

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PABLO RODRIGUES MUNIZ**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE  
LEVANTAMENTO DE CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO  
DE MOTORES ELÉTRICOS SEM RETIRADA DE OPERAÇÃO**

VITÓRIA  
2006

PABLO RODRIGUES MUNIZ

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE  
CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO DE MOTORES ELÉTRICOS  
SEM RETIRADA DE OPERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Professor Vladimir Ivanovitch Dunnikov, Phd.

VITÓRIA

2006

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

M966d Muniz, Pablo Rodrigues, 1980-  
Desenvolvimento de metodologia de levantamento de características  
de conjugado de motores elétricos sem retirada de operação / Pablo  
Rodrigues Muniz. – 2006.  
101 f. : il.

Orientador: Vladimir Ivanovitch Dynnikov.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Centro Tecnológico.

1. Motores elétricos. 2. Torque. 3. Motores. 4. Mecânica. I.  
Dynnikov, Vladimir Ivanovitch. II. Universidade Federal do Espírito  
Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621

---

**PABLO RODRIGUES MUNIZ**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE  
CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO DE MOTORES ELÉTRICOS  
SEM RETIRADA DE OPERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Mecânica dos Sólidos.

Aprovada em 26 de maio de 2006.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Professor Vladimir Ivanovitch Dynnikov, Ph. D.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Professor Gilberto Costa Drumond Sousa, Ph. D.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-orientador

---

Professor Fransérgio Leite da Cunha, Ph. D.  
Faculdade do Centro Leste

---

Professora Jussara Farias Fardin, D. Sc.  
Universidade Federal do Espírito Santo

A Sandra e Newton, que me trouxeram à luz.

“A porta da verdade estava aberta, mas só deixava passar meia pessoa de cada vez. Assim, não era possível atingir toda a verdade, porque a meia pessoa que entrava só trazia o perfil de meia verdade. E a segunda metade voltava igualmente com meio perfil. E os dois meios perfis não coincidiam. Arrebentaram a porta. Derrubaram a porta. Chegaram a um lugar luminoso onde a verdade esplendia seus fogos. Era dividida em duas metades, diferentes uma da outra. Chegou-se a discutir qual a metade mais bela. As duas eram totalmente belas. Mas carecia optar. Cada um optou conforme seu capricho, sua ilusão, sua miopia.”

Carlos Drummond de Andrade

## RESUMO

Como alternativa aos métodos consolidados na indústria e consensados em normas técnicas, esta dissertação propõe o uso de um registrador oscilográfico atualmente disponível no mercado, com relativa alta taxa de amostragem de sinais, para oscilografar grandezas elétricas de alimentação de motor, com posteriores cálculos e estimativas de potência entregue pelo motor à carga, obtendo-se assim uma metodologia de levantamento de características de conjugado de motores elétricos sem retirada da máquina da planta operacional, dispensando laboratórios e oficinas. Como resultado, tem-se então uma metodologia de resultados com boa precisão, de baixo custo, não destrutiva, não interferente na produção obtida pelo motor em operação e passível de utilização por indústrias que não disponham de documentação técnica completa de motores em operação, ou que necessitem de comprovar a documentação disponível.

## **ABSTRACT**

As an alternative to the procedures used in the industry and described in technical standards, available oscillographic recorder is proposed to be used, with relative high sampling rate, to record electrical voltage and current of a motor, with posterior calculations and estimates of power supplied from the motor to the load, obtaining methodology of survey of torque characteristics of electric motors without withdrawal of the machine from the operational plant, without the needing for laboratories and workshops. As a result, good precision methodology is achieved, of low cost, not destructive, that does not interfere in the production obtained by the motor and it is fitter for industries that do not have available the motor technical documentation, or that need to validate the available documentation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – motores elétricos de rotor gaiola .....	25
Figura 2 – curva característica de conjugado de bombas hidráulicas .....	29
Figura 3 – curva característica de conjugado de ventiladores .....	30
Figura 4 – curvas características de conjugado de compressores centrífugos.....	31
Figura 5 – curva característica de conjugado de compressores rotativos .....	32
Figura 6 – curvas características de conjugado de compressores recíprocos de pistão.....	33
Figura 7 – pontos notáveis de conjugado do motor na curva de partida.....	35
Figura 8 – comparação qualitativa entre as diferentes categorias de conjugado de motor .....	37
Figura 9 – ponto de operação do conjunto motor-carga .....	39
Figura 10 – análise da estabilidade operacional do ponto P .....	41
Figura 11 – verificação gráfica do conjugado de aceleração do conjunto motor-carga .....	44
Figura 12 – requisito de conjugado motriz ser superior ao conjugado resistente em todos os pontos .....	45
Figura 13 – curvas de conjugado de partida de motor elétrico e carga acionada (ventilador) .....	46
Figura 14 - dispositivos de travamento de rotores para ensaio de rotor bloqueado...55	55
Figura 15 – circuito elétrico equivalente do motor de indução rotor gaiola .....	56
Figura 16 – motor em corte e suas perdas de potência .....	68
Figura 17 – motor utilizado no experimento .....	77
Figura 18 – variação do campo magnético com a intensidade de campo .....	80
Figura 19 – oscilografia de partida do motor .....	84
Figura 20 – Tabela de dados obtida a partir da oscilografia.....	87
Figura 21 – gráfico da potência transferida ao rotor .....	88

