

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

Este exemplar corresponde à rejeição final da tese
defendida por Antonio Tadeu Lyrio de
Almeida perante a Comissão
Julgadora em 03 11 93.

Orientador Ruppert

UMA CONTRIBUIÇÃO À CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E À MANUTENÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE ROTOR EM GAIOLA

ANTONIO TADEU LYRIO DE ALMEIDA

Orientador: Prof.Dr. ERNESTO RUPPERT FILHO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA

ELÉTRICA

NOVEMBRO 1993

931193

RESUMO

A tese apresenta dois métodos para avaliação rápida e confiável do desempenho de motores de indução trifásicos de rotor em gaiola com vistas à aplicação em conservação de energia elétrica e em manutenção.

O primeiro método baseia-se em ensaios executados em máquina em rotor livre e com rotor travado.

O segundo método baseia-se no tratamento dos valores de grandezas características do motor a partir de dados de catálogos de fabricantes.

Ambos são métodos onde os parâmetros do circuito equivalente em T são identificados a partir de um processo de otimização estatística dentro de toda a faixa de operação do motor, incluindo a partida .

O desempenho de ambos os métodos foi avaliado em ensaios executados em 40 motores utilizando o método B da norma IEEE-112 e, em 54 motores, utilizando a norma IEC-34-2, após o adequado tratamento numérico.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof.Dr. Ernesto Ruppert Filho pela paciência demonstrada e pelo trabalho de orientação ao longo de todo o doutorado;

Ao Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu pela sua amizade desprendida de sempre, dedicação, lealdade no plano pessoal e em toda a minha trajetória profissional e por, talvez, ter sido o único que sempre acreditou;

Ao muito saudoso José Augusto Lamóglia que, com sua persistência, colaborou de forma decisiva neste trabalho, embora não tenha visto o seu próprio terminado;

Ao Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá por ter sido uma fonte de referência e incentivo em minha carreira, apesar de nossas incontáveis divergências profissionais nos últimos anos;

Aos companheiros Luiz Octávio Mattos Reis (Pará), Antônio José do Couto Pitta, Roberto Devienne Filho e José Eugênio Pereira Ribeiro que, mais do que alunos e orientados, tornaram-se grandes amigos e incentivadores, propiciando apoio em momentos difíceis;

À srta. Lucimara Aparecida Mendes dos Reis que, pacientemente, digitou a primeira versão da tese, até com um certo sacrifício pessoal;

À srta. Ilze Maria Souza Mota que, com muita paciência e dedicação, auxiliou em minhas funções de Coordenador Geral dos Laboratórios do Departamento de Eletrotécnica da EFEI durante os diversos meses em que elaborava a tese, permitindo aumentar o tempo disponível a ser dedicado a esta atividade e incentivando terminá-la;

Às várias pessoas que, de uma forma ou outra, colaboraram para a realização deste trabalho; e,

À Ana Maria, Júnior, Ana Carolina, Camila e Ana Paula por suportarem os momentos de mau humor, solidão, depressão e afastamento durante todo o curso de doutorado, principalmente, quando da elaboração da tese.

Este trabalho é dedicado a você,
que me mostrou um lado da vida já
esquecido e que a felicidade está
nas coisas simples, embora nem
sempre seja possível alcançá-la
como se deseja.

Na primeira noite
Eles se aproximam
E colhem uma flor
De nosso jardim
E não dizemos NADA

Na segunda noite
Já não se escondem :
Pisam nas flores
Matam nosso cão
E não dizemos NADA

Até que um dia
O mais frágil deles
Entra sôzinha em nossa casa,
Rouba-nos a lua e,
Arranca-nos a voz da garganta
E porque não dissemos NADA
Já não podemos dizer mais NADA

MAIAKOWSKY

NOTAÇÃO UTILIZADA

- $\cos\varphi_n$ - fator de potência nas condições nominais;
- $\cos\varphi_{1r1}$ - fator de potência para o rotor livre.
- $\cos\varphi_{75}$ - fator de potência para 75% da plena carga aplicada ao eixo do motor;
- $\cos\varphi_{50}$ - fator de potência para 50% da plena carga aplicada ao eixo do motor;
- E_2 - tensão induzida no enrolamento do rotor, variável com o escorregamento (V);
- I_0 - corrente do enrolamento do estator com rotor livre (A);
- I_1 - corrente do enrolamento do estator para uma condição qualquer (A);
- I_2 - corrente do enrolamento do rotor para uma condição qualquer (A);
- I_{2n} - corrente do enrolamento do rotor nas condições nominais (A);
- I_m - corrente de magnetização, variável com o escorregamento (A);
- I_n - corrente do enrolamento do estator nas condições nominais (A);
- I_p - corrente de partida (A);
- J - momento de inércia do motor (kgm^2);
- M - conjugado motor (N.m);
- M_{ac} - conjugado acelerador (N.m);
- M_k - conjugado máximo (N.m);
- M_n - conjugado nominal (N.m);
- M_p - conjugado de partida (N.m);
- n_s - velocidade síncrona (rpm);
- n_n - velocidade nominal (rpm);
- n - velocidade correspondente à carga do motor (rpm);
- P - potência disponível no eixo (W);
- P_n - potência nominal (W);
- P_{el} - potência elétrica absorvida (W);

- P_{av} - perda por atrito e ventilação (W);
- P_g - potência eletromagnética, disponível no entreferro;
- R_1 - resistência do enrolamento do estator/fase (Ω);
- R_2 - resistência do enrolamento do rotor, variável com o escorregamento devido ao Efeito Pelicular, valor referido ao estator/fase (Ω);
- R_m - resistência que representa as perdas no ferro/fase (Ω);
- s_k - escorregamento correspondente ao conjugado máximo " M_k ";
- s - escorregamento do rotor;
- s_{rl} - escorregamento correspondente à situação de rotor livre;
- U - tensão de fase aplicada ao motor (V);
- U_n - tensão nominal (V)
- X_1 - reatância de dispersão do enrolamento do estator/fase, variável com o escorregamento devido à saturação (Ω);
- X_2 - reatância de dispersão do enrolamento do rotor, variável com o escorregamento devido ao Efeito Pelicular e à saturação, valor referido ao estator/fase (Ω);
- X_m - reatância de magnetização (Ω).
- η_n - rendimento nominal
- η_{75} - rendimento para 75% da plena carga aplicada ao eixo do motor;
- η_{50} - rendimento para 50% da plena carga aplicada ao eixo do motor;

Os sub-índices "rl" e "rb" referem-se às grandezas com rotor livre e com rotor bloqueado, respectivamente.

SUMÁRIO

I	- CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
II	- AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	4
II.1	- INTRODUÇÃO	4
II.2	- NORMAS TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	7
II.2.1	- Ensaio usuais	7
II.2.2	- Determinação das características de desempenho	8
II.2.3	- Determinação da curva conjugado x velocidade - $M = f(n)$	12
II.2.4	- Ensaio com rotor bloqueado	14
II.2.5	- Ensaio com rotor livre	15
II.2.6	- Ensaio de aquecimento	16
II.3	- METODOLOGIAS NÃO-NORMALIZADAS	17
II.3.1	- Avaliação do carregamento	18
II.3.1.1	- Fórmula de Klöss	18
II.3.1.2	- Linearização da curva $M = f(n)$	18
II.3.1.3	- Metodologia desenvolvida por Sá	19
II.3.1.4	- Metodologia desenvolvida por Juri	19
II.3.1.5	- Metodologia desenvolvida por Avólio	19
II.3.1.6	- Diagrama circular	20
II.3.1.7	- IEEE - F3 modificado	20
II.3.1.8	- Outras metodologias	20
II.3.2	- Avaliação da corrente	22
II.3.2.1	- Métodos que utilizam o circuito equivalente	22
II.3.2.2	- Linearização da curva $I_1 = f(n)$	22
II.3.2.3	- Metodologia desenvolvida por Almeida	22
II.3.3	- Avaliação do rendimento	23

II.3.3.1 - Métodos que utilizam o circuito equi-	23
valente	
II.3.3.2 - Metodologia desenvolvida por Almeida	23
II.3.3.3 - Diagrama circular	24
II.3.3.4 - Linearização da curva $I_1 = f(n)$	24
II.3.4 - Avaliação do aquecimento	24
II.4 - AJUSTES ESTATÍSTICOS PARA RESULTADOS DE ENSAIOS	25
II.4.1 - Necessidade de ajuste	25
II.4.2 - Modelos estatísticos utilizados	27
II.4.2.1 - Curva do conjugado em função da velo-	
cidade $M = f(n)$	27
II.4.2.2 - Curva de corrente em função da velo-	
cidade $I_1 = f(n)$	28
II.4.2.3 - Curva de potência elétrica em função	
da velocidade $P_{el} = f(n)$	29
II.4.2.4 - Características provenientes do	
ensaio com rotor livre	29
II.4.2.5 - Modelos estatísticos obtidos	31
II.5 - MODELOS ESTATÍSTICOS E METODOLOGIAS NÃO-NORMALIZADAS	39
II.6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
III - OBTENÇÃO DE PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS A PARTIR DOS ENSAIOS	
COM ROTOR LIVRE E BLOQUEADO	47
III.1 - INTRODUÇÃO	47
III.2 - ESTRUTURA BÁSICA DO MÉTODO	48
III.3 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS COM ROTOR LIVRE	51
III.3.1 - Equacionamento para a estimativa inicial	51
III.3.2 - Estimativa inicial	53
III.3.3 - Refinamento dos parâmetros	55
III.4 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS COM ROTOR BLOQUEADO	56
III.5 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA PONTOS BÁSICOS INTERME-	
DIÁRIOS ENTRE O ROTOR LIVRE E BLOQUEADO	56
III.5.1 - Equacionamento para a estimativa	57

III.5.2 - Procedimentos para a estimativa	58
III.6 - ALGORÍTMO	60
III.7 - OBTENÇÃO DE DADOS A PARTIR DOS ENSAIOS COM ROTOR LIVRE E BLOQUEADO	62
IV - OBTENÇÃO DE PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS A PARTIR DE DADOS DE CATÁLOGOS DE FABRICANTES	64
IV.1 - INTRODUÇÃO	64
IV.2 - ESTRUTURA BÁSICA DO MÉTODO	65
IV.3 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA AS CONDIÇÕES NOMINAIS	66
IV.3.1 - Equacionamento para a estimativa inicial	66
IV.3.2 - Estimativa inicial	68
IV.3.3 - Refinamento dos parâmetros	71
IV.4 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA AS CONDIÇÕES DE PARTIDA	71
IV.4.1 - Equacionamento para a estimativa inicial	71
IV.4.2 - Estimativa inicial	73
IV.4.3 - Refinamento dos parâmetros	74
IV.5 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA AS CONDIÇÕES DE CONJUGADO MÁXIMO	74
IV.5.1 - Equacionamento para a estimativa inicial	74
IV.5.2 - Procedimentos para a estimativa	75
IV.6 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA PONTOS BÁSICOS INTERME- DIÁRIOS ENTRE A PARTIDA E AS CONDIÇÕES NOMINAIS	75
IV.6.1 - Equacionamento para a estimativa	76
IV.6.2 - Procedimentos para a estimativa	77
IV.7 - ALGORÍTMO	79
V - VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS	81
V.1 - INTRODUÇÃO	81
V.2 - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA QUE UTILIZA DADOS DOS ENSAIOS COM ROTOR LIVRE E ROTOR BLOQUEADO	82
V.2.1 - Exemplo de aplicação	82

V.2.2 - Resultados gerais	86
V.3 - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA QUE UTILIZA DADOS DE CATÁLOGOS	88
V.3.1 - Exemplo de aplicação	88
V.3.2 - Resultados gerais	94
VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	97
ANEXO I: DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE	99
ANEXO II: ENSAIOS EXECUTADOS EM MOTORES ESPECÍFICOS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

C A P Í T U L O I

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A adoção de uma política tarifária não realista e a de construção de grandes barragens nas três últimas décadas, tornou a energia elétrica um insumo cujo peso é pouco significativo na planilha de composição de custos da maioria das indústrias.

A inexistência de recursos internos e a crescente dificuldade na captação dos externos, os quais possibilitem manter o modelo implantado, aliado à elevação do consumo de energia elétrica, que tem ocorrido mesmo em épocas de queda acentuada nas atividades econômicas, levam à perspectiva de épocas com escassez de energia e ao crescimento acelerado de seu preço.

Sendo assim, o planejamento otimizado e a adequação do emprego dos recursos existentes como a melhoria da eficiência dos processos e de utilização das cargas em geral, bem como a preocupação com a economia do investimento na geração, entre outras ações, tornam-se fundamentais. A postura de conservação de energia e a geração descentralizada tendem a serem incentivadas, não só como tentativas de atenuar o risco de déficits nos próximos anos, mas também para reverter o quadro de baixa competitividade dos produtos nacionais. Em outras palavras, a utilização racional da energia está ligada diretamente à produtividade e à modernização do parque industrial.

Deve-se ressaltar que, apesar de particularizada para o país, tais questões possuem um caráter mundial.

Muita atenção tem sido e deve ser dedicada aos motores de indução trifásicos pois constituem a carga mais significativa dos processos industriais. Além disto, a grande maioria dos motores podem ser considerados como inadequados para as cargas que acionam, principalmente quando aplicados à movimentação de fluidos que constituem a mai-

or aplicação de motores. O termo "motor sobredimensionado" vem sendo cada vez mais mencionado . Devido à frequente utilização dos motores com a alimentação por conversores estáticos acionando cargas em ciclo intermitente de trabalho não é mais a potência que deve ser observada na avaliação da operação de um motor mas o binômio "temperatura-rendimento" do mesmo.

Muitos procedimentos têm sido empregados para a determinação de tais características, os quais se agrupam em dois níveis básicos, a saber: os executados em laboratório e os no próprio ambiente de trabalho do motor.

Os ensaios em laboratório baseiam-se em várias normas e empregam equipamentos dificilmente disponíveis e/ou transportáveis para a utilização em campo. Procura-se obter as chamadas "características de tipo" que, a princípio, são consideradas idênticas para as várias unidades fabricadas com um mesmo projeto, apesar de poder ocorrer diversidade na qualidade dos materiais empregados e na mão de obra.

A avaliação do desempenho dos motores em seu local de trabalho tem sido objeto de repetidos estudos resultando em várias metodologias e formulações mais adequadas à realidade prática.

Em ambas as situações, verifica-se que existem incertezas nas metodologias empregadas, tanto para ensaios quanto para medições e extrapolações. A literatura é farta quanto à exemplificação destes aspectos, principalmente na obtenção do rendimento dos motores.

Neste sentido, surgem dúvidas sobre a conveniência e viabilidade técnico-econômica, considerando-se o ponto de vista do usuário, de se substituir um acionamento já existente, pois, mesmo empregando os métodos consagrados nas diversas e conceituadas normas internacionais, resultam questões preocupantes, ou seja: qual é o valor correto do rendimento? Quais resultados devem ser adotados para avaliar técnica e economicamente a viabilidade de substituição de um motor? Há viabilidade prática nas metodologias normalizadas?

As mesmas observações são aplicáveis a motores danificados, acrescentando-se uma outra questão: deve-se recuperá-los ou substituí-los por novos?

Desta maneira, também as atividades de manutenção assumem

grande importância já que se deve inspecionar, verificar indisponibilidades e causas de ocorrências visando evitar o seu agravamento ou repetição e acompanhar o desempenho dos motores durante suas vidas úteis, entre outros fatores.

Sendo assim, o conceito atual de manutenção envolve não apenas os tipos clássicos (corretiva, preventiva e preditiva), mas também, o comissionamento, a inspeção e a avaliação das características operacionais dos motores visando conservar energia.

Em função do exposto, o propósito deste trabalho é o de verificar a aplicabilidade e exatidão das técnicas existentes para a determinação das características de desempenho de motores de indução trifásicos do tipo gaiola empregadas, especificamente, em atividades de conservação de energia e manutenção preventiva. Adicionalmente, propõe-se novas metodologias alternativas que fornecem subsídios, inclusive, para uma modernização de testes e ensaios.

As metodologias já existentes são analisadas no Capítulo II através de um estudo comparativo entre elas envolvendo 94 resultados de avaliações de motores com potências entre 3 e 2250 c.v., ensaiados por diferentes normas internacionais [1-5]. As estatísticas dos resultados são apresentadas conforme a faixa de potência dos citados motores.

Em função das várias restrições e incertezas resultantes da aplicação destes procedimentos, nos Capítulos III e IV desenvolve-se as metodologias alternativas citadas. A modelagem proposta determina os parâmetros do circuito equivalente em "T" para cada ponto operacional do motor, porém o seu equacionamento não permite uma solução analítica (isto é, de forma determinística), pois o número de incógnitas é superior ao de expressões (no caso, haverá dois graus de liberdade). De forma a contornar tal inconveniente elaborou-se um tratamento estatístico, gerando-se valores pseudo-aleatórios de grandezas adotadas como básicas. Os dados básicos são os resultados provenientes dos ensaios com rotor livre e com rotor bloqueado ou os constantes em catálogos de fabricante nacionais. As suas validades são verificadas no Capítulo V através de um amplo programa de testes.

C A P Í T U L O II

AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO EM OPERAÇÃO

RESUMO

A obtenção das características de desempenho dos motores em operação são fundamentais para os estudos de viabilidade econômica de substituição de motores. De forma a verificar a sensibilidade, aplicabilidade e exatidão de vários procedimentos para o levantamento de tais características em campo e em laboratório, este capítulo apresenta um estudo comparativo entre eles através de 94 resultados de avaliações de motores com potências entre 3 e 2250 c.v., ensaiados por diferentes normas internacionais. Apresenta-se análises estatísticas dos resultados conforme a faixa de potência dos citados motores.

II.1 - INTRODUÇÃO

As características de desempenho de um motor de indução são descritas por um conjunto de grandezas eletromecânicas e térmicas, as quais definem o comportamento operacional do motor sob determinadas condições. Sendo assim, ele apresenta valores definidos de rendimento, fator de potência, corrente absorvida, velocidade, conjugado desenvolvido, perdas e elevações de temperatura em função da potência exigida pela carga em um dado instante e das condições da rede elétrica de alimentação.

A especificação inadequada e a substituição de um motor por outro de potência maior, quando da ocorrência de um problema qualquer,

fazem com que motores sobredimensionados sejam utilizados frequentemente e em até grandes quantidades nos processos industriais.

Os motores sobredimensionados operam com rendimento e fator de potência menores do que os que apresentariam à potência nominal, tornando-se ineficientes do ponto de vista de conservação de energia e, portanto, candidatos a serem substituídos.

Devido à grande quantidade de motores presentes nas atividades industriais surgem, com frequência, unidades danificadas.

Após a avaliação da extensão dos eventuais danos, são possíveis cinco opções, a saber: a) Comprar um novo motor com alto rendimento; b) Comprar um novo motor padronizado; c) Reformar o motor para apresentar seu rendimento original; d) Reformar o motor para apresentar um rendimento maior que o original; e) Reenrolar o estator ao menor custo possível e colocá-lo em serviço rapidamente.

Observe-se que a filosofia vigente em muitas instalações é a de considerar os motores de pequeno porte como descartáveis, enquanto que os de maior são passíveis de reparos. Em pequenas indústrias prefere-se os reparos.

A realidade prática mostra que existem muitas dúvidas sobre a validade de substituir, ou não, motores elétricos que estejam danificados ou sobredimensionados.

Neste ponto, verifica-se que as atividades de conservação de energia e de manutenção em relação a motores convergem para um mesmo objetivo.

As grandezas básicas utilizadas para avaliar a necessidade de substituição de motores são o rendimento, o fator de potência e a potência no eixo do motor, em consequência, as perdas, que devem ser determinadas através de testes ou ensaios.

Tanto do ponto de vista da conservação de energia como de manutenção preventiva ou corretiva, deve-se selecionar entre as várias alternativas, uma gama de medições tecnicamente adequadas e associar confiabilidade e custo com um programa de atividades compatíveis.

Observa-se que, nem sempre, medições sofisticadas propiciam resultados mais eficazes que os obtidos com testes rotineiros, porém,

seus custos, tempo dispendido e trabalho para implementação são sempre maiores. A relação custo/benefício, nesta situação, pode ser alta e, além disto, tais medições não podem ser muito complexas, para evitar que os seus resultados sejam de difícil compreensão e análise.

Para cada uma destas condições, as atividades selecionadas podem ser divididas em três tipos, a saber: a) Monitoramento contínuo; b) Medições periódicas; c) Técnicas preditivas.

Os resultados obtidos dessas atividades, caso sejam determinadas condições insatisfatórias, devem ser cuidadosamente analisados para verificar em qual instante a manutenção corretiva deve ser aplicada ou, ainda, se é conveniente a substituição de um dado motor. Pelo exposto, há necessidade de se determinar as características de desempenho de cada motor em uma instalação.

Muitos procedimentos tem sido empregados para tanto, os quais se agrupam em dois tipos básicos: os executados em laboratório e os executados no próprio ambiente de trabalho.

Os ensaios em laboratório baseiam-se em várias normas [1, 2, 3, 4, 5] e empregam equipamentos dificilmente disponíveis ou transportáveis para o campo. Assim, o que se obtém em laboratório são, em geral, as chamadas "características de tipo", que a princípio, são consideradas idênticas para as diversas unidades fabricadas baseadas em um mesmo projeto, apesar de haver diversidade na qualidade dos materiais empregados, na mão de obra e na imprecisão de dispositivos utilizados na fabricação.

A avaliação "in loco" dos motores tem sido objeto de repetidos estudos [6, 7, 8, 9] resultando em várias metodologias e formulações. A ênfase se justifica pela necessidade de se averiguar as situações operacionais reais do conjunto motor-carga, com ferramental acessível ao pessoal de serviço em geral, de manutenção e, mesmo, de oficinas elétricas, evitando-se utilizar qualquer processo baseado nas características de tipo, que podem levar a conclusões incorretas.

Verifica-se, porém, que existem incertezas nas metodologias empregadas, tanto para ensaios quanto para medições e extrapolações. A literatura é farta em exemplificar estes aspectos, principalmente em

relação à obtenção do rendimento dos motores. Um mesmo motor ensaiado por normas distintas apresenta valores de rendimento diferentes entre si [10, 11, 12, 13].

Em função do exposto e, visando a diminuição da taxa de incerteza na utilização de dados e de ensaios, efetua-se a seguir uma análise crítica dos erros e dificuldades inerentes aos vários métodos normalizados e expeditos.

II.2 - NORMAS TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

II.2.1. - Ensaios usuais

Os ensaios em motores tem sido, historicamente, objeto de muitas controvérsias. Muitos usuários exigem um programa completo de ensaios com respectivas análises, outros nem ao menos os documentam.

A possibilidade do motor desempenhar uma determinada função se relaciona com sua história e com as condições atuais. De fato, qualquer programa de manutenção preventiva, deve se basear no histórico do equipamento e em comparações de seu desempenho esperado com a situação atual, sob pena de se tornarem inócuas quaisquer avaliações.

Neste contexto, verifica-se que as atitudes de substituição de um motor deve, necessariamente, basear-se em tais informações de forma a evitar enganos. O mesmo é válido para um motor reformado, que, se torna um equipamento crítico, pois as oficinas elétricas e muitas equipes de manutenção não possuem equipamentos adequados para a execução dos ensaios, bem como, é muito comum não disporem de documentação técnica dos mesmos.

A qualidade de um motor pode ser aferida por um conjunto de ensaios disponíveis nas várias normas [1-5]. Os de maior interesse são: a) Ensaio para a determinação das características de desempenho; b) Ensaio para a determinação da curva conjugado em função da velocidade; c) Ensaio com rotor bloqueado; d) Ensaio com rotor livre; e) Ensaio de aquecimento; f) Ensaio de surto de tensão; g) Ensaio de medição de resistência do isolamento; h) Ensaio de tensão aplicada; i) En-

saio de impulso; j) Ensaio para medição de descargas parciais l) Ensaio de vibrações; m) Ensaio para a medição de temperatura dos mancais; n) Ensaio para a determinação do nível de ruído; o) Ensaio para identificação de barras quebradas no rotor.

Apesar da importância de todos os ensaios, este trabalho analisa apenas os relacionados de "a" até "e" pois são os mais controversos, apresentam metodologias alternativas às normalizadas e influenciam diretamente na verificação sobre a viabilidade de substituição de motores quanto ao aspecto de conservação de energia.

II.2.2 - Determinação das características de desempenho

São consideradas como características de desempenho do motor as relações entre si e com o tempo de tensão, corrente, potência absorvida junto ao alimentador, conjugado, velocidade, potência no eixo, fator de potência e rendimento, para quaisquer condições de carga.

Os benefícios de determiná-las são, em geral: a) Confirmar as características de projeto, bem como, o comportamento das perdas; b) Avaliar se os dados garantidos pelo fabricante estão corretos, especialmente, o rendimento e o comportamento da corrente em função da carga a uma tensão específica; c) Verificar que os dispositivos de comando e proteção estão adequados para o motor específico; d) Identificar o ponto de operação mais econômico; e) Confirmar se uma unidade reparada ainda mantém as características originais ou avaliar as mudanças ocorridas; f) Avaliar a propriedade de aplicação do motor para as condições operacionais da carga.

Assim, em resumo, o conhecimento dessas características é interessante pois permite determinar o comportamento em operação de um motor novo ou reformado. Além disto, os resultados permitem definir uma máquina de características desconhecidas (caso de uma reformada ou sem dados) para avaliar uma possível necessidade de substituição por outra de concepção mais moderna e eficiente.

As principais normas aceitas internacionalmente, quanto a ensaios de rendimento dos motores de indução (as demais grandezas são obtidas durante a sua realização), são a IEEE std 112 [1], IEC Pub 34-2 [2], NEMA std MG 1 [3], JEC std 37 [4] e NBR 5383 [5] que se baseia,

em grande parte, na IEEE std 112.

A IEEE std 112 apresenta duas categorias de ensaios, os com medição direta e os com medição indireta das perdas (adição das perdas). Na primeira categoria encontram-se os métodos A, B, e C, ou seja:

a) Método A: Freio

Exige o acoplamento do motor a um freio (gerador de corrente contínua), o qual deve ter suas perdas conhecidas para cada ponto de operação, ou seja, deve ser "calibrado". Executando-se a leitura das grandezas elétricas de saída do gerador e descontando-se as suas perdas, previamente conhecidas, determina-se a potência e a velocidade e, portanto, o conjugado no eixo. Com a leitura da potência elétrica absorvida pelo motor, calcula-se o rendimento e demais grandezas para várias cargas, se desejado;

b) Método B: Dinamômetro

Neste caso, o freio possui a carcaça livre e um braço. Ao se aplicar carga, a carcaça se movimenta e é possível medir-se a força magnética exercida, através de um dinamômetro ou célula de carga, inseridas na ponta do braço. A multiplicação desta leitura pela distância do ponto de aplicação ao centro do eixo, fornece o conjugado desenvolvido para aquela situação. Medindo-se a velocidade e a potência absorvida pelo motor junto à rede, calcula-se o rendimento e as demais grandezas;

Ainda é possível utilizar-se de transdutores de conjugado, inseridos entre o motor e o dinamômetro que permitem a leitura direta do conjugado, velocidade e potência no eixo do conjunto.

c) Método C: Oposição

Exige duas máquinas iguais, mecanicamente acopladas e eletricamente conectadas à fontes de energia, onde uma delas deverá ter frequência ajustável (é conhecido também por "back-to-back").

Na segunda categoria, tem-se:

a) Método E: Adição das Perdas

Verifica-se a potência elétrica da entrada e subtrai-se as

perdas medidas em ensaios separados, obtendo-se a potência no eixo;

b) Método F: Circuito equivalente

O desempenho do motor é obtido através do circuito equivalente. Entretanto, a natureza não linear do motor exige muito cuidado na execução do ensaio. A frequência das tensões do alimentador deve ser inferior à nominal, necessitando de fontes especiais para a sua realização.

Os métodos da IEC-34-2 são, basicamente, os já citados; entretanto, o preferido é o de adição das perdas (método E da IEEE-112), diferenciando-se deste último na maneira de correção das mesmas com a temperatura e na avaliação das perdas adicionais. Os métodos da JEC-37 são semelhantes ao de IEEE-112, não sendo aplicável o método C. O método preferido pela norma é o do diagrama circular, exigindo-se ensaios com frequências das tensões do alimentador inferiores à nominal do motor. A NEMA adota como procedimento normalizado, o método B da IEEE-112, incluindo um tratamento específico das perdas adicionais.

A determinação do rendimento de uma máquina elétrica não é um processo preciso. Todos os métodos são falhos e apresentam divergências nos resultados. A figura 2.1 mostra um exemplo das diferenças que existem nos valores de rendimento quando se ensaia um mesmo motor utilizando-se procedimentos diferentes [10].

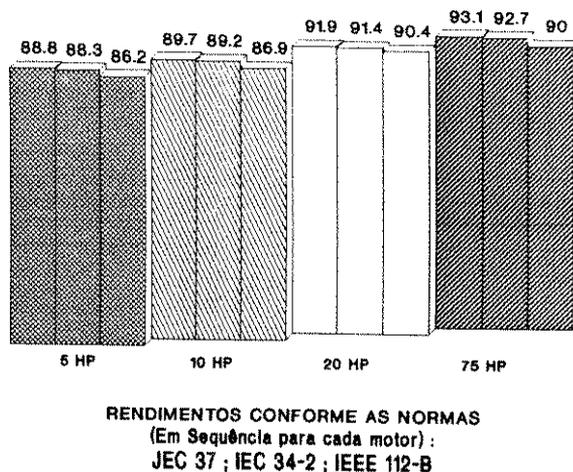


Figura 2.1 - Rendimentos obtidos utilizando-se os procedimentos de diferentes normas [10].

As discrepâncias nos resultados se devem às perdas adicionais [10] e, baseando-se neste pressuposto, a NEMA conduziu ensaios com fabricantes utilizando-se do método B do IEEE, com e sem tratamento das perdas adicionais obtendo-se os resultados mostrados na tabela 2.1.

POT. (HP)	Sem Tratamento		Com Tratamento	
	η médio%	Desvio	η médio%	Desvio
5	86,3	2,0	87,1	0,7
25	89,6	1,3	89,5	0,8
100	92,7	1,3	91,9	0,9

TABELA 2.1 - Variação no rendimento de motores [10].

No caso de motores elétricos [10], a variação das perdas para a população de motores de um dado projeto é aquela na qual 97,7% dos motores possuam um rendimento acima do rendimento mínimo definido pela variação das perdas do motor de $\pm 20\%$ das perdas correspondentes ao rendimento nominal ou médio; naturalmente, isto se deve ao fato de que os motores, assim como qualquer outro produto, estão sujeitos à variações no material, processos de fabricação e ensaios, o que causa alteração no rendimento de um motor para outro, embora com mesmo projeto.

Conseqüentemente, a NEMA adotou em sua norma MG 1 - 12.53 b, a recomendação de que motores de indução polifásicos sejam especificados com o rendimento nominal NEMA (ou NEMA NOMEFF) quando testados de acordo com a IEEE-112, método do dinamômetro, com tratamento das perdas adicionais. Além disto, um valor mínimo de rendimento foi desenvolvido para cada valor de rendimento nominal. Portanto, a NEMA admite uma faixa de valores de rendimento para um dado motor, baseada em distribuição estatística, resultando em diferenças de até 4,5 pontos percentuais.

Em relação à JEC-37, propõe-se [14] alterações em alguns de seus procedimentos, visando obter uma maior precisão nas características calculadas.

Observe-se que, mesmo em ensaios que utilizem o dinamômetro

(IEEE-112, método B) há diversas fontes de imprecisões, tais como as dos instrumentos, as do dinamômetro e as de calibração dos instrumentos e do dinamômetro.

A figura 2.2 ilustra a montagem geral para este ensaio.

