1 = -2.015697$ $a_2 = 16.536404$ | $a_1 = -2.940511$ $a_2 = 18.421882$ |
| $F_{mec} = k \cdot w^q$ $w(rad/s)$ | $k = 8.95 \cdot 10^{-4}$ $q = 2.00$ | $k = 1,200 \cdot 10^{-3}$ $q = 2.00$ | $k = 8.1851 \cdot 10^{-4}$ $q = 2.00$ |

TAB.04 - Parâmetros hidráulicos das bombas e conexões

medidas para instantes de vazão nula, isto é, para o registro totalmente fechado. Esse ensaio é repetido para diversos valores de altura manométrica.

A redução de dados, é feita ajustando-se os coeficientes dos modelos por intermédio do algoritmo dos mínimos quadrados. Neste ensaio os parâmetros resultantes do emprego deste algoritmo é mostrado na tabela 04.

CAPÍTULO IV

VI.1 - Introdução

Neste capítulo, procede-se uma descrição e análise do SCEE no que se refere ao seu comportamento, envolvendo os subsistemas acionantes e acionados. Destaca-se, assim, a contribuição deste trabalho com relação ao que já existia implementado. Serão apresentados estudos comparativos dos resultados obtidos no ensaio de campo aberto, assim como, comparações com os resultados de trabalhos de pesquisa da mesma área. É conveniente salientar que devido ao grande número de componentes do SCEE, maior ênfase serão dadas as análises dos circuitos elétricos envolvidos em regime permanente.

IV.2 - O SCEE

Conforme a figura 24, pode-se verificar que no sistema de conversão de energia eólica existem vários acoplamentos de carga, que são, turbina eólica e alternador, motor de indução e bomba centrífuga. Outro acoplamento que pode também ser considerado é bomba centrífuga e instalação hidráulica. Para realizar-se o acoplamento estático de carga é necessário que se conheça antecipadamente o comportamento em regime permanente dos diversos subsistemas acionantes

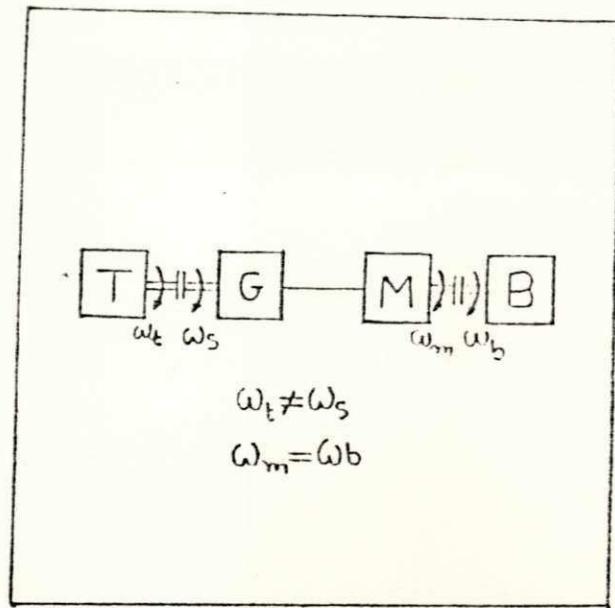


FIG.24 - Diagrama em blocos simplificado do SCEE

e acionados funcionando cada um isoladamente. Desta forma, divide-se o SCEE em três blocos distintos, que são: a turbina eólica, o aerogerador e o motor assíncrono e, por último, a bomba centrífuga e as instalações hidráulicas.

IV.2.1 - O subsistema elétrico

O subsistema elétrico é formado pelo gerador síncrono que alimenta um motor assíncrono, através de uma linha de transmissão.

A figura 25, aplicando a lei de Kirchhoff para correntes de malha, tem-se:

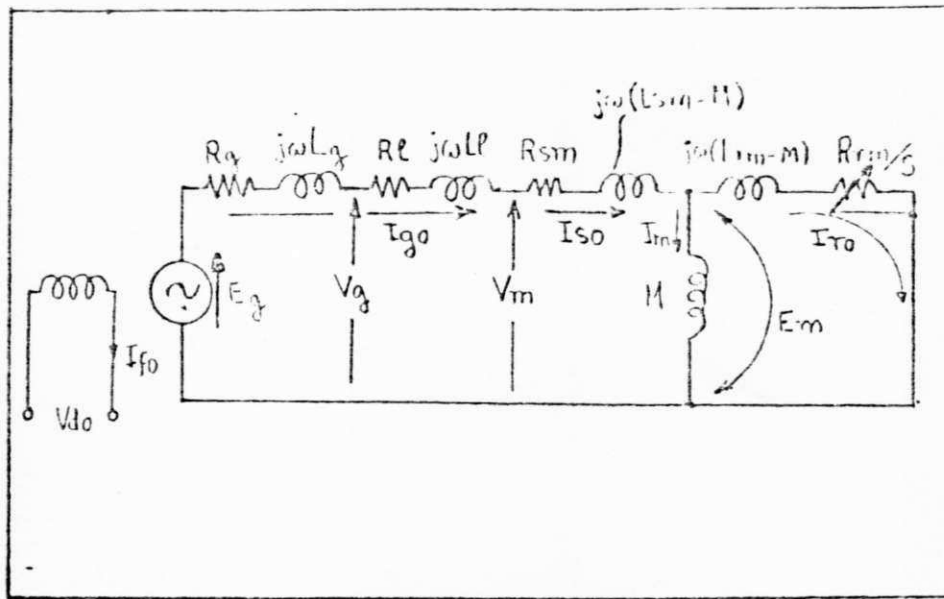


FIG.25 - Esquema representativo do circuito elétrico do acoplamento Motor-Gerador envolvido no SCEE

$$E_g = [(R_g + R_l + R_{sm}) + j\omega_s \cdot (L_g + L_l + L_{sm} - M + M)] \cdot I_{go} - j\omega_s \cdot M \cdot I_{ro} \quad (4.01)$$

$$\emptyset = -j\omega_s \cdot M \cdot I_{so} + [(R_{rm}/S) + j\omega_s \cdot (L_{rm} - M + M)] \cdot I_{ro} \quad (4.02)$$

de (4.02) tem-se:

$$j\omega_s \cdot M \cdot I_{so} = [(R_{rm}/S) + j\omega_s \cdot L_{rm}] \cdot I_{ro}$$

logo

$$I_{so} = \frac{[(R_{rm}/S) + j\omega_s \cdot L_{rm}]}{j\omega_s \cdot M} \cdot I_{ro} \quad (4.03)$$

Calculando I_{ro} como função de E_g (4.03) em (4.01)

$$E_g = \frac{[(R_g + R_l + R_{sm}) + j\omega_s \cdot (L_g + L_l + L_{sm} - M + M)] \cdot [(R_{rm}/s) + j\omega_s \cdot L_{rm}]}{-j\omega_s \cdot M \cdot I_{ro}} \quad (4.04)$$

Calculando para o valor da corrente do rotor, I_{ro} tem-se:

$$I_{ro} = \frac{j\omega_s \cdot M \cdot E_g}{[(R_g + R_l + R_{sm}) + j\omega_s \cdot (L_g + L_l + L_{sm})] \cdot [(R_{rm}/s) + j\omega_s \cdot L_{rm}] + (\omega_s \cdot M)^2} \quad (4.05)$$

Desenvolvendo somente o denominador, de forma a separar as componentes reais das imaginárias, tem-se:

$$R_{eq} = (R_g + R_l + R_{sm}) \frac{R_{rm}}{s} - \omega_s \cdot L_{rm} \cdot (L_g + L_l + L_{sm}) + (\omega_s \cdot M)^2 \quad (4.06)$$

$$X_{eq} = j\omega_s \cdot [L_{rm} \cdot (R_g + R_l + R_{sm}) + \frac{R_{rm}}{s} \cdot (L_g + L_l + L_{sm})] \quad (4.07)$$

Simplificando, obtém-se para R_{eq} e L_{eq} as expressões

$$R_{eq} = (R_g + R_l + R_{sm}) \frac{R_{rm}}{s} - \omega_s \cdot [M^2 - (L_g + L_l + L_{sm}) \cdot L_{rm}] \quad (4.08)$$

$$L_{eq} = L_{rm} \cdot (R_g + R_l + R_{sm}) + \frac{R_{rm}}{s} \cdot (L_g + L_l + L_{sm}) \quad (4.09)$$

e conseqüentemente, para o valor da reatância indutiva equivalente, tem-se:

$$X_{eq} = \omega_s \cdot L_{eq} \quad (4.10)$$

A equação que modela a f.e.m do gerador é expressa conforme o item (III.4.2.2) como:

$$E_g = C k_g \cdot W_s \cdot (A + \sqrt[3]{I_f}) \quad (4.11)$$

Desta forma podemos calcular o valor de I_{ro} , de (4.07), (4.08) e (4.09)

$$I_{ro} = \frac{W_s \cdot M \cdot E_g}{\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}} \cdot \frac{0 \quad -i}{90 - \text{tg}(X_{eq}/R_{eq})} \quad (4.12)$$

O valor de I_{so} expresso em forma fasorial é conforme (4.13)

$$I_{so} = \frac{\sqrt{(R_{rm}/S)^2 + (W_s \cdot L_{rm})^2}}{W_s \cdot M} \cdot I_{ro} \quad \angle \phi_{so} \quad (4.13)$$

Onde

$$\phi_{so} = \text{tg}^{-1} \left[\left(\frac{S \cdot W_s \cdot L_{rm}}{R_{rm}} \right) \cdot [90 - \text{tg}^{-1}(X_{eq}/R_{eq})] - 90^\circ \right]$$

ϕ_{so} - ângulo de fase.

A reatância indutiva de rotor é

$$X_{rm} = j W_s \cdot L_{rm} \quad (4.14)$$

As componentes reais e imaginárias da corrente de estator são respectivamente:

$$I_{sr} = I_{so} \cdot \cos \theta_{so} \quad (4.15)$$

$$I_{sm} = I_{so} \cdot \sin \theta_{so} \quad (4.16)$$

A potência elétrica absorvida, é expressa como:

$$P_{elm} = 3 \cdot R_{rm} \cdot I_{ro}^2 \quad (4.17)$$

Segundo o modelo proposto em (III.6.5) tem-se as perdas mecânicas, no ferro e adicionais do motor como:

$$P_{mec} = C_m \cdot (W_{cr})^{1,3} \quad (4.18)$$

$$P_{fem} = C_f \cdot E_m \cdot (f)^{0,5} \quad (4.19)$$

$$P_{adm} = C_a \cdot P_{elm} \quad (4.20)$$

Onde

C_m , C_f e C_a - são constantes

Assim pode-se definir a primeira parcela das perdas do motor como:

$$P_{erm1} = P_{mec} + P_{fem} + P_{adm} \quad (4.21)$$

Para suprir essas perdas no motor, esta deverá exigir uma certa parcela de corrente de fase do gerador:

$$I_{perm} = P_{ermi} / (3 \cdot E_m) \quad (4.22)$$

Como na saída do gerador está conectado os terminais de entrada do retificador semicontrolado, e que este requer para alimentar a sua carga e suprir as perdas requeridas um certo valor de corrente, então a corrente de entrada do retificador é dada pelas seguintes expressões, correspondentes às partes real e imaginária :

$$I_{retr} = C_{rr} \cdot I_f \quad (4.23)$$

$$I_{retm} = C_{rm} \cdot I_f \quad (4.24)$$

Onde

C_{rr} e C_{rm} - são constantes do retificador

Conseqüentemente, a corrente total fornecida pelo gerador ao motor de indução, é indicada pelas expressões correspondentes aos valores reais e imaginários, como:

$$I_{gr} = I_{sr} + I_{perm} + I_{retr} \quad (4.25)$$

$$I_{gm} = I_{sm} + I_{retrm} \quad (4.26)$$

A potência convertida sob forma mecânica é dada de acordo com a equação (3.45), e dividindo-se pela velocidade angular de rotor referida ao estator, tem-se o conjugado interno do motor:

$$C_{mec} = 3 \cdot R_{rm} \cdot I_{ro}^2 \cdot [(1-s)/\omega_r \cdot s] \quad (4.27)$$

A impedância do gerador é descrita de acordo com a equação (4.28)

$$Z_g = \sqrt{R_g^2 + X_g^2} \cdot \frac{-i}{\text{tg} (X_g/R_g)} \quad (4.28)$$

Onde

$$X_g = \omega_s \cdot L_g \quad (4.29)$$

A impedância da linha por sua vez é expressa como

$$Z_l = \sqrt{R_l^2 + X_l^2} \cdot \frac{-i}{\text{tg} (R_l/X_l)} \quad (3.30)$$

Onde

$$X_l = \omega_s \cdot L_l \quad (4.31)$$

A corrente elétrica fasorial fornecida pelo gerador a carga é:

$$I_{go} = \sqrt{I_{gr}^2 + I_{gm}^2} \cdot \frac{-1}{\operatorname{tg} (I_{gr}/I_{gm})} \quad (4.32)$$

Conhecendo-se esta corrente, calcula-se o valor da tensão nos terminais do gerador:

$$V_g = E_g - (R_g + j X_g) \cdot (I_{gr} + j I_{gm}) \quad (4.33)$$

Caso o retificador semiconduzido seja conectado na entrada do motor, o valor desta tensão é:

$$V_m = E_g - [(R_g + R_l) + j(X_g + X_l)] \cdot (I_{gr} + j I_{gm}) \quad (4.34)$$

A potência lida nos terminais do gerador é expressa como:

$$P_{elg} = 3 \cdot E_g \cdot I_{go} \cdot \cos \phi$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} (I_{gm}/I_{gr})$$

As perdas joulicas correspondentes as perdas por aquecimento do motor é:

$$P_{cum} = 3 \cdot (R_{sm} \cdot I_{so}^2 + R_{rm} \cdot I_{ro}^2) \quad (4.36)$$