Figura 22 – registrador oscilógrafo .....	97
Figura 23 – alicates transdutor de corrente .....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – valores de conjugado de partida para motor de indução trifásico, rotor gaiola, de 200 cv, 1800 rpm.....	38
Tabela 2 – cálculo do conjugado de partida pelo método da aceleração .....	52
Tabela 3 - cálculo da potência entregue ao rotor .....	74
Tabela 4 – dados de placa do motor ensaiado.....	79
Tabela 5 –ensaio a vazio no laboratório do fabricante .....	79
Tabela 6 –ensaio a rotor bloqueado no laboratório do fabricante .....	80
Tabela 7 – comparação entre o conjugado do motor sob ensaio e o de um motor categoria N.....	82
Tabela 8 – comparação dos valores de conjugados obtidos, com os valores do fabricante .....	92

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão

IEC - International Electrical Commission

NEMA - National Electrical Manufacturers Association

TC - Transformador de Corrente

TP - Transformador de Potencial

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. VISÃO GERAL DE MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS.....	15
1.2. APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA – CASO CST .....	16
1.3. O PROBLEMA.....	18
1.4. A IDÉIA.....	19
1.5. JUSTIFICATIVA .....	19
1.6. O MÉTODO EMPREGADO .....	20
<b>2. MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS DE ROTOR GAIOLA.....</b>	<b>22</b>
2.1. A HISTÓRIA DAS MÁQUINAS MOTRIZES .....	22
2.2. PARTIDA E OPERAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR-CARGA .....	25
2.2.1. A SEGUNDA LEI DE NEWTON .....	26
2.2.2. TIPOS DE CARGAS ACIONADAS POR MOTOR ELÉTRICO.....	27
2.2.3. CURVAS DE CONJUGADO DE MOTORES ELÉTRICOS .....	34
2.2.4. FUNCIONAMENTO EM REGIME.....	38
2.2.5. REQUISITOS DE PARTIDA .....	41
2.2.6. ASPECTOS ADICIONAIS DE PARTIDA .....	45
2.3. ESPECIFICAÇÃO PARA COMPRA DE MOTOR ELÉTRICO.....	48
<b>3. MÉTODOS DE LEVANTAMENTO DE CONJUGADO DE PARTIDA DE MOTOR ELÉTRICO.....</b>	<b>50</b>
3.1. MÉTODOS MECÂNICOS .....	50
3.1.1. MÉTODO DA POTÊNCIA DE SAÍDA .....	50
3.1.2. MÉTODO DA ACELERAÇÃO.....	51
3.1.3. MÉTODO DA MEDIÇÃO DIRETA .....	53
3.2. MÉTODOS ELETRO-MECÂNICOS .....	53
3.2.1. MÉTODO DO DIAGRAMA CIRCULAR.....	54
3.2.2. MÉTODO DA POTÊNCIA DE ENTRADA .....	56
3.2.3. COMPARATIVO GERAL ENTRE OS MÉTODOS .....	57