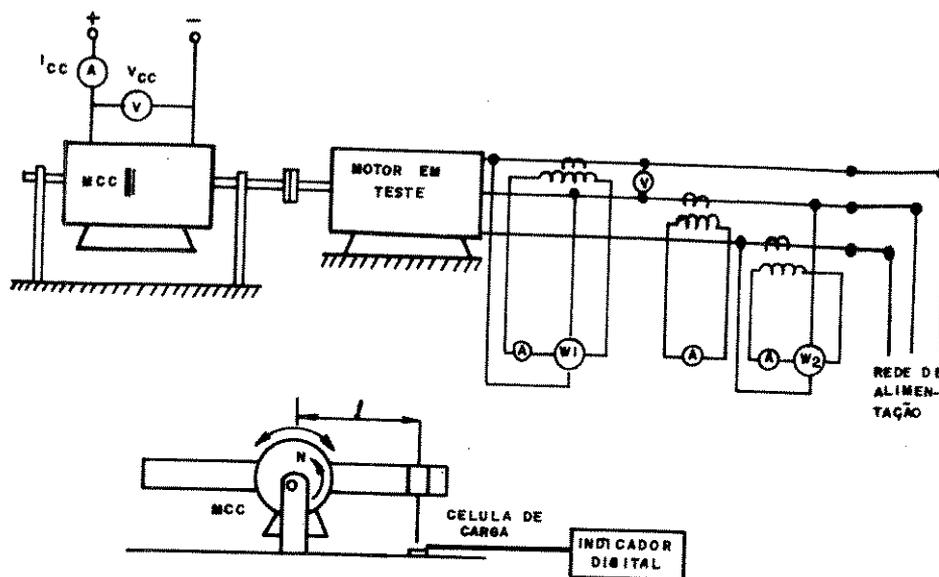


Figura 2.2 - Determinação das características de desempenho através do dinamômetro (método B - IEEE-112)

II.2.3 - Determinação da curva conjugado x velocidade - $M = f(n)$

A obtenção da característica $M = f(n)$ é de grande interesse prático, pois permite: a) Confirmar as grandezas esperadas quando do projeto, tais como, conjugados máximo, de partida e mínimo; b) Verificar se o motor poderá acionar uma determinada carga e determinar o tempo de aceleração, fornecendo subsídios para a sua proteção adequada; c) Identificar a presença de depressões de conjugado ou anormalidades tais como um nível de conjugado extremamente baixo. Em especial, esta avaliação torna-se bastante importante nos casos de reenrolamento do estator com mudança do passo de bobina ou para alteração da velocidade básica.

Desta forma, este ensaio identifica problemas em potencial

com a disposição dos enrolamentos nas ranhuras, tanto para novos motores quanto para reformados.

A IEEE-112 [1] estabelece quatro métodos para a determinação da citada característica, a saber: medição direta, indireta, com separação das perdas e aceleração.

Os três primeiros métodos são aplicações dos métodos A e B e é impossível verificar-se oscilações no conjugado, descaracterizando algumas vantagens da realização do ensaio.

Para se obter toda a característica, desde a velocidade nula até a síncrona, é necessário empregar-se o método da aceleração.

A filosofia básica deste procedimento é considerar-se que a partida é feita com eixo livre, ou seja, o conjugado motor é igual ao acelerador (considera-se nulos os conjugados de atrito e ventilação). Assim:

$$M \cong M_{ac} = \frac{2\pi}{60} J \frac{dn}{dt} \quad (2.1)$$

onde:

M , M_{ac} - conjugados motor e acelerador, respectivamente (N.m); J - momento de inércia do motor (kgm^2); $\frac{dn}{dt}$ - aceleração (rpm/s).

Assim, dispondo-se do comportamento da velocidade durante toda a partida calcula-se dn/dt em cada ponto, obtem-se o conjugado a menos de uma constante. É necessário ajustar a curva, ou seja, deve-se determinar o conjugado em um ponto específico por outro método para deslocar a curva obtida acima convenientemente.

Embora seja possível efetuar-se o ensaio empregando-se instrumentos indicadores, o grau de dificuldade é grande; desta forma, é conveniente o uso de equipamentos registradores rápidos, acelerômetros, que já calculam dn/dt [15], ou sistemas de aquisição de dados.

Um dos problemas que se apresenta com este tipo de equipamento é o fato do tacogerador apresentar ruído, bem como, a existência de campos harmônicos que produzem conjugados que podem prejudicar os re-

sultados. Para atenuar tais ruídos é necessário utilizar filtros passa-baixa analógicos. Como se sabe, tais filtros empregam capacitores que definirão a frequência de corte; entretanto, a velocidade varia durante a aceleração. A capacitância deveria se alterar de forma contínua tornando a construção do filtro impossível. Emprega-se, na prática, uma variação discreta que resulta em oscilações na resposta.

Para evitar tal problema é possível digitalizar os sinais do taco-gerador e diferenciá-lo através de "software" dedicado [16] Os seus principais aspectos são a aplicação de cinco filtros digitais distintos e um novo processo de diferenciação numérica para eliminarem-se ruídos e suavizar a curva de resposta.

II.2.4 - Ensaaios com rotor bloqueado

O ensaio com rotor bloqueado fornece as características de partida do motor e é, particularmente, interessante para: a) Confirmação das características de projeto, especialmente aquelas associadas com a partida, tais como corrente, fator de potência e conjugado; b) Verificação de que os dispositivos de comando e proteção do motor estão especificados de forma adequada, baseando-se na corrente de partida; c) Avaliação da aplicação do motor em relação ao conjugado de partida. Como exemplo pode-se citar o caso de um motor com conjugado normal de partida (categoria N da NBR 7094 [17]) substituir um outro, o qual aciona uma carga com alta inércia exigindo um alto conjugado de partida (categoria D da NBR 7094); d) Confirmação do balanceamento de fases do motor, pois permite identificar se o comportamento do mesmo é compatível com o de um motor balanceado ou se houve problemas de fabricação; e) Verificação de uma possível reforma do motor.

O ensaio consiste em se medir a corrente e o conjugado com o rotor bloqueado à tensão nominal. As grandezas assumem altos valores, gerando esforços mecânicos e térmicos excessivos. O ensaio pode ser realizado com tensão reduzida, empregando-se um nível de tensão tal que a corrente não ultrapasse a nominal e, tanto o conjugado quanto a corrente, são obtidas, para a tensão nominal, por extrapolação, com a

corrente corrigida linearmente e o conjugado com o quadrado da tensão.

Estas correções podem causar resultados diferentes dos que seriam medidos com a tensão plena, pois a lei de variação destas grandezas depende da saturação do material magnético empregado.

II.2.5 - Ensaio com rotor livre

O ensaio com rotor livre permite determinar as perdas no núcleo (estator e rotor, conjuntamente), a corrente com rotor livre e em vazio, as perdas devido ao atrito e ventilação, o fator de potência com o rotor livre e:

- a) Verificar a qualidade do circuito magnético, tanto para o motor novo quanto para um reformado. Estas informações permitem verificar a força magnetomotriz básica adotada no projeto e os processos de montagem do motor;
- b) Confirmar a qualidade do material magnético com relação às perdas. Como as perdas no núcleo podem ser obtidas neste ensaio, qualquer dano devido a uma eventual falha/defeito ou a queima do isolamento das chapas é facilmente detectado se houver um histórico do motor. Note-se que tal avaliação é, particularmente, interessante para motores reformados;
- c) Verificar se o entreferro está apropriado quando da montagem ou após uma reforma. Esta avaliação se reveste de grande importância, pois alterações apreciáveis no entreferro resultam em esforços radiais e axiais no eixo, podendo causar fraturas e/ou vibrações excessivas;
- d) Identificar eventuais cargas sobre os mancais, através das perdas por atrito e ventilação, importante em motores com eixos verticais após uma troca de mancais;
- e) Conhecer-se o comportamento ou problemas em potencial quando o motor operar com tensões diferentes da nominal.

Apesar da aparente simplicidade deste ensaio, é um dos que apresentam maiores possibilidade de erros e de imprecisões nos resultados devido à:

- a) Necessidade de se utilizar instrumentos de baixo fator de potência quando os mesmos forem convencionais. Como estes possuem um custo mais elevado que os normais, são simplesmente, preteridos pelos do segundo tipo;
- b) Que a obtenção das perdas por atrito e

ventilação exige que sejam aplicados diferentes níveis de tensão e, seja realizada uma extrapolação da característica potência absorvida em função da tensão, até o valor de tensão nula.

II.2.6 - Ensaio de aquecimento

A avaliação do aquecimento permite: a) Verificar as características de projeto de uma família ou grupo de novos motores ou, especialmente, naqueles que tenham sido reenrolados para uma nova potência ou velocidade; b) Determinar a temperatura de operação do motor, verificando-se a sua adequação à classe de isolamento e permitindo um teórico aumento de vida esperada; c) Confirmar que o motor não está sendo utilizado de forma inadequada em sua plataforma de trabalho, pela avaliação dos vários parâmetros em condições controladas. Isto calibra a unidade e simplifica a identificação de uma eventual sobrecarga ou outra causa que eleve a temperatura; d) Avaliar se o motor pode acionar uma carga superior à sua potência nominal, bem como, o tempo correspondente à esta operação; e) Verificar se houve alterações nos dutos de ventilação pela comparação com resultados anteriores. Um exemplo desta situação são canais obstruídos por acúmulo de poeira ou resina em excesso quando o motor foi reenrolado imprópriamente; f) Confirmar que eventuais reparos foram executados de forma adequada, especialmente a instalação de defletores de ar e de ventoinhas.

Em resumo, este ensaio é usado para avaliar se um motor novo, reparado, redimensionado ou em operação é apropriado para a carga que aciona.

A IEEE-112 [1] cita três procedimentos básicos para a sua execução, ou seja: termômetro, sensores térmicos embutidos e variação da resistência dos enrolamentos.

Em todos os casos, o motor deve acionar uma carga específica a uma certa tensão e frequência, monitorando-se a temperatura dos enrolamentos e/ou núcleo do estator até a sua estabilização. Esta condição é supostamente atingida quando leituras subsequentes indiquem uma elevação de temperatura do núcleo do estator inferior a 2^oC em uma ho-

ra.

O uso de termômetros ou de detetores bimetálicos é limitada pela sua própria natureza. Os sensores térmicos resistivos embutidos (DTR) e termistores são boas alternativas, mas devem ser instalados quando da fabricação dos enrolamentos. Além disto, o seu custo é relativamente alto, restringindo sua aplicação a motores de maior potência.

A medição da variação de resistência do enrolamento do estator é aplicável a qualquer motor, porém fornece a sua temperatura média. O custo da realização é alto, pois exige a presença de várias pessoas para desconectar a cablagem de alimentação, introduzir, ajustar e ler a indicação da ponte. Além disto, as resistências lidas devem ser corrigidas para o instante de desligamento, resultando em mão-de-obra adicional. Pode-se, alternativamente, utilizar-se do método da superposição, ou seja, efetuar a leitura da resistência injetando-se corrente contínua com a máquina em operação [5]; entretanto, este método ainda se encontra em fase experimental em relação à normalização, não tendo sido definida com exatidão a sua total adequação.

Em qualquer um dos procedimentos, as condições do rotor não são avaliadas.

II.3 - METODOLOGIAS NÃO-NORMALIZADAS

Os procedimentos normalizados são mais aplicáveis em laboratórios que em campo, devido à necessidade de equipamentos e instalações adequadas.

Surgiram então várias metodologias e formulações que procuram determinar as características dos motores em seu próprio ambiente de trabalho. Em geral, elas se baseiam em medições facilmente executáveis e em dados de placa ou de catálogos de fabricantes.

Alguns destes métodos, os quais serão designados genericamente por metodologias expeditas, são descritos de forma sucinta a seguir.

II.3.1 - Avaliação do carregamento

II.3.1.1 - Fórmula de Klöss

A fórmula de Klöss permite obter a relação entre o conjugado (M) para um escorregamento qualquer (s) e o conjugado máximo (M_k), ou seja:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} s_k\right)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \frac{R_1}{R_2} s_k} \quad (2.2)$$

Quando não se pode determinar a relação entre as resistências do estator (R₁) e a do rotor referida ao estator (R₂) de forma mais precisa, admite-se [18] que:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2 (1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k} \quad (2.3)$$

A equação de Klöss é, comumente, utilizada de uma forma mais simplificada ainda, ou seja:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.4)$$

Onde, "s_k" é o escorregamento correspondente ao conjugado máximo "M_k". O seu valor é obtido tomando-se por base os valores fornecidos em catálogos para as condições nominais (M_n, n_n) e a relação M_k/M_n.

II.3.1.2 - Linearização da curva M = f(n)

O princípio básico deste método é a linearização da curva "conjugado x velocidade do rotor", na região de operação, ou seja, entre o escorregamento nulo e "s_k". Considera-se como um ponto da curva o par (M_n, n_n) que é fornecido e suposto como verdadeiro. Assim, a carga no eixo do motor é dada por:

$$M = \frac{n - n_s}{n_n - n_s} M_n \quad (2.5)$$

onde: n_s é a velocidade síncrona; e n é a velocidade correspondente à carga do motor (M).

II.3.1.3 - Metodologia desenvolvida por Sá [19]

Foi desenvolvida [19] uma metodologia baseada na solução do circuito equivalente em "T" do motor de indução, calculando os parâmetros a partir de dados de catálogo. Considera a resistência e a reatância do rotor variáveis com o escorregamento (ou com a frequência do rotor) entre a partida ($s = 1$) e s_k . Assim, incorpora o refinamento de empregar o Efeito Pelicular na faixa citada.

O trabalho incorpora também o efeito da variação de temperatura na determinação dos parâmetros da máquina, não incorporando a influência da saturação magnética. Na chamada região de operação os parâmetros se mantêm constantes.

II.3.1.4 - Metodologia desenvolvida por Juri [21]

Propôs-se uma metodologia [21] também baseada em dados de catálogo ou de placa. O procedimento consiste em se determinar os parâmetros do circuito equivalente em "T" transformando-os para o circuito em "L". Além do equacionamento distinto do anterior [19] são necessários dados adicionais, ou seja, deve-se fornecer os valores de rendimento e fator de potência à 50% e 75% da carga nominal.

O Efeito Pelicular sobre as grandezas do rotor é considerado em toda a faixa de funcionamento do motor ($1 \geq s > 0$), bem como o efeito da temperatura, e sugere um fator para verificar a influência da saturação sobre os citados parâmetros.

II.3.1.5 - Metodologia desenvolvida por Avólio [22]

O desenvolvimento [22] permite a obtenção das características

de desempenho utilizando-se de dados de catálogo, como as duas anteriores.

O trabalho considera também o Efeito Pelicular e o efeito térmico é modelado por equações dinâmicas. A resistência por fase do enrolamento do estator deve ser conhecida, evitando a necessidade de se ter rendimentos e fatores de potência diferentes da condição nominal.

II.3.1.6 - Diagrama circular

A construção do Diagrama Circular é possível através de dados obtidos pela realização dos ensaios com rotor livre e com o rotor bloqueado sob tensão reduzida [18]; com o diagrama e os valores nominais dados em placa, obtem-se todas as curvas características.

II.3.1.7 - IEEE - F3 modificado

O método F3 da IEEE std-112 [1] exige que o ensaio com rotor bloqueado seja feito com uma fonte com frequência com, no mínimo, 25% da nominal, de forma a considerar o caráter não linear dos parâmetros do motor. A dificuldade no atendimento desta disposição leva à execução do ensaio na frequência nominal, modificando-o. O procedimento de cálculo é, basicamente, o mesmo do proposto, sendo amplamente utilizado no meio técnico.

II.3.1.8 - Outras metodologias

Existem metodologias onde a potência é obtida a partir de três outros valores retirados de catálogos de fabricantes, correspondentes a 50%, 75% e 100% de plena carga [24]. Assim, definindo-se:

$$\bar{P} = P/P_n \quad (2.6)$$

Onde: P é a potência disponível no eixo, e, P_n , a potência nominal [W]

Tem-se:

$$\eta = a_1 \bar{P}^2 + a_2 \bar{P} + a_3 \quad (2.7)$$

sendo as constantes a_1 , a_2 e a_3 obtidas da solução do sistema de equações:

$$a_1 + a_2 + a_3 = \eta_n \quad (2.8)$$

$$a_1(0,75)^2 + a_2(0,75) + a_3 = \eta_{75} \quad (2.9)$$

$$a_1(0,5) + a_2(0,5) + a_3 = \eta_{50} \quad (2.10)$$

Onde: η_n , η_{75} , η_{50} são os rendimentos para 100%, 75% e 50% da plena carga aplicada ao eixo do motor.

Os escorregamentos são estimados [24] através de:

$$s = 0,5 - \sqrt{0,25 - \bar{P} (1-s_n) s_n} \quad (2.11)$$

Com as potências e velocidades obtidas a partir dos escorregamentos, os conjugados e demais grandezas são facilmente calculados para um ponto de operação qualquer.

Goldemberg e Lobosco [25] determinam os parâmetros do circuito equivalente do motor baseando-se na folha de dados dos fabricantes. O equacionamento inclui o conhecimento do rendimento e fator de potência para 50% e 75% da carga, além das condições nominais. Emprega-se outros dados, tais como o conjugado de partida e máximo e a corrente de partida. São obtidas quatorze equações para seis incógnitas, o que resulta em infinitas soluções analíticas. Adicionalmente, é feito um ajuste através de métodos numéricos para minimizar o desvio entre os valores calculados pelo formulário F3 da IEEE-112 [1] e os fornecidos pelo fabricante.

Artime e Sanz [26] apresentam um outro método bastante elaborado para determinar as características de desempenho, utilizando-se de medições das grandezas elétricas do motor; entretanto, é necessário o valor do conjugado desenvolvido para um destes pontos, restringindo sua aplicação em campo.

Além destes, a literatura é farta quanto a apresentação de técnicas de estimação não-linear de parâmetros [27-30], utilizando-se como ferramental principal o método dos mínimos quadrados.

II.3.2 - Avaliação da corrente

II.3.2.1 - Métodos que utilizam o circuito equivalente

Nas metodologias que estimam os parâmetros do circuito equivalente descritas anteriormente, a corrente do estator pode ser calculada através do cálculo da impedância equivalente para dadas velocidade e tensão aplicadas.

II.3.2.2 - Linearização da curva $I_1 = f(n)$

Este método baseia-se no pressuposto de que a corrente e a velocidade se relacionam linearmente na região de operação do motor; além disto, utiliza uma aproximação adicional que considera que a velocidade do motor operando com rotor livre é a síncrona. Assim, tem-se:

$$I_1 = (I_n - I_0) \frac{n - n_n}{n_n - n_s} + I_n \quad (2.12)$$

Onde: I_1 , I_n , I_0 são as correntes calculada, nominal e com rotor livre, respectivamente [A]; n é a velocidade desenvolvida [rpm]; n_n , n_s são as velocidades nominal e síncrona, respectivamente [rpm].

II.3.2.3 - Metodologia desenvolvida por Almeida [31]

Na metodologia desenvolvida por Almeida [31], a corrente do estator é dada em função do escorregamento através de:

$$I_1 = I_n \sqrt{I_2^2 + I_0^2 + 2 I_2 I_0 \frac{s}{\sqrt{(K_x s_k)^2 + s^2}}} \quad (2.13)$$

Sendo:

$$I_2 = I_{2n} \sqrt{\frac{M \cdot s}{M_n s_n}} \quad (2.14)$$

$$I_{2n} = I_n \cos\varphi_{1n} \sqrt{1 + \left(\frac{s_n}{K_x s_k}\right)^2} \quad (2.15)$$

$$I_0 = I_n \left(\sin\varphi_{1n} - \frac{s_n}{K_x s_k} \cos\varphi_{1n} \right) \quad (2.16)$$

$$K_x = 2,67 \text{ (Motores gaiola N)} \quad (2.17)$$

Onde: M é o conjugado desenvolvido, calculado pela equação de Klöss para um certo escorregamento "s"; I_2 , I_{2n} são as correntes no enrolamento do rotor para uma condição qualquer e para a nominal, respectivamente; $\cos\varphi_{1n}$ é o fator de potência nas condições nominais; K_x é o fator de distribuição de reatâncias entre estator e rotor.

II.3.3 - Avaliação do rendimento

II.3.3.1 - Métodos que utilizam o circuito equivalente

Nas metodologias que estimam os parâmetros do circuito equivalente, descritas anteriormente, a potência ativa absorvida junto ao alimentador (P_{el}) pode ser calculada através da tensão aplicada, da corrente e do cosseno do argumento da impedância equivalente para uma dada velocidade. Como se dispõe da potência no eixo do motor (P), o rendimento é facilmente calculado através de:

$$\eta = \frac{P}{P_{el}} \quad (2.18)$$

II.3.3.2 - Metodologia desenvolvida por Almeida [31]

A potência ativa absorvida junto ao alimentador é dada por:

$$P_{el} = \sqrt{3} U \cdot I_1 \cos\varphi_1 \quad (2.21)$$

sendo:

I_1 - calculada através de (2.13); e,

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_2}{I_n} \cdot \frac{k_x s_k}{\sqrt{(k_x s_k)^2 + s^2}} \quad (2.22)$$

I_2 é calculada pela expressão (2.14) e o rendimento por (2.18).

II.3.3.3 - Diagrama circular

O rendimento é obtido diretamente pela construção do diagrama.

II.3.3.4 - Linearização da curva $I_1 = f(n)$

Na metodologia de linearização de $I_1 = f(n)$, estima-se a potência ativa através de (2.21), porém o fator de potência para uma carga qualquer deve ser calculado através de:

$$\cos\varphi_1 = a_1 \bar{P}^2 + a_2 \bar{P} + a_3 \quad (2.23)$$

sendo as constantes a_1 , a_2 e a_3 obtidas da solução do sistema de equações:

$$a_1 + a_2 + a_3 = \cos\varphi_{1n} \quad (2.24)$$

$$a_1(0,75)^2 + a_2(0,75) + a_3 = \cos\varphi_{75} \quad (2.25)$$

$$a_1(0,5)^2 + a_2(0,5) + a_3 = \cos\varphi_{50} \quad (2.26)$$

onde: $\cos\varphi_{1n}$, $\cos\varphi_{75}$, $\cos\varphi_{50}$ são os fatores de potência para 100%, 75% e 50% da plena carga aplicada ao eixo do motor.

II.3.4 - Avaliação do aquecimento

O cálculo do aquecimento das várias partes do motor é complexo. Entretanto, de maneira simplificada, considerando-se o motor como

um corpo homogêneo, resulta que a elevação de temperatura atingida ($\Delta\theta$) pelo motor em relação ao meio ambiente durante um período de funcionamento "t" é:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_f (1 - e^{-t/Ta}) + \theta_0 e^{-t/Ta} \quad (2.27)$$

onde:

$\Delta\theta_f$ é a elevação de temperatura final, em regime permanente; Ta é a constante de tempo de aquecimento; θ_0 é a temperatura inicial.

As metodologias que se baseiam na expressão (2.27), tais como [19,31], por exemplo, apresentam como característica a utilização de valores típicos de constante de tempo de aquecimento. Naturalmente, tais valores podem não corresponder a um dado motor. Neste sentido, a referência [32] propõe o seu cálculo a partir do tempo de rotor bloqueado e densidade de corrente nos enrolamentos para a condição nominal e de partida. Nestes métodos, as condições do rotor não são avaliadas.

Esta restrição é levantada pelas formulações que empregam circuitos elétricos análogos para a determinação do aquecimento [19 a 23 e 33 a 36]. No entanto, em todos os casos, os procedimentos dependem da massa dos enrolamentos e núcleo do estator e rotor. Apesar da total adequação demonstrada nas referências, é necessário consultar o fabricante para a obtenção dos dados citados; sendo assim, para motores em operação daqueles fabricantes que deixaram o mercado ou mesmo fabricantes estrangeiros, esta pode ser uma condição bastante restritiva.

II.4 - AJUSTES ESTATÍSTICOS PARA RESULTADOS DE ENSAIOS

II.4.1 - Necessidade de ajuste

Os métodos apresentados no item anterior para o cálculo do conjugado desenvolvido e, conseqüentemente da potência fornecida no eixo do motor, são de caráter determinístico. Sabe-se, porém, que tais

procedimentos são passíveis de erros cometidos desde a realização das medições até a construção dos modelos matemáticos, sendo estes acumulados no decorrer de suas aplicações.

Uma das principais restrições que se apresentam a eles é a utilização de dados de placa ou de catálogos; de fato, a diversidade na qualidade dos materiais empregados e da mão-de-obra levam a desempenhos distintos para motores com as mesmas características nominais e projeto.

Ainda, a respeito de tais dados, é necessário que se verifique se eles são típicos, médios ou garantidos, se as perdas adicionais e dos mancais estão inclusas na sua determinação, qual o método de ensaio utilizado para obtê-los e qual é o nível de confiança que o usuário do motor deseja [8]. Desta forma, naturalmente, há uma grande incerteza em resultados obtidos com as metodologias que empregam dados de placa ou de catálogos [11].

No entanto, mesmo empregando métodos consagrados nas diversas e conceituadas normas internacionais as incertezas estão presentes, tanto na obtenção, quanto no uso dos resultados de ensaios e, não apenas nas metodologias não normalizadas.

Pelo exposto, há a necessidade de tratamento estatístico de quaisquer resultados obtidos, de forma a verificar os erros inerentes, ou sistemáticos, aos métodos de ensaios ou aos expeditos, às medições e extrapolações. Observe-se que as recomendações da NEMA [3] são neste sentido e que, mesmo empregando-se métodos considerados como precisos, como o dinamômetro, tais erros estão presentes. Como exemplo pode-se citar: a) Diminuição da velocidade quando a carga no eixo do motor diminui, em relação a uma medição anterior; b) Velocidade constante com aumento da carga; c) Velocidade constante com redução brutal de carga em relação a uma medição anterior, não estando o motor operando com carga leve no eixo; d) Velocidades diferentes para cargas iguais no eixo, na ausência de controle de velocidade.

Estas situações podem ser facilmente verificadas pelos resultados apresentados na referência [37], por exemplo.

A consistência de dados pode ser conseguida através de

ajustes a modelos estatísticos [38], os quais, entretanto, devem refletir o comportamento físico do motor para que sejam válidos. Entre estes, o que deve ser utilizado é aquele que apresentar o menor erro médio quadrático. Desta forma, os modelos ajustados podem ser empregados como a melhor aproximação do desempenho do motor.

As características que necessitam de ajustes foram aquelas relativas às grandezas medidas, ou seja a de conjugado em função da velocidade, corrente do estator em função da velocidade, potência elétrica absorvida em função da velocidade e as resultantes do ensaio com rotor livre.

II.4.2 - Modelos estatísticos utilizados

II.4.2.1 - Curva do conjugado em função da velocidade $M = f(n)$

Baseando-se na teoria de motores de indução trifásicos e no equacionamento de seu circuito equivalente [18], desenvolveu-se três modelos estatísticos aplicáveis à região de operação estável do motor, os quais são descritos a seguir:

a) MODELO 1

Neste modelo considera-se como simplificação que os parâmetros não variam na região de operação do motor o que equivale a linearização da característica, ou seja:

$$M = a_0 + a_1 n \quad (2.28)$$

b) Modelo 2

Neste modelo adicionou-se um novo termo à expressão (2.28) de forma a considerar-se os erros sistemáticos, sendo a expressão que o representa dada por:

$$M = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 \quad (2.29)$$

c) Modelo 3

Como, na realidade, alguns dos parâmetros da máquina variam com a velocidade no decorrer da operação, adicionou-se um novo termo à expressão (2.29) na tentativa de representar este fato, ou seja:

$$M = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 \quad (2.30)$$

A utilização de polinômios de ajustes com grau superior a 3 foram desconsiderados devido à inexistência de suporte teórico, com o qual fosse possível representar o comportamento físico da máquina.

O ajuste das curvas foi executado utilizando-se a regressão polinomial [38].

II.4.2.2 - Curva de corrente em função da velocidade $I_1 = f(n)$

Para a curva $I_1 = f(n)$ também foram pesquisados os três modelos aplicáveis à região de operação estável do motor descritos a seguir:

a) Modelo 1

Adota-se a simplificação de uma variação linear da corrente em função da velocidade desenvolvida, considerando-se que os parâmetros do motor não variam e, desta forma, tem-se:

$$I_1 = a_0 + a_1 n \quad (2.31)$$

b) Modelo 2

De forma a considerar os erros sistemáticos acrescentou-se um novo termo à expressão (2.31) resultando em:

$$I_1 = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 \quad (2.32)$$

c) Modelo 3

Este modelo incorpora um termo adicional ao descrito por (2.32) na tentativa de se considerar a variação dos parâmetros com a velocidade de operação, ou seja:

$$I_1 = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 \quad (2.33)$$

A utilização de polinômios com grau superior a 3 foram desconsiderados devido à inexistência do suporte teórico, com o qual fosse possível representar o comportamento físico da máquina.

O ajuste das curvas foi executado utilizando-se a regressão polinomial [38].

II.4.2.3 - Curva de potência elétrica em função da velocidade

$$P_{el} = f(n)$$

Modelos semelhantes aos anteriores foram aplicados para esta característica, pelos mesmos motivos expostos.

a) Modelo 1

$$P_{el} = a_0 + a_1 n \quad (2.34)$$

b) Modelo 2

$$P_{el} = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 \quad (2.35)$$

c) Modelo 3

$$P_{el} = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 \quad (2.36)$$

II.4.2.4 - Características provenientes do ensaio com rotor livre

A identificação das perdas por atrito e ventilação pode ser feita a partir do ensaio com rotor livre. Para tanto, deve-se aplicar vários níveis de tensão, medindo-se a potência absorvida [1]. Os pontos correspondentes são locados em um gráfico, e, através de extrapolação, determina-se as citadas perdas para a tensão nula. A IEEE-112 [1] sugere que os pontos sejam locados em função do quadrado da tensão pois a curva se aproxima de uma reta. As perdas no núcleo são obtidas facilmente.

Além disto, é possível obter-se a curva representativa da excitação da máquina, relacionando-se a tensão aplicada e a corrente absorvida com rotor livre.

O modelo utilizado para esta última curva foi:

$$U = a_1 \operatorname{tg}^{-1} (a_2 I_0) + a_3 I_0 \quad (2.37)$$

onde: U é a tensão aplicada; I_0 - corrente absorvida com rotor livre.

O primeiro termo do segundo membro foi adotado devido à semelhança do comportamento da função arco-tangente com o típico de curvas de saturação; o segundo termo foi incluído na tentativa de se representar os erros sistemáticos.

Em relação à potência absorvida em função da tensão aplicada com rotor livre, pesquisou-se os modelos sugeridos em [1] e um terceiro como mostrado a seguir:

a) Modelo 1

Neste modelo, o quadrado da tensão aplicada é a variável independente como sugerido em [1] e, portanto, tem-se:

$$P_{el} = a_1 U^2 + P_{av} \quad (2.38)$$

Onde:

P_{el} é a potência elétrica absorvida com rotor livre e, P_{av} é a perda por atrito e ventilação.

b) Modelo 2

Avalia-se a tendência de comportamento dos pontos como estabelecido em [1], ou seja:

$$P_{el} = a_1 U^2 + a_2 U + P_{av} \quad (2.39)$$

c) Modelo 3

A variação da potência elétrica em função da tensão mantém uma semelhança com o comportamento, no terceiro quadrante, da função

arco-tangente.

$$P_{el} = a_1 \operatorname{tg}^{-1}(a_2 U) + a_3 U + P_{av} \quad (2.40)$$

O ajuste dos modelos não-lineares foi feito utilizando-se o algoritmo de Marquadt [39], enquanto que nos demais empregou-se a regressão polinomial [38].

II.4.2.5 - Modelos estatísticos obtidos

Para a posterior comparação com as metodologias não normalizadas foram levantados os resultados de ensaios de 61 motores em uma faixa de potência compreendida entre 3 e 2250 c.v.. Os dados foram obtidos junto à fabricantes, na referência [37], e em laboratório durante o desenvolvimento deste trabalho.

Deve-se observar que 40 motores foram ensaiados conforme a IEEE-112 - método B [1] ou equivalente e 54 pela IEC-34-2 [2] formando um universo de 94 avaliações. A figura 2.3 fornece a distribuição de motores por faixa de potência.

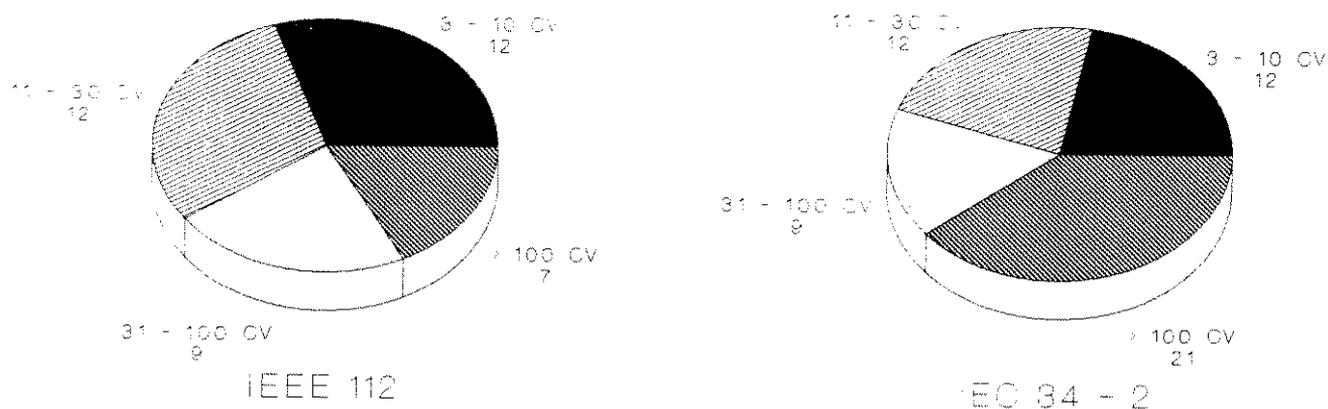


Figura 2.3 - Motores ensaiados conforme as várias normas - Distribuição por faixa de potência

O erro considerado para verificar a adequação dos ajustes foi o médio quadrático, corrigido para pequenas amostras [38].