E, no gerador é

$$P_{cug} = 3 \cdot R_g \cdot I_{go}^2 + R_{ft} \cdot I_f^2 \quad (4.37)$$

Onde

$$R_{ft} = R_t + R_{AD} \quad (4.38)$$

R_t - resistência da bobina de campo do alternador

R_{AD} - resistência adicional

R_{ft} - resistência total do campo

As perdas joulicas na linha é:

$$P_{cul} = 3 \cdot R_l \cdot I_m^2 \quad (4.39)$$

Onde

$$I_m = \sqrt{(I_{sr} + I_{perm})^2 + I_{sm}^2} \cdot \frac{\text{tg} [I_{sm}/(I_{sr} + I_{perm})]}{\quad} \quad (4.40)$$

As perdas correspondentes ao núcleo (P_{fe}) e adicionais são expressas segundo Kostenko (1975)

$$P_{feg} = C_{fg} \cdot E_g \cdot (f)^{0,5} \quad (4.41)$$

$$P_{adg} = C_{ag} \cdot P_{elg} \quad (4.42)$$

C_{fg} e C_{ag} - são constantes

Finalmente, pode-se expressar as perdas totais do motor, como:

$$P_{totm} = P_{mecm} + P_{ermi} + P_{cum} \quad (4.43)$$

Onde

$$P_{mec} = \text{Conjm} \cdot W_s \quad (4.44)$$

A perda total do gerador, incluindo as da linha, é:

$$P_{totg} = P_{cug} + P_{feg} + P_{adg} + P_{mecg} + P_{cul} \quad (4.45)$$

Então pode-se calcular o rendimento do motor como:

$$\text{Rendm} = P_{mec} / P_{totm} \quad (4.46)$$

Para expressar-se o rendimento do gerador basta dividir-se a potência total absorvida pelo motor pela potência total do sistema.

$$\text{Rendg} = P_{totm} / P_{tots} \quad (4.47)$$

Onde

$$P_{tots} = P_{totm} + P_{totg} \quad (4.48)$$

P_{tots} - perdas totais elétricas do sistema

O fluxo magnético do motor é expresso de acordo com a equação:

$$\phi_m = E_m / f_1 \quad (4.49)$$

O valor da tensão de saída do retificador semicontrolado como função da tensão de saída do gerador é:

$$V_{do} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi} \cdot V_g (1 + \cos \alpha_c) \quad (4.50)$$

Logo a corrente que irá circular na bobina do campo do alternador será:

$$I_f = V_{do} / R_{ft} \quad (4.51)$$

Finalmente, define-se o conjugado no eixo do alternador por:

$$C_g = P_{elg} / \omega_s \quad (4.52)$$

Onde

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \quad (4.53)$$

A potência do motor entregue nos terminais da carga ou em seu eixo pode ser escrita por:

$$P_{elm} = P_{elg} - \sum \text{Perdas do bloco gerador motor} \quad (4.54)$$

Ou ainda

$$P_{elm} = P_a - \sum \text{Perdas do motor} \quad (4.55)$$

Onde

P_a - potência absorvida pelo motor

A figura 26, mostra o diagrama fasorial do bloco alternador motor de indução, mostrando apenas valores fictícios como visualização do que foi feito nesta simulação

IV.2.2 - O subsistema acionante

O subsistema acionante, formado pela turbina eólica tem sua simulação feita através dos modelos matemáticos que descrevem os fenômenos físicos envolvidos e é mostrado em sequência, neste item.

O valor da relação de velocidade é definida como:

$$\lambda = W.R/V$$

O coeficiente de potência ou rendimento aerodinâmico é dado pela expressão abaixo, onde o valor dos b's variam de acordo com os ângulos de passo da pá para o qual esta estiver posicionada.

$$C_p = \lambda \cdot [b_1 + b_2 \cdot \lambda^{1/2} + \lambda \cdot (b_3 + b_4 \cdot \lambda^{1/2} + b_5 \cdot \lambda)] \quad (4.57)$$

A potência que pode ser extraída do eixo da turbina é dada por:

$$P_{tur} = (1/2) \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (4.58)$$

Onde

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (4.60)$$

O conjugado é expresso pela seguinte equação

$$Conjt = P_{tur}/W_t \quad (4.61)$$

W_t - rotação da turbina

IV.2.3 - O subsistema da bomba centrífuga

O subsistema da bomba centrífuga é dito acionado devido ser necessário um conjugado aplicado externamente ao seu eixo, para fazê-la operar. Este subsistema pode ser visto sob outro aspecto, isto é, como subsistema acionante devido o fluido a ser bombeado necessitar de energia cinética para entrar em movimento. Desta forma fica a critério a escolha de como deva chamar-se este subsistema, de forma que, aqui será denominado de subsistema acionado.

A rotação que determina o limite mínimo, para o qual o SCEE começa a bombear água, segundo Silva (1988), é dado pela expressão:

$$\text{Rotmin} = \sqrt{H_s/Cb1} \quad (4.62)$$

Onde

H_s - altura estática da tubulação hidráulica

$Cb1$ - constante.

A altura manométrica é dada pela soma das alturas estáticas de sucção e recalque, mais as perdas de carga localizadas correspondentes as conexões e equipamentos envolvidos na instalação hidráulica, pode ser expressa por Silva (1988), como:

$$H_{man} = C3.C_{est}.Q^2 = C1.Rotb^2 + C2.Rotb.Q - C3.Q^2 \quad (4.63)$$

Onde

C's - são coeficientes

A vazão é calculada através da seguinte equação:

$$Q(i+1) = Q_i \cdot (W_n/W_i) \quad (4.64)$$

Onde

W_i - rotação da bomba (Rotb)

W_n - rotação nominal da bomba

O valor do rendimento nominal da bomba, foi desenvolvido o seu modelo experimentalmente e é mostrado abaixo:

$$\eta_n = Ck_1 \cdot Q_n^2 + Ck_2 \cdot Q_n$$

Ck's - são constantes

A modelagem das perdas mecânicas e rotacionais também foram obtidas experimentalmente e são descritas no ítem (III.8.2.2).

A potência de acionamento da bomba centrífuga é dada

pela expressão abaixo:

$$N_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta} \quad (4.66)$$

A potência consumida pela bomba, é igual a:

$$P_{total} = N_b + \sum \text{Perdas} \quad (4.67)$$

O rendimento da bomba, para qualquer valor de rotação de eixo é expresso por:

$$\eta_b = N_b / P_{total} \quad (4.68)$$

Desta forma, pode-se calcular o valor do conjugado correspondente estaticamente ao valor da velocidade do eixo da bomba:

$$\text{Conj}_b = P_{teixo} / \text{Rot}_b \quad (4.69)$$

Onde

P_{teixo} - potência absorvida pela bomba

Com os subsistemas descritos, é possível fazer-se o acoplamento estático de cargas, utilizando-se, para isso, o uso das equações descritas nestes últimos itens.

IV.3 - O SCEE a fluxo constante

O objetivo deste trabalho é obter o funcionamento do motor com seu fluxo magnético constante, assegurando que, mesmo sob a velocidade variável, o grau de seu aquecimento fique dentro do limite de segurança e, desta forma, um aproveitamento otimizado do conjugado eletromagnético seja conseguido.

A figura 27(a) apresenta o diagrama esquemático do SCEE mostrando o circuito de controle da corrente de campo do gerador síncrono para obtenção do fluxo constante.

Através das equações descritas anteriormente relativas

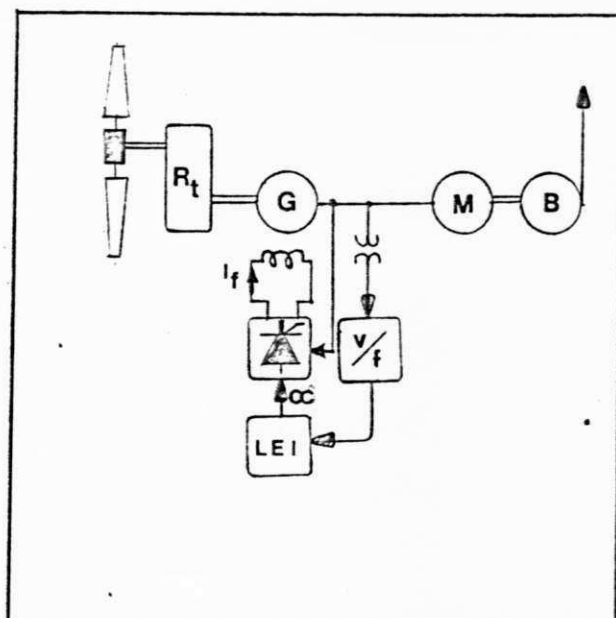


FIG.27(a) - Esquema de controle da corrente de campo do alternador

ao rotor eólico, gerador síncrono, motor assíncrono e bomba centrífuga, montou-se um algoritmo que simula o comportamento, em regime permanente, do SCEE, onde o motor opera a fluxo constante (E_m/f_1) e deste algoritmo, após processado, obteve-se os resultados que podem ser vistos na curva 01 da figura 27(b). Para implementar-se um circuito eletrônico que descreve uma função deste tipo é comum aproxima-lo através de retas, como as 02 e 03 mostradas na figura 27(b). Com os dois intervalos de retas projetou-se e implementou-se, na prática, seus circuitos eletrônicos que conjuntamente com outros circuitos já existentes, geram a lei, que irá impor o ângulo de gatilho da ponte semicontrolada, para manter o fluxo constante, para qualquer

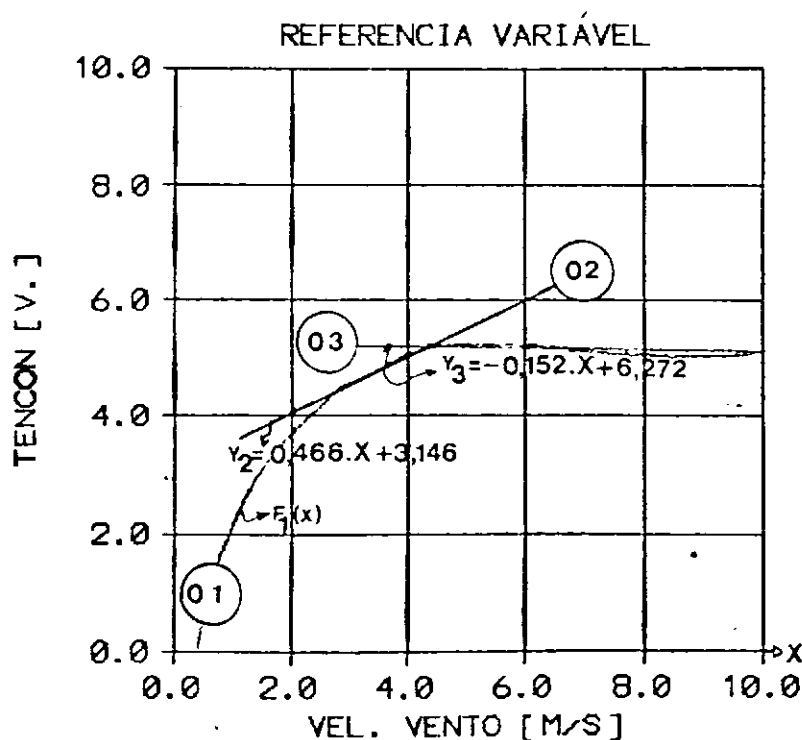


FIG.27(b) - Curva característica para controle do ângulo de gatilho e retas equivalentes

condição de regime de vento que esteja dentro do intervalo de rotação mínima de bombeamento até ao valor de rotação da bomba que corresponda a uma velocidade de vento aproximadamente de 10 m/s.

Como este é um modelo em regime permanente o princípio de imposição da lei (oc) é válido, tendo em vista o conhecimento prévio do comportamento do SCEE através de simulação via computador. Esta simulação é mostrada no final deste trabalho utilizando esta lei descrita anteriormente.

IV.4 - Circuitos eletrônicos utilizados

O SCEE em estudo possui, para controle da corrente da bobina de campo do alternador, três circuitos eletrônicos que são, o retificador semicontrolado, um gerador dente de serra em fase com a forma de onda gerada pelo alternador e um circuito degrau com amplitude que varia proporcionalmente com a frequência.