<b>4. METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>59</b>
4.1. ASPECTOS GERAIS .....	59
4.2. A MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA DE ENTRADA .....	60
4.3. CÁLCULO DAS PERDAS DE POTÊNCIA .....	63
4.3.1. PERDAS NOS CABOS DE ALIMENTAÇÃO .....	63
4.3.2. PERDAS NO MOTOR ELÉTRICO .....	64
4.4. CÁLCULO DO CONJUGADO DESENVOLVIDO NO EIXO DO MOTOR NOS PONTOS DE INTERESSE .....	69
4.4.1. PERDAS À CONDIÇÃO NOMINAL .....	69
4.4.2. CÁLCULO DO CONJUGADO .....	70
4.4.3. CONJUGADO MÁXIMO .....	72
<b>5. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>77</b>
5.1. MOTOR ENSAIADO .....	77
5.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....	82
5.2.1. ASPECTOS GERAIS .....	82
5.2.2. OSCILOGRAFIA DA PARTIDA .....	83
5.2.3. CÁLCULO DAS PERDAS À CONDIÇÃO NOMINAL .....	84
5.2.4. CÁLCULO DA POTÊNCIA DE ENTRADA E DA POTÊNCIA ENTREGUE AO EIXO .....	86
5.2.5. CÁLCULO DO CONJUGADO A ROTOR BLOQUEADO .....	89
5.2.6. CÁLCULO DO CONJUGADO MÁXIMO .....	90
<b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE A - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE B – CÁLCULO DO CONJUGADO ATRAVÉS DO MODELO dq DO MOTOR .....</b>	<b>100</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. VISÃO GERAL DE MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

O motor elétrico, substantivo masculino, pode ser definido como “tudo que dá movimento a um mecanismo” [04].

Se for perguntado a 10 pessoas de diferentes áreas de atuação, provavelmente serão obtidas 10 diferentes definições para a função do motor elétrico. Poderíamos ouvir desde “fazer girar ou rodar”, “produzir”, “gerar movimento”, até algumas mais didáticas como “transformar energia elétrica em mecânica”, “produzir movimento”, “produzir conjugado”.

O motor elétrico pode ser classificado basicamente em 3 grupos [07], todos eles tendo a função de transformar energia elétrica em energia mecânica rotacional:

- a) Motor de corrente contínua: alimentado através de energia elétrica em forma de corrente contínua. São motores de custo mais elevado, aplicados para funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e prestam a controles de grande flexibilidade e precisão. Com o avanço dos métodos de modelamento e controle de motores de corrente alternada, tem caído em desuso [23].
- b) Motor de corrente alternada síncrono: alimentação através de energia elétrica em forma de corrente alternada, apresenta no eixo rotação constante independente da carga, dentro de condições normais de operação;
- c) Motor de corrente alternada assíncrono: também alimentado através de energia elétrica em forma de corrente alternada, apresenta no eixo pequenas variações de rotação (tipicamente na ordem de 5% ou menos) conforme a carga imposta. Podem ser de rotor bobinado, com enrolamentos de cobre, ou de rotor com barras de materiais condutores, conhecido como rotor gaiola de esquilo. Atualmente, é possível controlar a velocidade com alta flexibilidade e precisão

com uso de inversores de frequência (conversores de energia contínua para alternada) dotados de recursos de modelamento matemáticos modernos [23].

A potência mecânica entregue pelo eixo do motor à carga se correlaciona com a rotação através da grandeza denominada “Conjugado” ou “Torque”, ou ainda “Momento”. Quanto maior o conjugado e quanto maior a rotação, maior é a potência entregue. Ou seja, a potência é o produto entre conjugado e rotação.

O conjugado pode ser definido [07] como a tendência de um acoplamento mecânico, no caso o acoplamento entre o motor e a carga acionada, para produzir rotação. Essa tendência é obtida através de uma força aplicada a um dispositivo girante, distanciado do seu eixo de rotação. No caso do motor, é o próprio rotor girando seu eixo. Ao abrirmos uma porta, é a força aplicada na maçaneta para girá-la em relação ao eixo onde estão montadas as dobradiças na aduela.

O conjugado do motor, em toda a sua faixa de operação (ou seja, de rotação), é o responsável por imprimir à carga acionada a potência necessária ao seu acionamento. Esse conjugado, em toda a faixa de operação, é definido como “Conjugado de partida” [05].