A título ilustrativo a figura 2.4 apresenta a distribuição de erros resultante da aplicação dos vários modelos relativos à curva $M = f(n)$, considerando-se as normas IEEE-112 e IEC-34-2.

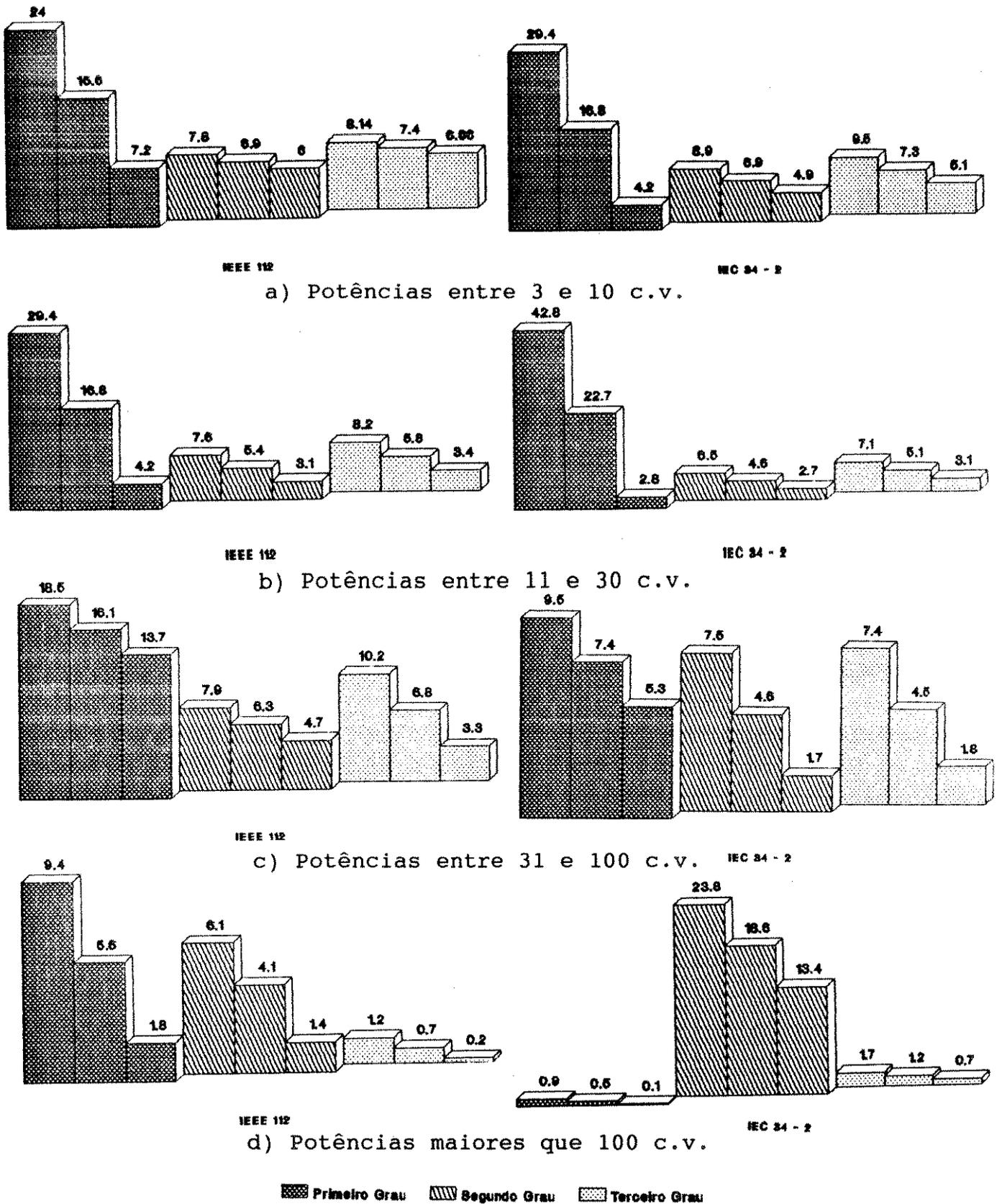
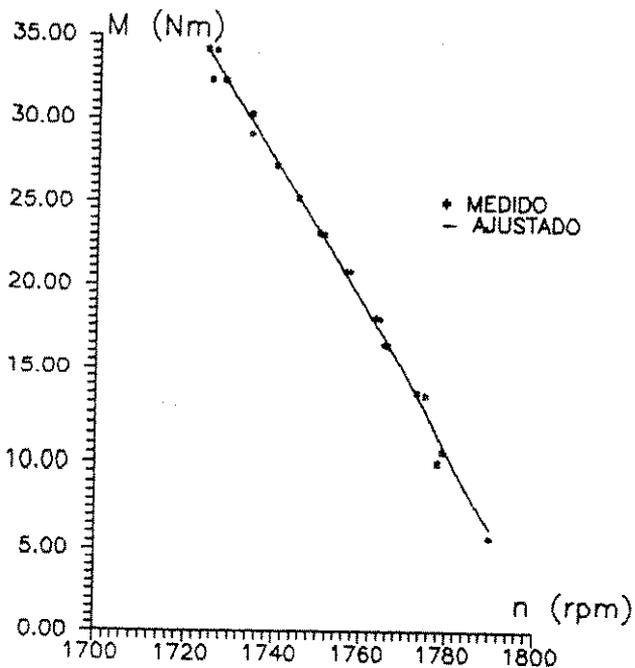
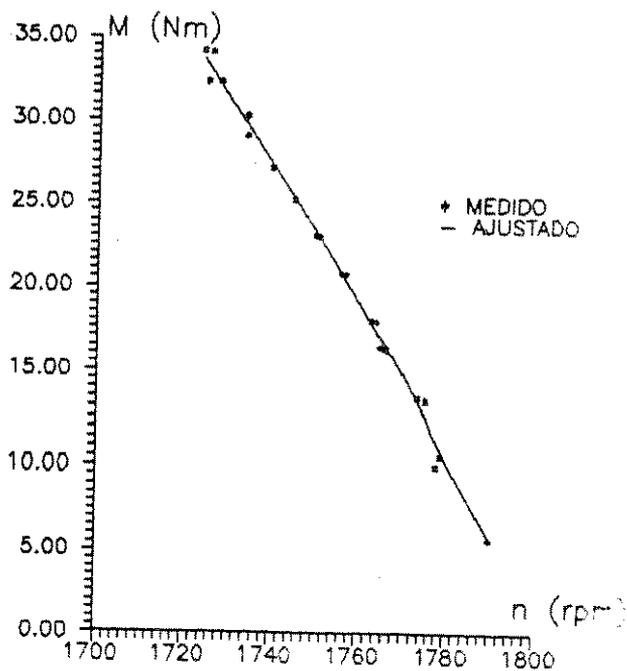


Figura 2.4 - Distribuição de erros conforme o modelo ajustado e por faixa de potência. Curva $M = f(n)$. Erros em % (o valor intermediário para cada modelo é o médio e os das extremidades correspondem à adição e à subtração de um desvio padrão à média)

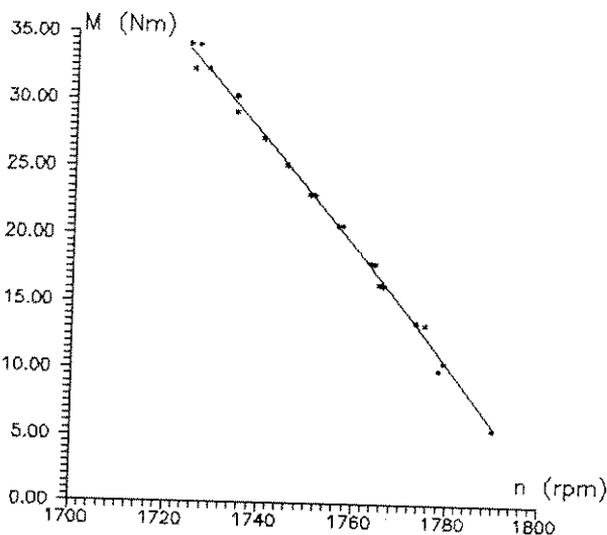
A figura 2.5 exemplifica a aplicação dos vários modelos de curvas $M = f(n)$ a um conjunto amostral correspondente a um motor de 7,5 c.v..



a) Modelo 1



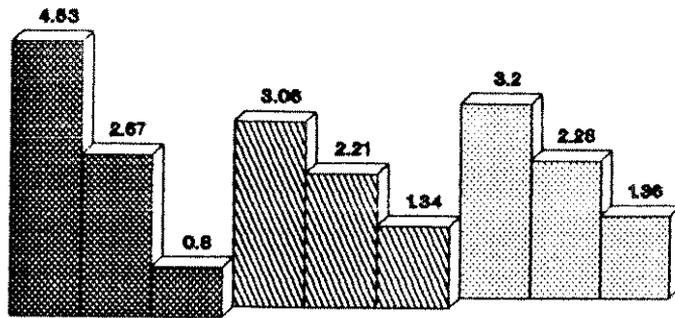
b) Modelo 2



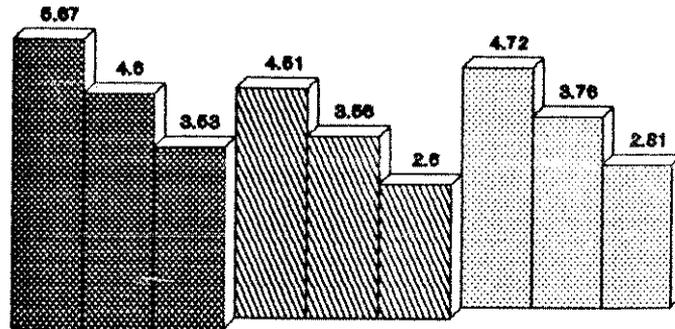
c) Modelo 3

Figura 2.5 - Exemplo de aplicação dos modelos. Motor de 7,5 c.v..
Curva $M = f(n)$.

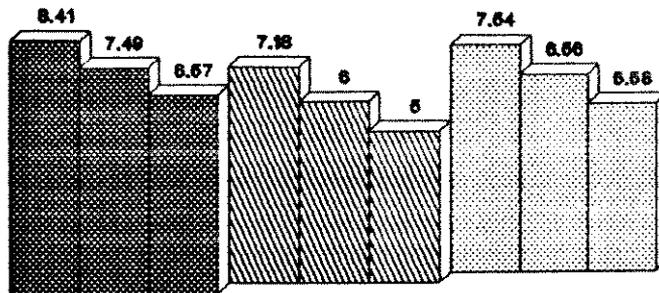
As figuras 2.6 e 2.7, apresentam as mesmas grandezas para a curva $I_1 = f(n)$.



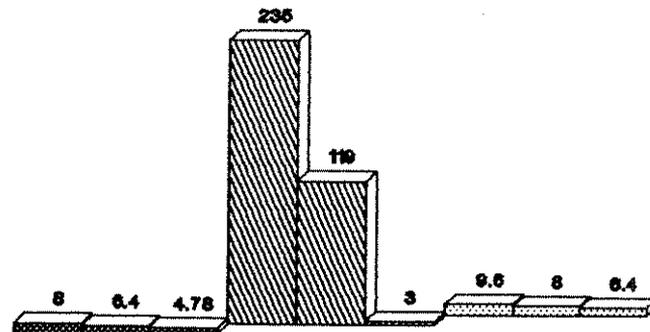
a) Potências entre 3 e 10 c.v.



b) Potências entre 11 e 30 c.v.



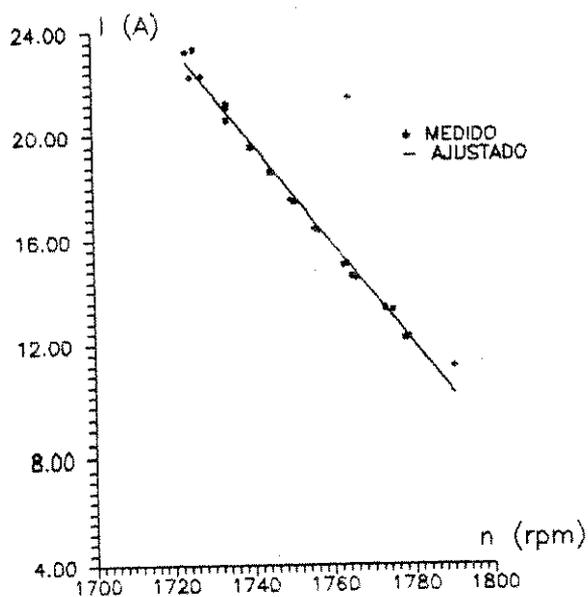
c) Potências entre 31 e 100 c.v.



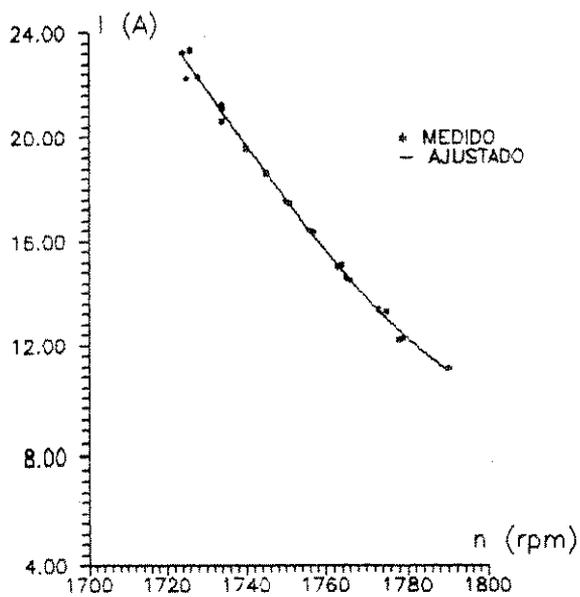
d) Potências maiores que 100 c.v.

■ Primeiro Grau ▨ Segundo Grau ▤ Tercero Grau

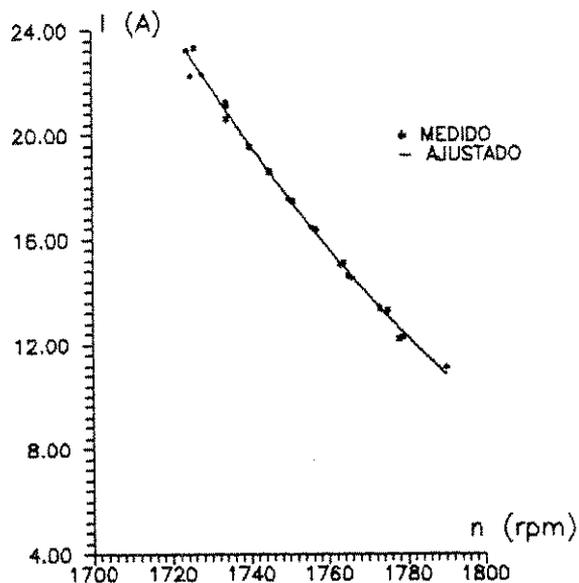
Figura 2.6 - Distribuição de erros conforme o modelo ajustado e por faixa de potência. Curva $I_1 = f(n)$. Erros em % (o valor intermediário para cada modelo é o médio e os das extremidades correspondem à adição e à subtração de um desvio padrão à média)



a) Modelo 1



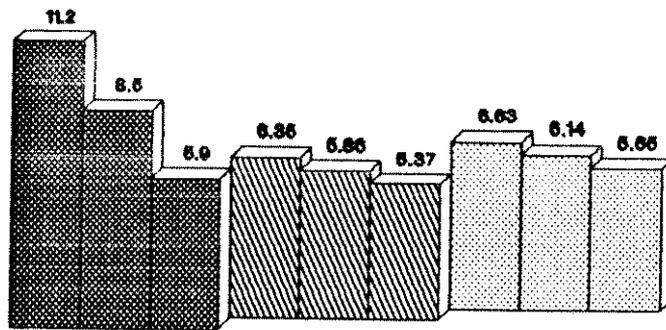
b) Modelo 2



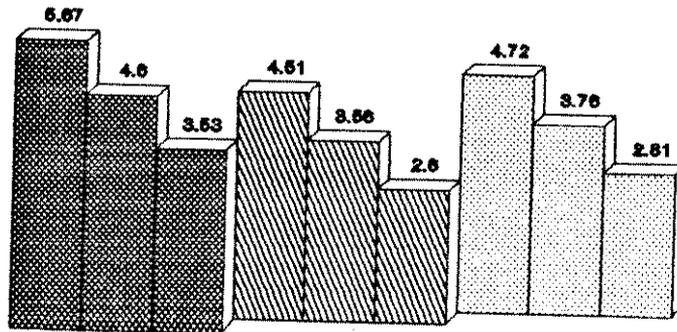
c) Modelo 3

Figura 2.7 - Exemplo de aplicação dos modelos. Motor de 7,5 c.v..
 Curva $I_1 = f(n)$.

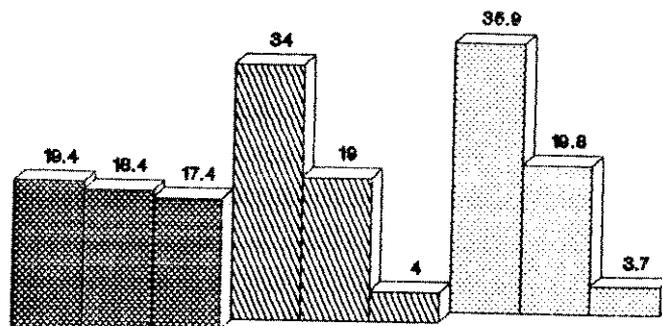
As figuras 2.8 e 2.9, fornecem os resultados para a curva
 $P_{el} = f(n)$.



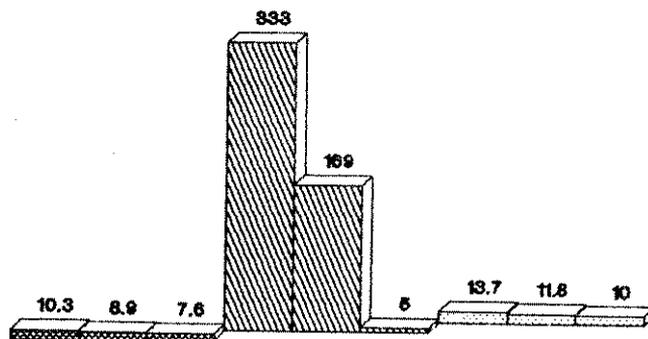
a) Potências entre 3 e 10 c.v.



b) Potências entre 11 e 30 c.v.



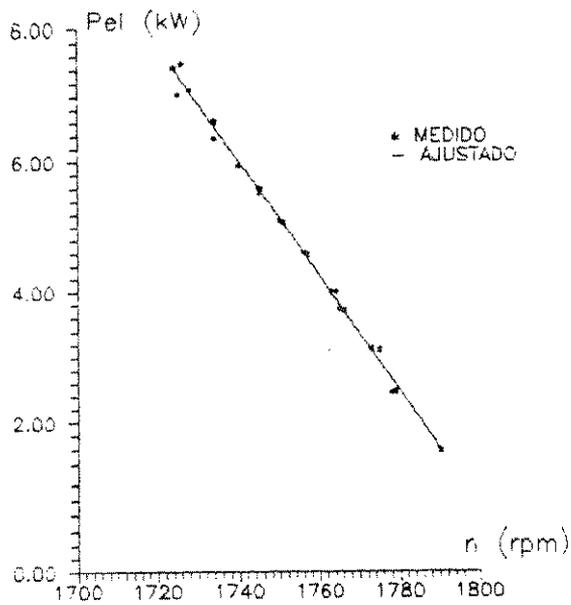
c) Potências entre 31 e 100 c.v.



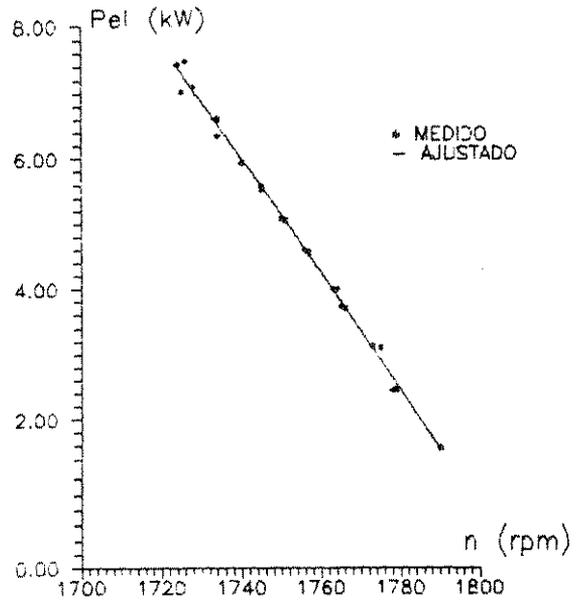
d) Potências maiores que 100 c.v.

Primeiro Grau
 Segundo Grau
 Terceiro Grau

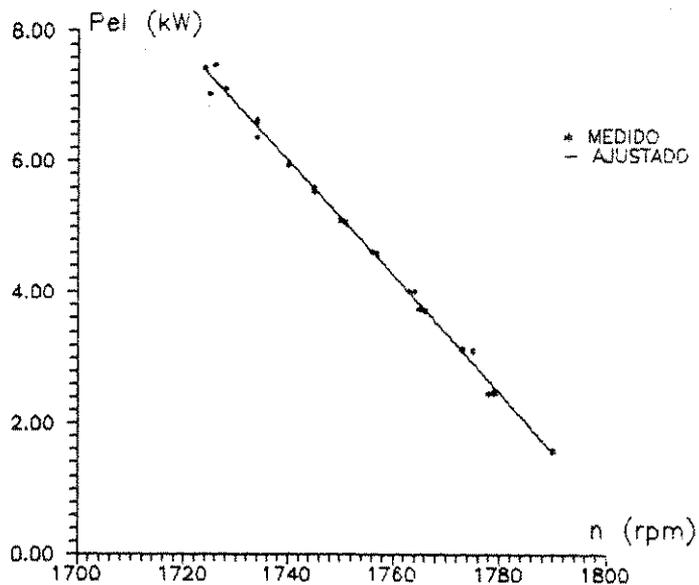
Figura 2.8 - Distribuição de erros conforme o modelo ajustado e por faixa de potência. Curva $P_{el} = f(n)$. Erros em % (o valor intermediário para cada modelo é o médio e os das extremidades correspondem à adição e à subtração de um desvio padrão à média)



a) Modelo 1



b) Modelo 2



c) Modelo 3

Figura 2.9 - Exemplo de aplicação dos modelos. Motor de 7,5 c.v..

$$\text{Curva } P_{el} = f(n)$$

As figuras 2.10 e 2.11 apresentam exemplos de ajuste para os modelos utilizados para as curvas $U = f(I_0)$ e $P_{el} = f(U)$, para o ensaio com rotor livre.

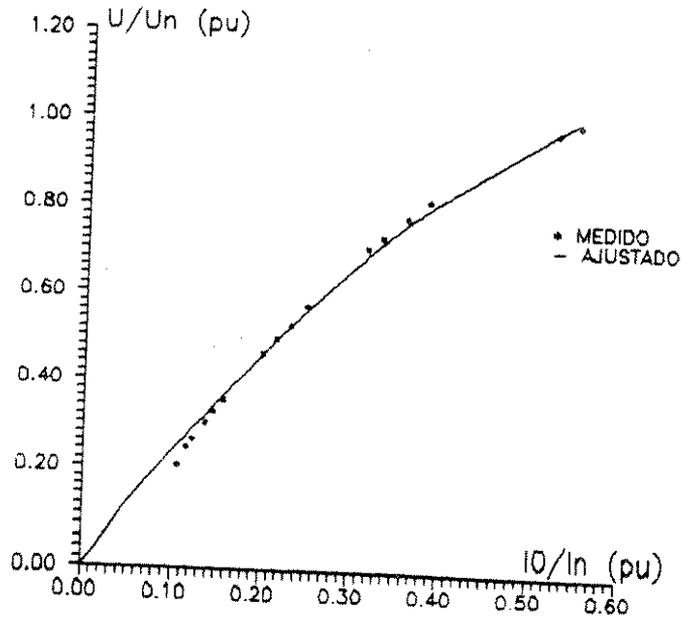
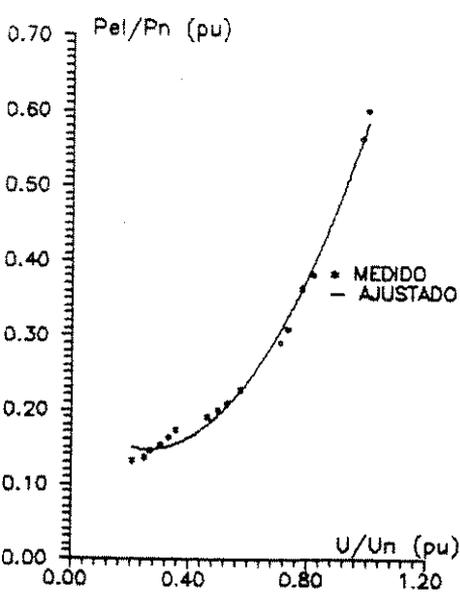
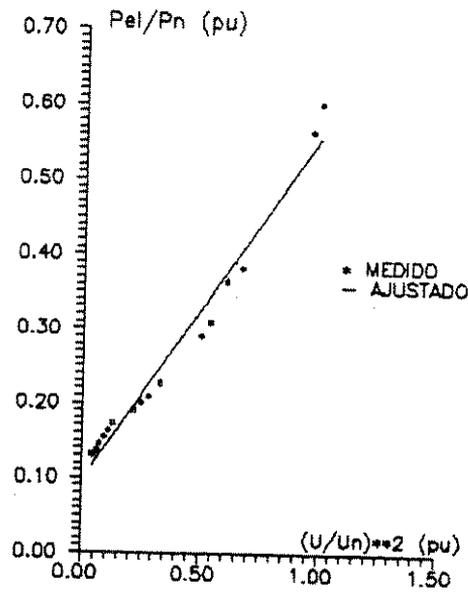


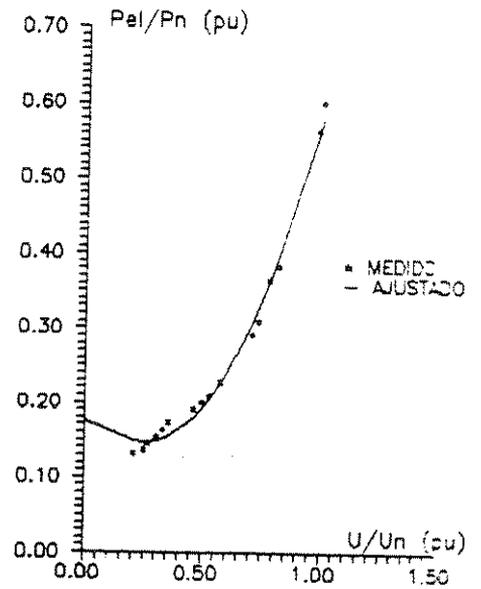
Figura 2.10 - Exemplo de aplicação do ajuste da característica $U = f(I_0)$. Ensaio com rotor livre. Motor de 7,5 c.v.. Valores em pu.



a) modelo 1



b) modelo 2



c) modelo 3

Figura 2.11 - Exemplo de aplicação dos modelos. Característica $P_{el} = f(U)$ do ensaio com rotor livre. Motor de 7,5 c.v.. Valores em pu.

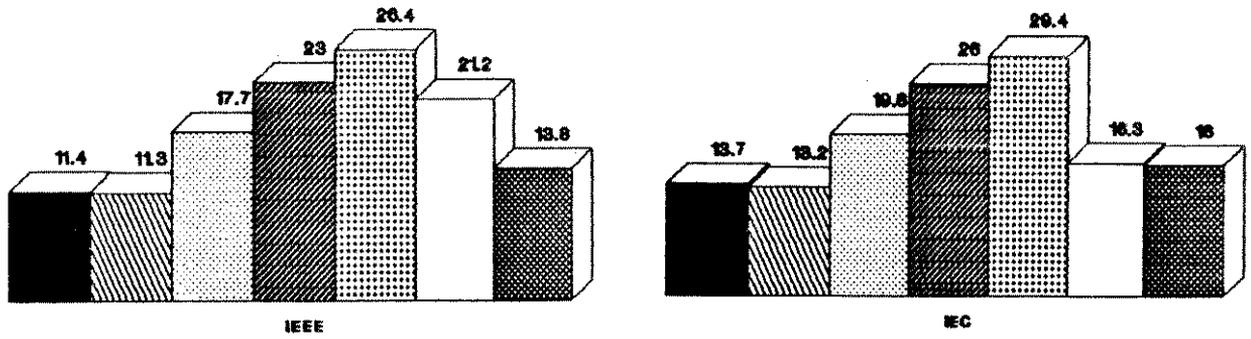
II.5 - MODELOS ESTADÍSTICOS E METODOLOGIAS NÃO NORMALIZADAS

A utilização do modelo que apresenta um menor erro médio quadrático é que dá consistência aos dados provenientes de ensaios, sendo considerada como melhor aproximação de uma determinada característica de desempenho do motor. Qualquer extrapolação visando a obtenção de outros pontos da citada característica pode ser feita através da expressão representativa do modelo.

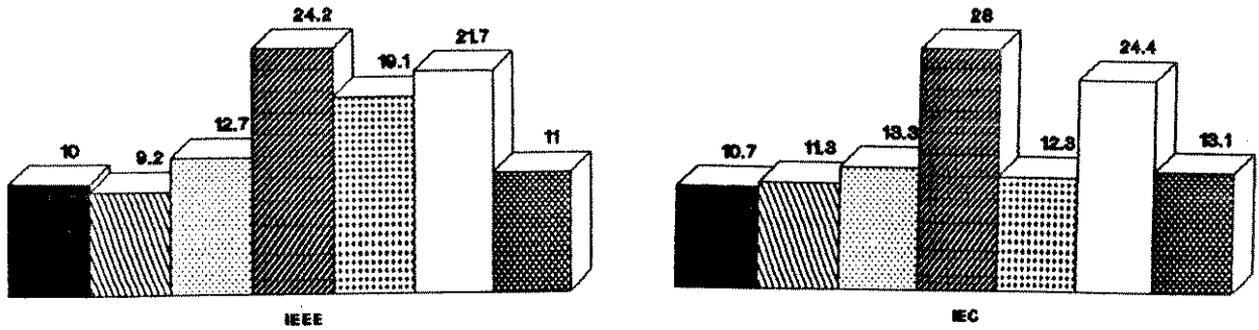
Neste contexto, executou-se uma avaliação de erros entre os procedimentos não normalizados e a curva ajustada para cada caso e característica. Novamente, ressalte-se que todas as análises são válidas para a região de operação do motor.

As figuras 2.12 , 2.13 e 2.14 apresentam as comparações para as curvas $M = f(n)$, $I_1 = f(n)$ e $\eta = f(n)$ respectivamente, considerando-se as várias metodologias não normalizadas e normas de ensaios, bem como, a faixa de potência dos motores ensaiados.

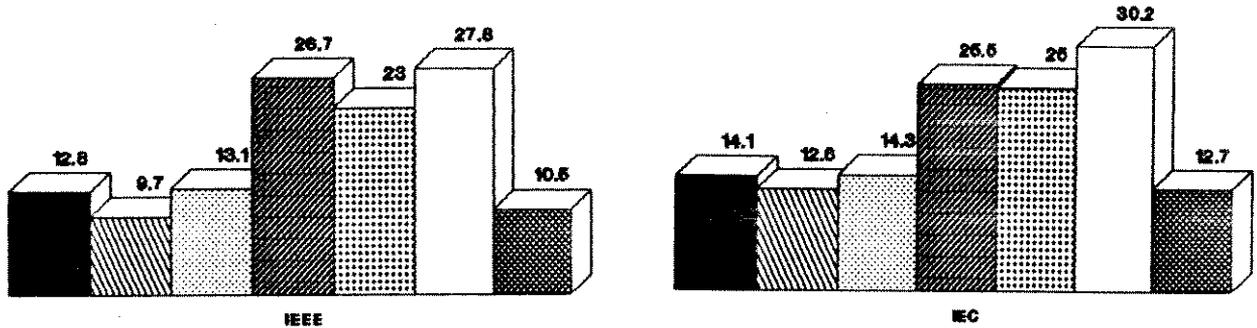
As figuras 2.15 , 2.16 e 2.17 mostram o comportamento das características $M = f(n)$, $I_1 = f(n)$ e $\eta = f(n)$ respectivamente, obtidas pelos vários métodos, comparativamente ao modelo estatístico ajustado correspondente para um motor de 7,5 c.v..