Existe ainda um quarto circuito eletrônico, que comanda a entrada e saída de operação do grupo moto-bomba, no intervalo definido para o melhor aproveitamento da energia eólica. Este ponto foi obtido experimentalmente, levando-se em consideração o efeito dinâmico da aceleração angular do rotor eólico. Os circuitos mostrados neste item foram projetados, confeccionados e implantados no SCEE, na central de testes do NERG/DCT/UFPB. Foram realizados os testes finais em todos os circuitos envolvidos e equipamentos de aquisição de dados, para finalmente realizar o ensaio global, para obtenção dos dados experimentais. Isto permite a comparação, com os resultados obtidos dos modelos

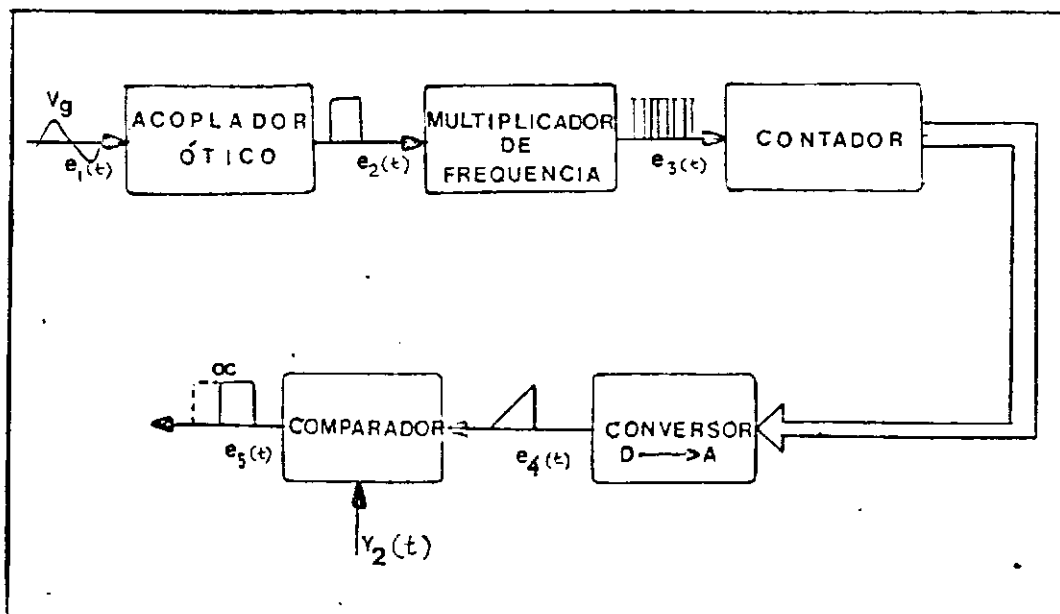


FIG.28 - Diagrama em blocos do circuito gerador dente de serra e formas de ondas

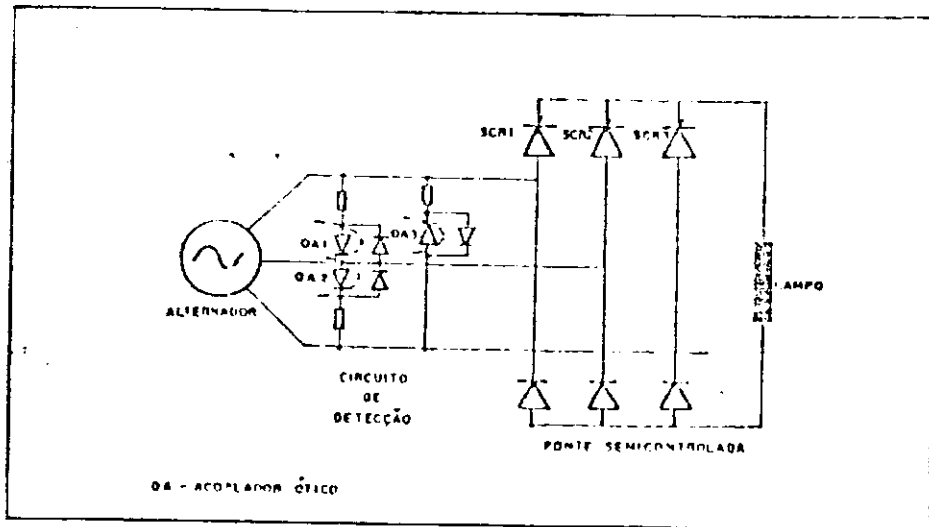


FIG.29 - Circuito elétrico da ponte semicontrolada utilizada

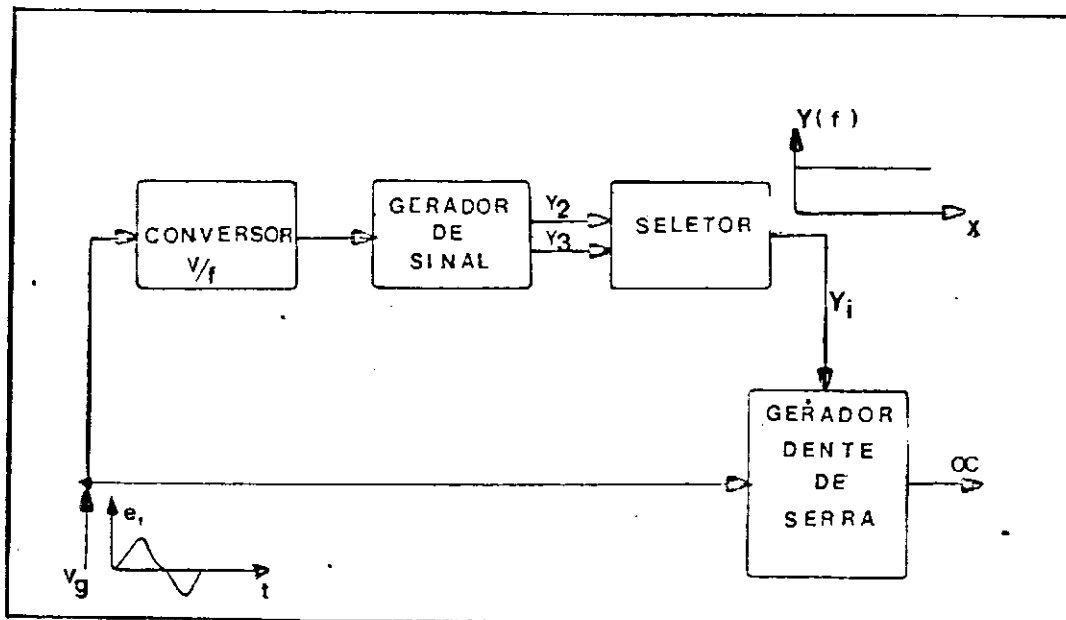


FIG.30(a) - Diagrama em bloco do sistema de realimentação

matemáticos que estão contidos no algoritmo que simula o sistema, assim como com outros trabalhos análogos existentes dentro do mesmo assunto de pesquisa.

A comparação de resultados, obtidos do algoritmo e do ensaio de campo, serão agora mostrados e analisados, levando-se em consideração, nesta análise, o desvio existente entre os resultados das duas formas de implementação e a compatibilidade entre eles.

IV.5 - Análise dos resultados obtidos

Dos resultados obtidos pode-se verificar que a operação $a (E_m/f_1)$ constante, no modelo analisado, é satisfatório, dentro das condições impostas ao trabalho. Pode-se comprovar os bons resultados deste modelo levando-se em consideração que não foi realizada a regressão dos resultados decorrentes do modelo teórico visando uma maior compatibilização com aqueles obtidos em ensaios experimentais colhidos em campo aberto.

Com o objetivo de comprovar estas indicações se faz necessário uma boa análise para compreensão dos dados levantados e dos resultados obtidos, relativos ao SCEE em questão.

O SCEE, é um sistema autopilotado, representado pelo controle de excitação do alternador através da realimentação da corrente. Este sistema foi colocado em operação em campo aberto, durante certo período e os resultados obtidos, a partir da medição das grandezas significativas, serão utilizados para comprovação do modelo teórico desenvolvido.

As grandezas, velocidade de vento, potência fornecida pelo gerador a carga, corrente de linha e corrente de campo foram avaliadas através de medidas efetuadas em campo aberto, por intermédio de oscilógrafos, enquanto que, a vazão foi obtida com o auxílio de hidrômetros calibrados.

A operação em malha fechada, assegurando o fluxo magnético no motor assíncrono, com valores próximo de seu valor nominal, foi monitorado, através de um osciloscópio, permanentemente em operação, mostrando a forma de onda da lei de controle.

Após a realização deste ensaio, foi possível conhecer-se o comportamento das grandezas medidas em campo aberto. O procedimento para elaboração dos gráficos, resultantes das medidas efetuadas, utilizou-se o princípio da seleção dos

resultados, que consta dos melhores traçados de curvas indicados pelos oscilógrafos e consequente planimetria dos seus respectivos oscilogramas, a fim de obter os valores médios em 10 minutos. De forma que, para cada velocidade de vento, obteve-se um conjunto de pontos, cujo valor médio é levado em consideração.

Como os melhores resultados obtidos, localizam-se na faixa de operação do sistema com ventos de $5,5 < V_i < 9,5$ m/s, procedeu-se, então, a escolha dos resultados da simulação dentro deste limite. Os resultados são apresentados em forma de gráficos, cujas curvas serão analisadas indicando o comportamento do SCEE.

IV.5.1 - Obtenção do fluxo constante

Do ponto de vista da implementação do circuito, foi essencial o desenvolvimento da simulação no computador, representado na figura 36(a), de forma a assegurar constante o fluxo magnético do motor de indução.

O resultado obtido é indicado na figura 37, onde verifica-se que, na gama de variação de velocidade entre 5,5 a 9,5 m/s, o fluxo magnético mantém-se aproximadamente constante.

Assegurando este princípio, é possível analisar o comportamento do SCEE através das grandezas elétricas, mecânicas e hidráulicas, assim como compará-lo com resultados obtidos por Silva (1988), em que a comparação é centrada em manter-se a operação do SCEE a 1 ótimo.

IV.5.2 - Resultados experimentais

Nas figuras apresentadas neste item, as com traço cheio (—) representam os resultados da simulação no computador, as de traço interrompido (---) representam os resultados das medidas em campo do sistema operando a fluxo constante e as pontilhadas (...) representam os resultados das medidas em campo do sistema operando com ω_c constante.

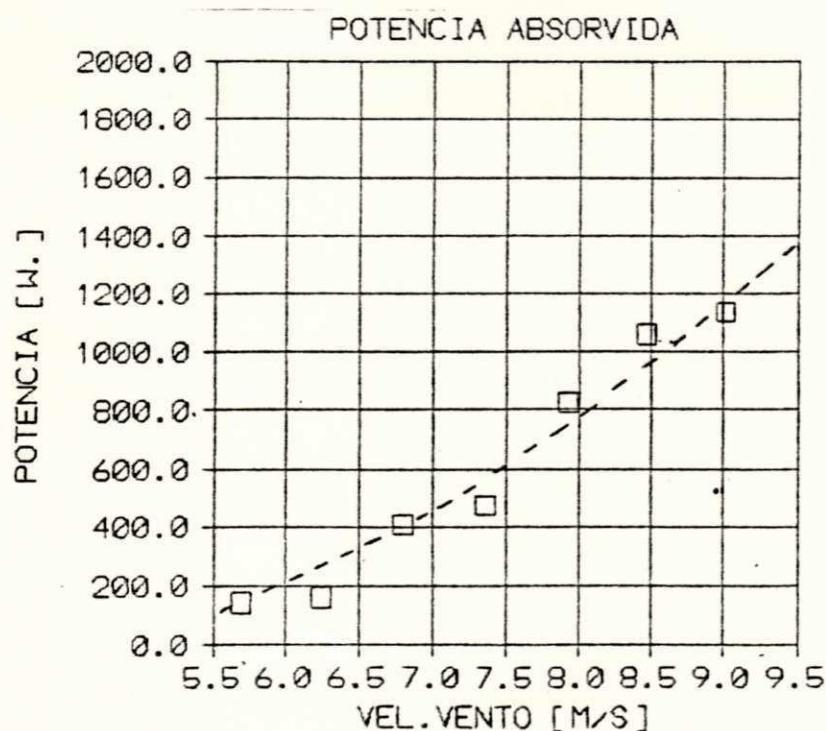


FIG.32 - Curva da potência elétrica medida nos terminais do motor de indução X velocidade de vento

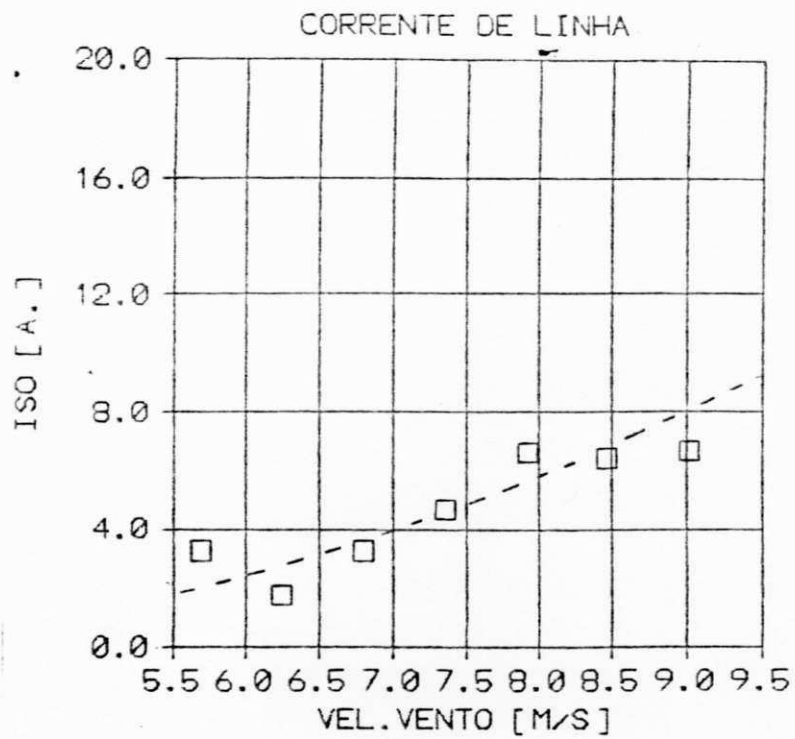


FIG.33 - Curva da corrente fornecida pelo alternador a carga X velocidade de vento