## **1.2. APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA – CASO CST**

Em consulta informal feita à Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST<sup>1</sup> no ano de 2004, uma companhia siderúrgica integrada cuja linha de produção vai desde a matéria prima retirada da natureza até o produto final pronto para uso por outras indústrias de acabamento e aplicação final de aços planos, constatou-se que em

---

<sup>1</sup> Optou-se por fazer levantamento na CST por se ter acesso às informações necessárias neste trabalho e, principalmente, por refletir bem a realidade da indústria de maneira geral quanto à utilização de motores elétricos, visto que há grande diversidade de tipos de cargas acionáveis por motores elétricos – bombas, ventiladores, exaustores, transportadores de correia, pontes e pórticos rolantes, bobinadeiras, mesas de rolos, moinhos, misturadores, agitadores, locomotivas, etc.

operação, ou seja, excetuando-se estoque de sobressalentes e *stand by*<sup>2</sup>, há aproximadamente 7.000 motores elétricos, uma proporção de 2 motores em operação para cada colaborador direto. Desses, aproximadamente 6.000 são motores elétricos de indução, trifásicos, de rotor gaiola. Uma participação de aproximadamente 85% em relação ao conjunto de todos os motores industriais, que tende a aumentar com a constante substituição de motores de corrente contínua e de rotor bobinado por motores de rotor gaiola com acionamentos modernos.

De maneira geral, motores elétricos de grandes potência, tipicamente acima de 200 cv<sup>3</sup>, e alguns de baixa potência, são instalados em aplicações de produção cuja parada implica em altas perdas por lucros cessantes, e em locais cuja parada acidental pode implicar em prejuízos financeiros desproporcionais ao motor – como por exemplo equipamentos de refrigeração – ou ainda em acidentes com danos a pessoas, a patrimônio ou ao ambiente – considerando-se agora equipamentos de controle ambiental, de içamento e transporte de cargas pesadas / perigosas.

Em consulta ao Sistema Informatizado de Manutenção de Área da CST – conhecido pela sigla SISMANA, no ano de 2004 [22], verificou-se que mais de 60% dos motores acima de 200 cv de potência possuem a grandeza denominada por essa empresa como Criticidade calculada como média ou alta. Esses níveis de criticidade indicam que a falha do motor elétrico pode provocar impactos de parada de produção da unidade operacional e/ou de toda a empresa e/ou podem causar impactos ambientais e/ou podem causar risco ao homem.

A aplicação de motores de rotor gaiola tem sido largamente preferida em detrimento de outros tipos de motores devido a ter menos itens de inspeção e manutenção, proporcionando maior tempo entre manutenções e entre falhas, com maior confiabilidade e maior disponibilidade operacional [21].

---

<sup>2</sup> O termo *stand by* é correntemente aplicado na indústria a equipamentos e dispositivos que se encontram instalados na linha de produção, porém sem estar de fato em operação. A função é estarem aptos e entrarem em operação em caso de alguma anormalidade com os outros equipamentos e dispositivos que funcionam em condições normais.

<sup>3</sup> A unidade “cv”, conhecida como cavalo-vapor, apesar de não constar no Sistema Internacional de Unidades como a unidade de Potência, está sendo utilizada devido ao seu uso comum pelas indústrias fabricantes de motores elétricos. Os fabricantes têm utilizado como relação 1 cv igual a 0,736 kW [23].

Até a década passada, o motor de rotor gaiola era basicamente utilizado em aplicações onde se necessitava velocidade aproximadamente constante após a partida da carga, tais como bombas, ventiladores, exaustores, transportadores de correia e acionamento de turbinas. Com a consolidação do inversor de frequência e de outros acionamentos da eletrônica de potência, o uso do motor de rotor gaiola tem inevitavelmente substituído motores de corrente contínua cuja aplicação era devido à necessidade de variação de velocidade e também de altos valores de conjugado, neste último caso substituindo também o motor de rotor bobinado. Com essa nova realidade tecnológica, não seria exagero dizer que é possível que em uma nova indústria a ser construída e após substituições por fim de vida útil em indústrias atuais, 100% dos motores de tensão elétrica até a faixa de 6.600 V sejam de rotor gaiola<sup>4</sup>.

Pela abrangência e importância descritas, a metodologia a ser apresentada abrange os motores elétricos de rotor gaiola, cujo funcionamento, aplicações e aspectos de partida serão descritos no próximo capítulo.

### **1.3. O PROBLEMA**

Após 30 anos de operação a taxa de mortalidade de motores elétricos de grande porte aumenta abruptamente, de maneira que em torno de 95% dessas máquinas elétricas possuem essa vida útil [08]. Assim, inevitavelmente as indústrias em dado momento têm de substituir seus motores seja de forma preditiva, seja em situação emergencial após falha grave.