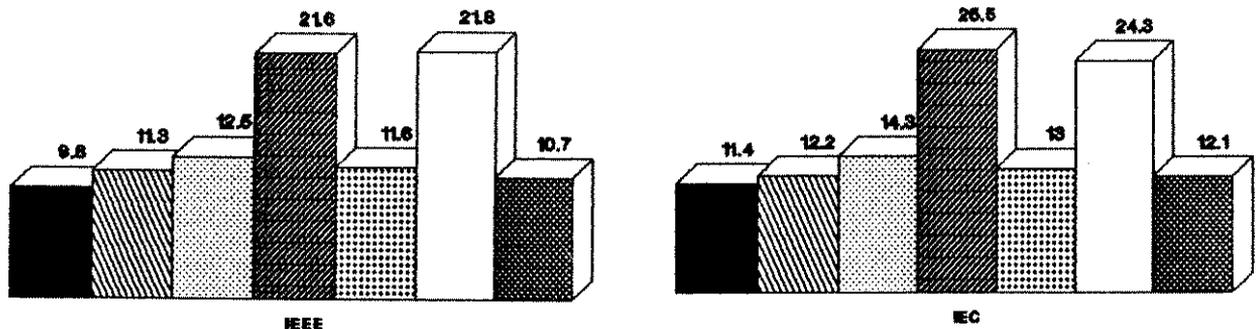
a) Potências entre 3 e 10 c.v.



b) Potências entre 11 e 30 c.v.



c) Potências entre 31 e 100 c.v.



d) Potências maiores que 100 c.v.

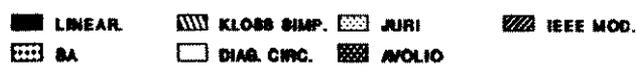
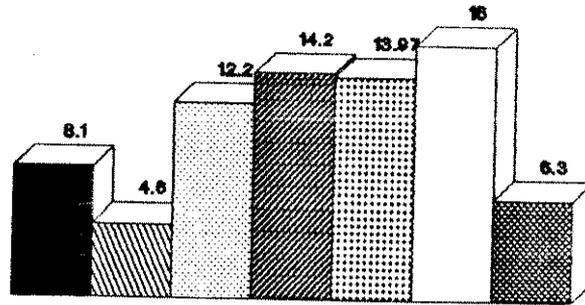
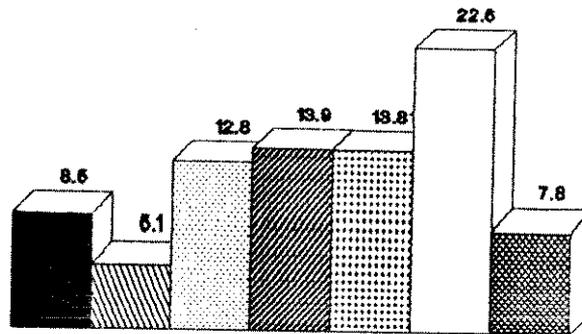


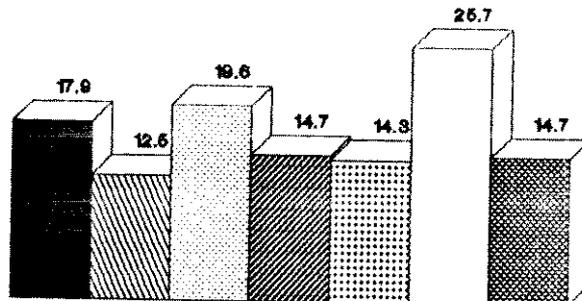
Figura 2.12 - Análise comparativa entre os erros médios em % resultantes da aplicação das várias metodologias não normalizadas. Curva $M = f(n)$



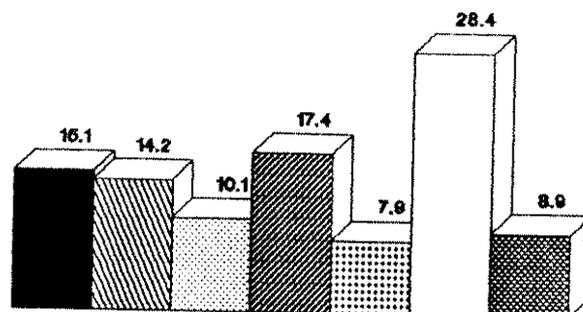
a) Potências entre 3 e 10 c.v.



b) Potências entre 11 e 30 c.v.



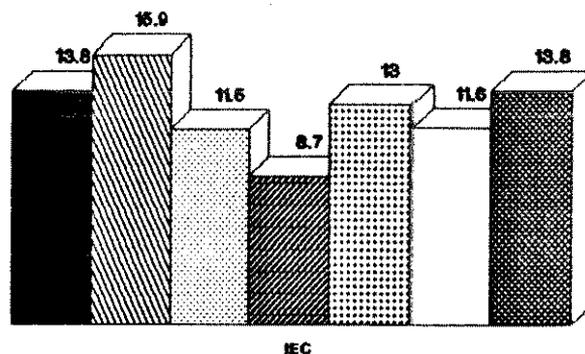
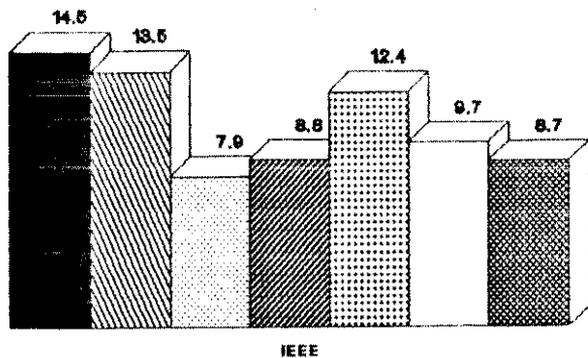
c) Potências entre 31 e 100 c.v.



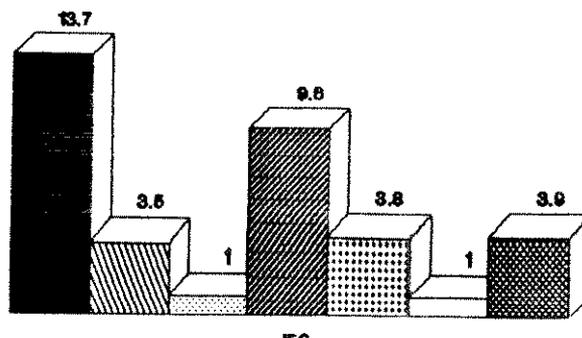
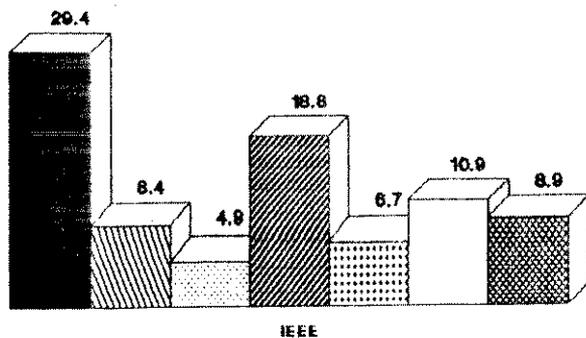
d) Potências maiores que 100 c.v.



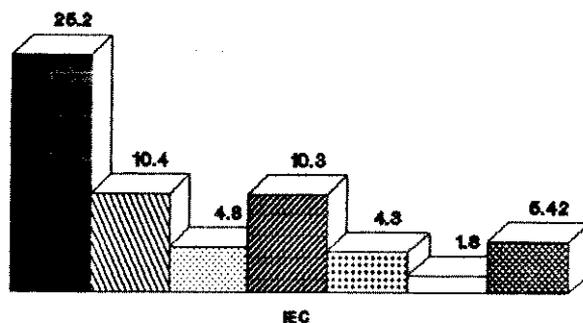
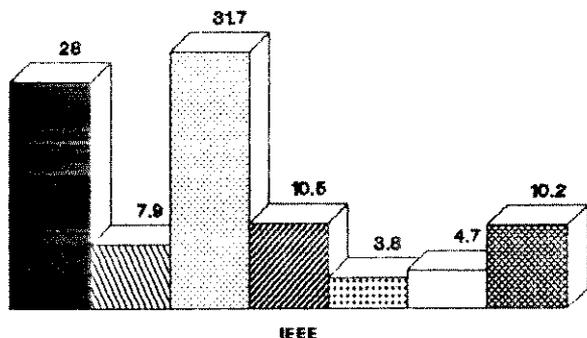
Figura 2.13 - Análise comparativa entre os erros médios em % resultantes da aplicação das várias metodologias não normalizadas. Curva $I_1 = f(n)$



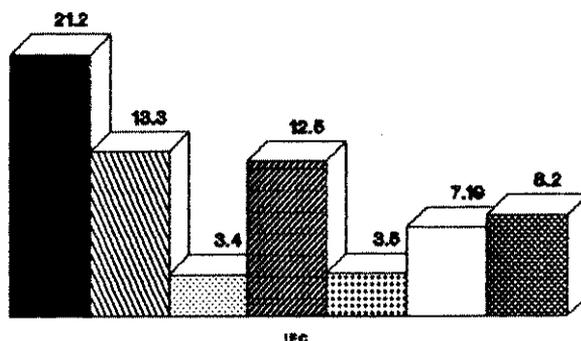
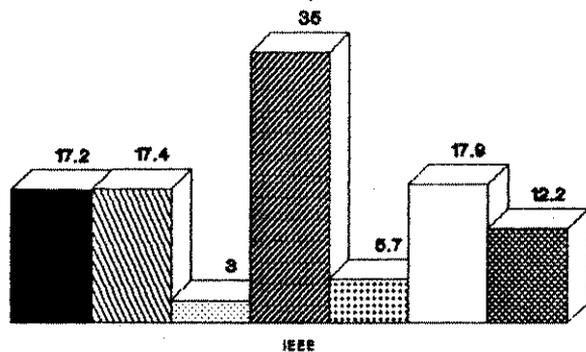
a) Potências entre 3 e 10 c.v.



b) Potências entre 11 e 30 c.v.



c) Potências entre 31 e 100 c.v.



d) Potências maiores que 100 c.v.

■ LINEAR ▨ ALMEIDA ▩ JURI ▤ IEEE MODIFICADO
 ▧ BA □ DIAB. CIRC. ▦ AVOLIO

Figura 2.14 - Análise comparativa entre os erros médios em % resultantes da aplicação das várias metodologias não normalizadas. Curva $\eta = f(n)$

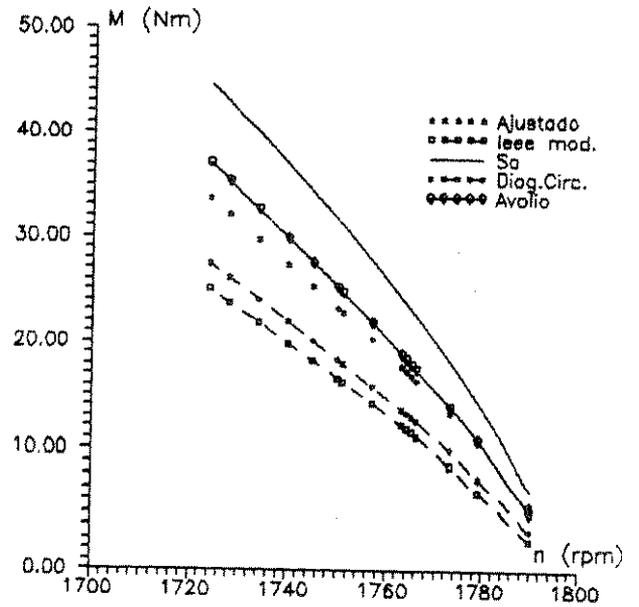
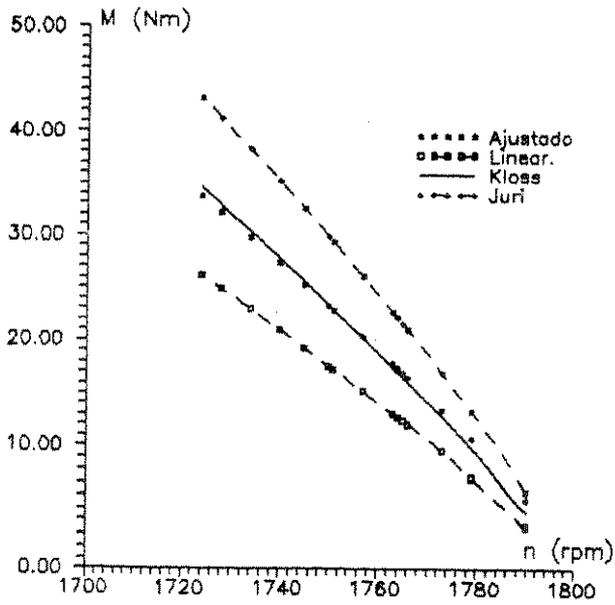


Figura 2.15 - Características $M = f(n)$, obtidas pelos diferentes Métodos. Motor de 7,5 c.v.

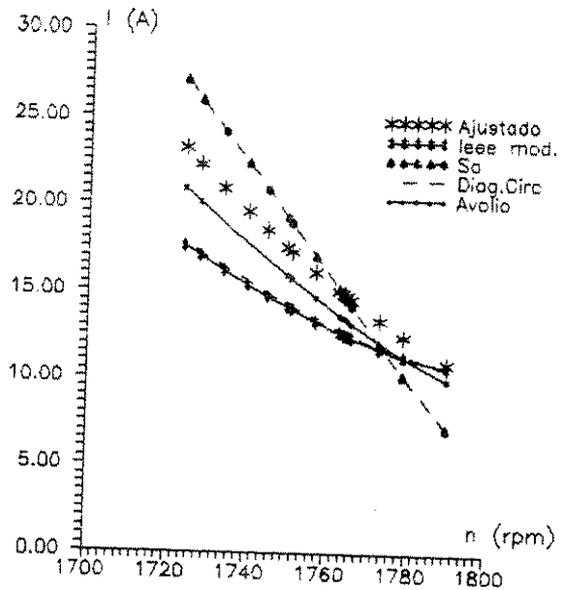
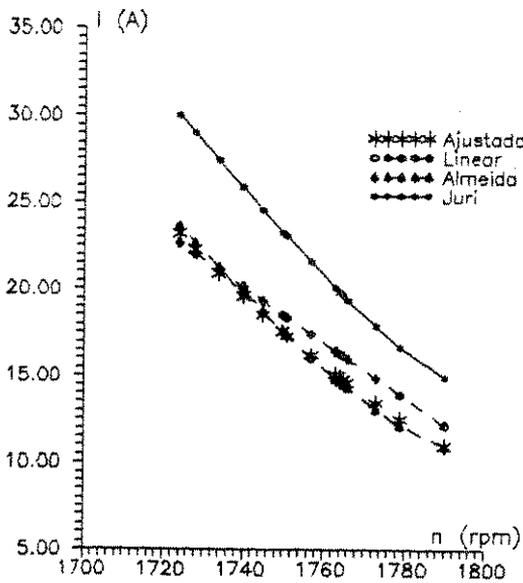


Figura 2.16 - Característica $I_1 = f(n)$, obtidas pelos diferentes métodos. Motor de 7,5 c.v.

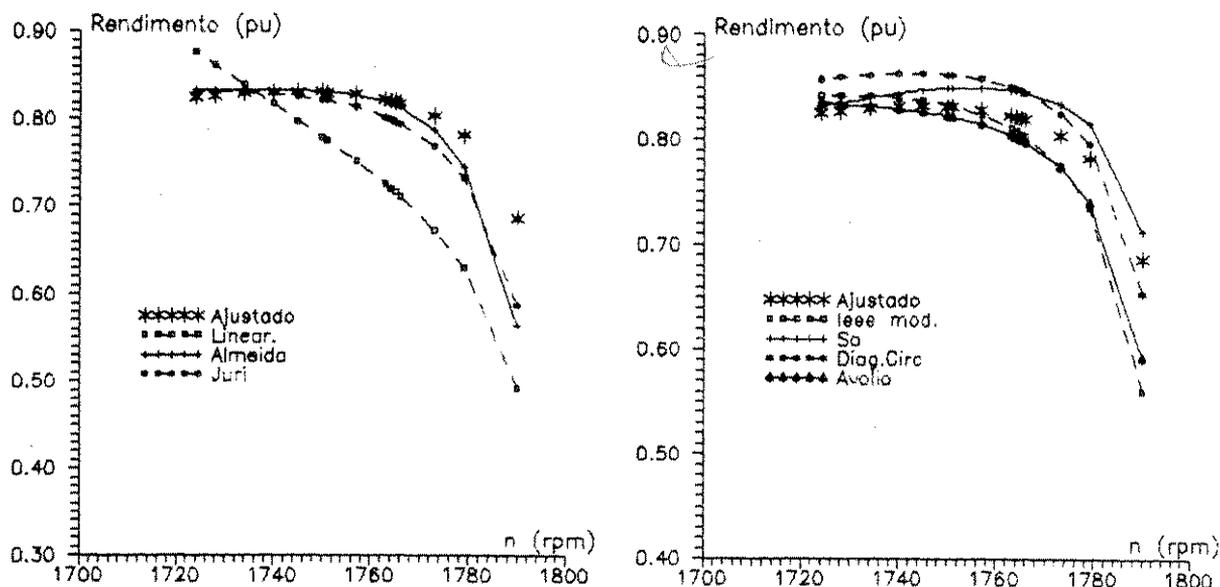


Figura 2.17 - Características $\eta = f(n)$, obtidos pelos diferentes métodos. Motor de 7,5 c.v.

Na análise efetuada relativa à característica $M = f(n)$, considerou-se apenas a equação de Klöss simplificada, ou seja, aquela dada pela expressão (2.4).

II.6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados de ensaio com o dinamômetro (Método B da IEEE-112), apesar do método ser considerado como o mais preciso [10], devem sofrer um tratamento estatístico além das correções do próprio equipamento, de forma a dar consistência aos dados. Neste sentido, apenas após o ajuste específico, as grandezas medidas (conjugado, corrente e potência absorvida) devem ser empregadas para se obter as demais. O estudo realizado mostrou os modelos mais adequados para cada faixa de potência, embora, para cada caso específico seja interessante verificar todos eles. O mesmo é válido para o método preferencial da IEC-34-2 (separação das perdas).

A comparação de resultados, obtidos pelas metodologias não normalizadas e os de ensaios ajustados revelou que, sistematicamente, os desvios são maiores para a IEC-34-2 se considerado apenas a avaliação do conjugado e, de forma surpreendente, o contrário para o rendi-

mento, as correntes medidas são as mesmas para as duas normas e, portanto, os erros são os mesmos. Pode-se supor que isto ocorre porque as perdas adicionais são calculadas pela IEC-34-2 como sendo 0,5% da potência ativa absorvida da rede para uma dada carga no eixo, o que causa distorções.

Com relação à obtenção de conjugados e correntes pelas metodologias não normalizadas, pode-se concluir que: a) Os métodos que se baseiam na solução do circuito equivalente a partir de dados de catálogo, apresentam como aspecto negativo esta dependência. Observe-se que na análise efetuada, tais dados foram extraídos de ensaios e, mesmo assim, os erros apresentados foram significativos. É de se imaginar que a imprecisão seria muito maior se isto não fosse feito. De qualquer forma, a especificação de um novo motor deve se basear nestes procedimentos, já que é impraticável comprá-lo, ensaiá-lo e depois especificá-lo; b) O diagrama circular traçado conforme [18] é de uso corrente para determinação de características de motores de indução; no entanto, verifica-se que apresentam erros bastante elevados, apesar de serem obtidos com a utilização de um programa digital. A sua construção manual, como é clássico, deverá introduzir erros maiores ainda. Para minimizá-los é necessário que o ensaio com rotor bloqueado seja executado com fontes cujas frequências sejam inferiores à nominal, o que o torna pouco prático; c) As mesmas considerações são aplicáveis ao método que foi denominado de IEEE modificado neste trabalho; d) A metodologia desenvolvida por Almeida [31] fornece resultados razoáveis, porém apresenta a dependência de dados de catálogo. Assim como os demais procedimentos, a necessidade de se empregar o conjugado máximo é um fator restritivo para a utilização em avaliações de motores em operação, pois tal grandeza é de difícil determinação prática; e) Face aos resultados obtidos, a linearização das curvas $I_1 = f(n)$ e $M = f(n)$ tornam-se alternativas interessantes devido à praticidade e por apresentarem erros reduzidos em todas as faixas de potência.

Por outro lado, se a grandeza a ser analisada for o rendimento, tem-se que: a) A metodologia proposta por Juri apresenta resultados excepcionais para motores acima de 10 c.v. ensaiados pela IEC-34-2,

sendo o mesmo válido para potências superiores a 100 c.v. ensaiados pela IEEE-112; b) O procedimento de Sá, por sua vez, resulta em desvios reduzidos para potências maiores que 10 c.v., qualquer que seja a norma de ensaio; c) Para as mesmas condições do item b), o diagrama circular fornece pequenos desvios, ao contrário do que ocorre se for utilizado para a determinação do conjugado e corrente; o mesmo pode ser afirmado do IEEE modificado; d) A linearização, entretanto, mostrou-se um método que resulta em grandes desvios para a avaliação do rendimento, sendo, em termos práticos, o de pior comportamento entre todos.

Deve-se observar que, em todos os casos, não são incorporadas quaisquer condições adversas da rede de alimentação, tais como desbalanços de tensões ou presença de harmônicas.

A identificação de potenciais de economia e avaliação técnica-econômica de substituição de motores requerem metodologias ágeis para aplicação em campo, mas como analisado, estas são insuficientes. Os procedimentos de ensaios, os quais poderiam suprir esta necessidade, são de difícil aplicação, apresentam resultados divergentes e muitas vezes, discrepantes, para motores de um mesmo projeto conforme a norma, que, dependendo do porte do motor, pode ter um custo mais elevado que o do motor.

Neste aspecto, a avaliação do rendimento ou do carregamento do motor torna-se um fato decididamente perigoso, pois há riscos de enganos brutais o que, evidentemente, resulta em prejuízos financeiros consideráveis. Os resultados obtidos pela análise estatística são claros neste sentido, ou seja, existem métodos que são mais aplicáveis à avaliação de uma ou outra grandeza, conforme a faixa de potência. Além disto, verificou-se que para motores com potências inferiores a 10 c.v. os desvios são sempre muito elevados.

De qualquer forma, pode-se concluir que os métodos não normalizados, para a avaliação de carga de motores, estão sujeitos à confiabilidade dos dados e características fornecidas pelos fabricantes, sendo o mesmo válido para os resultados de ensaios por eles realizados.

C A P Í T U L O III

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS A PARTIR DOS ENSAIOS COM ROTOR LIVRE E BLOQUEADO

RESUMO

Este capítulo apresenta uma metodologia alternativa, a qual permite obter as características de desempenho de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola categoria N utilizando-se o circuito equivalente. Os seus parâmetros são estimados a partir dos resultados obtidos nos ensaios com o rotor livre e com o rotor bloqueado.

III.1 - INTRODUÇÃO

As metodologias que utilizam os resultados dos ensaios com rotor livre e bloqueado apresentam grandes erros médios se comparados com as metodologias normalizadas, como analisado no capítulo II. O método do diagrama circular e o que foi denominado IEEE modificado podem conduzir a resultados bastante discrepantes; por outro lado, os procedimentos normalizados exigem a utilização de uma fonte de alimentação com frequências inferiores à nominal.

Como, dificilmente, se dispõe de condições adequadas para a execução de tais ensaios em locais que não sejam laboratórios especializados, é evidente que o uso de tais metodologias torna-se bastante restrito.

Desenvolve-se uma metodologia que emprega os resultados dos

mesmos ensaios, porém com algumas modificações, visando diminuir as incertezas das primeiras.

A modelagem proposta determina os parâmetros do circuito equivalente em "T" para cada ponto operacional do motor, porém o equacionamento não permite uma solução analítica, pois o número de incógnitas é superior ao de expressões. Esse problema é resolvido através de um processo de estimação por minimização do erro, conforme se descreve a seguir.

A formulação foi verificada experimentalmente para motores com rotor gaiola categoria N [17].

III.2 - ESTRUTURA BÁSICA DO MÉTODO

O circuito equivalente em "T" do motor de indução trifásico da figura 3.1, é adotado como base para o equacionamento. Note-se que este se refere à uma fase do motor ligado em estrela ou a uma fase da estrela equivalente para a conexão delta.

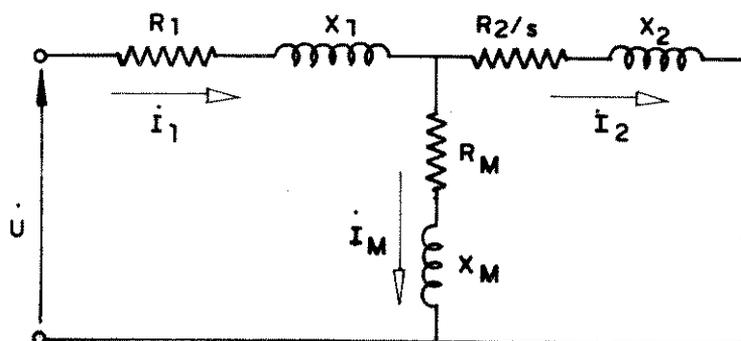


Figura 3.1 - Circuito equivalente do motor de indução trifásico.

Na Figura 3.1 tem-se:

- U - tensão de fase aplicada ao motor (V);
- I_1 - corrente do enrolamento do estator, variável com o escorre-

- gamento (A);
- R_1 - resistência do enrolamento do estator/fase (Ω);
 - X_1 - reatância de dispersão do enrolamento do estator/fase, variável com o escorregamento devido à saturação (Ω);
 - I_m - corrente de magnetização, variável com o escorregamento (A);
 - R_m - resistência que representa as perdas no ferro/fase (Ω);
 - X_m - reatância de magnetização (Ω);
 - E_2 - tensão induzida no enrolamento do rotor, variável com o escorregamento (V);
 - I_2 - corrente do enrolamento do rotor, variável com o escorregamento, valor referido ao estator (A);
 - R_2 - resistência do enrolamento do rotor, variável com o escorregamento devido ao Efeito Pelicular, valor referido ao estator/fase (Ω);
 - X_2 - reatância de dispersão do enrolamento do rotor, variável com o escorregamento devido ao Efeito Pelicular e à saturação, valor referido ao estator/fase (Ω);
 - s - escorregamento do rotor.

Deve-se notar que, embora seja acentuado o efeito da saturação sobre as reatâncias de dispersão no processo de aceleração, pode-se desprezá-lo comparando-se com a reatância de magnetização, pois ela pouco se altera entre a condição em vazio e a plena carga [18]. Por outro lado, em altos escorregamentos, o seu valor assume pouca importância, por ser muito superior aquele correspondente à impedância do rotor.

O Efeito Pelicular, ou seja, a variação da densidade de corrente na seção transversal das barras do rotor, que é acentuado no processo de aceleração [18], afeta a resistência e a reatância de dispersão do rotor.

Desta forma, na condição de rotor bloqueado ($s = 1$), a resistência e a reatância de dispersão do rotor, bem como, a reatância de dispersão do estator assumem os valores R_{2rb} , X_{2rb} e X_{1rb} , respectivamente, enquanto que, para operação com rotor livre assumem, respecti-

vamente, os valores R_{2rl} , X_{2rl} e X_{1rl} .

O circuito equivalente se altera conforme o ponto de operação do motor.

Considerando-se tais aspectos, o método desenvolvido consiste em estimar os parâmetros do circuito equivalente para cada ponto de operação.

Estima-se, inicialmente, os parâmetros (R_2 , X_1 , X_2) para a condição de rotor livre, que permite a determinação da reatância de magnetização (X_m) e da resistência que representa as perdas no núcleo (R_m). Elas permanecem constantes para toda a faixa de operação do motor. Em seguida, são calculados os parâmetros para a condição de rotor bloqueado.

Na condição de rotor livre gera-se uma série de valores que satisfazem o circuito equivalente, pois o número de incógnitas é superior ao de equações. Como são possíveis infinitas soluções, aplica-se um conjunto de restrições provenientes do próprio princípio de funcionamento do motor. Em seguida, emprega-se o valor que resulte no menor erro em relação àqueles calculados com as medições do ensaio com rotor livre, como o mais representativo do conjunto amostral. Como garantia adicional da adequação dos parâmetros determinados, eles são refinados com o uso do algoritmo de Marquadt.

Os parâmetros com o rotor bloqueado são obtidos também com a ajuda do algoritmo de Marquadt, usando como estimativa inicial os seus valores obtidos com rotor livre. As grandezas de ajuste são aquelas resultantes dos cálculos com medições provenientes do ensaio.

A partir destes valores limites estima-se os parâmetros para três pontos intermediários com uma técnica de estimação semelhante à citada. Este número de pontos foi determinado como o mínimo suficiente para acelerar o programa digital, bem como, permitir um ajuste adequado com uma função interpolante.

Pode-se, entretanto, determinar os parâmetros para quaisquer pontos de operação da máquina.

A função interpolante utilizada foi a "spline cúbica" devido à sua flexibilidade de ajuste proveniente do chamado "fator de tensão"

[40]. Determinadas as splines, os parâmetros variáveis ficam perfeitamente definidos e, desta forma, as várias grandezas são facilmente calculadas.

A resistência dos enrolamentos do estator (R_1) deve ser medida.

III.3 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS COM ROTOR LIVRE

III.3.1 - Equacionamento para a estimativa inicial

Utilizando-se os valores tratados de corrente, fator de potência ($\cos \varphi_1$) e $\sin \varphi_1$, os parâmetros do circuito equivalente podem ser obtidos através de seu equacionamento e do princípio de funcionamento do motor.

Na condição de rotor livre, a potência mecânica desenvolvida corresponde às perdas por atrito e ventilação (P_{av}) e, assim:

$$P_{av} = (1 - s_{rl}) P_g \quad (3.1)$$

onde:

P_g - potência eletromagnética, disponível no entreferro;

s_{rl} - escorregamento correspondente à situação de rotor livre.

Por outro lado, as perdas por efeito Joule no rotor para a citada condição (P_{Jrl}) são:

$$P_{Jrl} = 3 R_{2rl} I_{2rl}^2 = s_{rl} P_g \quad (3.2)$$

Utilizando-se (3.1) e (3.2) resulta:

$$R_{2rl} = \frac{s_{rl}}{1-s_{rl}} \frac{P_{av}}{3 I_{2rl}^2} \quad (3.3)$$

Sendo:

R_{2rl} - a resistência do enrolamento do rotor para a operação com rotor

livre referida ao estator;

I_{2rl} - corrente de rotor livre, referida ao estator.

Nas condições sob análise, pode-se afirmar que a potência ativa absorvida corresponde às perdas totais, ou seja:

$$3 U I_{1rl} \cos\varphi_{1rl} = 3 R_1 I_{1rl}^2 + 3 R_{2rl} I_{2rl}^2 + P_{av} + P_{fe} \quad (3.4)$$

sendo:

U - tensão de fase;

I_{1rl} - corrente do enrolamento do estator para o rotor livre;

$\cos\varphi_{1rl}$ - fator de potência para o rotor livre.

No modelo de circuito empregado (figura 3.1), as perdas ferro no núcleo (P_{fe}) podem ser representadas através de:

$$P_{fe} = 3 R_m I_m^2 \quad (3.5)$$

onde:

I_m - corrente de magnetização.

Manipulando-se (3.4) e (3.5), obtem-se:

$$R_m \cong \frac{3 U I_{1rl} \cos\varphi_{1rl} - P_{av} - 3 R_1 I_{1rl}^2 - 3 R_{2rl} I_{2rl}^2}{3 I_m^2} \quad (3.6)$$

Supondo-se, como primeira aproximação, que as reatâncias de dispersão do estator (X_{1rl}) e do rotor referida ao estator (X_{2rl}) para a condição de rotor livre são iguais, a potência reativa absorvida pelo motor por fase é:

$$U I_{1rl} \sin\varphi_{1rl} = X_{1rl} I_{1rl}^2 + X_{2rl} I_{2rl}^2 + X_m I_m^2 \quad (3.7)$$

De onde:

$$X_{1rl} = X_{2rl} = X_{rl} = \frac{U I_{1rl} \sin\varphi_{1rl} - X_m I_m^2}{I_{1rl}^2 + I_{2rl}^2} \quad (3.8)$$

A reatância de magnetização (X_m) pode ser calculada por inspeção do circuito equivalente, ou seja:

$$X_m = \sqrt{\left[X_{2r1}^2 + \left(\frac{R_{2r1}}{s} \right)^2 \right] \left(\frac{I_{2r1}}{I_m} \right)^2 - R_m^2} \quad (3.9)$$

A corrente de rotor livre referida ao estator (I_{2r1}), pode ser calculada da análise do circuito equivalente da figura 3.1 através de:

$$I_{2r1} = \sqrt{I_{1r1}^2 + I_m^2 - 2 I_{1r1} I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{1r1})} \quad (3.10)$$

onde:

φ_m - ângulo de fase da corrente de magnetização.