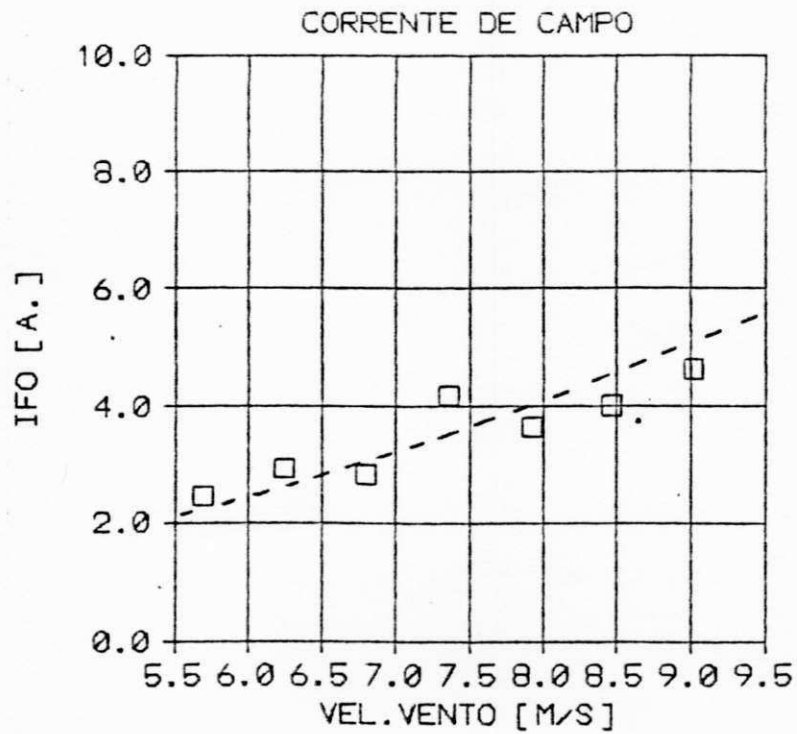


FIG.34 - Curva da corrente de campo do alternador X velocidade de vento

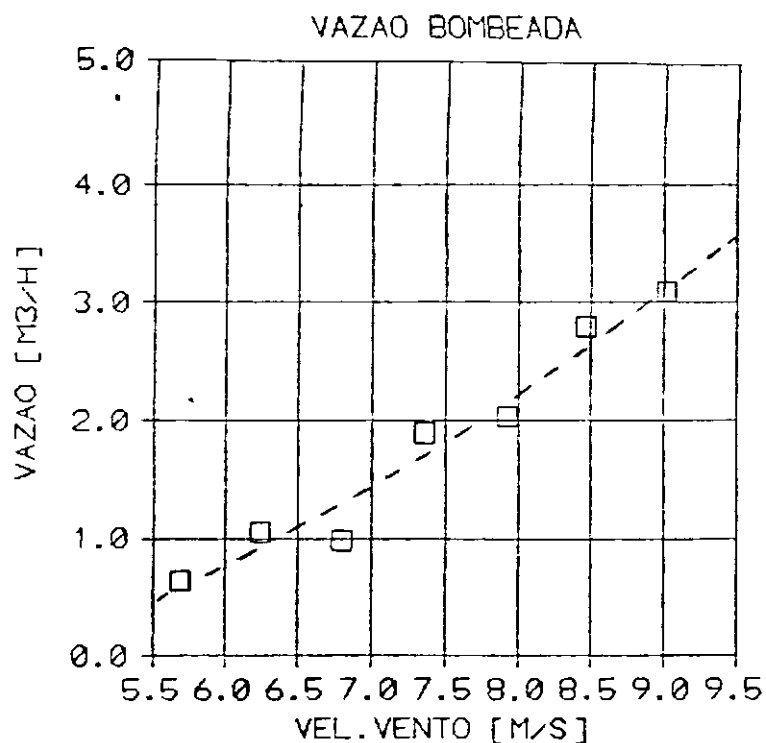


FIG.35 - Curva da vazão X velocidade de vento

As figuras 32, 33, 34, e 35 mostram as curvas dos resultados que foram selecionados dos ensaios em campo, indicando a potência elétrica absorvida pelo motor, corrente fornecida pelo alternador, corrente de campo e vazão respectivamente, como função da variação de velocidade do vento.

IV.5.3 - Simulação do SCEE

A figura 36(a) mostra o algoritmo de cálculo através do fluxograma da lógica da simulação. A entrada de dados é composta de todos os parâmetros elétricos e mecânicos envolvidos no SCEE, a saída consta dos valores das grandezas elétricas e mecânicas que se deseje conhecer.

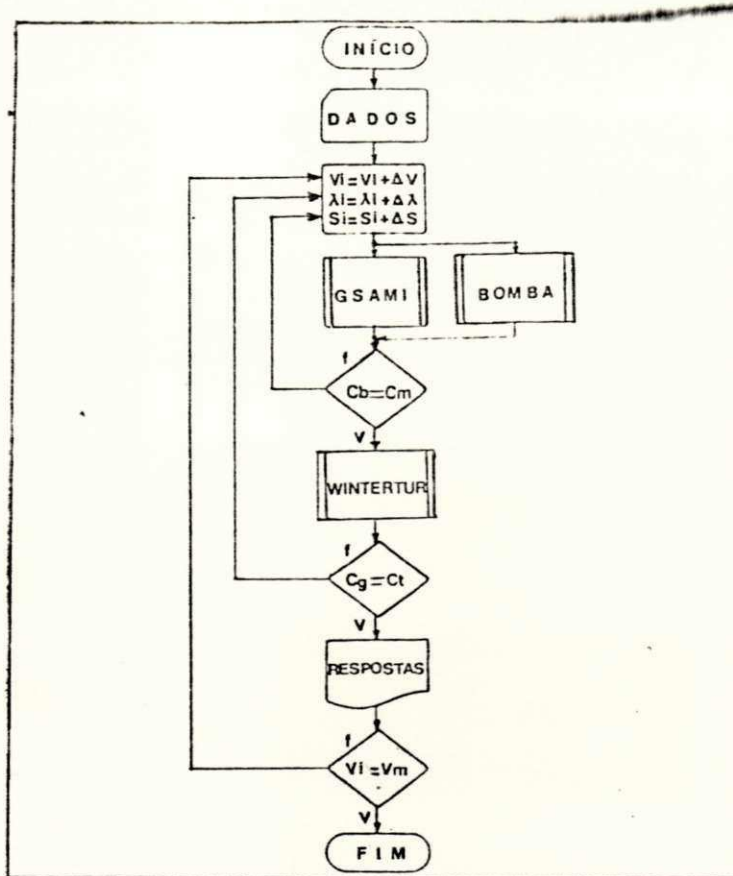


FIG.36(a) - Fluxograma representativo da lógica utilizada no programa de simulação do SCEE

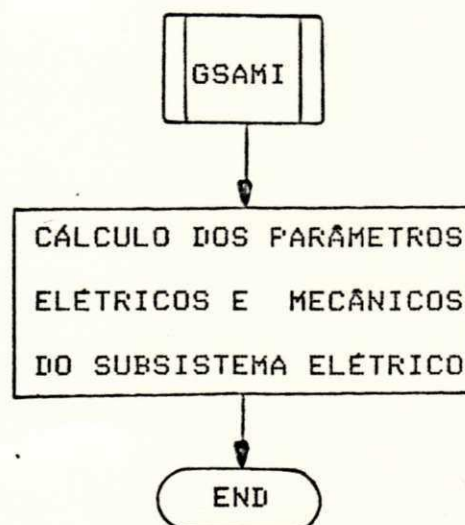


FIG.36(b) - Fluxograma básico da lógica utilizada na subrotina GSAMI

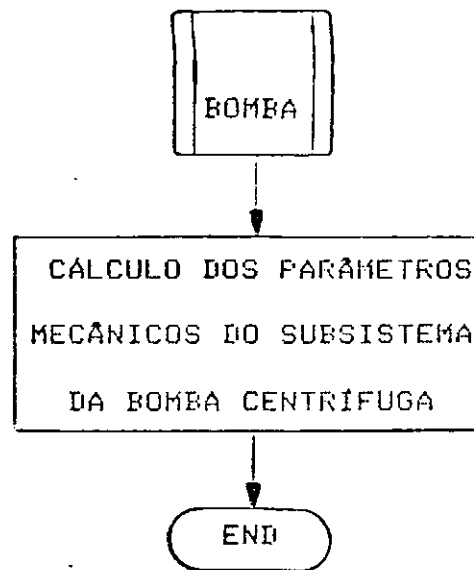


FIG.36(c) - Fluxograma básico da lógica utilizada na subrotina BOMBA

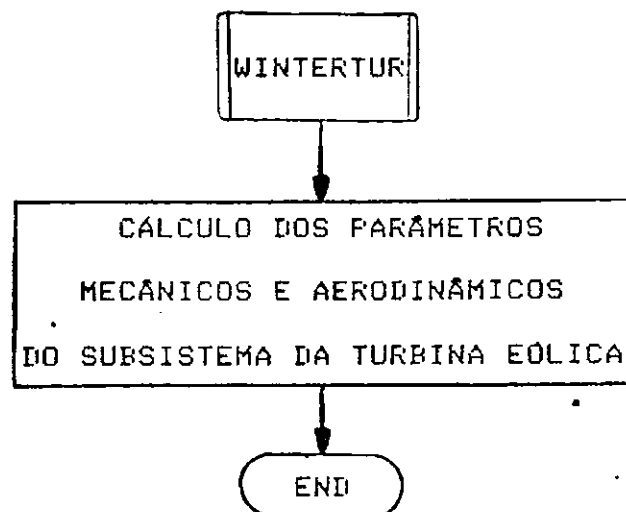


FIG.36(d) - Fluxograma básico da lógica utilizada na subrotina WINTERTUR

A lógica é centrada na utilização de vários laços interativos de forma a conseguir-se o acoplamento estático de carga entre os diversos subsistemas envolvidos. No capítulo III foram mostradas as equações que compõem esta simulação.

Os acoplamentos motor de indução-bomba centrífuga e turbina eólica-alternador são calculados através de um simples algoritmo para obtenção da raiz de um polinômio, de ordem n , comparando-se os níveis de conjugado destes componentes. Vários outros tipos de algoritmo podem ser utilizados para fazer estas comparações, como os utilizados por Silva (1988). O realizado no presente trabalho foi o que melhor adaptou-se a filosofia utilizada.

IV.5.4 - Comparação dos resultados

Após realizada a simulação do sistema de bombeamento autopilotado, através da excitação do campo do alternador e visando o fluxo constante do motor, é feita a comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Conforme já foi observado na figura 37, uma pequena variação do fluxo do motor durante todo o intervalo da variação do vento, considerando-se, assim, este fluxo constante.

As figuras 38, 39, 40 e 41 ilustram a comparação teórica experimental para as mesmas grandezas já descritas anteriormente. Desta forma pode-se dizer que as grandezas

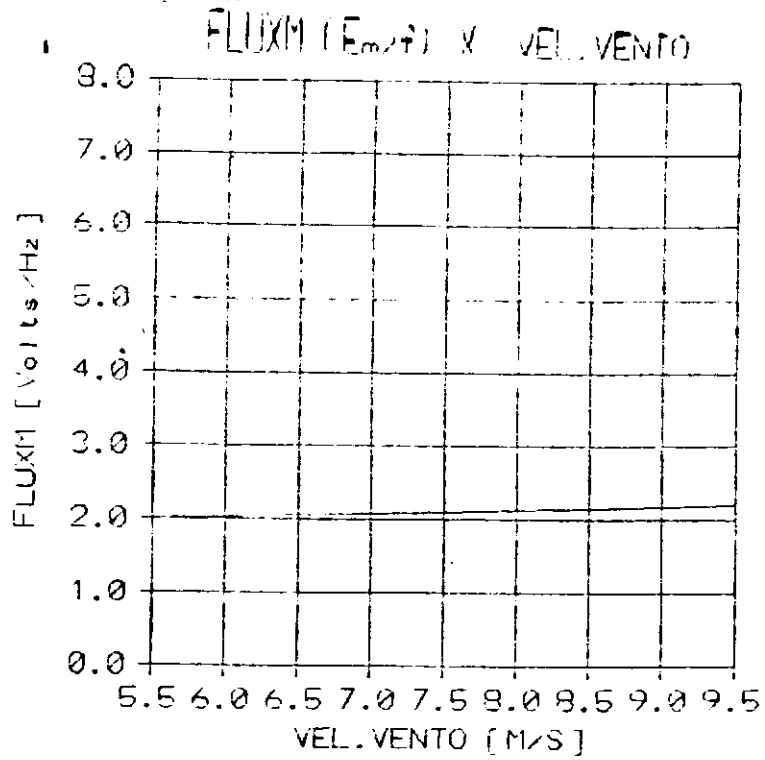


FIG. 37 - Curva característica do fluxo magnético do motor resultante da simulação

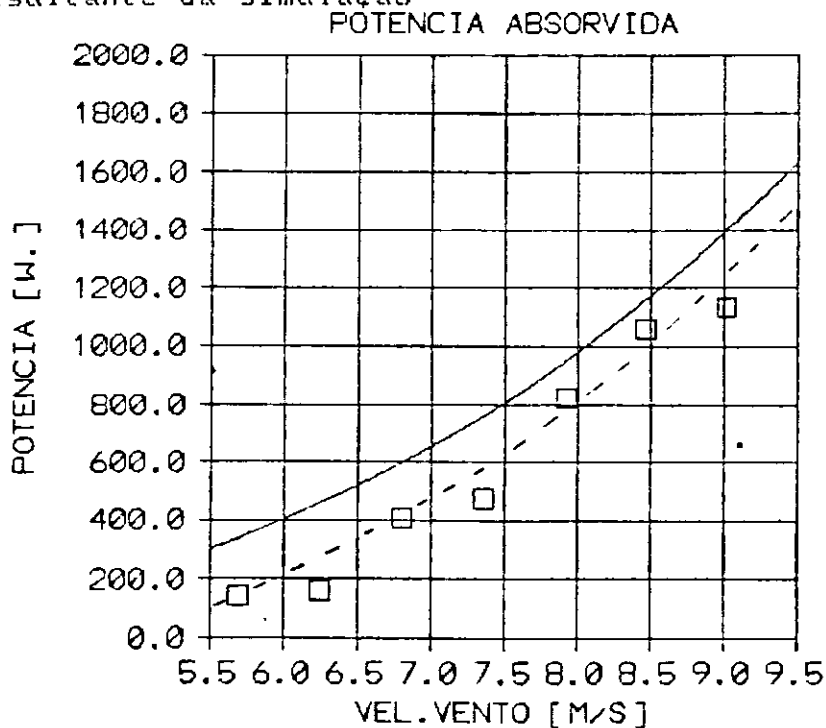


FIG. 38 - Curvas da potência elétrica medida nos terminais do motor de indução X velocidade de vento