Devido a razões diversas, muitas empresas não possuem documentação técnica completa de seus motores em operação, de forma a se ter subsídios razoáveis para especificação de compra de um motor sobressalente para substituição de motores originalmente em operação. Com esse problema, quando não se conhecem as características de conjugado de partida, torna-se praticamente impeditiva a compra

---

<sup>4</sup> Se faz a distinção para esta faixa de tensão porque não se tem no mercado tecnologia aceita para acionamentos de eletrônica de potência acima da tensão citada.

de um motor com o objetivo de ser intercambiável com o motor originalmente em operação.

#### **1.4. A IDÉIA**

Motivado pela realidade de nem sempre se dispor de documentação técnica dos motores, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de levantamento das características principais de conjugado de motores elétricos a partir de oscilografia de uma partida na própria planta operacional, sem necessidade de remoção do motor para laboratório de testes. Conforme consulta informal à CST, a remoção da planta de um motor de grande porte – algo em torno de 1.500 cv de potência – e posterior reinstalação demandariam tempo total de aproximadamente 16 horas, com custos em torno de US\$ 2.000, gerando ainda perda de produção que varia conforme a aplicação do motor.

#### **1.5. JUSTIFICATIVA**

Desde a descoberta do eletro-magnetismo e, mais recentemente, a consolidação de acionamentos de velocidade variável com baixo custo e alta confiabilidade, o motor elétrico tem se garantido como o principal elemento motriz na indústria de várias máquinas de linha de produção e de periféricos, tais como moinhos, ventiladores e exaustores, transportadores de correia, bobinadeiras, cadeiras de laminação, agitadores e misturadores e praticamente tudo que possa ser acionado através de movimento giratório.

Conforme uma pesquisa interna feita pelo autor na CST, atualmente os motores elétricos são responsáveis por 85 a 90% do total do consumo de energia elétrica na indústria, o que reforça a predominância dessa máquina, visto que somente entre 10 e 15 % de energia elétrica são utilizados para aquecimento e refrigeração, iluminação, computadores e outras aplicações.

## 1.6. O MÉTODO EMPREGADO

Este trabalho, tendo o objetivo de propor um método de levantamento do conjugado de partida de um motor instalado na planta operacional, com acionamento convencional<sup>5</sup>, considera que a função do motor elétrico é partir uma carga mecânica até a sua condição de regime e mantê-la nessa condição pelo tempo necessário. Essa definição exclui várias aplicações do motor elétrico, mas consideram-se neste trabalho as especificidades do motor elétrico de indução, trifásico, de rotor gaiola.

Como alternativa aos métodos constantes em normas técnicas e trabalhos acadêmicos, que implicam em ensaios em laboratório e serão descritos ao longo da dissertação, o método empregado para levantamento das características de conjugado do motor elétrico em operação é resumido pelas seguintes etapas:

- a) aquisição de dados elétricos, tensão e corrente elétrica, de entrada no motor durante a partida, em regime *on-line*<sup>6</sup>;
- b) interpretação gráfica das curvas adquiridas (que serão denominadas oscilografadas, conforme vocabulário utilizado no meio técnico);
- c) obtenção de valores específicos de potência elétrica de entrada do motor;
- d) cálculo de potência entregue pelo motor à carga acionada, ou seja, potência estimada no eixo do motor;
- e) cálculo do conjugado desenvolvido pelo motor.

Considerando que geralmente motores de baixa tensão possuem curvas de conjugado definidas por normas técnicas e que motores de alta tensão geralmente são fabricados para aplicações específicas com curvas de conjugado também específicas, a metodologia então será focada nestes motores, que tipicamente possuem potência acima de 200cv.

---

<sup>5</sup> O termo “acionamento convencional” é utilizado para aplicações onde se faz a partida do conjunto motor-carga sob tensão e frequência constantes, e não se varia sua velocidade.

<sup>6</sup> O termo “on-line” está sendo utilizado para indicar que a aquisição de dados é feita com o motor instalado, energizado, em operação.

A metodologia desenvolvida foi aplicada como estudo de caso em um motor de 842 cv de potência, que aciona uma bomba d'água, tendo apresentado resultados coerentes com os valores ensaiados no motor no laboratório do fabricante, comprovando a viabilidade da metodologia proposta.