III.3.2 - Estimativa inicial

Deve-se observar que as expressões apresentadas envolvem a corrente de magnetização e respectivo ângulo de fase, que não são obtidos diretamente do ensaio com rotor livre e, portanto, o procedimento utiliza um número de incógnitas superior ao de equações (dois graus de liberdade), resultando em infinitas soluções.

Para resolver o problema, elaborou-se um processo de estimação de estado por minimização de erro, gerando-se valores para ambas as grandezas entre limites fixados em função do seu comportamento físico.

Em outras palavras, a estratégia adotada foi a de incrementar o ângulo de fase entre limites previamente definidos para uma dada corrente de magnetização e calcular os parâmetros para cada par de valores, submetendo os resultados a restrições físicas. A sequência para tanto é: a) Calcular I_{2r1} através de (3.10), a qual depende de I_{1r1} e φ_{1r1} obtidos diretamente do ensaio e de I_m e φ_m estimados; b) Calcular R_m por (3.6), empregando P_{av} proveniente do ensaio e R_1 previamente medido; c) O cálculo de X_m e X_{r1} deve ser feito através

das equações (3.8) e (3.9). Para a sua solução utiliza-se de processo iterativo, adotando-se valores iniciais quaisquer para X_{r1} e X_m . A tolerância utilizada foi de 0,001%.

As restrições físicas a que se submetem os parâmetros calculados são: a) todos os parâmetros obrigatoriamente devem ser positivos; b) a reatância de magnetização é maior do que os demais parâmetros; c) a reatância de dispersão do rotor é maior que a respectiva resistência ($X_{2r1} > R_{2r1}$); e, d) a reatância de dispersão do estator é maior que a respectiva resistência ($X_{1r1} > R_1$).

Ao final da varredura do ângulo de fase, incrementa-se a corrente de magnetização de um valor previamente definido, reiniciando o processo até que seja atingido o limite superior estabelecido para I_m .

Após várias simulações executadas, concluiu-se que os limites de varredura mais adequados são:

a) O ângulo de fase:

$$\varphi_{1r1} \leq \varphi_m < 90^\circ \quad (3.11)$$

b) A corrente de magnetização:

$$\frac{P_{av}}{3U} \leq I_m < I_{1r1} \quad (3.12)$$

Para que o processo de estimativa inicial não seja excessivamente demorado, os incrementos de varredura mais convenientes, determinados após várias simulações, são:

a) O ângulo de fase:

$$\Delta\varphi_m = \frac{90 - \varphi_{1r1}}{100} \quad (3.13)$$

b) A corrente de magnetização

$$\Delta I_m = \frac{P_{av}}{150U} \quad (3.14)$$

Com o conjunto de valores de parâmetros, calcula-se para cada caso o fator de potência ($\cos\varphi_c$), $\sin\varphi_c$ e a corrente absorvida pelo

estator (I_c)

$$\dot{Z}_t = R_t + j X_t = \frac{(R_m + j X_m) (R_{2r1}/s_{r1} + X_{r1})}{(R_m + R_{2r1}/s_{r1}) + j (X_m + X_{r1})} + R_1 + j X_{1r1} \quad (3.15)$$

$$\cos\varphi_c = R_t/Z_t \quad (3.16)$$

$$\text{sen}\varphi_c = X_t/Z_t \quad (3.17)$$

$$I_c = U/Z_t \quad (3.18)$$

Com os valores obtidos em (3.16), (3.17) e (3.18) calcula-se o erro em relação aos resultados do ensaio com rotor livre. O conjunto de parâmetros que apresentar a menor soma dos três erros é considerado como o que melhor caracteriza o comportamento do motor para este ponto de operação.

III.3.3 - Refinamento dos parâmetros

O refinamento dos parâmetros para as condições de rotor livre é feita através de ajustes sucessivos nos parâmetros, empregando-se o algoritmo de Marquadt de modo a obter um erro quadrático inferior a $10^{-6}\%$ em relação às grandezas medidas, ou seja, a corrente do estator, fator de potência e o $\text{sen}\varphi_c$.

Neste ponto, o algoritmo é iterativo. Em outras palavras, os parâmetros ajustados para o seno do ângulo do fator de potência são utilizados como valores iniciais para o ajuste do fator de potência; estes, como os valores iniciais para a corrente e assim, sucessivamente, até que os erros do ajuste de cada grandeza sejam, simultaneamente, inferiores a $10^{-6}\%$.

III.4 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS COM ROTOR BLOQUEADO

Utilizando-se dos valores tratados de corrente, fator de potência e o seno do respectivo ângulo, obtidos no ensaio de rotor bloqueado, bem como dos parâmetros calculados para a condição de rotor livre, utilizados como estimativa inicial, estima-se os parâmetros para esta situação operacional com o algoritmo de Marquadt. O erro quadrático considerado, também neste caso, deve ser inferior a $10^{-6}\%$ em relação à medição executada. Os valores de R_m e de X_m são mantidos constantes.

O mesmo procedimento anterior foi empregado, ou seja, os parâmetros ajustados para o seno do ângulo do fator de potência são utilizados como valores iniciais para o ajuste do fator de potência; estes, como os valores iniciais para a corrente e assim, sucessivamente, até que os erros do ajuste de cada grandeza sejam, simultaneamente, inferiores a $10^{-6}\%$.

III.5 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA PONTOS BÁSICOS INTERMEDIÁRIOS ENTRE O ROTOR LIVRE E BLOQUEADO

Tem-se, até agora, as características da máquina para duas situações operacionais distintas: rotor livre ($s = s_{r1}$) e rotor bloqueado ($s = 1$). Para que seja possível encontrar uma função interpolante tipo "spline cúbica", que reproduza, com boa precisão, o comportamento de uma dada grandeza em toda a faixa de operação da máquina é preciso, ainda, determinar-se parâmetros para, pelo menos, três outros pontos de operação distintos.

Entretanto, é bom lembrar que tanto mais precisa será a característica quanto maior o número de pontos escolhidos, porém, neste caso, o tempo de simulação será maior.

A estimação destes parâmetros segue a mesma filosofia aplicada ao caso do rotor livre; entretanto, efetuou-se algumas modificações, devido, principalmente, ao fato de que se considerou a resistência do estator (R_1), a reatância de magnetização (X_m) e a resistência correspondente às perdas no núcleo (R_m) como constantes em toda a faixa

de operação do motor. Sendo assim, foi necessário estimar-se apenas a resistência do rotor e as reatâncias de dispersão do estator e do rotor.

III.5.1 - Equacionamento para a estimativa

Do circuito equivalente da figura 3.1 verifica-se que o módulo da queda de tensão (ΔU_1) no enrolamento do estator é dada por:

$$\Delta U_1 = \sqrt{[U - Z_m I_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_m)]^2 + [Z_m I_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_m)]^2} \quad (3.19)$$

e, o seu ângulo de fase (φ_{u1}) por:

$$\varphi_{u1} = \text{tg}^{-1} \left[\frac{-Z_m I_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_m)}{U - Z_m I_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_m)} \right] \quad (3.20)$$

onde:

$$\varphi_{zm} = \text{tg}^{-1} \frac{X_m}{R_m} \quad (3.21)$$

Sendo assim, a reatância de dispersão do estator (X_1) é, facilmente, calculada através de:

$$X_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1}{I_1} \right)^2 - R_1^2} \quad (3.22)$$

Por outro lado, definindo-se:

$$\varphi_{a2} = \varphi_m + \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1} \right) - \varphi_{u1} \quad (3.23)$$

Obtem-se a corrente do enrolamento do rotor referida ao estator (I_2) através de:

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 + I_m^2 - 2 I_1 I_m \cos \varphi_{a2}} \quad (3.24)$$

cujo ângulo de fase (φ_2) é dado por:

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1} \right) - \varphi_{u1} - \text{sen}^{-1} \left[\frac{I_m}{I_2} \text{sen } \varphi_{a2} \right] \quad (3.25)$$

Por outro lado, definindo-se:

$$R_2^* = R_2/s \quad (3.26)$$

E, utilizando-se as expressões anteriores e inspecionado-se o circuito da figura 3.1, resulta:

$$R_2^* = \frac{I_m}{I_2} \cos \varphi_2 \left[R_m (\cos \varphi_m + \text{tg} \varphi_2 \text{sen} \varphi_m) + X_m (\text{sen} \varphi_m - \text{tg} \varphi_2 \cos \varphi_m) \right] \quad (3.27)$$

e,

$$X_2 = R_2^* \text{tg} \varphi_2 - \frac{I_m}{I_2 \cos \varphi_2} \left[R_m \text{sen} \varphi_m - X_m \cos \varphi_m \right] \quad (3.28)$$

III.5.2 - Procedimentos para a estimativa

Nas expressões apresentadas também há a presença da corrente de magnetização e respectivo ângulo de fase; desta forma, utilizou-se o mesmo procedimento empregado para a condição de rotor livre, porém alterando-se os limites de varredura e algumas das restrições.

As novas restrições adotadas são:

a) todos os parâmetros devem ser positivos; b) as reatâncias de dispersão devem ser menores que aquelas calculadas para as condições de rotor livre, pois as correntes são maiores e a velocidade menor que para aquela situação; c) a resistência R_2^* deve ser menor que a calculada para a condição de rotor livre.

O procedimento é o que segue:

a) Estima-se um ponto de operação para uma corrente do enrolamento do estator igual a duas vezes a de rotor livre. Este valor de corrente foi adotado devido ao fato de que, nesta situação, a máquina não estará saturada e é próximo da corrente nominal; b) Para o valor de cor-

rente adotado, faz-se a varredura do ângulo de fase entre os limites dados por:

$$60^{\circ} \leq \varphi_m \leq 120^{\circ} \quad (3.29)$$

Esses limites foram fixados a partir dos ensaios realizados em 94 máquinas. Poder-se-ia fazer a varredura de 0 a 180° o que é proibitivo computacionalmente.

A corrente de magnetização assume o valor inicial de sua faixa de varredura definida por:

$$0,2 I_{1rl} \leq I_m \leq I_{1rl} \quad (3.30)$$

Assim, para cada par de valores calcula-se X_1 empregando-se as expressões (3.19) a (3.22), onde R_1 deve ser fornecido; c) Calcula-se R_2^* empregando-se as expressões (3.23) a (3.25) e (3.27); d) Obtem-se X_2 por (3.28); e) O processo continua até que seja coberta toda a faixa de varredura da corrente de magnetização com incrementos iguais aos utilizados para a condição de rotor livre; f) O conjunto de parâmetros que melhor caracteriza o comportamento do motor para a corrente I_1 previamente definida, é escolhido através do menor erro em relação à corrente absorvida pelo estator (I_c) obtida por cálculo, ou seja:

$$Z_t = R_t + j X_t = \frac{(R_m + j X_m) (R_2^* + X_2)}{(R_m + R_2^*) + j (X_m + X_2)} + R_1 + j X_1 \quad (3.31)$$

$$I_c = \frac{U}{Z_t} \quad (3.32)$$

g) No processo descrito, a resistência do rotor referida ao estator (R_2) não foi calculada devido ao desconhecimento do escorregamento; sendo assim, é necessário obtê-lo para definir todas as grandezas. A condição de contorno utilizada para este caso foi admitir que R_2 varia proporcionalmente a $s^{3/2}$ [25], o que corresponde a uma aproximação das curvas previstas pela teoria da gaiola retangular profunda e da dupla gaiola. Sendo assim, tem-se:

$$R_2 = R_{2rl} + (R_{2rb} - R_{2rl}) s^{3/2} \quad (3.33)$$

De onde resulta:

$$R_2^* = \frac{R_{2rl}}{s} + (R_{2rb} - R_{2rl}) s^{1/2} \quad (3.34)$$

A partir de (3.34), o escorregamento é facilmente calculado por métodos numéricos e, desta forma:

$$R_2 = R_2^* \cdot s \quad (3.35)$$

h) Em seguida, estima-se os parâmetros para outros dois níveis de corrente igualmente espaçados com valores entre a de rotor bloqueado e a do dobro da corrente de rotor livre. Aplica-se a estratégia e o equacionamento mostrado anteriormente.

III.6 - ALGORÍTMO

O algoritmo desenvolvido é composto pelas seguintes etapas:

a) Os resultados dos ensaios de rotor livre e de rotor bloqueado devem ser obtidos e tratados adequadamente conforme visto no Capítulo II. A resistência do estator e a velocidade do motor com rotor livre devem ser medidas; b) A seguir, estima-se os parâmetros do motor com rotor livre, como relatado no item III.3; c) Estima-se, agora, os parâmetros do motor com rotor bloqueado conforme estabelecido no item III.4; d) Ídem, para os tres pontos intermediários empregando-se os procedimentos apresentados no item III.5; e) Até este ponto, determinou-se os circuitos equivalentes para cinco situações operacionais; no entanto, é interessante obter-se mais circuitos equivalentes para que o comportamento das várias grandezas desde a partida até a condição de rotor livre possa ser determinado. Sendo assim, deve-se ter valores definidos de X_1 , X_2 e R_2 para cada escorregamento e, portanto, estabelecer a lei de variação destes parâmetros em função da grandeza. A resistência R_2 é dada por (3.33), enquanto que, para X_1 e X_2 , é necessário empregar-se uma função interpolante; a utilizada foi a "spline cúbica" de-

vido à sua flexibilidade de ajuste em função do chamado "fator de tensão"; g) Com os valores dos parâmetros do circuito equivalente para qualquer número de pontos desejados, calcula-se as grandezas do motor, através de:

- corrente do estator

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_t} \quad (3.36)$$

- corrente do rotor referida ao estator

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2} \quad (3.37)$$

- fator de potência

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_t}{Z_t} \quad (3.38)$$

- potência absorvida junto à rede

$$P_{el} = 3 U I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.39)$$

- conjugado desenvolvido

$$M = \frac{90}{\pi n_s} \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 \quad (3.40)$$

n_s - velocidade síncrona;

- potência mecânica

$$P = \frac{2\pi}{60} M \cdot n \quad (3.41)$$

- rendimento

$$\eta = P/P_{el} \quad (3.42)$$

sendo:

$$\dot{Z}_1 = R_1 + j X_1 \quad (3.43)$$

$$Z_2 = R_2/s + j X_2 \quad (3.44)$$

III.7 - OBTENÇÃO DE DADOS A PARTIR DOS ENSAIOS COM ROTOR LIVRE E BLOQUEADO

A figura 3.2 apresenta o diagrama de ligações para a execução dos ensaios de rotor livre e de rotor bloqueado empregando-se um sistema de aquisição de dados.

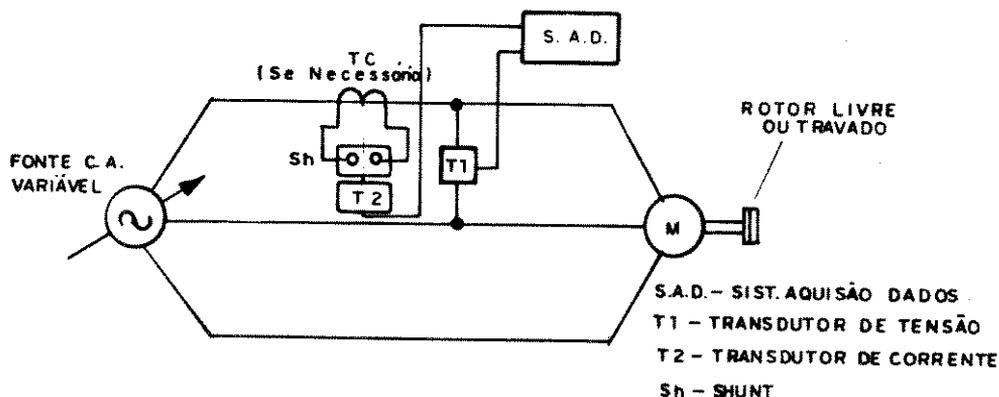


Figura 3.2 - Diagrama de ligações

O ensaio com rotor livre consiste em se diminuir gradativa e discretamente a tensão da fonte C.A, adquirindo os valores instantâneos de corrente e tensão até que o valor eficaz da corrente que decrescia comece a aumentar, como nos procedimentos normalizados. No Capítulo II foi mostrado o procedimento para tratamento dos dados e cálculo das grandezas.

Quanto ao ensaio de rotor bloqueado, aplica-se inicialmente uma tensão tal que circule, no máximo, a corrente nominal no enrola-

mento do estator; em seguida, diminui-se gradativa e discretamente a tensão da fonte, aquisitando os adquirindo os valores instantâneos de corrente e tensão. O procedimento para tratamento dos dados e cálculo das grandezas também foi mostrado no Capítulo II.

Apenas duas leituras adicionais são exigidas para calibrar a placa, as quais correspondem a um nível qualquer de corrente e tensão; para tanto, somente um multímetro é necessário, o que demonstra o grau de simplicidade da metodologia.

Deve-se observar que é possível utilizar-se os instrumentos analógicos tradicionais.

C A P Í T U L O IV

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS A PARTIR DE DADOS DE CATÁLOGOS DE FABRICANTES

RESUMO

Este capítulo apresenta uma metodologia para se obter as características de desempenho de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola categoria N utilizando o circuito equivalente. Os seus parâmetros são estimados a partir de dados de catálogos de fabricantes.

IV.1 - INTRODUÇÃO

Os estudos de substituição ou reforma de um motor implicam na necessidade de se ter um novo motor para comparação. Desta forma, é necessário especificá-lo.

A especificação de um motor deve, necessariamente, se basear em informações fornecidas em catálogos de fabricantes, já que o mesmo não está disponível para ensaios.

Neste sentido, utiliza-se como dados básicos, aqueles normalmente fornecidos nos catálogos, ou seja: potência (P_n) e tensão nominal (U_n), corrente (I_n) e velocidade nominal (n_n), velocidade síncrona (n_s), fator de potência ($\cos\phi_{1n}$) e rendimento nominal (η_n), corrente de partida (I_p), conjugado máximo (M_k) e de partida (M_p).

A exemplo do método mostrado no capítulo anterior, a modelagem proposta determina os parâmetros do circuito equivalente em "T" para cada ponto operacional do motor, porém o equacionamento não permite uma solução de forma determinística, pois o número de incógnitas

é superior ao de equações. De forma a contornar tal inconveniente, elaborou-se, também, um tratamento estatístico, gerando-se valores pseudo-aleatórios de grandezas adotadas como básicas, porém com algumas diferenças em relação a metodologia anterior, devido à natureza dos dados.

Ressalta-se que a estrutura do procedimento torna possível a determinação e inclusão do comportamento dos vários parâmetros em função do Efeito Pelicular e da saturação, em toda a faixa de operação compreendida entre a partida e rotor livre. Estes, entretanto, são adotados como constantes entre a condição nominal e a de rotor livre.

A formulação é válida para motores com rotor gaiola categoria N [14].

IV.2 - ESTRUTURA BÁSICA DO MÉTODO

Considerando-se que os parâmetros do circuito equivalente do motor se alteram para cada ponto de operação, o método desenvolvido consiste em se determinar os parâmetros para cada um deles, a exemplo da metodologia anterior.

Inicialmente, é necessário que isto seja feito para as condições ditas "nominais" para cálculo da reatância de magnetização (X_m) e da resistência que representa as perdas no núcleo (R_m) que são consideradas constantes para toda a faixa de operação do motor e estimadas para esta situação. Em seguida, são calculados os parâmetros para a condição de partida, obtendo-se os valores limites dos parâmetros variáveis (ou seja, R_2 , X_1 e X_2).

No primeiro caso gera-se uma série de parâmetros que, utilizados no circuito equivalente, permitem calcular grandezas que são comparadas com dados de catálogos. Considera-se como sendo os parâmetros do circuito equivalente naqueles pontos de operação, os que produzirem valores das grandezas calculadas com menor erro em relação aos valores apresentados nos catálogos. Como garantia adicional da adequabilidade dos parâmetros determinados, eles são refinados com o uso do algoritmo de Marquadt. Os parâmetros correspondentes à partida são ob-

tidos da mesma forma, aplicando-se, porém, as grandezas respectivas.

Um terceiro ponto de operação é estimado para a condição de conjugado máximo visando estabelecer um ponto de inflexão para a característica conjugado em função do escorregamento.

A partir destes valores básicos estima-se os parâmetros para dois pontos intermediários com uma técnica de estimação semelhante à citada. Este número de pontos foi determinado como o mínimo suficiente para acelerar o programa digital, bem como, permitir um ajuste adequado com uma função interpolante.

Pode-se, entretanto, determinar os parâmetros para quaisquer pontos de operação da máquina.

IV.3 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA AS CONDIÇÕES NOMINAIS

IV.3.1 - Equacionamento para a estimativa inicial

O equacionamento para estimação inicial (Anexo I) baseia-se no circuito equivalente em "T" utilizando os dados fornecidos nos catálogos para as condições nominais:

a) Reatância de magnetização

$$X_m = \frac{U_n^2 \eta_n \cos \varphi_n}{\left[\sin \varphi_n - \left(\frac{s_n}{s_k} \right) \cos \varphi_n \right] P_n} \quad (4.1)$$

b) Corrente no enrolamento do rotor

$$I_{2n} = \sqrt{I_n^2 + I_{mn}^2 - 2 I_n I_{mn} \cos(\varphi_{mn} - \varphi_n)} \quad (4.2)$$

$$\varphi_{2n} = \varphi_n - \sin^{-1} \left[\frac{I_{mn}}{I_{2n}} \sin(\varphi_{mn} - \varphi_n) \right] \quad (4.3)$$

c) Resistência do enrolamento do rotor

$$R_{2N} = \frac{s_n}{1 - s_n} \frac{P_n}{3 I_{2n}^2} \quad (4.4)$$

d) Resistência do ramo magnetizante

$$R_m = \frac{\frac{I_{2n} R_{2n}}{\cos\varphi_{2n} s_n} + I_{mn} X_m (\operatorname{tg}\varphi_{2n} \cos\varphi_{mn} - \operatorname{sen}\varphi_{mn})}{I_{mn} (\cos\varphi_{mn} + \operatorname{tg}\varphi_{2n} \operatorname{sen}\varphi_{mn})} \quad (4.5)$$

e) Reatância de dispersão do enrolamento do rotor

$$X_{2n} = \frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{tg}\varphi_{2n} - \frac{I_{mn}}{I_{2n} \cos\varphi_{2n}} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mn} - X_m \cos\varphi_{mn}) \quad (4.6)$$

f) Resistência do enrolamento do estator

$$R_1 = \frac{U - I_{2n} \left[\frac{R_{2n}}{s_n} (\cos\varphi_{2n} + \operatorname{tg}\varphi_n \operatorname{sen}\varphi_{2n}) + X_{2n} (\operatorname{sen}\varphi_{2n} - \operatorname{tg}\varphi_n \cos\varphi_{2n}) \right]}{I_n / \cos\varphi_n} \quad (4.7)$$

g) Reatância de dispersão do enrolamento do estator

$$X_{1n} = R_1 \operatorname{tg}\varphi_n + \frac{I_{2n}}{I_n \cos\varphi_n} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{sen}\varphi_{2n} - X_{2n} \cos\varphi_{2n} \right) \quad (4.8)$$

O escorregamento s_k pode ser calculado a partir da equação de Klöss [18], escrita para as condições nominais, ou seja:

$$\frac{M_n}{M_k} = \frac{2 \left(1 + \frac{R_1}{R_{2n}} s_k \right)}{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n} + 2 \frac{R_1}{R_{2n}} s_k} \quad (4.9)$$

De acordo com [18], pode-se utilizar como aproximação, quando não se conhece com exatidão as resistências, que:

$$R_1 = R_{2n} \quad (4.10)$$

e, assim, após alguma manipulação algébrica, resulta:

$$s_k = s_n \frac{\bar{M}_k + \sqrt{\bar{M}_k^2 - [2 s_n (1 - \bar{M}_k) + 1]}}{2 s_n (1 - \bar{M}_k) + 1} \quad (4.11)$$

onde:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (4.12)$$

$$M_n = \frac{60 P_n}{2 \pi n_n} \quad (4.13)$$

e,

$$\bar{M}_k = \frac{M_k}{M_n} \quad (4.14)$$

IV.3.2 - Estimativa inicial

Nota-se nas expressões apresentadas, que os parâmetros dependem de I_{mn} e de φ_{mn} , correspondentes às condições nominais e, portanto, é necessário determiná-los.

Como R_{2n}/s_n é muito maior do que X_{2n} , X_{1n} e R_1 , a defasagem entre E_{2n} e U_n é pequena. Além disto, sendo X_m muito maior do que R_m para este circuito, o valor do ângulo da corrente do ramo magnetizante (φ_{mn}) situa-se próximo a noventa graus.

O módulo da corrente do ramo magnetizante (I_{mn}) varia muito pouco entre a condição em vazio e plena carga [18], permitindo, assim, estimar seu valor em primeira aproximação, como o quociente entre a

tensão de alimentação e X_m ; esta consideração é possível, uma vez que X_m é muito maior que R_m , R_1 e X_{1n} . Desta forma, é possível pesquisar os valores de φ_{mn} e I_{mn} que satisfaçam as expressões (4.2) a (4.8) em intervalos previamente definidos.

Após várias simulações executadas, concluiu-se que os limites de varredura mais adequados são:

$$60^\circ < \varphi_{mn} < 120^\circ \quad (4.15)$$

e,

$$0,5 \frac{U_n}{X_m} < I_{mn} < 1,5 \frac{U_n}{X_m} \quad (4.16)$$

obedecendo-se às seguintes restrições: a) Todos os parâmetros devem ser positivos; b) A reatância de magnetização (X_m) deve ser maior que os demais parâmetros; c) A reatância de dispersão do rotor referida ao estator (X_{2n}) deve ser maior que a respectiva resistência (R_{2n}); d) A reatância de dispersão do estator (X_{1n}) deve ser maior que a respectiva resistência (R_1).

Para a determinação de φ_{mn} , utiliza-se o algoritmo descrito a seguir: a) Fixa-se o valor de I_{mn} no início de seu intervalo; b) Para este valor, varia-se o valor de φ_{mn} com um passo de iteração de $0,5^\circ$; c) A cada par de valores de I_{mn} e φ_{mn} , determina-se os valores de parâmetros e as grandezas dadas pelas expressões de (4.1) à (4.14); d) Attingido o limite superior da faixa de variação de φ_{mn} , incrementa-se I_{mn} com um passo de iteração igual a $(U_n/X_m)/100$; e) O processo será repetido até o limite superior da faixa de variação de I_{mn} ; f) Nestas condições, verifica-se a frequência de ocorrências (f_i) dos valores de φ_{mn} que, juntamente com os de I_{mn} , satisfazem à todas as restrições apresentadas simultaneamente. Dessa maneira constroi-se uma curva f_i em função de φ_{mn} ; g) Com o conjunto amostral, determina-se o valor médio e o desvio padrão correspondente, através de:

$$\bar{\varphi}_{mn} = \frac{\sum f_i \varphi_{mni}}{\sum f_i} \quad (4.17)$$

e,

$$\sigma\varphi_{mn} = \sqrt{\frac{\sum f_i (\varphi_{mni} - \varphi_{mn})^2}{\sum f_i - 1}} \quad (4.18)$$

onde:

- $\bar{\varphi}_{mn}$ = valor médio de φ_{mn} ;
- φ_{mni} = valores de φ_{mn} encontrados;
- $\sigma\varphi_{mn}$ = desvio padrão.

Utilizando-se o mesmo procedimento, pode-se determinar o valor médio de I_{mn} , correspondente a $\bar{\varphi}_{mn}$, alterando-se apenas o intervalo de φ_{mn} , ou seja:

$$\bar{\varphi}_{mn} - 3 \sigma\varphi_{mn} < \varphi_{mn} < \bar{\varphi}_{mn} + 3 \sigma\varphi_{mn} \quad (4.19)$$

Assim, deve-se repetir os itens a, b, c, d e e anteriores para I_{mn} variando a cada φ_{mn} e seguir o processo na letra h; h) verifica-se a frequência de ocorrências (f_i) e os correspondentes valores de I_{mn} que, juntamente com os de φ_{mn} , satisfazem as restrições, simultaneamente; i) Utilizando-se o novo conjunto de amostras, obtêm-se:

$$\bar{I}_{mn} = \frac{\sum f_i I_{mni}}{\sum f_i} \quad (4.20)$$

onde:

- \bar{I}_{mn} - valor médio de I_{mn} ;
- I_{mni} - valores de I_{mn} encontrados.

Os valores médios encontrados correspondem aos de ocorrência mais provável, relativamente à operação do motor nesta condição de funcionamento sob análise. Desta forma, aplicando-os às expressões (4.1) a (4.14), obtêm-se os valores dos parâmetros do circuito equivalente, os quais são adotados como estimativa inicial.

IV.3.3 - Refinamento dos parâmetros

O refinamento dos parâmetros para as condições nominais é feita através de ajustes sucessivos, nos parâmetros, empregando-se o algoritmo de Marquadt de modo a obter um erro quadrático inferior a $10^{-6}\%$ em relação às grandezas medidas, ou seja, a corrente do estator, o fator de potência, a potência mecânica, rendimento e conjugado nominais.

Neste ponto, o algoritmo é iterativo. Em outras palavras, os parâmetros ajustados para o fator de potência são utilizados como valores iniciais para o ajuste da potência mecânica; estes, como valores iniciais para o conjugado. Os obtidos para o conjugado, são os valores iniciais para o rendimento; os destes, para a corrente e assim, sucessivamente, até que os erros do ajuste de cada grandeza sejam, simultaneamente, inferiores a $10^{-6}\%$.

IV.4 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA AS CONDIÇÕES DE PARTIDA

IV.4.1 - Equacionamento para a estimativa inicial

O equacionamento para estimação inicial também se baseia no circuito equivalente em "T" e princípio de funcionamento da máquina e emprega os dados fornecidos nos catálogos para as condições de partida. A dedução encontra-se no Anexo I e ele é o que segue:

a) Módulo da queda de tensão no estator

$$\Delta U_{1p} = \sqrt{[U - I_{mp} Z_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_{mp})]^2 + [-I_{mp} Z_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_{mp})]^2} \quad (4.21)$$

onde:

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} \quad (4.22)$$

e,

$$\varphi_{zm} = \text{tg}^{-1} \frac{X_m}{R_m} \quad (4.23)$$

b) Ângulo da queda de tensão no estator

$$\varphi_{elp} = \text{tg}^{-1} \left[\frac{-I_{mp} Z_m \text{sen}(\varphi_{zm} - \varphi_{mp})}{U - I_{mp} Z_m \text{cos}(\varphi_{zm} - \varphi_{mp})} \right] \quad (4.24)$$

c) Reatância de dispersão do enrolamento do estator

$$X_{1p} = \sqrt{\left(\frac{E_{1p}}{I_p}\right)^2 - R_1^2} \quad (4.25)$$

d) Módulo da corrente do enrolamento do rotor

$$I_{2p} = \sqrt{I_p^2 + I_{mp}^2 - 2 I_p I_{mp} \text{cos}(\varphi_{mp} - \varphi_{1p})} \quad (4.26)$$

onde:

$$\varphi_{1p} = \varphi_{z1p} - \varphi_{elp} \quad (4.27)$$

e,

$$\varphi_{z1p} = \text{tg}^{-1} \frac{X_{1p}}{R_1} \quad (4.28)$$

e) Ângulo da corrente do enrolamento do rotor

$$\varphi_{2p} = \varphi_{2p} - \text{sen}^{-1} \left[\frac{I_{mp}}{I_{2p}} \text{sen}(\varphi_{mp} - \varphi_{1p}) \right] \quad (4.29)$$

f) Resistência do enrolamento do rotor

$$R_{2p} = \frac{I_{mp} \text{cos}\varphi_{2p}}{I_{2p}} \left[R_m (\text{cos}\varphi_{mp} + \text{tg}\varphi_{2p} \text{sen}\varphi_{mp}) + X_m (\text{sen}\varphi_{mp} - \text{tg}\varphi_{2p} \text{cos}\varphi_{mp}) \right] \quad (4.30)$$

g) Reatância de dispersão do enrolamento do rotor

$$X_{2p} = R_{2p} \operatorname{tg}\varphi_{2p} - \frac{I_{mp}}{I_{2p} \cos\varphi_{2p}} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mp} - X_m \cos\varphi_{mp}) \quad (4.31)$$

IV.4.2 - Estimativa inicial

A estimação destes parâmetros segue a mesma filosofia aplicada às condições nominais; entretanto, efetuou-se algumas modificações, devido, principalmente, ao fato de que se considerou a resistência do estator (R_1), a reatância de magnetização (X_m) e a resistência correspondente às perdas no núcleo (R_m) como constantes em toda a faixa de operação do motor. Sendo assim, foi necessário estimar-se apenas a resistência do enrolamento do rotor (R_2), e as reatâncias de dispersão dos enrolamentos do estator e do rotor (X_1 e X_2 , respectivamente).