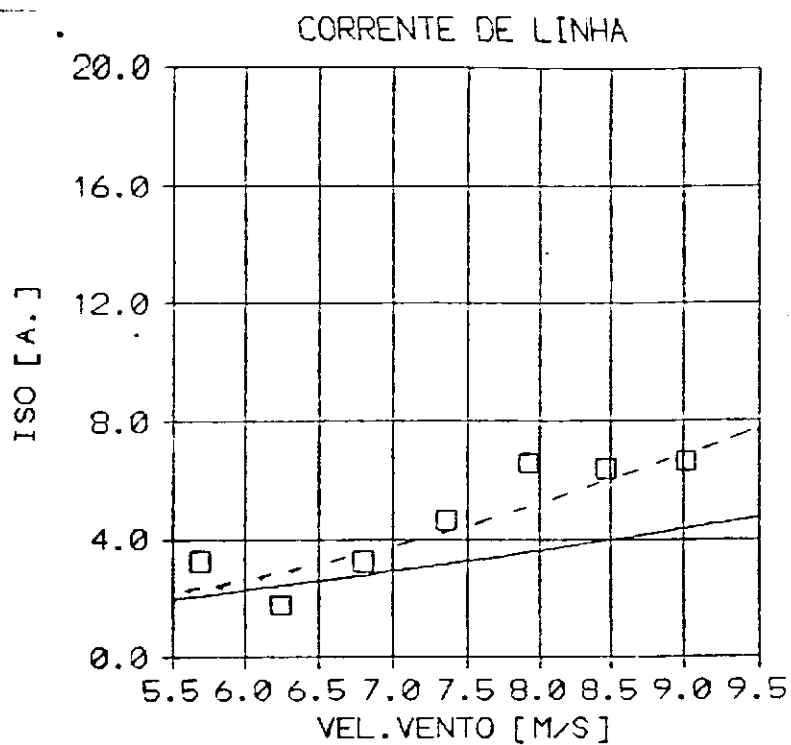


FIG.39 - Curvas da corrente fornecida pelo alternador a carga X velocidade de vento

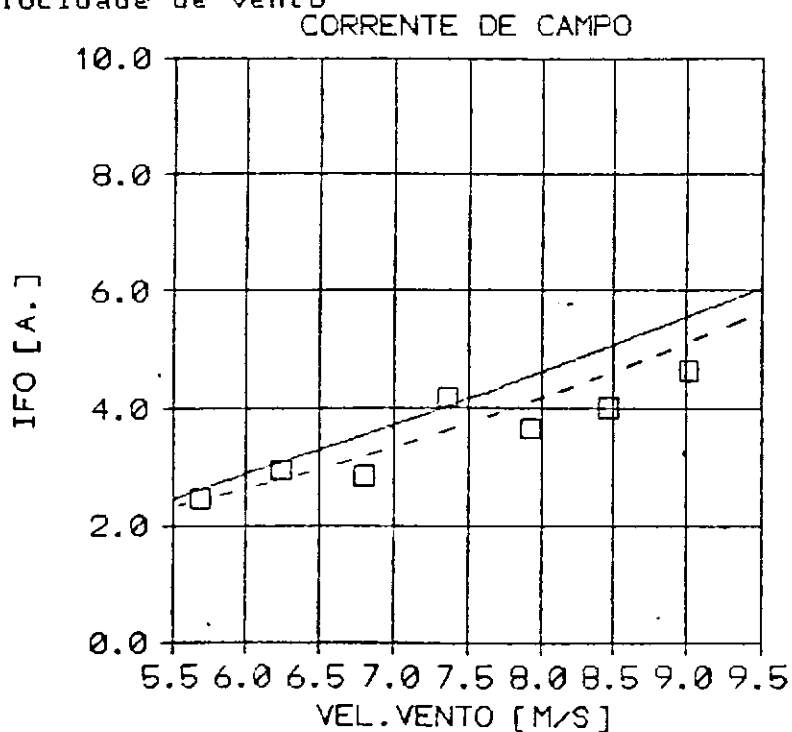


FIG.40 - Curvas da corrente de campo do alternador X velocidade de vento

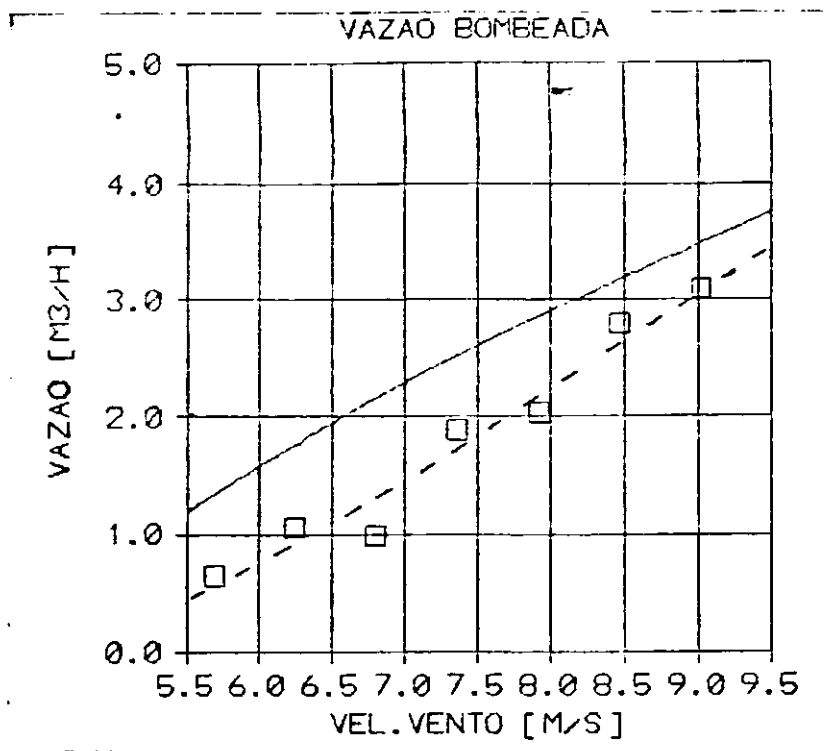


FIG.41 - Curvas da vazão X velocidade de vento

elétricas apresentam poucas distorções, a exceção da corrente de linha que apresenta uma divergência para elevadas velocidades.

IV.5.5 - Fluxo X α constante

Como indicado no início do item IV.5, as figuras 43, 44, 45 e 46 ilustram a comparação teórica e experimental para as mesmas grandezas já descritas, de dois sistemas distintos, o SCEE a fluxo constante e o SCEE a ângulo de gatilho α constante.

O sistema apresentado no trabalho de Silva (1988) direcionado ao bombeamento centrífugo de água, mostra que o sistema autopilotado operando com ângulo de gatilho α constante, assegura que o sistema turbina-gerador opere próximo da relação de velocidade ótima propiciando um rendimento aerodinâmico nas proximidades do seu valor ótimo. Este sistema é visualizado através do esquema mostrado na figura 42.

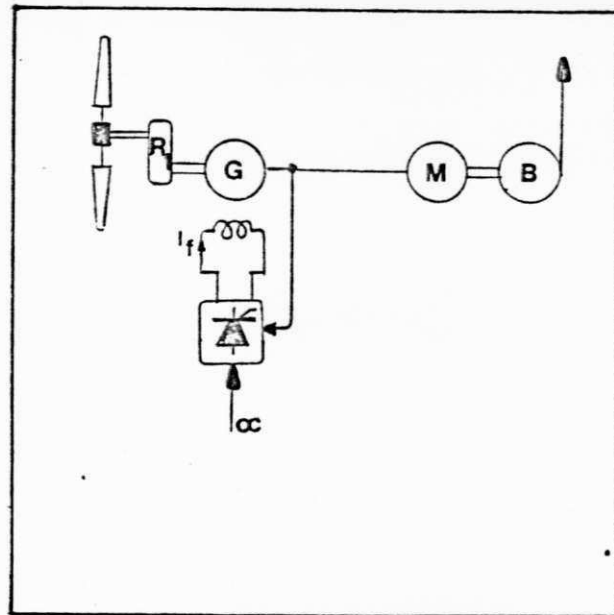


FIG.42 - Esquema proposto para o SCEE a α constante

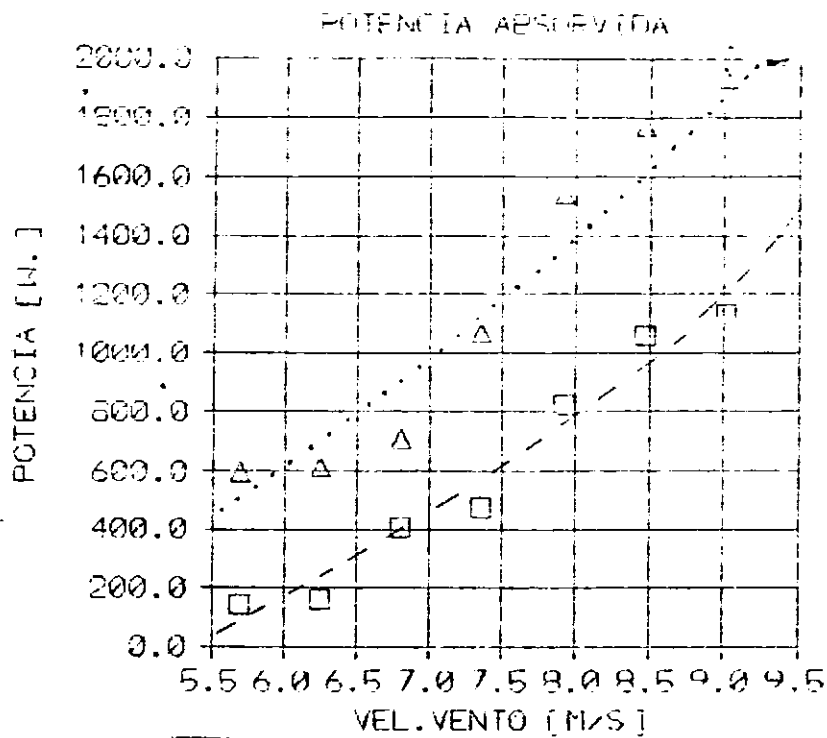


FIG.43 - Curvas da potência elétrica medida nos terminais do motor de indução X velocidade de vento

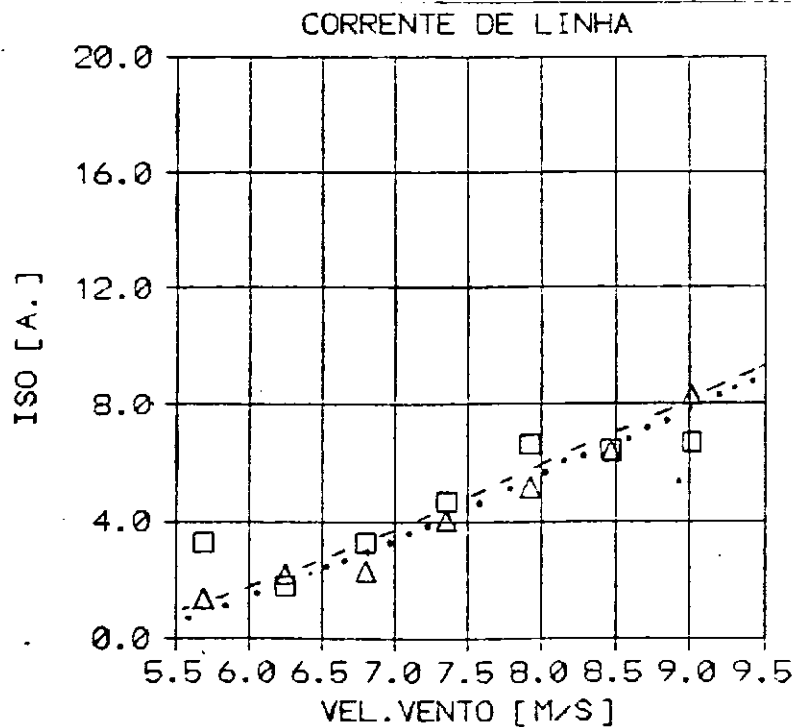


FIG.44 - Curvas da corrente fornecida pelo alternador a carga X velocidade de vento