Assim, com procedimento análogo ao utilizado para o motor operando nas condições nominais, porém estabelecendo os intervalos de pesquisa de I_{mp} e φ_{mp} em:

$$60^\circ < \varphi_{mp} < 120^\circ \quad (4.32)$$

e,

$$0,01 I_{mn} < I_{mp} < I_{mn} \quad (4.33)$$

Esses intervalos foram definidos após várias simulações executadas.

Impondo-se as seguintes restrições:

$$a) X_{1p} > R_1 \text{ e } X_{1p} < X_{1n}; \quad (4.34)$$

$$b) \varphi_{1p} > \varphi_{1n}; \quad (4.35)$$

$$c) R_{2p} > R_{2n}; \quad (4.36)$$

$$d) X_{2p} > R_{2p} \text{ e } X_{2n} < X_{2n} \quad (4.37)$$

determina-se os parâmetros variáveis com o escorregamento na condição de partida empregando-se as expressões (4.21) à (4.31).

IV.4.3 - Refinamento dos parâmetros

Utilizando-se dos valores de corrente e conjugado de partida fornecidos nos catálogos, bem como da estimativa inicial dos parâmetros para a condição de partida, estima-se os parâmetros para esta situação operacional com o auxílio do algoritmo de Marquadt. O erro quadrático considerado, também neste caso, deve ser inferior a $10^{-6}\%$ em relação aos dados de entrada.

O mesmo procedimento empregado para as condições nominais foi utilizado nesse caso, ou seja, os parâmetros ajustados para a corrente de partida são utilizados como valores iniciais para o ajuste do conjugado de partida e assim, sucessivamente, até que os erros de ajuste de cada grandeza sejam, simultaneamente, inferiores a $10^{-6}\%$.

IV.5 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA AS CONDIÇÃO DE CONJUGADO MÁXIMO

IV.5.1 - Equacionamento para a estimativa inicial

Definindo-se:

$$R_2^* = R_2/s_k \quad (4.38)$$

E, utilizando-se as expressões anteriores e inspecionado-se o circuito equivalente da figura 3.1, resulta:

$$Z_t = R_t + j X_t = \frac{(R_m + j X_m) (R_2^* + X_2)}{(R_m + R_2^*) + j (X_m + X_2)} + R_1 + j X_1 \quad (4.39)$$

Pode-se definir o conjugado eletromagnético desenvolvido a partir destes parâmetros do circuito equivalente através de:

$$M = \frac{90}{\pi n_s} \frac{U_n^2}{(Z_2^*)^2} \left(1 - \frac{Z_1}{Z_t}\right)^2 R_2^2 \quad (4.40)$$

onde:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad (4.41)$$

$$z_2^* = \sqrt{R_2^{*2} + X_2^2} \quad (4.42)$$

IV.5.2 - Procedimentos para a estimativa

Para o conjugado máximo, sabe-se que R_1 , R_m e X_m são valores constantes, previamente calculados, devendo-se estimar R_2 , X_1 e X_2 para tal condição. Neste caso, utiliza-se também o algoritmo de Marquadt, tendo como base a expressão (4.42) e sendo:

$$M = M_k \quad (4.43)$$

Os valores iniciais dos parâmetros são os correspondentes aqueles calculados para as condições nominais, considerando-se que:

$$R_{2inicial}^* = \frac{R_{2n}}{s_n} \quad (4.44)$$

Após o refinamento por Marquadt, o escorregamento correspondente ao conjugado máximo (s_k) é calculado através da solução de contorno semelhante à apresentada no capítulo III, ou seja:

$$R_2^* = \frac{R_{2n}}{s_k} + (R_{2rb} - R_{2n}) s_k^{1/2} \quad (4.45)$$

Obtido s_k através de processos numéricos, a resistência R_2 é calculada através de:

$$R_2 = R_2^* s_k \quad (4.46)$$

IV.6 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA PONTOS INTERMEDIÁRIOS BÁSICOS ENTRE A PARTIDA E AS CONDIÇÕES NOMINAIS

Como citado anteriormente, a metodologia requer os parâmetros de dois pontos intermediários entre a partida e condições nominais.

Isto é necessário para que, a posteriori, determine-se uma função interpolante e, assim, obtenha-se os seus comportamentos durante toda a faixa de funcionamento.

IV.6.1 - Equacionamento para a estimativa

O equacionamento é o mesmo desenvolvido para o item III.5, o qual será repetido a seguir para uma maior facilidade no entendimento do algoritmo de estimação. O módulo da queda de tensão no enrolamento do estator é dada por:

$$\Delta U_1 = \sqrt{[U - Z_m I_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_m)]^2 + [Z_m I_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_m)]^2} \quad (4.47)$$

e, o seu ângulo de fase por:

$$\varphi_{e1} = \text{tg}^{-1} \left[\frac{-Z_m I_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_m)}{U - Z_m I_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_m)} \right] \quad (4.48)$$

onde:

$$\varphi_{zm} = \text{tg}^{-1} \frac{X_m}{R_m} \quad (4.49)$$

Sendo assim, a reatância de dispersão do enrolamento do estator (X_1) é calculada através de:

$$X_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1}{I_1}\right)^2 - R_1^2} \quad (4.50)$$

Por outro lado, definindo-se:

$$\varphi_{a1} = \varphi_m - \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1}\right) - \varphi_{e1} \quad (4.51)$$

Obtem-se a corrente do enrolamento do rotor referida ao estator (I_2) através de:

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 + I_m^2 - 2 I_1 I_m \cos \varphi_{a2}} \quad (4.52)$$

cujo ângulo de fase (φ_2) é dado por:

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1} \right) - \varphi_{e1} - \text{sen}^{-1} \left[\frac{I_m}{I_2} \text{sen } \varphi_{a2} \right] \quad (4.53)$$

Por outro lado, definindo-se:

$$R_2^* = R_2/s \quad (4.54)$$

E, utilizando-se as expressões anteriores e inspecionando-se o circuito equivalente da figura 3.1, resulta:

$$R_2^* = \frac{I_m}{I_2} \cos \varphi_2 [R_m (\cos \varphi_m + \text{tg} \varphi_2 \text{sen} \varphi_m) + X_m (\text{sen} \varphi_m - \text{tg} \varphi_2 \cos \varphi_m)] \quad (4.55)$$

$$e, \quad X_2 = R_2^* \text{tg} \varphi_2 - \frac{I_m}{I_2 \cos \varphi_2} [R_m \text{sen} \varphi_m - X_m \cos \varphi_m] \quad (4.56)$$

IV.6.2 - Procedimentos para a estimativa

Nas expressões apresentadas também há a presença da corrente de magnetização e respectivo ângulo de fase. Desta forma, utilizou-se o mesmo procedimento empregado para as condições nominais e as de partida, porém alterando-se os limites de varredura e algumas das restrições.

As novas restrições adotadas são:

a) todos os parâmetros devem ser positivos;

$$b) X_1 > X_{1p} \quad e \quad X_1 < X_{1n} \quad (4.57)$$

$$c) \varphi_1 > \varphi_{1n} \quad e \quad \varphi_1 < \varphi_{1p} \quad (4.58)$$

$$d) \varphi_2 > \varphi_{2n} \quad e \quad \varphi_2 < \varphi_{2p} \quad (4.59)$$

$$e) R_2 > R_{2p} \quad e \quad R_2 < R_{2n}/sn \quad (4.60)$$

$$f) X_2 > X_{2p} \quad e \quad X_2 < X_{2n} \quad (4.61)$$

O procedimento é o que segue: a) Estima-se, inicialmente, um

ponto de operação para uma corrente do enrolamento do estator com um valor entre a corrente de partida e aquela correspondente ao conjugado máximo; o segundo estará entre esta condição e a nominal. Tal artifício foi utilizado visando uma melhor distribuição das condições operacionais. b) Para o valor de corrente adotado, inicia-se a varredura do ângulo de fase entre os limites dados por:

$$60^\circ \leq \varphi_m \leq 120^\circ \quad (4.62)$$

A corrente de magnetização assume o valor inicial de sua faixa de varredura definida por:

$$0,2 I_{mp} \leq I_m \leq 1,5 I_{mn} \quad (4.63)$$

Para cada par de valores calcula-se X_1 empregando-se as expressões (4.47) a (4.50); c) Calcula-se R_2^* empregando-se as expressões (4.51) a (4.53) e (4.55); d) Obtêm-se X_2 por (4.56); e) O processo continua até que seja coberta toda a faixa de varredura da corrente de magnetização. Os incrementos são os mesmos utilizados para a condições nominais; f) Nestas condições, verifica-se a frequência de ocorrências (f_i) dos valores de φ_m que, juntamente com os de I_m , satisfazem à todas as restrições apresentadas simultaneamente. Dessa maneira constrói-se uma curva f_i em função de φ_{mn} ; g) Com o conjunto amostral, determina-se o valor médio e o desvio padrão correspondente. Utilizando-se o mesmo procedimento, pode-se determinar o valor médio de I_m , correspondente a $\bar{\varphi}_m$, alterando-se apenas o intervalo de φ_m , ou seja:

$$\bar{\varphi}_m - 3 \sigma\varphi_m < \varphi_m < \bar{\varphi}_m + 3 \sigma\varphi_m \quad (4.64)$$

onde $\sigma\varphi_m$ é o desvio padrão da média de φ_m

Deve-se repetir os itens a, b, c, d e e anteriores para I_{mn} variando a cada φ_{mn} e seguir o processo na letra h; h) A seguir, verifica-se a frequência de ocorrências (f_i) e os correspondentes valores de I_m que, juntamente com os de φ_m , satisfazem as restrições, simultaneamente; i) Utilizando-se o novo conjunto de amostras,

obtêm-se o valor médio de I_m , o qual corresponde ao de ocorrência mais provável, relativamente à operação do motor nesta condição de funcionamento sob análise; j) Aplica-se tais valores às expressões (4.39), obtendo-se os valores dos parâmetros do circuito equivalente; g) No processo descrito, a resistência do rotor referida ao estator (R_2) não foi calculada devido ao desconhecimento do escorregamento; sendo assim, é necessário obtê-la para definir todas as grandezas. A solução de contorno utilizada para este caso foi a mesma utilizada no método anterior, ou seja:

$$R_2^* = \frac{R_{2r1}}{s} + (R_{2rb} - R_{2r1})s^{1/2} \quad (4.65)$$

A partir de (4.65), o escorregamento é facilmente calculado por métodos numéricos e, desta forma:

$$R_2 = R_2^* \cdot s \quad (4.66)$$

IV.7 - ALGORÍTMO

O algoritmo desenvolvido é composto pelas seguintes etapas:

a) Após o fornecimento dos dados de catálogo, estima-se os parâmetros do motor para as condições nominais, como relatado no item IV.3; b) Estima-se os parâmetros do motor para as condições conforme estabelecido no item IV.4; c) Ídem, para para a condição de conjugado máximo utilizando-se o algoritmo descrito em IV.5; d) Em seguida estima-se os dois pontos intermediários empregando-se os procedimentos apresentados no item IV.6; e) Até este ponto, determinou-se os circuitos equivalentes para cinco situações operacionais; no entanto, é interessante obter-se mais circuitos equivalentes para que o comportamento das várias grandezas desde a partida até a condições nominais possa ser determinado. Sendo assim, deve-se ter valores definidos de X_1 , X_2 e R_2 para cada escorregamento e, portanto, estabelecer a lei de variação destes parâmetros em função da grandeza. A resistência R_2^* é dada por (4.65), enquanto que, para X_1 e X_2 , é necessário empregar-se uma função interpo-

lante; a utilizada foi a "spline cúbica" a exemplo da metodologia anterior f) Com os valores dos parâmetros do circuito equivalente para qualquer número de pontos desejados, calcula-se as grandezas do motor, através das expressões (3.36) à (3.44), fornecidas no Capítulo III.

C A P Í T U L O V

VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS

RESUMO

De forma a verificar a sensibilidade, aplicabilidade e exatidão das metodologias desenvolvidas, este capítulo apresenta estudos comparativos entre os seus resultados e os provenientes de ensaios.

V.1 - INTRODUÇÃO

Os desenvolvimentos teóricos relatados nos capítulos anteriores são avaliados a seguir em termos experimentais, visando verificar as suas sensibilidades, aplicabilidades e exatidões. Para tanto, foi elaborado um estudo comparativo entre os resultados obtidos com o emprego das metodologias e os de ensaios normalizados.

No caso da segunda metodologia, as grandezas básicas (potência, tensão e corrente nominais, velocidades síncrona e nominal, corrente de partida e conjugado máximo) foram obtidas através dos ensaios, utilizando-as como se fossem dados fornecidos em catálogos de fabricantes.

Note-se que tal atitude apresenta como aspecto positivo, tornar possível avaliar-se os motores de forma individual em uma condição específica de trabalho, por exemplo, em uma certa temperatura, permitindo adotar-se uma mesma base para comparações. Além disto, empregando-se apenas dados de catálogos para as comparações, poder-se-ia levantar algumas restrições quanto às suas validades, conforme comentado no capítulo II.

O universo de estudo de ambas as metodologias é o mesmo do Capítulo II (vide item II.4.2.5 e figura 2.5).

V.2 - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA QUE UTILIZA DADOS DOS ENSAIOS COM ROTOR LIVRE E ROTOR BLOQUEADO

V.2.1 - Exemplo de aplicação

A título de exemplificação, apresenta-se os resultados da aplicação da metodologia para um motor de 15 c.v, cujas características foram obtidas através de ensaios realizados com os procedimentos da IEEE-112 - método B e relatados no Anexo II. Os dados nominais obtidos são: Potência nominal - 15 C.v; velocidade nominal - 1169 rpm; Corrente nominal - 22,9 A; Corrente de rotor bloqueado - 6,3 pu; Conjugado nominal - 90,0 N.m; Conjugado de rotor bloqueado - 2,3 pu; Conjugado máximo - 3,4 pu; $\cos\phi$ a plena carga - 73,5%; η a plena carga - 85,9%. A tensão nominal é 440 V, a frequência nominal de 60 Hz e a velocidade síncrona igual a 1200 rpm.

Os resultados dos ensaios de rotor livre e bloqueado são os mostrados na figura 5.1.

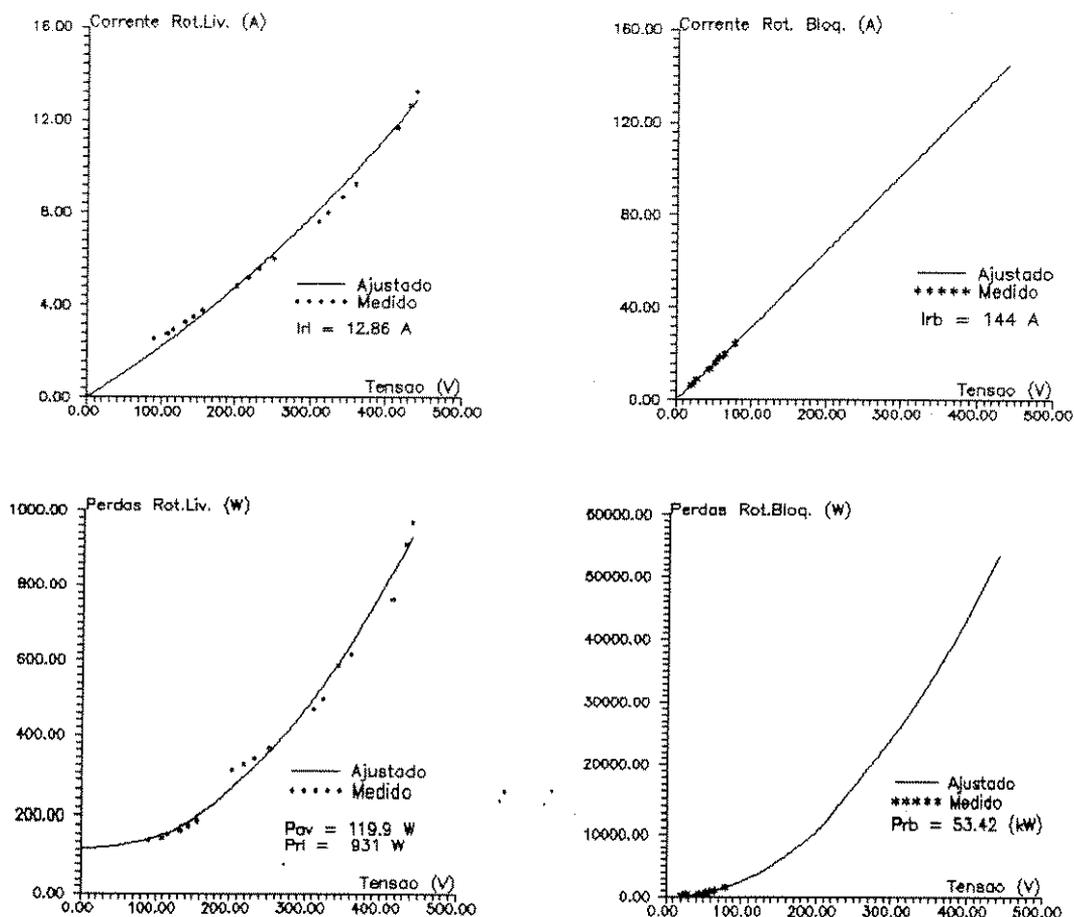


Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de rotor livre e bloqueado

A aplicação da metodologia resultou nos seguintes parâmetros (valores por fase):

a) Parâmetros invariáveis com o efeito pelicular e com a saturação.

$$R_1 = 0,4365 \Omega \text{ (medido)}; R_m = 1,201 \Omega; X_m = 18,06 \Omega$$

b) Condição de rotor livre

$$R_{2rl} = 0,3379 \Omega; X_{2rl} = 1,6438 \Omega; X_{1rl} = 1,6395 \Omega$$

c) Condição de rotor bloqueado

$$R_{2p} = 0,4619 \Omega; X_{2p} = 0,8639 \Omega; X_{1p} = 0,7086 \Omega$$

O comportamento destes parâmetros em função do escorregamento, e da corrente é ilustrado na figura 5.2 entre as condições de rotor bloqueado e livre (valores por fase).

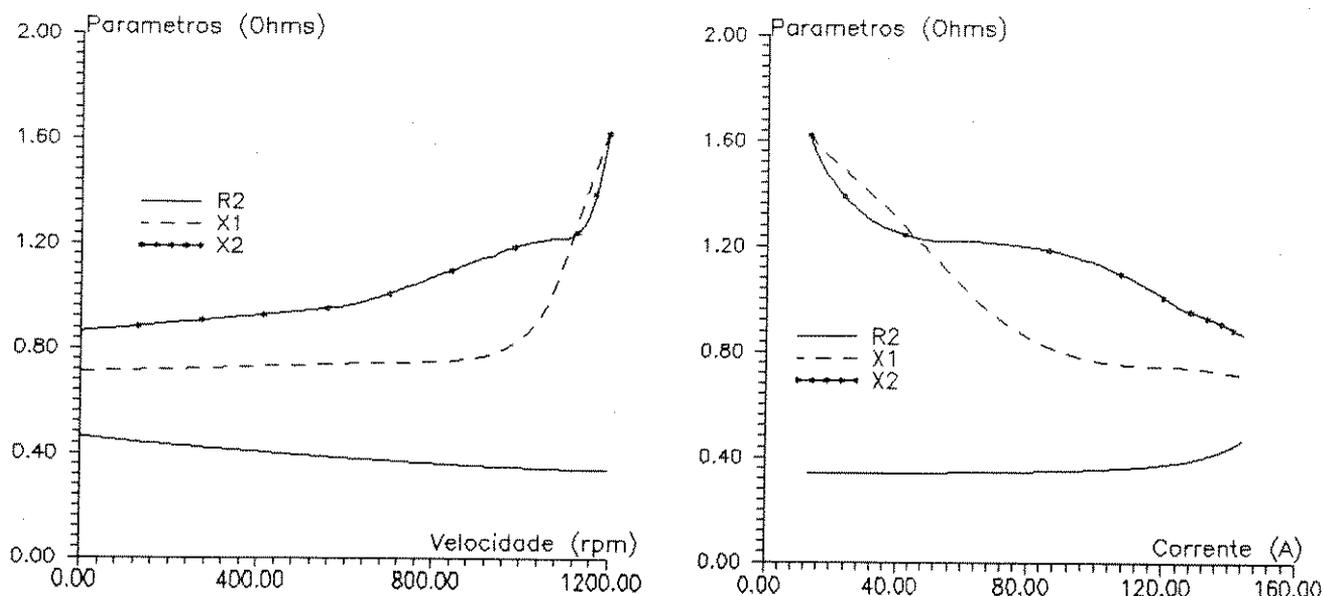


Figura 5.2 - Comportamento dos parâmetros em função da velocidade e da corrente (valores por fase).

As figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram as curvas $M = f(n)$, $I_1 = f(n)$, η e $\cos \varphi_1 = f(n)$ e $P_{e1} = f(n)$, respectivamente, obtidas pela metodologia e resultados de ensaios.

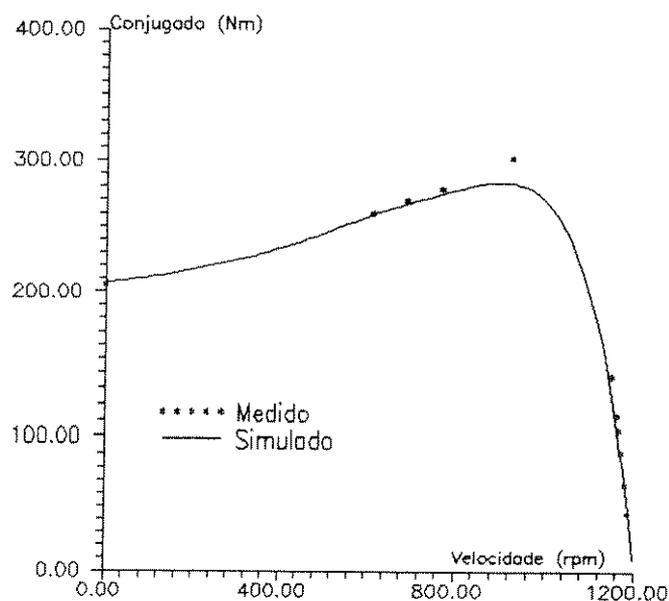


Figura 5.3 - Curva $M = f(n)$, obtida pela metodologia desenvolvida. Motor de 15 c.v.

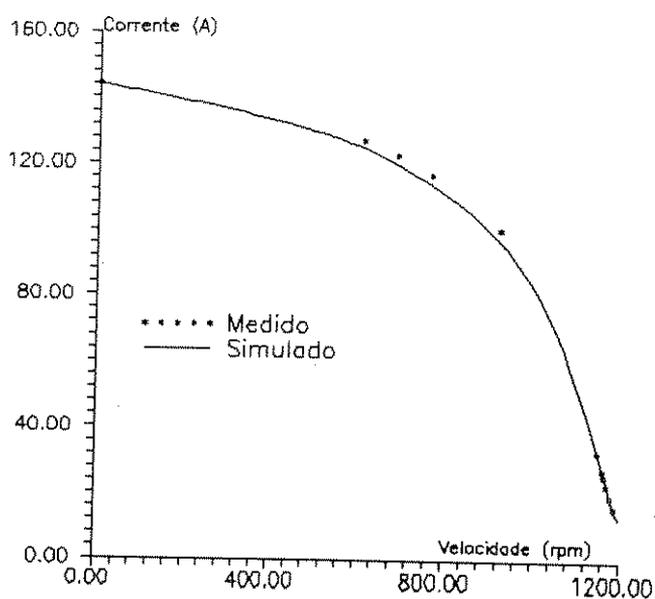


Figura 5.4 - Curva $I_1 = f(n)$, obtida pela metodologia desenvolvida. Motor de 15 c.v.

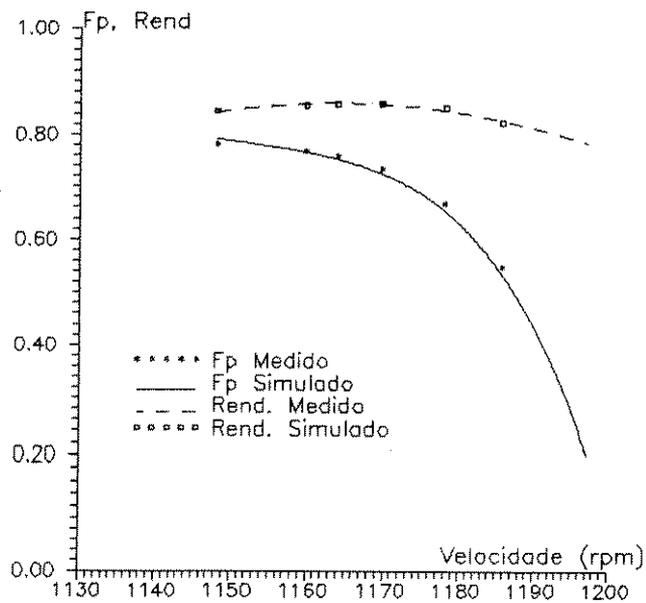


Figura 5.5 - Curvas $\eta = f(n)$ e $\cos \varphi_1 = f(n)$, obtidas pela metodologia desenvolvida. Motor de 15 c.v.

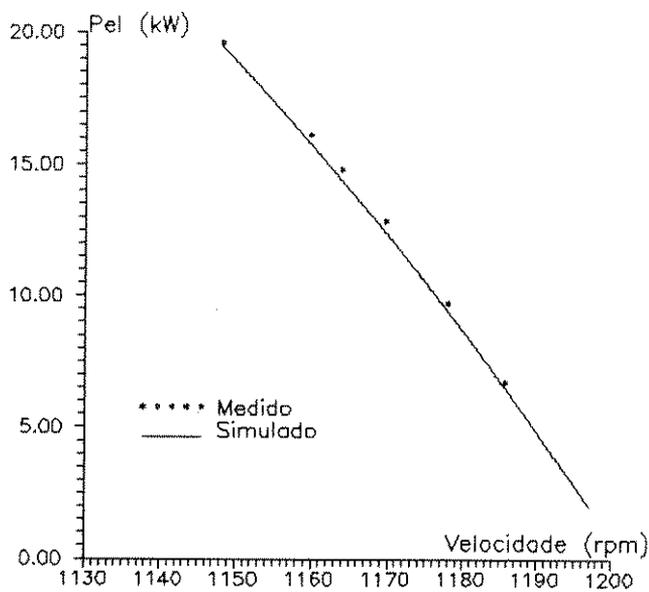


Figura 5.6 - Curva $P_{el} = f(n)$, obtida pela metodologia desenvolvida. Motor de 15 c.v.

V.2.2 - Resultados gerais

As figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam os erros médios da aplicação da metodologia comparativamente aos resultados de ensaios, para as curvas $M = f(n)$, $I_1 = f(n)$ e $\eta = f(n)$, respectivamente. Ressalta-se que a análise é válida para a região de operação em regime permanente dos motores.

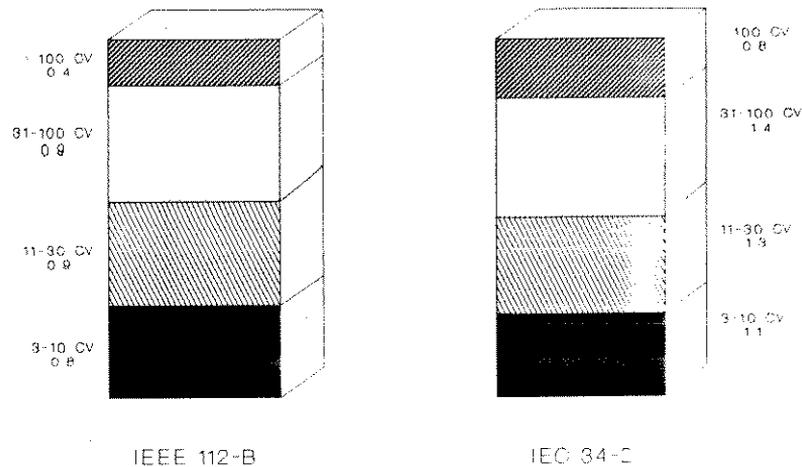
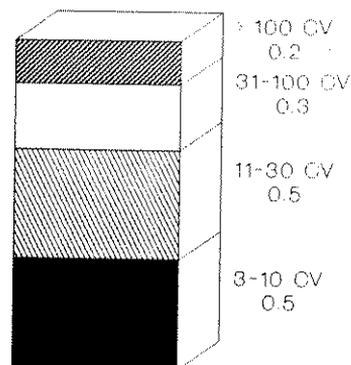


Figura 5.7 - Análise comparativa entre os erros médios (em porcentagem) resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida. Curva $M = f(n)$.



IEEE 112-B e IEC 34-2

Figura 5.8 - Análise comparativa entre os erros médios (em porcentagem) resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida. Curva $I_1 = f(n)$.

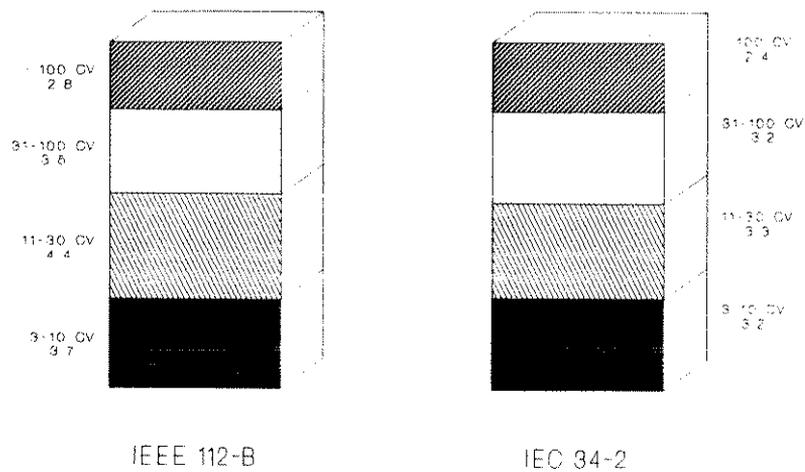


Figura 5.9 - Análise comparativa entre os erros médios (em porcentagem) resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida. Curva $\eta = f(n)$.

Além destas curvas, por vezes é interessante o conhecimento do comportamento do conjugado de partida e do máximo, bem como da corrente de partida. Portanto, é conveniente verificar a margem de erro esperada pela aplicação da metodologia, também para estas grandezas. Os resultados são fornecidos na figura 5.10.

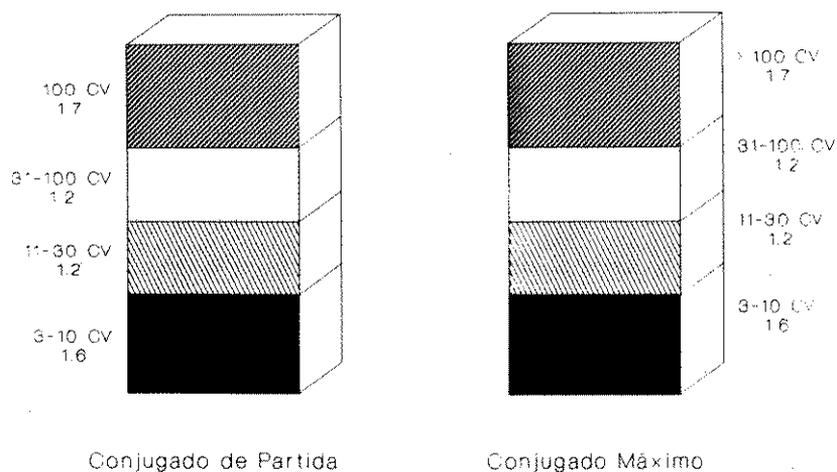


Figura 5.10 - Análise de erros para o conjugado de partida comparativamente aos resultados de ensaios.

V.3 - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA QUE UTILIZA DADOS DE CATÁLOGOS

V.3.1 - Exemplo de aplicação

A título de exemplificação, apresenta-se os resultados da aplicação da metodologia para o mesmo motor de 15 c.v, citado no item anterior.

Os resultados dos ensaios são utilizados como se fossem dados de catálogos.

A estimativa inicial dos parâmetros nas condições nominais, as distribuições de frequência do ângulo e módulo da corrente de magnetização são as mostradas nas figuras 5.11 e 5.12, respectivamente.

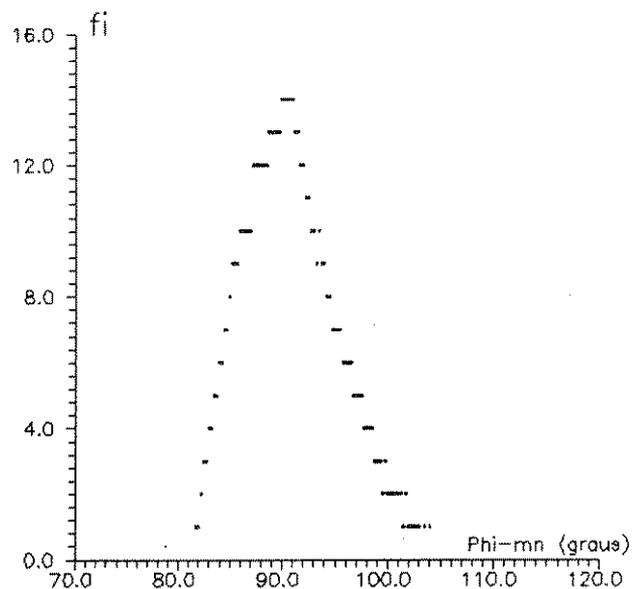


Figura 5.11 - Curva de distribuição de φ_{mn} .

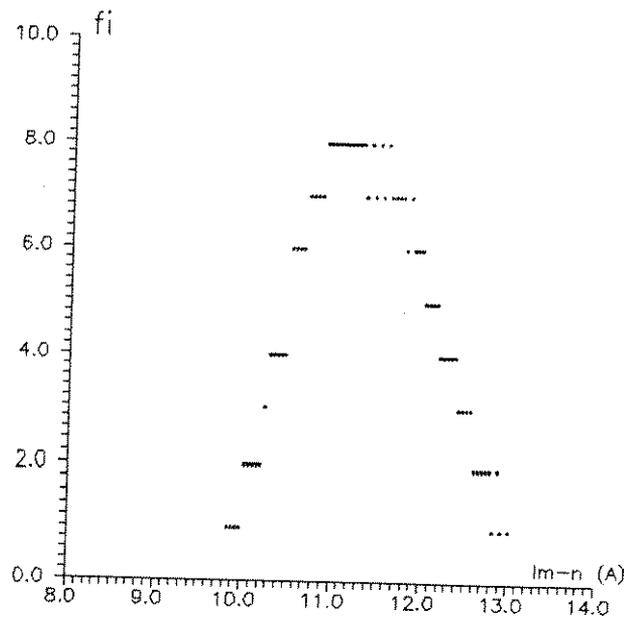


Figura 5.12 - Curva de distribuição de I_{mn} .

Os valores médios obtidos foram:

$$\bar{I}_{mn} = 11.3553 \text{ A}$$

e

$$\bar{\varphi}_{mn} = 90.8057^\circ$$

De onde, resultou nos seguintes parâmetros (valores por fase):

$$R_1 = 0,5823 \Omega; R_{2n} = 0,3124 \Omega; R_m = 1,5432 \Omega$$

$$X_{1n} = 1,7251 \Omega; X_{2n} = 1,7562 \Omega; X_m = 19,1253 \Omega$$

Após a aplicação do algoritmo de Marquadt para o refinamento, obteve-se:

$$R_1 = 0,4358 \Omega; R_{2n} = 0,3287 \Omega; R_m = 1,4725 \Omega$$

$$X_{1n} = 1,4230 \Omega; X_{2n} = 1,4514 \Omega; X_m = 18,3525 \Omega$$

As estimativas iniciais para a condição de partida, resultaram nas distribuições de frequências fornecidas nas figuras 5.13 e 5.14.

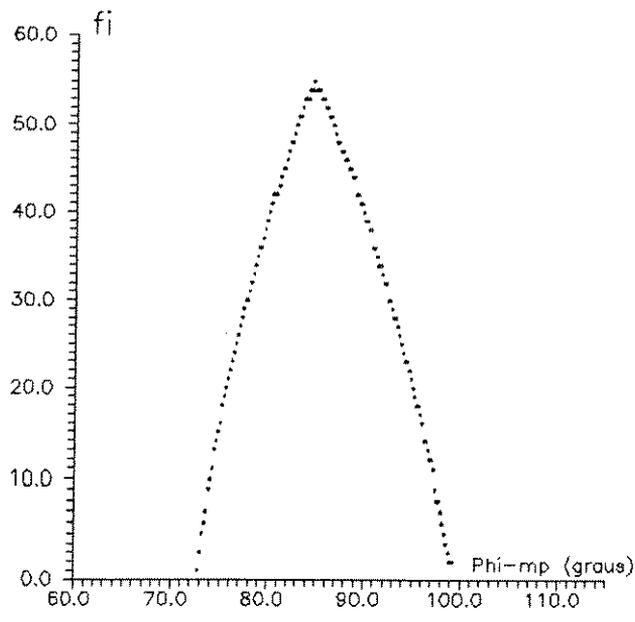


Figura 5.13 - Curva de distribuição de φ_{mp}

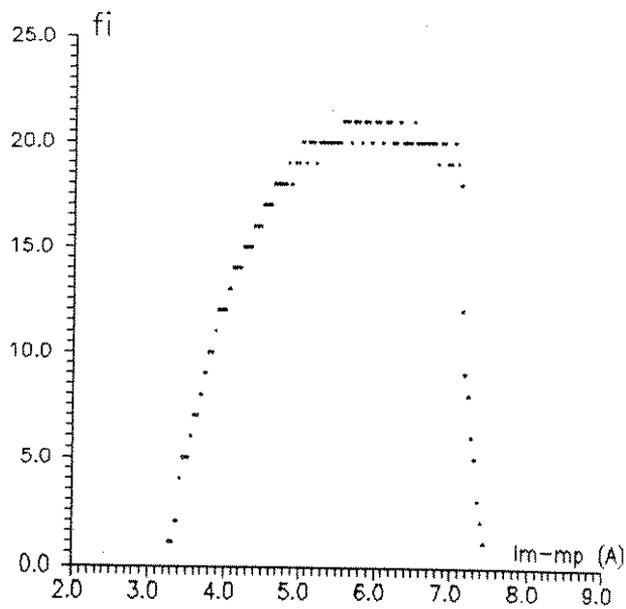


Figura 5.14 - Curva de distribuição de I_{mp}

Os valores médios obtidos foram:

$$\bar{I}_{mp} = 5,5117 \text{ A}$$

e

$$\bar{\varphi}_{mp} = 85,4111^\circ$$

De onde, resultou (valores por fase):

$$R_{2p} = 0,4422 \Omega; X_{1p} = 0,8868 \Omega; X_{2p} = 0,6025 \Omega$$

Com o refinamento realizado com o algoritmo de Marquadt, obteve-se:

$$R_{2p} = 0,4453 \Omega; X_{1p} = 0,8685 \Omega; X_{2p} = 0,6889 \Omega$$

O comportamento destes parâmetros em função do escorregamento e da corrente entre a partida e a condição de rotor livre é ilustrado na figura 5.15.

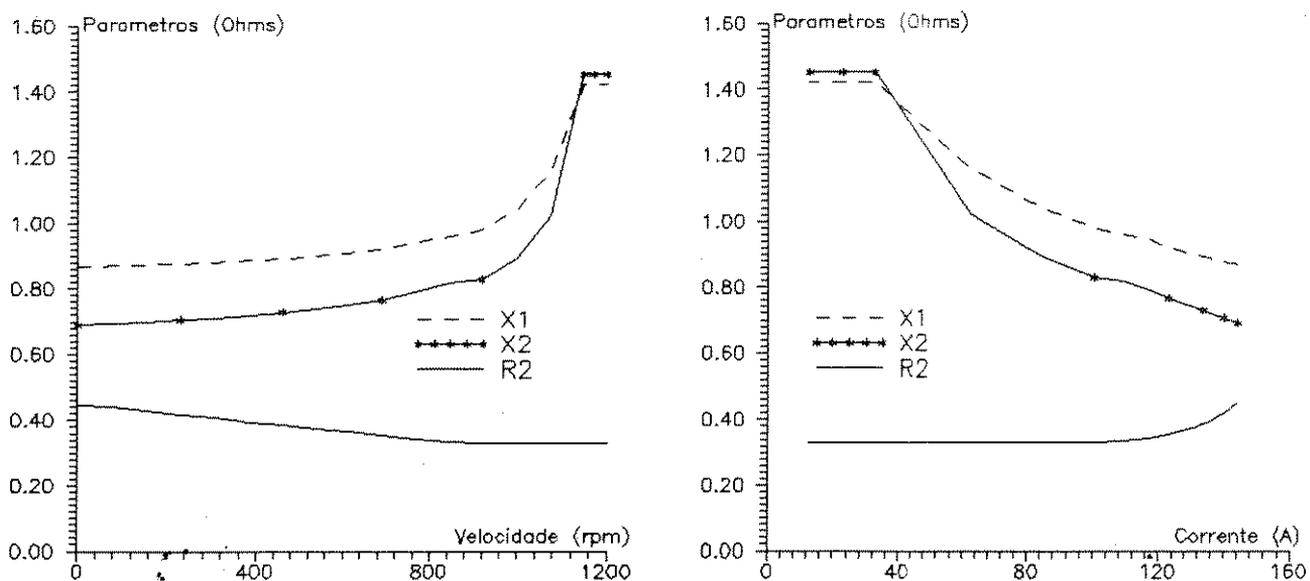


Figura 5.15 - Comportamento dos parâmetros em função da velocidade e da corrente (valores por fase)

As demais curvas são mostradas das figuras 5.16 a 5.20.

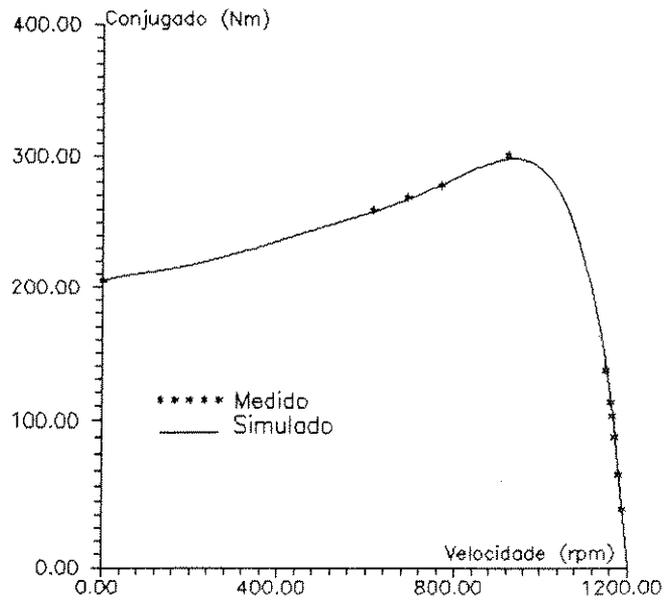


Figura 5.16 - Curva $M = f(n)$. Motor de 15 c.v.

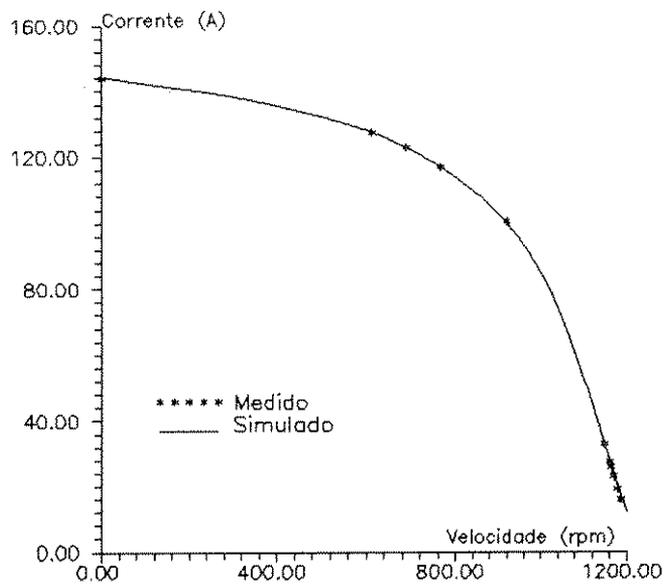


Figura 5.17 - Curva $I_1 = f(n)$. Motor de 15 c.v.

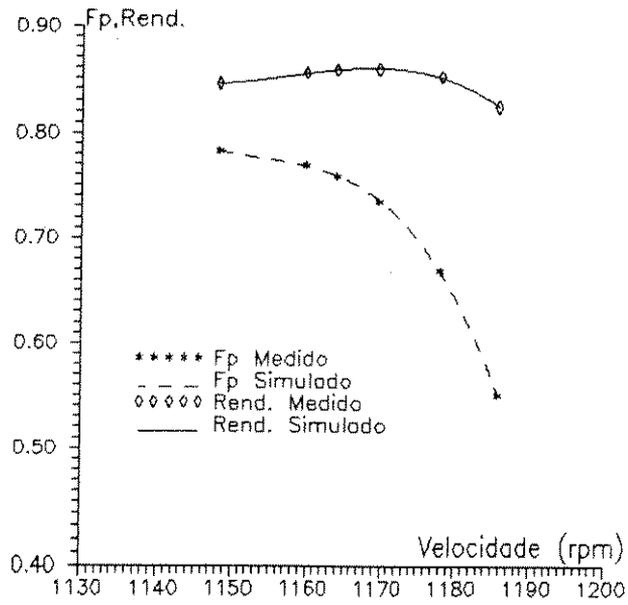


Figura 5.18 - Curva $\eta = f(n)$ e $\cos \varphi_1 = f(n)$. Motor de 15 c.v.

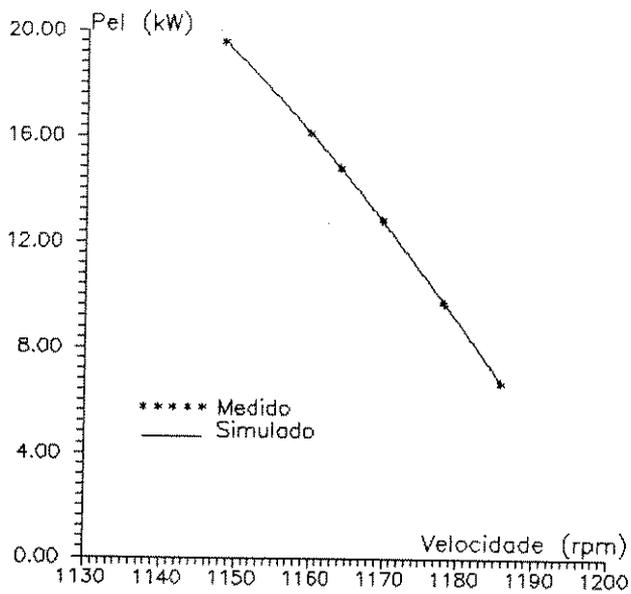


Figura 5.19 - Curva $P_{el} = f(n)$. Motor de 15 c.v.

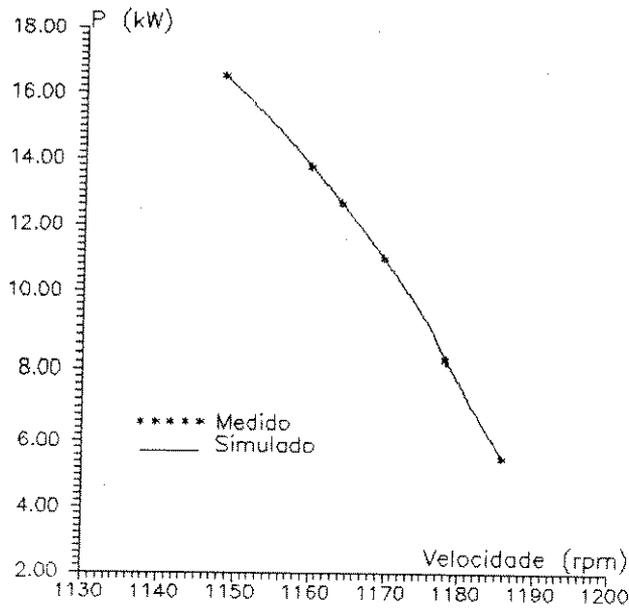


Figura 5.20 - Curva $P = f(n)$. Motor de 15 c.v.

V.3.2 - Resultados gerais

Para a comprovação da validade desta metodologia executou-se um estudo comparativo com os resultados de ensaios do mesmo universo de motores, sendo estes empregados como se fossem dados de catálogos.

As figuras 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam as comparações para as curvas $M = f(n)$, $I_1 = f(n)$ e $\eta = f(n)$, respectivamente, considerando-se a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos através dos ensaios normalizados, bem como a faixa de potência dos motores ensaiados.

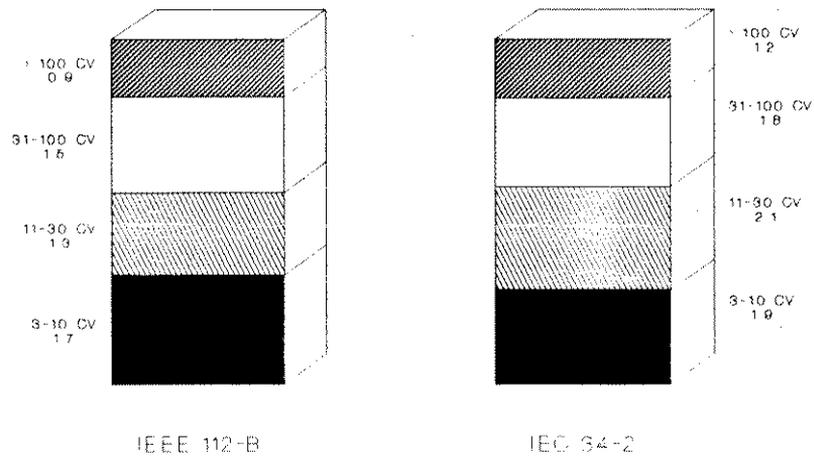
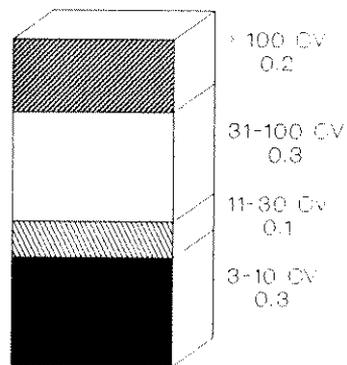


Figura 5.21 - Análise comparativa entre os erros médios (em porcentagem) resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida. Curva $M = f(n)$.



IEEE 112-B e IEC 34-2

Figura 5.22 - Análise comparativa entre os erros médios (em porcentagem) resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida. Curva $I_1 = f(n)$.

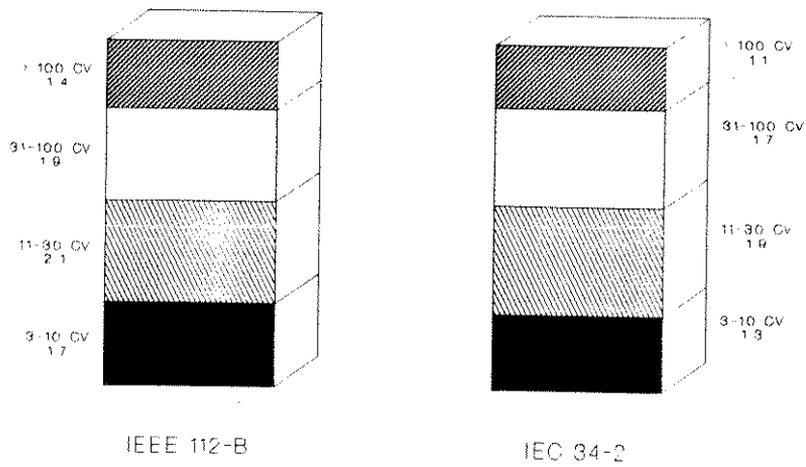


Figura 5.23 - Análise comparativa entre os erros médios (em porcentagem) resultantes da aplicação da metodologia desenvolvida. Curva $\eta = f(n)$.

Em relação ao conjugado e corrente de partida os erros são inferiores a $10^{-6}\%$, pois são condições básicas para a formulação do método. O mesmo é válido para o conjugado máximo.

C A P Í T U L O VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Os modelos matemáticos que são utilizados nas avaliações de viabilidade econômica de substituição de motores sobredimensionados ou danificados, apresentam várias dificuldades de uso.

Algumas das grandezas que os integram são de caráter aleatório, em especial, a vida esperada do motor novo e a do motor substituído ou reformado. Outras, como o rendimento e a potência disponível no eixo, são obtidas através de metodologias que apresentam grandes erros e/ou são de pouca aplicabilidade em campo devido à dificuldade de transporte e/ou alto custo de equipamentos.

Este trabalho apresentou dois métodos simples e rápidos para avaliar o desempenho de um motor de indução de rotor em gaiola dispensando os ensaios normalizados que, em geral, são complexos, exigem pessoal qualificado, equipamentos adequados e conseqüentemente são de alto custo.

Os métodos apresentados se mostraram bastante confiáveis quando aplicados a um conjunto razoável de motores que também foram ensaiados pelos métodos normalizados IEEE-112-B E IEC-34-2. A comparação dos resultados mostrou que o erro resultante em relação aos métodos normalizados citados é menor do que 2% em conjugados, correntes e menos do que 5% em rendimento. Além disso, os algoritmos para os métodos são simples e de fácil implementação em microcomputadores.

O trabalho é totalmente voltado para as atividades industriais, especialmente nas áreas hoje emergentes, de manutenção e de conservação de energia. O seu enfoque principal foi o de permitir a detecção de um motor sobredimensionado ou danificado e o fornecimento

de subsídios para a especificação de um novo motor ou para a reforma do antigo.

Como sugestões para uma continuidade deste trabalho, propõe-se:

- a) Elaboração de rotinas computacionais que permitam a identificação de defeitos com o uso do sistema de aquisição de dados;
- b) Desenvolvimento de uma metodologia que permita analisar se a necessidade da eventual substituição do motor tenha a ver com o desequilíbrio das tensões da rede alimentadora.
- c) Implementação de sistemas associados aos métodos de acionamentos estáticos para eliminar os desequilíbrios e permitir a adequação da potência do motor com a da carga (ou seja, possibilitar sempre a operação onde se tenha o máximo produto "rendimento x fator de potência"), inclusive dinamicamente;
- d) Desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados dedicados de baixo custo para monitoramento "on-line" dos motores.

A N E X O I

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

A.1.1 - DETERMINAÇÃO DA REATÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO X_m

Um cálculo aproximado do valor de X_m é possível, considerando-se o circuito equivalente em "L" conforme [18], indicado na figura A.1.1 para o motor em vazio.

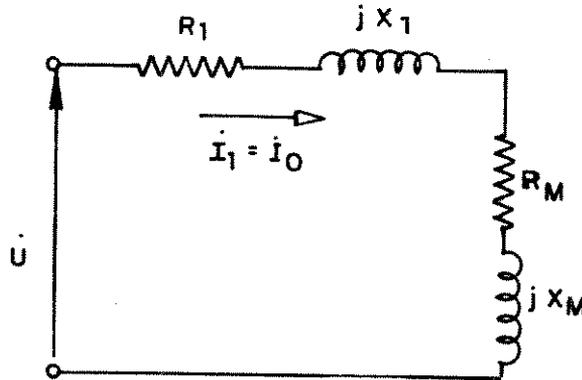


Figura A.1.1 - Circuito equivalente em "L" do motor de indução trifásico para o motor em vazio.

O valor da corrente do enrolamento do estator para a condição em vazio I_0 é dada, em módulo, por:

$$I_0 = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_{1n} + X_m)^2}} \quad (\text{A.1.1})$$

Nas máquinas assíncronas comuns R_1 e R_m são consideravelmente menores que X_{1n} e X_m , respectivamente e $X_m > X_{1n}$. Então:

$$I_0 = \frac{U}{X_m} \quad (\text{A.1.2})$$

Nas condições nominais, pode-se escrever:

$$\dot{I}_{1n} = \dot{I}_{2n} + \dot{I}_0 \quad (\text{A.1.3})$$

$$I_{2n} \cos\varphi_{2n} = I_{1n} \cos\varphi_{1n} \quad (\text{A.1.4})$$

e,

$$I_0 = I_{1n} \sin\varphi_{1n} - I_{2n} \sin\varphi_{2n} \quad (\text{A.1.5})$$

Combinando-se (A.1.2), (A.1.4) e (A.1.5), obtem-se:

$$\frac{U}{X_m} = I_{1n} (\sin\varphi_{1n} - \text{tg}\varphi_{2n} \cos\varphi_{1n}) \quad (\text{A.1.6})$$

Como:

$$\text{tg}\varphi_{2n} = \frac{(X_{1n} + X_{2n})}{R_{2n}/s_n} \quad (\text{A.1.7})$$

pois,

$$\frac{R_{2n}}{s_n} \gg R_1 \quad (\text{A.1.8})$$

conforme [18], tem-se:

$$\frac{X_{1n} + X_{2n}}{R_{2n}} = \frac{1}{s_k} \quad (\text{A.1.9})$$

Combinando-se (A.1.7) e (A.1.9), resulta:

$$\text{tg}\varphi_2 = \frac{s_n}{s_k} \quad (\text{A.1.10})$$

Logo:

$$\frac{U}{X_m} = I_{1n} \left(\text{sen}\varphi_{1n} - \frac{s_n}{s_k} \cdot \text{cos}\varphi_{1n} \right) \quad (\text{A.1.11})$$

Multiplicando-se membro a membro por $3 U \text{cos}\varphi_{1n}$, resulta:

$$\frac{3 U^2 \text{cos}\varphi_{1n}}{X_m} = 3 U I_{1n} \text{cos}\varphi_{1n} \left(\text{sen}\varphi_{1n} - \frac{s_n}{s_k} \text{cos}\varphi_{1n} \right) \quad (\text{A.1.12})$$

como,

$$3 \cdot U^2 = U_n^2 \quad (\text{A.1.13})$$

e,

$$3 U I_{1n} \text{cos}\varphi_{1n} = \frac{P_n}{\eta_n} \quad (\text{A.1.14})$$

tem-se:

$$X_m = \frac{U_n^2 \eta_n \text{cos}\varphi_{1n}}{\left[\text{sen}\varphi_{1n} - \frac{s_n}{s_k} \text{cos}\varphi_{1n} \right] P_n} \quad (\text{A.1.15})$$

A.I.2 - DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DO ENROLAMENTO DO ROTOR

O diagrama fasorial das correntes do motor para uma dada condição de carga é mostrado na figura A.1.2.

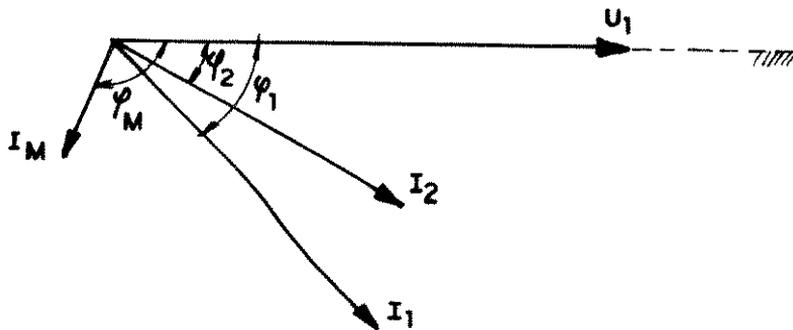


Figura A.1.2 - Diagrama fasorial das correntes em um motor de indução trifásico.

Através de relações trigonométricas adequadas, tem-se:

$$I_2^2 = \sqrt{I_1^2 + I_m^2 - 2 I_1 I_m \cos(\varphi_m - \varphi_1)} \quad (\text{A.1.16})$$

e,

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \text{sen}^{-1} \left[\frac{I_m}{I_2} \text{sen}(\varphi_m - \varphi_1) \right] \quad (\text{A.1.17})$$

A.I.3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS R_m , X_{2n} , X_{1n} e R_1

Utilizando-se o circuito equivalente da figura 3.1 (vide Capítulo III, item 3.1) para as condições nominais, verifica-se que:

$$I_{mn} e^{-j\varphi_{mn}} (R_m + jX_m) = I_{2n} e^{-j\varphi_{2n}} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} + jX_{2n} \right) \quad (\text{A.1.18})$$

e,

$$I_{2n} e^{-j\varphi_{2n}} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} + jX_{2n} \right) + I_{1n} e^{-j\varphi_{1n}} (R_1 + jX_{1n}) = U e^{j0} \quad (\text{A.1.19})$$

A equação (A.1.18) pode ser escrita como:

$$I_{2n} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \cos\varphi_{2n} + X_{2n} \operatorname{sen}\varphi_{2n} \right) = I_{mn} (R_m \cos\varphi_{mn} + X_m \operatorname{sen}\varphi_{mn}) \quad (\text{A.1.20})$$

$$I_{2n} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{sen}\varphi_{2n} + X_{2n} \cos\varphi_{2n} \right) = I_{mn} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mn} + X_{mn} \cos\varphi_{mn}) \quad (\text{A.1.21})$$

Isolando-se X_{2n} em (A.1.20) e (A.1.21), e igualando-se as expressões, resulta:

$$\begin{aligned} \frac{I_{mn}}{I_{2n}} (R_m \cos\varphi_{mn} + X_m \operatorname{sen}\varphi_{mn}) - \frac{R_{2n}}{s_n} \cos\varphi_{2n} &= \operatorname{tg}\varphi_{2n} \left[\frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{sen}\varphi_{2n} \right. \\ &\left. - \frac{I_{mn}}{I_{2n}} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mn} - X_m \cos\varphi_{mn}) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.1.22})$$

De onde:

$$R_m = \frac{\frac{I_{2n}}{\cos\varphi_{2n}} \frac{R_{2n}}{s_n} + I_m X_m (\operatorname{tg}\varphi_{2n} \cos\varphi_{mn} - \operatorname{sen}\varphi_{mn})}{I_{mn} (\cos\varphi_{mn} + \operatorname{tg}\varphi_{2n} \operatorname{sen}\varphi_{2n})} \quad (\text{A.1.23})$$

Determinando-se R_m por (A.1.23), pode-se calcular X_{2n} , isolando-a na expressão (A.1.21), ou seja:

$$X_{2n} = \frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{tg}\varphi_{2n} - \frac{I_{mn}}{I_{2n} \cos\varphi_{2n}} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mn} - X_m \cos\varphi_{mn}) \quad (\text{A.1.24})$$

Utilizando-se do mesmo procedimento anterior, tem-se:

$$I_{1n} (R_1 \cos\varphi_{1n} + X_{1n} \operatorname{sen}\varphi_{1n}) + I_{2n} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \cos\varphi_{2n} + X_m \operatorname{sen}\varphi_{2n} \right) = U \quad (\text{A.1.25})$$

$$I_{1n} (R_1 \operatorname{sen}\varphi_{1n} - X_{1n} \cos\varphi_{1n}) + I_{2n} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{sen}\varphi_{2n} - X_{2n} \cos\varphi_{2n} \right) = 0 \quad (\text{A.1.26})$$

Isolando-se X_{1n} em (A.1.25), resulta:

$$X_{1n} = R_1 \operatorname{tg}\varphi_{1n} + \frac{I_{2n}}{I_{1n} \cos\varphi_{1n}} \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \operatorname{sen}\varphi_{2n} - X_{2n} \cos\varphi_{2n} \right) \quad (\text{A.1.27})$$

Substituindo-se (A.1.27) em (A.1.26), tem-se:

$$R_1 = \frac{U - I_{2n} \left[\frac{R_{2n}}{s_n} (\cos\varphi_{2n} + \operatorname{tg}\varphi_{1n} \operatorname{sen}\varphi_{2n}) + X_{2n} (\operatorname{sen}\varphi_{2n} - \operatorname{tg}\varphi_{1n} \cos\varphi_{2n}) \right]}{I_{1n} / \cos\varphi_{1n}} \quad (\text{A.1.28})$$

A.I.4 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS X_{2p} e R_{2p}

Para as condições de partida, o circuito equivalente da figura 3.1 (vide Capítulo III, item 3.1) permite escrever:

$$I_{mp} e^{-j\varphi_{mp}} (R_m + jX_m) = I_{2p} e^{-j\varphi_{2p}} (R_{2p} + jX_{2p}) \quad (\text{A.1.29})$$

De onde:

$$I_{mp} (R_m \cos\varphi_{mp} + X_m \operatorname{sen}\varphi_{mp}) = I_{2p} (R_{2p} \cos\varphi_{2p} + X_{2p} \operatorname{sen}\varphi_{2p}) \quad (\text{A.1.30})$$

e,

$$I_{mp} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mp} - X_m \cos\varphi_{mp}) = I_{2p} (R_{2p} \operatorname{sen}\varphi_{2p} - X_{2p} \cos\varphi_{2p}) \quad (\text{A.1.31})$$

De (A.1.31), vem:

$$X_{2p} = R_{2p} \operatorname{tg}\varphi_{2p} - \frac{I_{mp}}{I_{2p} \cos\varphi} (R_m \operatorname{sen}\varphi_{mp} - X_m \cos\varphi_{2p}) \quad (\text{A.1.32})$$

Substituindo-se (A.1.32) em (A.1.30), resulta:

$$R_{2p} = \frac{I_{mp} \cos\varphi_{2p}}{I_{2p}} [R_m (\cos\varphi_{mp} + \operatorname{tg}\varphi_{mp} \operatorname{sen}\varphi_{mp}) + X_m (\operatorname{sen}\varphi_{mp} - \operatorname{tg}\varphi_{2p} \cos\varphi_{mp})] \quad (\text{A.1.33})$$

A N E X O II

ENSAIOS EXECUTADOS EM MOTORES ESPECÍFICOS

A.II.1 - EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

A metodologia de ensaios escolhida foi a do método B da IEEE-112 devido à sua precisão, conforme analisado no capítulo II. O esquema de ligações é o mostrado na figura A.2.1.