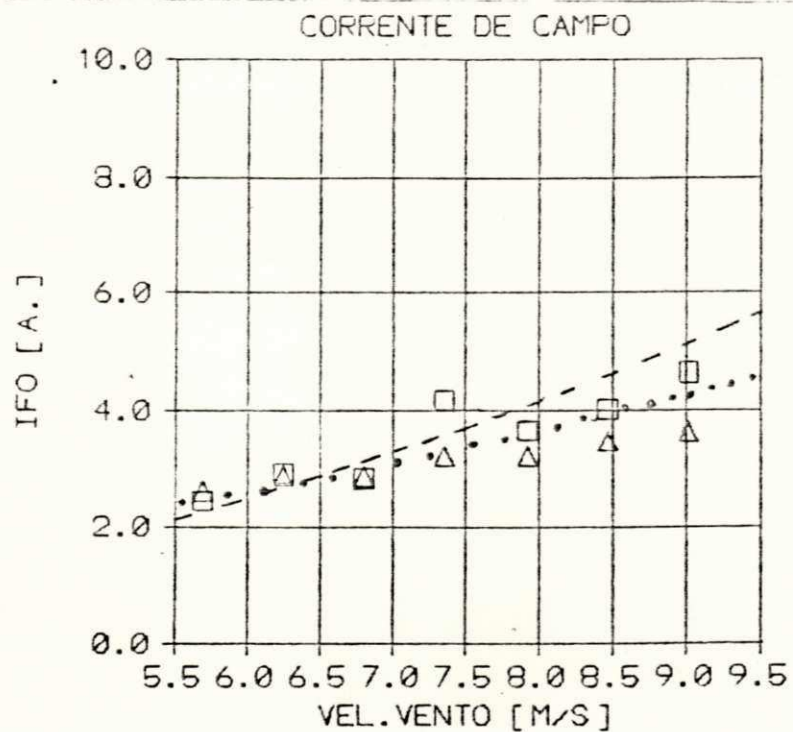


FIG. 45 - Curvas da corrente de campo do alternador X velocidade de vento

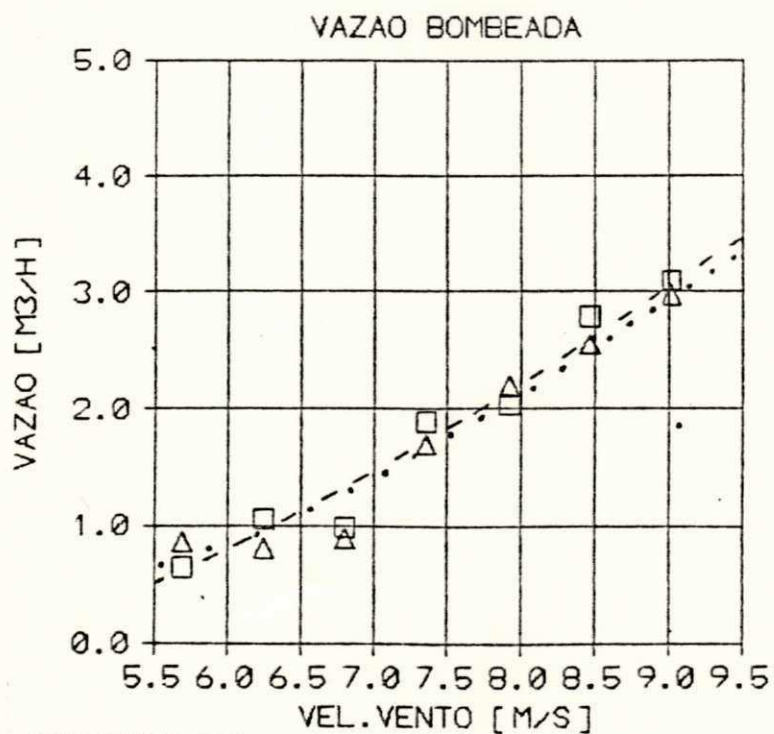


FIG. 46 - Curvas da vazão X velocidade de vento

Destas figuras pode-se afirmar que houve um comportamento muito próximo dos dois sistemas, de forma a validar toda a teoria e ensaios realizados neste trabalho, o que já era esperado. Na figura 43 pode-se verificar que as duas curvas teórica e experimental possuem o mesmo comportamento embora com valores diferentes durante todo o intervalo de vento em questão, podendo ser justificado que o sistema a ω constante absorve mais potência resultando em maiores perdas. Para concluir, a figura 47 mostra o comportamento de λ no sistema a fluxo constante, apresentando pequena variação durante toda gama de velocidade de vento.

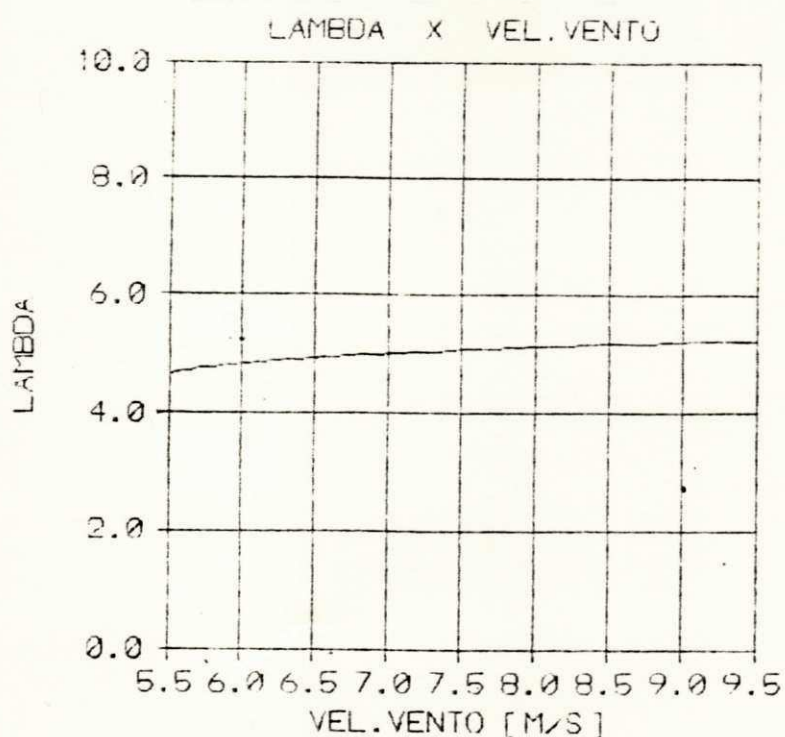


FIG.47 - Curva característica da relação de velocidade λ obtida da simulação do SCEE a fluxo constante

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Neste item será analisada a metodologia utilizada nas pesquisas contidas na presente dissertação. Este estudo caracteriza-se pela filosofia adotada no NERG/CCT/UFPB, que busca o envolvimento de várias áreas científicas para um ou mais trabalhos realizados.

Este trabalho aglutina várias áreas em um corpo único e interdependente, assim como as várias formas de análise necessária para uma implementação dessa natureza, tais como ensaios de campo aberto que trabalham com sistema real e o levantamento de parâmetros para elaboração dos modelos matemáticos do sistema.

Para compreensão desta dissertação, necessita-se uma gama variada de conhecimentos que abrange ensaios, modelos, simulação e operacionalidade com as várias áreas técnico-científicas envolvidas.

Com a finalidade de proceder-se esta análise, a seguir é mostrada as suas fases de evolução sequencial, para sua melhor compreensão.

O estudo de identificação técnica para os diversos componentes do SCEE, apresentado no capítulo II, fornece os dados de placa, de manuais e dos folhetos dos fabricantes das respectivas máquinas envolvidas.

Os ensaios de máquinas contidos neste estudo, tiveram de acordo com o capítulo III, o objetivo de encontrar as suas características operativas para elaboração dos modelos matemáticos compatíveis com seus comportamentos físicos. Embora que algumas dessas características já haviam sido determinadas em trabalhos anteriores, os parâmetros da máquina de indução e da lei de controle (α), para realimentação do sistema, se fizeram necessárias para a obtenção completa do modelo do sistema.

Neste estudo, utilizou-se modelos clássicos da máquina elétrica operando sob regime permanente. A sua aplicação, no entanto, como proposta de filosofia para este tipo de estudo é válida, principalmente visando a elaboração de algoritmos para simulações de subsistemas isolados, assim como em modelos que necessitem o acoplamento de cargas entre vários subsistemas, como os apresentados nesta dissertação.

Estudos dirigidos para conversão de energia eólica em energia elétrica podem ser encontrados. No entanto, apenas uma pequena parcela é direcionada ao bombeamento centrífugo de água. Pode-se verificar, assim, a contribuição deste trabalho sobre a análise de sistema auto-pilotado em

condições de malha fechada para este tipo de aplicação.

Muito embora não seja este estudo dirigido à obtenção do comportamento dinâmico, pode-se verificar a boa estabilidade do SCEE pelas comparações realizadas entre respostas obtidas dos ensaios em campo aberto, operando a ω constante e fluxo constantes respectivamente.

O projeto e a implementação prática da realimentação em malha fechada do sistema existente comportou-se satisfatoriamente, tendo em vista o interesse direcionado ao funcionamento em regime permanente.

Uma boa ferramenta para o estudo do SCEE é propiciado pelo desenvolvimento de um programa de computador. Consolidando esta afirmação, indicam-se os resultados obtidos das comparações realizadas nos itens finais do capítulo quatro.

Os resultados da simulação e dos ensaios em campo aberto indicam apenas algumas pequenas discrepâncias. A precisão dos instrumentos não levaram em consideração a operação em regime de frequência variável. Além, disto, o funcionamento do circuito de gatilho dos SCR'S é restrito a operações a baixa frequência. Teve-se também dificuldades para processar a planimetria das curvas fornecidas dos oscilogramas. Por fim, a necessidade de conversão de alguns

instrumentos de medição poderia ter alterado suas precisões dentro da gama de leituras efetuadas.

A comparação entre os dois sistemas, a OC constante e fluxo constante do motor, segundo os resultados obtidos dos respectivos ensaios em campo aberto, levam a concluir que o comportamento destes são muito próximos.

Do que foi descrito neste capítulo, verifica-se o cumprimento da proposta do trabalho. Seguindo-se a evolução do estudo, nota-se o fácil entendimento das abordagens dos aspectos utilizados na pesquisa, para chegar-se à projetos e implementações teóricas e experimentais respectivamente.

Na evolução desse estudo destaca-se a filosofia utilizada não só relativa à pesquisa, como também aos projetos, confecção e execução de circuitos elétricos e eletrônicos desenvolvidos e implementados.

Na auto-excitação do alternador, assinala-se a estratégia utilizada como alternativa ao bom acoplamento de cargas. O controle de malha fechada é uma solução viável para este tipo de sistema.

Inerente ao emprego do software, houve certa preocupação com a estratégia utilizada, tendo em vista a intersecção das curvas. Essas curvas variam em função das mesmas variáveis e possuem mais de um ponto de contato.

Para tal, elaborou-se um método numérico e implementou-se um algoritmo que contribuiu para satisfazer as condições desejadas.

Analizando-se finalmente este trabalho, sob o ponto de vista de sua contribuição, faz-se necessário salientar que este estudo constitui um caso específico de operação de um SCEE mais abrangente.

Das contribuições inerentes ao sistema que opera a ω constante, salienta-se a maior eficiência do conjugado mecânico nas condições de vento existentes pois o sistema a fluxo constante não permite a saturação do fluxo magnético do motor, mesmo quando sujeito a altas frequências, garantindo que o grau de aquecimento fique dentro do limite de segurança diminuindo as perdas existentes e dando então uma maior vida aos equipamentos.

Dentro deste pressuposto, o estudo em regime permanente para bombeamento centrífugo de água, através do sistema auto-pilotado com realimentação em malha fechada, está realizado e atende às expectativas da proposta do mesmo.

Em capítulos anteriores destacou-se a validação de todo o estudo. No entanto, uma melhora pode ser obtida com o aprimoramento da simulação computacional, e do circuito de gatilho dos SCR'S, particularmente do seu gerador dente de serra. A obtenção de um sistema de medição para aquisição de dados em laboratório e ensaios de campo aberto são imprescindíveis. Uma solução que venha a resolver este problema é a utilização de microprocessadores como um estudo já em desenvolvimento pelo NERG/CCT/UFPB.

CAPITULO VI

BIBLIOGRAFIA

- 01 - ARAÚJO, T. S. ; SIMÕES, F. J. ; SILVA, S. R. , Projeto e estudo de um gerador de pequeno porte; IV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1987.
- 02 - ABDELAZIZ, M. E., Permanent magnet synchronous machines ; EPF de Lausanne, 1982.
- 03 - ALMEIDA, J. L. A., Eletrônica de potência; Livros Técnicos Editora Ltda, 1986.
- 04 - AVELINO, J. A., Análise do bombeamento centrífugo sob frequência variável; FUC Rio de Janeiro, 1982.
- 05 - AIEE, Test procedure for synchronous machines; IEEE New York, 1965.
- 06 - BUEHRING, I. K. and FRERIS, L. L., Control policies for wind energy conversion systems; IEE proceedings, 1981.
- 07 - BOLOGNANI, S. and BUJA, G. S., Control system of a current inverter induction motor drive; IEEE, 1985.
- 08 - BRAN, R. e SOUZA, Z., Máquinas de fluxo; Ao Livro Técnico S.A, 1969.

09 - CEBALLOS, J. C., BASTOS, E. J. B. e LUCENA, G. H.,
Nomogramas de Potência eólica para Campina Grande; SBPC,
1978.

10 - CASANOVA, V. H. and FRERIS, L. L., Control policies for
maximising energy extraction from wind turbines; London,
1982.

11 - CASANOVA, V. H. and FRERIS, L. L., Dynamics and control
of wind energy conversion systems; London, 1984.

12 - CLARK, R. N., Wind energy for pumping irrigation water;
Hamburg, 1984.

13 - CARNAHAN, B., LUTHER, H. A. e WILKES, J. O., Applied
numerical methods; New York, 1969.

14 - CLARK, R. N., Operating electric motors with autonomous
wind power; Hawaii, 1988.

15 - CARVALHO, D. F., Instalações elevatórias e bombas; PUC,
1977.

16 - FALCONE, A. G., Eletromecânica; Ed. Edgard Blucher Ltda,
1979.

17 - GOEZINNE, F. and EILERING, F., Wind electric pumping
systems; Hamburg, 1984.

18 - JONES, C. V., The unified theory of electrical machines; London, 1967.

19 - LEVI, E., Poliphase motors; USA, 1984.

20 - MEMARZADEH, M. A. and BARTON, T. H., Windmill power pumps with intermediate electrical power transmission; Québec, 1975.

21 - MEDEIROS, A., Otimização de sistemas de conversão de energia eólica para bombeamento de água; UFPB, 1986.

22 - MUSGROVE, P. J., Wind energy conversion - An introduction; IEE proceedings, 1983.

23 - MURPHY, J. M. D., Thyristor control of A.C. motors; New York, 1974.

24 - NATHAN, G. K., Investigation of interaction between a simulated wind turbine and a pump; Singapore, 1984.

25 - KOSTENKO, M. P. e PIOTROVSKI, L. M., Máquinas elétricas; Moscou, 1975.