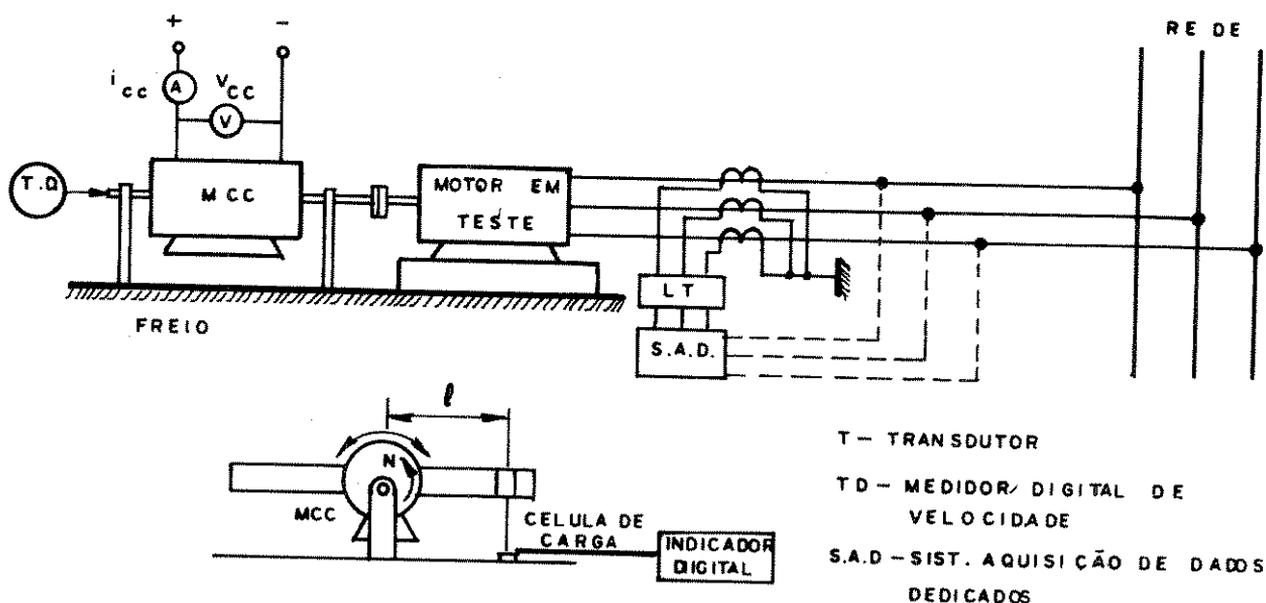


Figura A.2.1 - Esquema de ligações para os ensaios dos motores

O freio eletrodinâmico empregado possui mancal suspenso por filme do óleo, ar aspirado e erro de conjugado de, apenas, 0,3%. A instrumentação adicional é, basicamente, toda de tecnologia digital sendo os equipamentos principais:

a) Célula de carga calibrada com peso padrão e respectivo indicador

digital; b) sistema de aquisição de dados dedicado; c) medidor digital de velocidade com sensor magnético, cuja resolução é de ± 1 dígito.

O sistema de aquisição de dados dedicado permite calcular os valores de potência ativa, reativa, fator de potência e valores eficazes de tensão e de corrente.

Os transformadores para instrumentos (TC's) empregados para a acomodação de sinais são de classe de exatidão de 0,2%.

A figura A.2.2 mostra um motor de 3 c.v. na plataforma de ensaios, enquanto que as figuras A.2.3, A.2.4 e A.2.5 fornecem as vistas do conjunto célula de carga-indicador digital e do sistema de aquisição de dados dedicado.

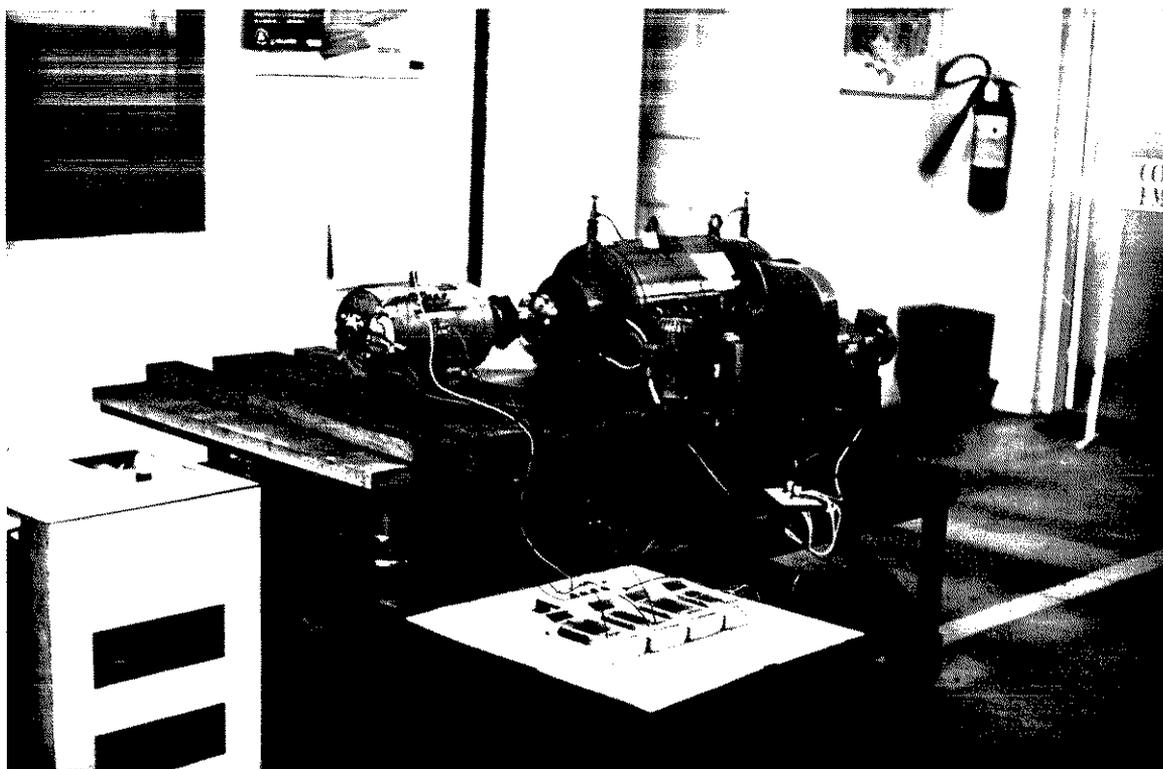


Figura A.2.2 - Motor de 3 c.v. na plataforma de ensaios



Figura A.2.3 - Conjunto célula de carga-indicador digital

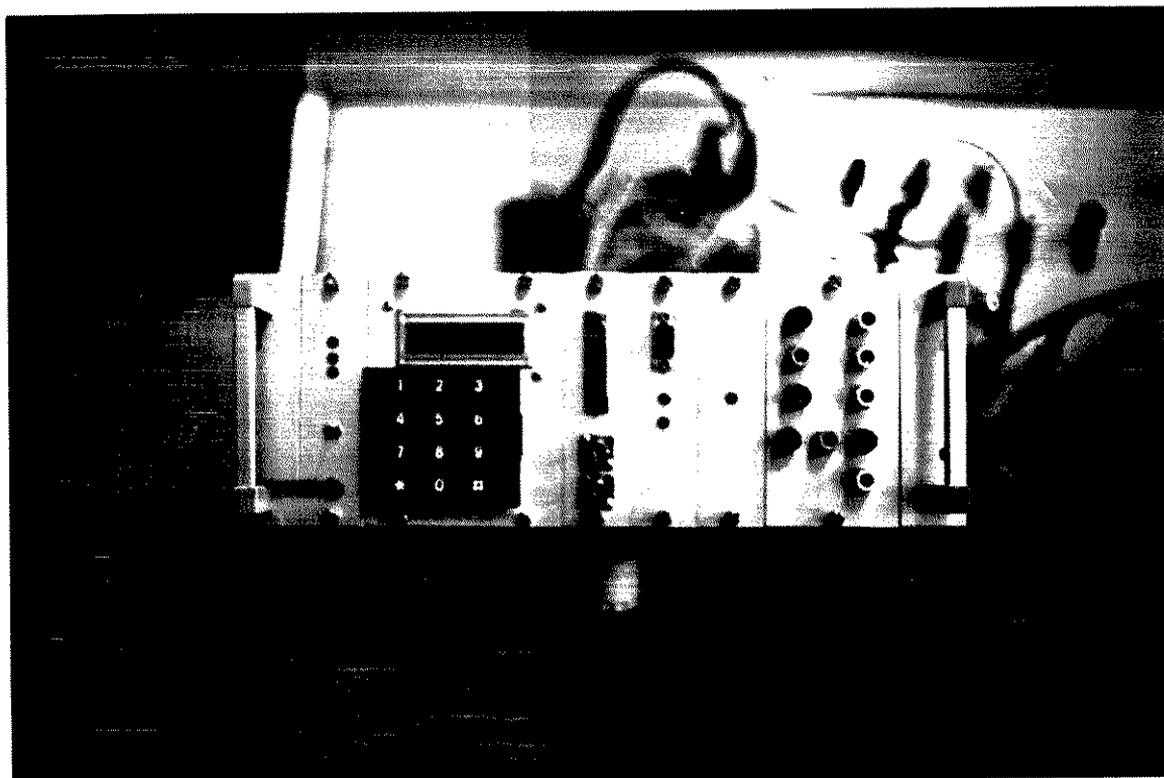


Figura A.2.4 - Sistema de aquisição de dados dedicado

A.II.2 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Como citado, os procedimentos de ensaios foram aqueles previstos na IEEE std112 [1], método B, inclusive quanto às correções de eventuais erros do freio eletrodinamométrico.

Após a estabilização da temperatura do estator executou-se um conjunto de cinco medidas para cada ponto operacional em instantes diferentes, calculando-se a média; tal valor foi considerado como o que melhor representa o universo amostrado.

Os valores de conjugado, incluindo o de partida, foram obtidos através de:

$$M = 9,81 P.l \quad (A.2.1)$$

onde:

"P" é o pêsó exercido pelo freio eletrodinométrico com carcaça livre para uma certa carga; e, "l" é o comprimento do braço de freio do seu centro até o ponto de aplicação (sobre uma célula de carga).

Com a medida da velocidade (n) através de sensor magnético e com as medidas de correntes e tensões executadas pelo sistema de aquisição de dados dedicado, obteve-se:

a) Valores eficazes de tensão e corrente; b) Potência ativa (P_{el}), aparente e reativa absorvidas e, conseqüentemente, o fator de potência; c) Potência mecânica (P) através de:

$$P = \frac{2\pi}{P_{el}} M.n \quad (A.2.2)$$

d) e, o rendimento por:

$$\eta = \frac{P}{P_{el}} \quad (A.2.3)$$

As correntes de partidas foram aquiritadas disparando-se o sistema ("trigger" externo através do contato auxiliar do contator principal) no instante da energização. Realizou-se medidas para seis posicionamentos distintos do rotor. A média dos valores eficazes dos picos de corrente foi adotada como o valor da corrente de partida.

A figura A.2.5 ilustra um dos casos aquiritados.

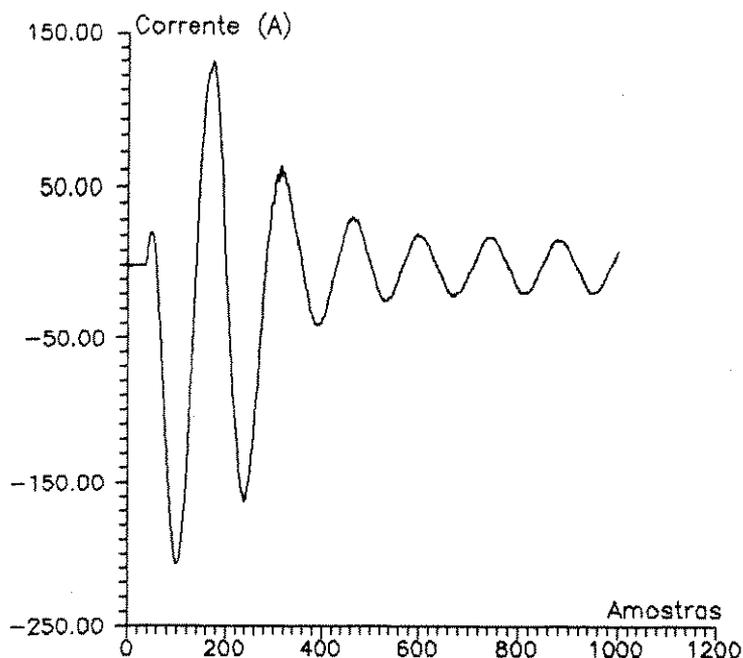


Figura A.2.5 - Comportamento da corrente do estator durante a partida

O ensaio de conjugado máximo foi executado reduzindo-se a tensão de alimentação do motor a um valor adequado para o freio. Colocando-se carga no motor através do freio eletrodinamométrico chegou-se até o limiar da operação estável que corresponde ao conjugado máximo com a tensão reduzida (U). Neste ponto, mede-se a tensão (U) e o conjugado (M). Assim, o conjugado máximo é dado por:

$$M_k = M \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \quad (\text{A.2.4})$$

A.II.3 - RESULTADOS OBTIDOS

Apresenta-se a título de exemplo, os resultados obtidos nos ensaios de motores de 3 c.v., 15 c.v. e 40 c.v.

A.II.3.1 - MOTOR DE 3 C.v.

Para tensões perfeitamente balanceadas e iguais à nominal do motor, o ensaio em carga apresentou os resultados fornecidos na tabela A.2.1, já devidamente ajustados.

n [rpm]	M [N.m]	P [KW]	I_1 [A]	P_{el} [KW]	$\cos\phi_1$	η
1782	2.955	0.551	4.70	0.778	0.430	0.708
1757	5.995	1.103	5.83	1.460	0.650	0.755
1742	7.659	1.397	6.70	1.801	0.705	0.776
1729	9.138	1.654	7.37	2.100	0.740	0.788
1712	10.777	1.932	8.30	2.509	0.793	0.770
1692	12.451	2.206	9.45	2.940	0.800	0.750
1649	15.969	2.757	11.80	3.840	0.840	0.718
1609	17.858	3.009	14.20	4.542	0.839	0.662

TABELA A.2.1 - Resultados do ensaio em carga com tensões balanceadas.
Motor 3 c.v.

A figura A.2.6 ilustra graficamente o comportamento das grandezas em função da potência no eixo.

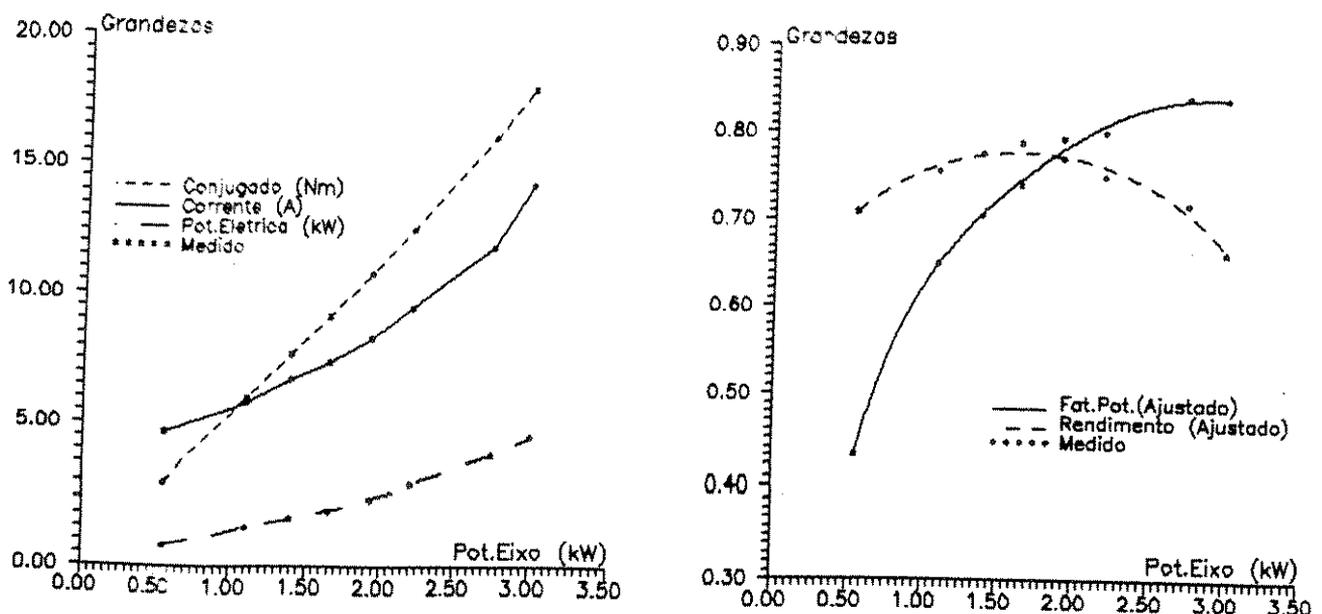


Figura A.2.6 - Características de desempenho - Motor de 3 c.v.

A.II.3.2 - MOTOR DE 15 C.v.

A tabela A.2.2 e a figura A.2.7 fornecem os resultados obtidos no ensaio em carga do motor de 15 c.v. alimentado por tensões balanceadas e iguais a nominal.

n [rpm]	M [N.m]	P [Kw]	I ₁ [A]	P _{el} [Kw]	cosφ ₁	η
1186	44.431	5.519	15.75	6.53	0.544	0.846
1178	67.090	8.277	18.98	9.68	0.669	0.855
1169	90.121	11.029	23.30	13.16	0.741	0.838
1162	104.327	12.693	26.51	15.47	0.766	0.820
1157	113.900	13.796	28.93	17.12	0.776	0.806
1140	138.652	16.549	36.46	21.76	0.783	0.761

TABELA A.2.2 - Resultados do ensaio em carga com tensões balanceadas - Motor de 15 c.v.

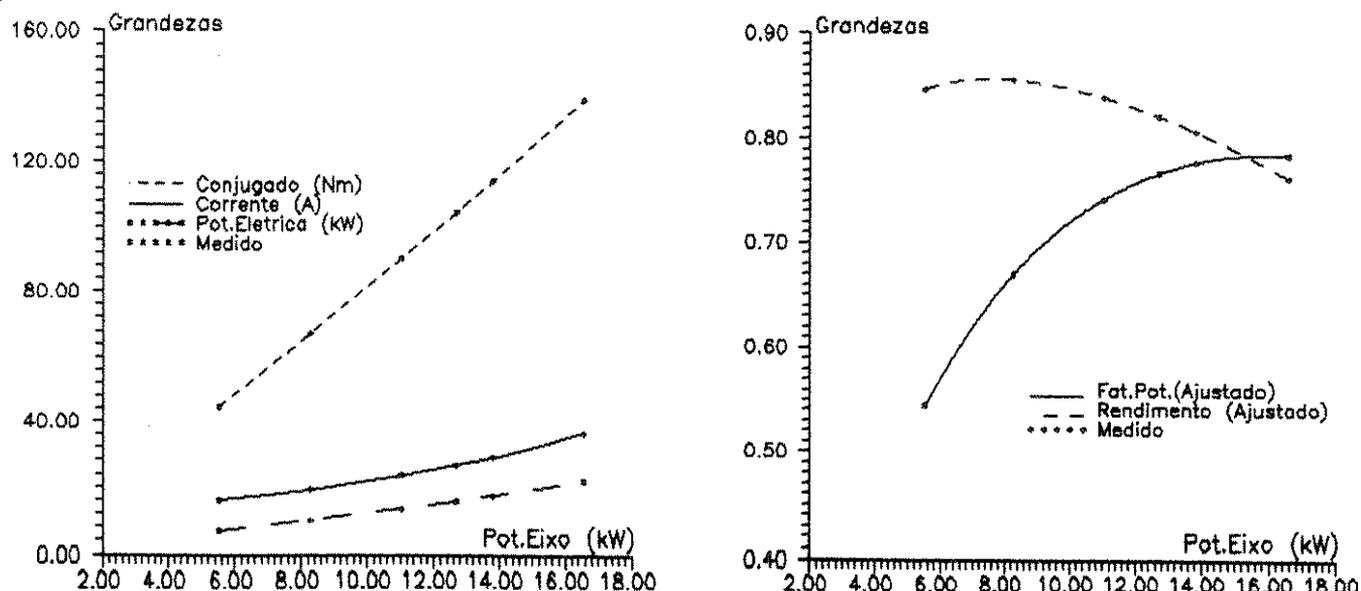


Figura A.2.7 - Características de desempenho - Motor de 15 c.v.

A.II.3.2 - MOTOR DE 40 C.v.

A tabela A.2.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio em carga com as tensões do alimentador balanceadas iguais a nominal do motor.

n [rpm]	M [N.m]	P [Kw]	I_1 [A]	P_{el} [Kw]	$\cos\phi_1$	η
1798	2.449	0.461	17.0000	0.962	0.0741	0.479
1797	16.203	3.049	19.0000	3.960	0.2700	0.770
1794	58.731	11.034	26.0000	12.219	0.6189	0.903
1788	112.267	21.021	38.0000	22.725	0.7850	0.925
1785	137.904	25.778	45.0000	27.868	0.8125	0.925
1781	159.135	29.680	51.0000	32.261	0.8300	0.920
1773	209.525	38.902	68.0000	42.703	0.8250	0.911
1766	241.251	44.617	81.0000	49.850	0.8075	0.895
1754	304.702	55.967	107.0000	64.182	0.7800	0.872
1746	314.973	57.590	116.0000	67.043	0.7575	0.859

TABELA A.2.3 - Resultados do ensaio em carga com tensões balanceadas - Motor de 40 c.v.

A figura A.2.8 ilustra o comportamento das grandezas em função da potência no eixo.

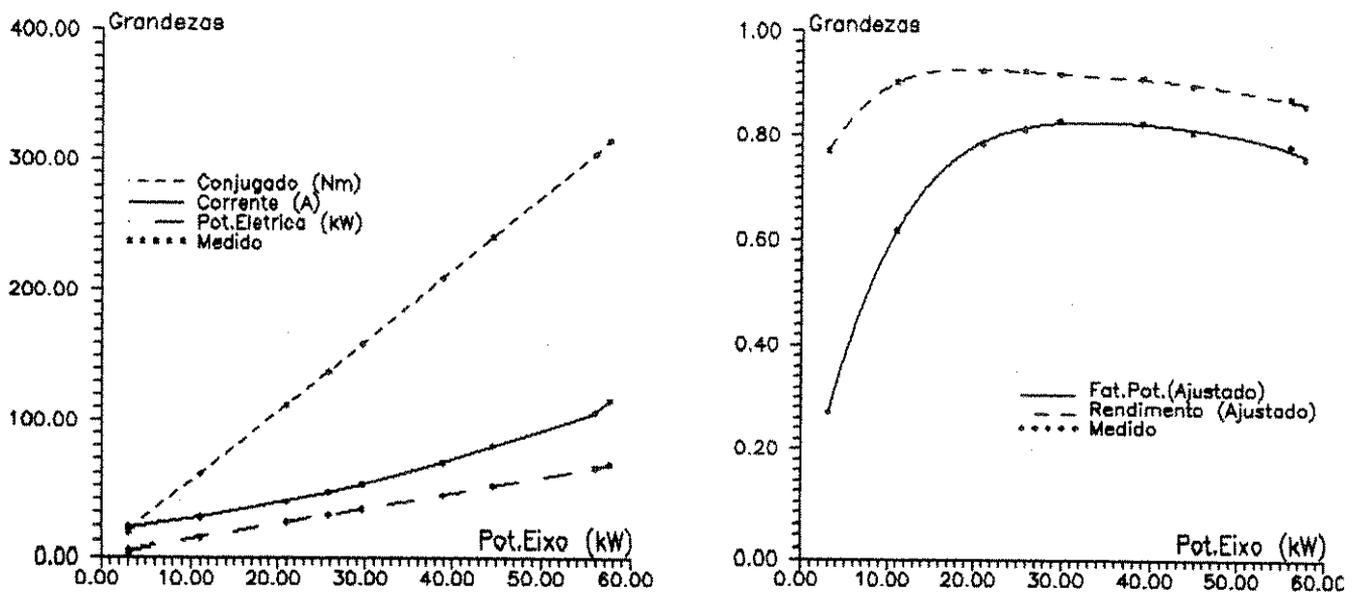


Figura A.2.8 - Características de desempenho - Motor de 40 c.v.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Institute of Electrical and Electronic Engineers - "Test Procedures for Polyphase Induction Motors and Generators" - IEEE std 112 , 1986;
- [2] - "Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery From Tests" - Rotating Electrical Machines - Part 2 - IEC Publication 34 - 2 (1972);
- [3] - American National Standard for Motors and Generators, NEMA MG 1 1978;
- [4] - Induction Machine, "Standard of Japanese Electrotechnical Committee". JEC - 37, 1961;
- [5] - NBR 5383 - "Máquinas Polifásicas de Indução - Método de Ensaio" Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- [6] - Ferreira Neto, J.L.; Santos, A.H.M. - "Metodologia Expedida de Avaliação Técnico-Econômica de Substituição de Motores em Operação" - Trabalho vencedor do Premio Pirelli de Conservação de Energia - 1988;
- [7] - Almeida, A.T.L.; Santos, A.H.M.; Ferreira Neto, J.L.; Bortoni, E.C. - "Assessment of the Three-Phase Induction Motors Characteristics Aiming to Save Energy: An Error Analysis" - IX Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, 1991;
- [8] - Bonnet, A.H.; - "Understanding Efficiency in Squirrel - Cage Induction Motors" - IEEE Trans. on IA, Vol. IA, n^o 4, j/a -

1980, pp 476/483;

- [9] - Huget, E.W.; - "Squirrel Cage Induction Motors Performance Versus Efficiency" - IEEE Trans. on IA, vol. IA-19, n^o 5, sept/out - 1983, pp 818/823;
- [10] - Andreas, J.C. "Energy Efficient Electric Motors - Selection And Applications" - Marcel Dekker, Inc., New York, 1982;
- [11] - Nailen, R.L. - "Can Fields Tests Prove Motor Efficiency?" - IEEE Trans. on IA, vol. 25, n^o 23, m/j - 1989 - pp 391/396;
- [12] - Cumings, P.G.; Bowers, W.D.; Martiny, W.J. - "Induction Motor Efficiency Test Methods" - IEEE Trans. on IA, vol. IA - 17, n^o 3, may/june 1981, pp 253/272;
- [13] - Cumings, P.G. - "Comparison of IEC and NEMA / IEEE Motor Standards - Part I" - IEEE Trans. on Ind Appl., Vol. IA-18, n^o 5, sep/out - 1982 - pp 471/478;
- [14] - Ishizaki, A.; Hirayama, K.; - "Determination of Equivalent Circuit Parameters For Performance Calculation of Polyphase Induction Machines - Electrical Engineering in Japan - 87 (1) 1967 - pp 71/75;
- [15] - Cristofides, N.; Adkins, B.; - "Determination of Load Losses and Torques in Squirrel - Cage Induction Motors" - Proc. IEE. vol. 113, n^o 2, dec. 1966 - pp 1995/2005;
- [16] - Szabados, B.; Findlay, R.D.; Obermeyer, G.M.; Drapher, R.E. - "Measurements of the Torque-Speed Characteristics of Induction Motors Using an Improved New Digital Approach" IEEE Trans. on En. Conv, vol. 5, n^o 3;
- [17] - NBR 7094 - "Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução"

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Dez/81;

- [18] - Kostenko, M.; Piotrovski, I. - "Electrical Machines" - Mir Publishers, Moscou, 1976;
- [19] - Ruppert F^o, E.; Arango, H.; Sá, J.S. - "Analysis of Squirrel Cage Induction Motor Rotor Bars Thermal Behavior" - Proc. Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM) - Cambridge, 1990, pp 458/463;
- [20] - Sá, J.S.; - "Uma Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor do Tipo Gaiola - "Tese de Doutorado - UNICAMP 1989;
- [21] - Juri, G.F. - "Supervisão em Tempo Real de Motores de Indução Trifásicos" - Dissertação de Mestrado - EFEI - 1990;
- [23] - Avolio, E. - "Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Térmico e do Desempenho Elétrico de Motores de Indução com Rotor em Gaiola" - Tese de Doutorado. UNICAMP - 1992;
- [24] - Woodham, J.B. - "Motor Loading for Lowest Losses" Electrical Construction and Maintenance - feb.1979, pp 66/69;
- [25] - Goldemberg, C.; Lobosco, O.S. - "Determination of Induction Motor Characteristics from Manufacturers Data Sheets " - Proc. Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM) - Cambridge, 1990, pp 458-463;
- [26] - Artime, J.; Sanz, J. - "A New Proposed Method for the Determination of Circuit Parameters in Squirrel-Cage Induction Motors by Steady - State Tests" - Proc. Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM) - Cambridge, 1990, pp 522/526;
- [27] - Ansuji, S. et alli - "Parameter Estimation for Induction

Machines Based on Sensitivity Analysis" - IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 25, n^o 6, November 1969, pp 1035-1040;

- [28] - Belline, A.; De Carli, A.; La Cava, M. - "Parameter Identification for Induction Motor Simulation"- Automatica, vol.12; 1986, pp 383-386;
- [29] - Hickiewicz J.; Macek-Kaminaka K. and Wach P. - "Algorithmic Methods of Induction Machines Parameters Estimation from Measured Slip-Curves" - Archiv fur Elektrotechnik, n^o 72; 1989; pp 239-249;
- [30] - Souza F^o, E. B; Lima, A.M. N; Jacobina, C.B. - "Parameter Estimation for Induction Machines Via Non-Linear Least Squares Method" - IECON 91, Japan, october/november; 1991; pp 639-643;
- [31] - Almeida, A.T.L. - "Especificação de Motores de Indução Trifásicos Controlados Pela Variação Combinada do Valor Eficaz da Tensão do Estator e da Resistência do Rotor" - Dissertação de Mestrado - EFEI - 1986;
- [32] - Assunção, J. T. - "Especificação de Motores de Indução Trifásicos para Acionamentos de Velocidade Controlada Através da Variação da Tensão e Frequência da Rêde" - Dissertação de Mestrado - EFEI - 1990;
- [33] - Zhu, D. S; Chamenois, G.; Gruszczvnski, P. - "Thermal Model Parameter Identification of an Induction Machine by a Weighted - Least-Square Method". - Proc. Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM) - Cambridge, 1990, pp 227/232;
- [34] - Mellor, P. H.; Turner, D. R. - "Real Time Prediction or Temperatures in an Induction Motor Using a Microprocessor" -

Electric Machines and Power Systems, Vol.15, pp 333-352, 1988;

- [35] - Zocholl, S. E. - "Motor Analysis and Thermal Protection". IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, n^o 3, july 1990;
- [36] - Zocholl, S. E.; Schweitzer III, E. O.; Zegarra, A. A. - "Thermal Protection of Induction Motors Enhanced by Interactive Electrical and Thermal Models" - IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol PAS-103, n^o 7, july 1984;
- [37] - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) - "Avaliação do Desempenho dos Motores Elétricos Trifásicos - Relatório Síntese" - Eletrobrás/CEMIG - 1992;
- [38] - Davies, O. L.; Goldsmith, P. L. - "Statistical Methods in Reserarch and Production" - Haffer Pub. Co., New York, 1972;
- [39] - Marquadt, D.W - "An Algorithm For Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters" - J. Soc. Indust. Appl. Math., vol. 11, n^o 2, June/1963, pp431/441;
- [40] - Blauhut, R. E. - "Fast Algorithms For Digital Signal Processing" - Addison-Wesley Pub. Co., 1987;