26 - KRAUSE, P. C. and THOMAS, C. H., Simulation of symmetrical induction machinery; IEEE, 1965.

- 27 - PAPADOPOULI, N., Installation of a commercial wind-
electric generator with battery storage; Canadá, 1981
- 28 - POWER, H. M., A simulation model for wind turbines;
Applied Energy, 1980.
- 29 - PFLEIDERER, C. e PETERMANN, H., Máquinas de fluxo;
Livros Técnicos e Científicos; Rio de Janeiro, 1979.
- 30 - SILVA, S. R., ARAÚJO, T. S. e SIMÕES, F. J.,
Alternativas de acoplamento de bombas centrífugas em
conexão direta com aerogeradores; Belo Horizonte, 1986.
- 31 - SILVA, S. R., ARAÚJO, T. S. e SIMÕES, F. J., Análise do
desempenho de sistemas eólicos comportando bombas
centrífugas; Rio de Janeiro, 1987.
- 32 - SILVA, S. R., Uma contribuição ao acionamento elétrico
industrial; UFMG, 1984.
- 33 - SILVA, S. R., Sistema eólico de geração de energia
elétrica Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica ;UFPB,
1988.
- 34 - SILVA, S. R. e ARAÚJO, T. S., Performance of optimal
WECS with electrical transmission and centrifugal pump;
Windpower '88 , Honolulu, USA, 1988. 1988.

35 - SILVA, S. R., ARAÚJO, T. S., FECHINE, E. e SIMÕES, F. J., Modelling and optimal load coupling of wind energy conversion systems; Italy, 1986.

36 - SIMÕES, F. J., ARAÚJO, T. S., SILVA, S. R., Determinação e modelamento das características de conversão de turbinas eólicas a partir de testes em campo aberto; Belo Horizonte, 1986.

37 - SIMÕES, F. J. e GRANZEIRA, M. R., Simulação e testes de campo de um sistema eólico para bombeamento; Belo Horizonte, 1986.

38 - SOUZA, Z. e BRAN, R., Máquinas de fluxo; Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1969.

39 - VENKATARAMAN, R., RAMASWAMI, B. and HOLTZ, J., Electronic analog slip calculator for induction motor drives; IEEE, 1980.

40 - Manual Elektro GmbH Winterthur.

A P E N D I C E

STORAGE: 2

```

C *****
C *
C *   O PROGRAMA SCEE CALCULA AS CARACTERISTICAS DO ACOPLAMENTO
C *   DE UMA TURBINA EOLICA, GERADOR SINCRONO, MOTOR DE INDUCAO
C *   E BOMBA CENTRIFUGA OPERANDO COM FLUXO DO MOTOR CONSTANTE
C *   E COM REALIMENTACAO DE CAMPO DO GERADOR
C *
C *****
C *
C * ROTT - ROTACAO DA TURBINA EOLICA
C * ROTB - ROTACAO DA BOMBA CENTRIFUGA
C * RFT  - RESISTENCIA TOTAL DO CAMPO DO ALTERNADOR
C * RF   - RESISTENCIA DO CAMPO DO ALTERNADOR
C * RAD  - RESISTENCIA ADICIONAL DO CAMPO DO ALTERNADOR
C * WS   - VELOCIDADE ANGULAR DO CAMPO GIRANTE DO MOTOR
C * RT   - RELACAO DE TRANSMISSAO
C * PPG  - PAR DE POLOS DO ALTERNADOR
C * PPM  - PAR DE POLOS DO MOTOR
C * FREQ - FREQUENCIA DO SISTEMA
C * WR   - VELOCIDADE ANGULAR INDUZADA NO ROTOR DO MOTOR
C * S    - ESCORREGAMENTO
C * WM   - VELOCIDADE ANGULAR REFERIDA AO EIXO DO MOTOR
C * RG   - RESISTENCIA DO GERADOR
C * RL   - RESISTENCIA DA LINHA DE TRANSMISSAO
C * RSM  - RESISTENCIA DO ESTATOR DO MOTOR
C * RRM  - RESISTENCIA DO ROTOR DO MOTOR
C * MM   - INDUTANCIA MUTUA DO MOTOR
C * LSM  - INDUTANCIA DO ESTATOR DO MOTOR
C * LL   - INDUTANCIA DA LINHA DE TRANSMISSAO
C * LG   - INDUTANCIA DO GERADOR
C * LRM  - INDUTANCIA DO ROTOR DO MOTOR
C * EG   - F.E.M. DO ALTERNADOR
C * CKG  - CONSTANTE DO ALTERNADOR
C * IFO  - CORRENTE DO CAMPO DO ALTERNADOR
C * IRO  - CORRENTE DO ROTOR DO MOTOR
C * EM   - F.E.M DO MOTOR
C * ISO  - CORRENTE DE ESTATOR DO MOTOR
C * ANGR - ANGULO DE FASE DE IRO
C * XRM  - REATANCIA INDUTIVA DO ROTOR DO MOTOR
C * ANGS - ANGULO DE FASE DE ISO
C * ISR  - COMPONENTE REAL DE ISO
C * ISM  - COMPONENTE IMAGINARIO DE ISO
C * PELM - POTENCIA ELETRICA DO MOTOR
C * PMECH- PERDAS MECANICAS DO MOTOR
C * CKMEM- CONSTANTE DE PERDAS MECANICAS DO MOTOR
C * PFEM - PERDAS NO FERRO
C * PADM - PERDAS ADICIONAIS DO MOTOR
C * CKPAM- CONSTANTES DE PERDAS ADICIONAIS DO MOTOR
C * PERM1- PRIMEIRA PARCELA DAS PERDAS DO MOTOR
C * IPERM- CORRENTE DE PERDAS
C * IGO  - CORRENTE DO FORNECIDA PELO GERADOR AO SISTEMA

```

C * IGR - COMPONENTE REAL DE IGO
 C * IGM - COMPONENTE IMAGINARIO DE IGO
 C * CKRETH - CONSTANTE DO RETIFICADOR COMPONENTE IMAGINARIA
 C * CKRETR - CONSTANTE DO RETIFICADOR COMPONENTE REAL
 C * CONJM - CONJUGADO FORNECIDO AO EIXO DO MOTOR
 C * XG - REATANCIA DO GERADOR
 C * ZG - IMPEDANCIA DO GERADOR
 C * ANGZG - ANGULO DE ZG
 C * XL - REATANCIA INDUTIVA DA LINHA
 C * ZL - IMPEDANCIA DA LINHA
 C * ANGZL - ANGULO DE ZL
 C * CORRH - CORRENTE ABSORVIDA PELO MOTOR CORRIGIDA
 C * ANGCH - ANGULO DA CORRH
 C * ANGGE - ANGULO DE IGO
 C * TENSAG - TENSÃO TERMINAL DO GERADOR
 C * TENSAG2 - TENSÃO TERMINAL DO TRANSFORMADOR DE SINAL
 C * TENCOR - TENSÃO DE CONTROLE DA REALIMENTAÇÃO
 C * XI - ANGULO ALFA DA PONTE SEMICONTROLADA
 C * TENSAM - TENSÃO TERMINAL DO MOTOR
 C * COSP - FATOR DE POTENCIA DO SISTEMA
 C * CORRG - CORRENTE FORNECIDA PELO GERADOR AO SISTEMA OU IGO
 C * PCUM - PERDAS NO COBRE DO MOTOR
 C * POTG - POTENCIA GERADA PELO ALTERNADOR
 C * PCUG - PERDAS NO COBRE DO GERADOR
 C * PCUL - PERDAS NO COBRE DA LINHA
 C * PFEG - PERDAS NO FERRO DO GERADOR
 C * PADG - PERDAS ADICIONAIS NO GERADOR
 C * PMECG - PERDAS MECANICAS NO GERADOR
 C * PERM - PERDAS TOTAIS NO MOTOR
 C * PERG - PERDAS TOTAIS NO GERADOR
 C * PMEC - POTENCIA MECANICA FORNECIDA AO EIXO DA BOMBA
 C * PTOTM - POTENCIA TOTAL ABSORVIDA PELO MOTOR
 C * POTOT - POTENCIA TOTAL ABSORVIDA PELO SISTEMA
 C * RENDM - RENDIMENTO DO MOTOR
 C * RENDG - RENDIMENTO DO GERADOR
 C * FLUXM - FLUXO DO MOTOR
 C * VDD - TENSÃO TERMINAL DO CAMPO DO ALTERNADOR
 C * IFO - CORRENTE DE CAMPO DO ALTERNADOR
 C * CONJG - CONJUGADO NO EIXO DO GERADOR
 C * ROTMIN - ROTACAO NOMINAL PARA BOMBAMENTO DE AGUA DO SISTEMA
 C * ALTEST - ALTURA ESTATICA DO SISTEMA
 C * VAZAO - VAZAO DA BOMBA
 C * ALTEST - ALTURA ESTATICA DO SISTEMA
 C * CBOH'S - CONSTANTES PERDAS DO SISTEMA HIDRAULICO
 C * CEST - CONSTANTE DE PERDAS DE CARGA DOS ACESSORIOS
 C * VAZEQ - VAZAO CORRIGIDA
 C * ROTNB - ROTACAO NOMINAL DA BOMBA
 C * RENDN - RENDIMENTO NOMINAL NA VELOCIDADE
 C * CKREB'S - CONSTANTES DE RENDIMENTO NOMINAL DA BOMBA
 C * ALTMAN - ALTURA MANOMETRICA
 C * POTUT - POTENCIA UTIL DA BOMBA
 C * PERTOT - PERDA TOTAL DA BOMBA CENTRIFUGA
 C * PMEC - PARCELA DE PERTOT REFERENTE AS PERDAS MECANICAS
 C * PINT - PARCELA DE PERTOT REFERENTE AS PERDAS INTERNAS
 C * PTEIXO - POTENCIA ABSORVIDA PELO EIXO DA BOMBA

```

C      * RENDB  - RENDIMENTO DA BOMBA
C      * WDOM   - VELOCIDADE ANGULAR DA BOMBA OU WM
C      * CONJB  - CONJUGADO ABSORVIDO PELO EIXO DA BOMBA
C      * WT     - VELOCIDADE ANGULAR DO EIXO DA TURBINA
C      * LAMBDA - RELACAO DE VELOCIDADE DO ROTOR EOLICO
C      * LAMBX  - VALOR MAXIMO DE LAMBDA
C      * CPCOE'S- CONSTANTES PARA SIMULACAO MATEMATICA DO CP
C      * AREA   - AREA VARRIDA PELAS PAS DO ROTOR EOLICO
C      * RAO    - RAO DA TURBINA EOLICA
C      * PEXTR  - POTENCIA EXTRAIVEL DO VENTO PELO AEROGERADOR
C      * DENSAR - DENSIDADE DO AR
C      * CP     - COEFICIENTE DE POTENCIA
C      * CONJT  - CONJUGADO DO CATAVENTO
C      *
C      *****
C
C
C      REAL   IFO, IRO, ISO, ISR, ISM, IGO, IGR, IGM, IPERM
C      REAL   LSM, LRM, MM, LG, LEQ, LL
C      REAL   LAMBDA, LAMBX, LAMBMIN, LAMBMAX, ALAMB
C      REAL GRAPH(500, 10)
C      REAL* 8 S, SANTE, SESC
C      INTEGER*2 NCOU, NPT, NTOT, NCLE, NDEL
C
C      **-----**
C
C      COMMON /BLOC01/ CEST, CBOM1, CBOM2, CBOM3
C      COMMON /BLOC02/ ROTNB, ALTEST, CKREB1, CKREB2
C      COMMON /BLOC03/ PI, ERR, CNI, ERR2, CKPMEC, RENDB1
C      COMMON /BLOC04/ RT, RSM, RRM, RF, RAD, PPG, PPM, CKRETR, RL
C      COMMON /BLOC05/ LSM, LRM, LG, MM, A, CKF, CKG, CKRETM, LL
C      COMMON /BLOC06/ CKPAM, CKPAG, CKFEM, CKFEG, CKMEM, CKMEG
C      COMMON /BLOC07/ FLUXM, RENDB, RENDBG, COSP, S, IPERM, TENCON
C      COMMON /BLOC08/ RAO, DENSAR, CPCOE1, CPCOE2, CPCOE3, CPCOE4, CPCOE5,
C      LAMBX
C      COMMON /BLOC10/ TENSAM, CORR, POTUT, PUTIL, FREQ, PELM, CONJG
C
C      **-----**
C
C      OPEN(3, FILE = 'SCEE.ENT', STATUS = 'OLD')
C      OPEN(4, FILE = 'SCEE1.SAI', STATUS = 'NEW')
C      OPEN(5, FILE = 'SCEE2.SAI', STATUS = 'NEW')
C
C      **-----**
C
C      WRITE(*, '(A\)' ) ' Smin = '
C      READ(*, *) S
C      DO 78 INTERACAO=1, 24
C
C      WRITE(*, *)
C      WRITE(*, '(A\)' ) ' Ifo = '
C      READ(*, *) IFO
C      DO 79 INTERACAO=1, 24
C
C      WRITE(*, *)

```



```
WRITE(X, '(A\)\') Lmax =  
READ(X, *) LAMB2
```

C
C
C

```
PI = 3.14159265400
```

C
C
C

```
READ(3,10) PFM, PPG  
READ(3,10) RL, LL  
READ(3,10) RSM, RG  
READ(3,10) RRM, LG  
READ(3,10) LSM, LRM  
READ(3,10) MH, A  
READ(3,10) RF, RAD  
READ(3,10) CKG, CKF  
READ(3,10) CKFAM, CKFAG  
READ(3,10) CKFEM, CKFEG  
READ(3,10) CKMEM, RT  
READ(3,10) CKRETR, CKRETM  
READ(3,10) CNI, ERR  
READ(3,10) CIN, CFIN  
READ(3,10) CNP, ALTEST  
READ(3,10) ROTNB, CBOM1  
READ(3,10) CBOM2, CBOM3  
READ(3,10) CKPMEC, CKREB1  
READ(3,10) CKREB2, ERR2  
READ(3,10) RAIO, DENSAR  
READ(3,10) CPCOE1, CPCOE2  
READ(3,10) CPCOE3, CPCOE4  
READ(3,10) CPCOE5, CKMEG  
READ(3,10) CEST, VAS  
READ(3,10) VAL
```

C

```
10 FORMAT(18X, D12.4, 28X, D12.4)  
ALAMB = 1.10 * LAMB2
```

C
C

```
WRITE(4,20)
```

```
20 FORMAT(1X, 'VENTO', 8X, 'ROTT ', 12X, 'FREQ', 13X, 'TENSAG', 8X, 'CORRG',  
. 10X, 'PELM', 8X, 'IFO', 6X, 'FLUXM', /)
```

C

```
WRITE(5,22)
```

```
22 FORMAT(1X, 'VENTO', 8X, 'ROTB ', 12X, 'S', 13X, 'ALTMAN', 8X, 'PTEIXO',  
. 10X, 'VAZAO', 8X, 'PEXTR', 6X, 'LAMBDA', /)
```

C

```
****
```

C

```
VARIACAO DE VELOCIDADE  
SIMULACAO DO VENTO
```

C

```
****
```

C

```
NP = CNP
```

```
J = 0
```

C

```
SESC = S
```

```
SANTE = 0.90 * S
```

```
ANPZ = 0.000
DO 1000 I = 1,NP
AINTL = VAL
JCONTL = 0
DIVL = 10
```

```
C .....
C.....VARIACAO DE LAMBDA PARA CADA VALOR DE VELOCIDADE DE VENTO PARA
C.....IGUALAR O VALOR DOS CONJT E CONJG
```

```
C .....
J = J + 1.0
ANPZ = ANPZ + 1.000
LAMBX = LAMB2
VENTO = 10.1 - 10.0 * (ANPZ/200)
```

```
C
8000 ROTT = 30 * LAMBX * VENTO/(PI*RAIO)
```

```
C
SANTE = 0.9 * SESC
S = SESC
JCONTS = 0
AINTS = VAS
DIVS = 10
```

```
C .....
C.....LACO PARA IGUALAR O VALOR DO CONJM COM CONJB VARIANDO S
```

```
C
7777 ROTB = ROTT*RT*PPG*(1-S)/PPM
```

```
C
#####
CALL GSAMI(ROTT,ROTB,TENSAG,CORRG,CONJM,POTOT,IFO,XI,I,POTG,
PELM1)
CALL BOMBA(ROTB,VAZAD,ALTMAN,RENDB,CONJB,PTEIXO,I)
```

```
C
#####
APONTA = PTEIXO - PELM1
IF (APONTA.LT.0.0 ) GOTO 8887
SANTE = S
S = S + AINTS
IF(S.GT.0.98) GOTO 8887
GOTO 7777
```

```
C
8887 IF (JCONTS.GT.4) GOTO 8189
```

```
S = SANTE
AINTS = VAS/DIVS
JCONTS = JCONT + 1
DIVS = 10 * DIVS
GOTO 7777
```

```
C
C FIM DO LACO
```

```
C .....
C.....
8189 CALL WINTERTUR (VENTO,ROTT,LAMBDA,CP,PEXTR,CONJT)
```

```
C .....
C.....
```

```
IF (LAMBXM.LT.2.0D0) GOTO 8887
IF (PEXTR.GT.POTOT) GOTO 8010
ALAMBXM = LAMBXM
LAMBXM = LAMBXM - AINTLA
GOTO 8000
```

```
C
8010 IF (JCONTL.GT.4) GOTO 8889
LAMBXM = ALAMBXM
AINTL = VAL/DIVL
JCONTL = JCONTL + 1
DIVL = 10 * DIVL
GOTO 8000
```

```
C
8889 RENDGL = RENDG*RENDM
```

```
C
C
C **-----*
WRITE(4,50) VENTO,ROTT,FREQ,TENSAG,CORRG,PELM1,IFO,FLUXM
50 FORMAT(1X,8(D12.6,6X))
WRITE(5,55) VENTO,ROTB,S,ALTMAN,PTEIXO,VAZAO,PEXTR,LAMBXM
55 FORMAT(1X,8(D12.6,6X))
C **-----*
```

```
C
1000 CONTINUE
```

```
C
CLOSE(4)
CLOSE(5)
STOP
END
```

```
C
C **-----*
C **-- A SUBROTINA "GSAMI" PROMOVE O ACOPLAMENTO DE UM GERADOR ---*
C **-- SINCRONO AUTOEXCITADO COM UM MOTOR DE INDUCAO. ---*
C **-----*
```

```
C SUBROUTINE GSAMI(ROTT,ROTB,TENSAG,CORRG,CONJM,POTOT,IFO,XI,I,
POTG,PELM1)
C **-----*
REAL IFO,IRO,ISO,ISR,ISM,IGO,IGR,IGM,IPERM
REAL LSM,LRM,MM,LG,LEQ,LL
REAL LAMBDA,LAMBXM,LAMBXM,LAMBXM2,ALAMBXM
REAL* 8 S,SANTE,SESC
C **-----*
```

```
C
COMMON /BLOC01/ CEST,CBOM1,CBOM2,CBOM3
COMMON /BLOC02/ ROTNB,ALTEST,CKREB1,CKREB2
COMMON /BLOC03/ PI,ERR,CNI,ERR2,CKPMEC,RENDM1
COMMON /BLOC04/ RT,RSM,RRM,RF,RAD,PPG,PPH,CKRETR,RL
COMMON /BLOC05/ LSM,LRM,LG,MM,A,CKF,CKG,CKRETM,LL
COMMON /BLOC06/ CKPAM,CKPAG,CKFEM,CKFEG,CKMEM,CKMEG
COMMON /BLOC07/ FLUXM,RENDM,RENDG,COSP,S,IPERM,TENCON
COMMON /BLOC08/ RAO,DENSAR,CPCOE1,CPCOE2,CPCOE3,CPCOE4,CPCOE5,
LAMBXM
COMMON /BLOC10/ TENSAM,CORRM,POTUT,PUTIL,FREQ,PELM,CONJG
```

```
C
C **-----*
RFT = RF + RAD
WS = ROTT*RT*PPG*PI/30
```

```

FREQ = WS/(2.*PI)
WR = WS * S
WM =WS*(1-S)
WMR =WM/PPM
REQ = (RG+RL+RSM)*RRH/S + WS*WS*(MM*MM-(LSM+LL+LG)*LRH)
LEQ = LRM*(RG+RL+RSM) + RRM*(LG+LL+LSM)/S
XEQ = LEQ*WS

```

```

C  **-----**
EG = CKG*WS*(A +(IFD)**(0.3333))
IRO = WS*MM*EG/(SQRT(REQ*REQ + XEQ*XEQ))
EM = IRO*SQRT(RRM*RRM/(S*S) + WS*WS*(LRM-MM)*(LRM-MM))
ISO = IRO*SQRT(RRM*RRM/(S*S) + WS*WS*LRM*LRM)/(WS*MM)
ANG = ATAN2(XEQ,REQ)
ANGR = PI/2. - ANG
XRM = WS*LRM
RRMS = RRM/S
ANG2 = ATAN2(XRM,RRMS)
ANGS = ANGR + ANG2 - PI/2.
ISR = ISO*COS(ANGS)
ISM = ISO*SIN(ANGS)
PELM = 3.*RRM*IRO*IRO
PMECH = CKMEH*(ABS(WMR)**1.3)*SIGN(X,WMR)
PFEM = CKFEM*EM*(ABS(FREQ)**0.5)*SIGN(X,FREQ)
PADM = CKPAM*PELM
PERM1 = PMECH + PFEM + PADM
IPERM = PERM1/(3.0*EM)
IGR = ISR + IPERM + IFO*CKRETR
IGM = ISM - IFO*CKRETH

```

```

C  **-----**
CONJM = (3*RRM*IRO*IRO*(1-S)*PPM)/(S*WS)
XG = WS*LG
ZG = SQRT( RG*RG + XG*XG )
ANGZG = ATAN2(XG,RG)
XL = WS*LL
ZL = SQRT( RL*RL + XL*XL )
ANGZL = ATAN2(XL,RL)
CORRM = SQRT((ISR+IPERM)*(ISR+IPERM) + ISM*ISM)
ANGCM = ATAN2(ISM,(ISR+IPERM))
IGO = SQRT( IGR*IGR + IGM*IGM )
ANGGE = ATAN2(IGM,IGR)
TENSAG = SQRT((EG-ZG*IGO*COS(ANGZG+ANGGE))**2 + (ZG*IGO*SIN(
ANGZG+ANGGE))**2)

```

```

C  **-----**
C  CONTROLE DE ALFA
C  A TENSAD TENSAG E TRANSFORMADA NA RELACAO DE 18.3333 CORRES-
C  PONDENTE A UM TP.
C  **-----**

```

```

C  TENSA2=TENSAG/18.3333
C  TENCON = - 2 * ( 0.076*TENSA2 + 3.136 )
C  XI = (PI/10)*TENCON
C  CKF1=(1.5*1.4142/PI)*(1+COS(XI))
C  **-----**
C

```



```

X = 1.00
ROTHIN = SQRT (ALTEST/CBOM1)
IF(ROTB.LE.ROTHIN) GO TO 50
NI = 0
VAZAO = 30.00
NM = CNI
C
10 AV1 = FBOMBA(ROTB,VAZAO,ALTEST,CBOM1,CBOM2,CBOM3,CEST)
AV2 = FDVBOM(ROTB,VAZAO,CBOM2,CBOM3,CEST)
VAZAO = VAZAO - AV1/AV2
NI = NI + 1
IF(ABS(AV1/AV2).LE.ERR) GO TO 40
IF(NI.GE.NM) GO TO 20
GO TO 10
C
20 WRITE(4,30) ROTB
30 FORMAT(1X,' BOMBA NAO CONVERGIU PARA ROTB = ',F12.6,' RPM')
RETURN
C
40 VAZEQ = VAZAO*ROTNB/ROTB
RENDN = -CKREB1*VAZEQ*VAZEQ + CKREB2*VAZEQ
IF(RENDN.LE.0.000) RENDN = 1.00-02
C
ALTMAN = ALTEST + CEST*VAZAO*VAZAO
POTUT = 736.*ALTMAN*VAZAO/ 270
PERTOT = POTUT/RENDN - POTUT
C
PMEC = 0.1*PERTOT*((ABS(ROTB)/ROTNB)**1.5)*SIGN(X,ROTB)
PINT = 0.9*PERTOT*((ROTNB/ABS(ROTB))**0.1)*SIGN(X,ROTB)
PTEIXO = POTUT + PMEC + PINT
RENDB = POTUT/PTEIXO
WBOM = ROTB*PI/30.
CONJB = PTEIXO/WBOM
C
RETURN
C
50 VAZAO = 0.000
ALTMAN = ALTEST
PTEIXO = CKPMEC*(ABS(ROTB)**2.0)*SIGN(X,ROTB)
RENDB = 0.000
WBOM = ROTB*PI/30.
CONJB = PTEIXO/WBOM
C
RETURN
END
C
**-----*
C
**-- A SUBROTINA "WINTERTUR" CALCULA A POTENCIA EXTRAIDA DO --*
C
**-- VENTO POR UMA TURBINA EOLICA. --*
C
**-----*
C
**-- POLINOMIO DE POWER -- N = 2 -----*
C
SUBROUTINE WINDTUR(VENTO,ROTT,LAMBDA,CP,PEXTR,CONJT)
C
**-----*
REAL IFO,IRO,ISO,ISR,ISM,IGO,IGR,IGM,IPERM
REAL LSM,LRM,MM,LG,LEQ,LL
REAL LAMBDA,LAMBX,LAMBMIN,LAMBMAX,ALAMB

```


REAL* 8 S, SANTE, SESC

```
C  **-----**
COMMON /BLOC01/ CEST, CBOM1, CBOM2, CBOM3
COMMON /BLOC02/ ROTNB, ALTEST, CKREB1, CKREB2
COMMON /BLOC03/ PI, ERR, CNI, ERR2, CKPMEC, RENDB1
COMMON /BLOC04/ RT, RSH, RRM, RF, RAD, PPG, PPM, CKRETR, RL
COMMON /BLOC05/ LSH, LRH, LG, MH, A, CKF, CKG, CKRETH, LL
COMMON /BLOC06/ CKPAM, CKPAG, CKFEM, CKFEG, CKHEM, CKHEG
COMMON /BLOC07/ FLUXH, RENDM, RENDG, COSP, S, IPERH, TENCON
COMMON /BLOC08/ RAID, DENSAR, CPCOE1, CPCOE2, CPCOE3, CPCOE4, CPCOE5,
LAMBX
COMMON /BLOC10/ TENSAR, CORRH, POTUT, PUTIL, FREQ, PELH, CONJG
```

```
C  **-----**
C  FUNCP(X1, A1, A2, A3, A4, A5) = X1*(A1+A2*SQRT(X1)+X1*(A3+A4*SQRT(X1
)+A5*X1))
```

```
C  **-----**
WT = ROTT*PI/30.
LAMBDA = LAMBX
CP = FUNCP(LAMBDA, CPCOE1, CPCOE2, CPCOE3, CPCOE4, CPCOE5)
CQ = CP/LAMBDA
IF(CP.LT.0.0D0) CP = 0.0D0
AREA = PI*RAID*RAID
PEXTR = 0.5*DENSAR*AREA*VENTO*VENTO*VENTO*CP
CONJT = (PEXTR/WT)
RETURN
END
```

```
C  **-----**
```