Outra aplicação para o método desenvolvido é a análise de falhas presentes e incipientes em motores de indução trifásicos a partir da comparação da curva de conjugado atual de um motor, com sua curva "original", obtida no ensaio em fábrica. Essa prática de manutenção tem sido objeto de pesquisas acadêmicas [14], e tem sido utilizada por oficinas de manutenção de motores elétricos [15]. Considera-se essa técnica como uma grande evolução dos métodos tradicionais que eram sensíveis e qualitativos na avaliação de sintomas do motor em busca de defeitos [20].

## **2. MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS DE ROTOR GAIOLA**

Na década de 1980 estimava-se que entre 70 e 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias no mundo era transformada em energia mecânica através de motores elétricos [01]. No Brasil, estimava-se produção anual de 3 milhões de motores. Tendo em vista a vocação exportadora de motores que o Brasil assumiu na década atual, fica difícil precisar a quantidade de motores atual que é produzida e destinada ao mercado interno que, certamente, supera em muito o número da década de 1980.

Colocada a importância dessa máquina elétrica, neste capítulo serão descritas suas função e aplicação, com destaque para a partida do conjunto motor-carga, foco deste trabalho. Deste ponto em diante, ao ser mencionado o termo “motor elétrico” estará fazendo-se referência ao motor elétrico de indução trifásico de rotor gaiola.

Antes, o motor elétrico será localizado na evolução das máquinas de gerar movimento.

### **2.1. A HISTÓRIA DAS MÁQUINAS MOTRIZES**

Para o motor elétrico ter conquistado o título de máquina motriz mais utilizada, a história [02] [07] nos diz que as grandes fontes de energia para gerar movimento já foram os ventos, que em homenagem ao seu deus grego Eolo recebeu a denominação eólica. Ainda nos dias atuais, é possível encontrar aplicações para moenda de grãos, que surgiram nas regiões dos atuais Irã e Afeganistão no século VII d.C. No Brasil, a energia dos ventos ainda é muito utilizada para bombeamento de água através de cata-ventos.

Consta também na história que aproximadamente 100 anos antes de Cristo coube aos chineses a criação de um dos primeiros instrumentos movidos pela água, que era uma enorme ferramenta de trabalho semelhante a um martelo, denominada martinete, substituindo a tração animal.

Em uma época mais recente, no início do século XVIII, surge o movimento a vapor, quando o inglês Thomas Newcomen engendrou um sistema de bombeamento de água das minas de sua propriedade, sendo esse evento considerado por muitos como o marco inicial da Revolução Industrial. O movimento a vapor seria empregado largamente ainda em navios e trens.

A evolução toma velocidades maiores quando o diário *New York Herald Tribune* estampa a manchete de que Thomas Alva Edison, em 1879, tinha acabado de expor sua mais recente invenção, a lâmpada incandescente, utilizando um gerador de corrente contínua criado pelo alemão Werner Siemens em 1866. Em poucos anos, cidades ganharam iluminação noturna a energia elétrica, como foi o caso de São Paulo em 1891.

Voltando ao invento de Siemens, 1866 é considerado o ano do nascimento do motor elétrico, após quase 3 séculos de estudos, passando por Tales de Mileto e William Gilbert, que perceberam atração entre partículas friccionadas contra outros materiais, em 1600, passando também pelo alemão Otto Guericke, que inventou uma máquina constituída de uma esfera de enxofre e um eixo, em 1663, chegando até o século XVIII também na Europa.

Nesse século, em que “o homem passava a ser o centro do universo”, descobriu-se a pilha elétrica, o eletromagnetismo, e o eletroímã, considerado o embrião que se desenvolveria e transformar-se-ia no motor elétrico.

Michael Faraday, no dia 28 de agosto de 1831, descobre a lei da indução, comprovando-a através de um gerador que num campo magnético é possível fazer girar espiras condutoras.

Saltando alguns pontos da história<sup>7</sup>, rege a lenda que ainda na década de 1830 um arquiteto e professor de física alemão, Moritz Hermann von Jacobi, instalou um motor elétrico numa lancha, motor esse baseado no gerador de Faraday com

---

<sup>7</sup> Ao leitor mais interessado, recomenda-se o livro “O motor elétrico”, da referência [02].

adaptações desenvolvidas pelo inglês W. Ritchie. A lancha teria deslocado 14 pessoas durante algumas horas contra as correntezas do rio Newa, causando espanto em passageiros e espectadores. Esse fenômeno teria sido a comprovação da utilidade do motor elétrico, e o incentivo a pesquisas sobre o assunto.

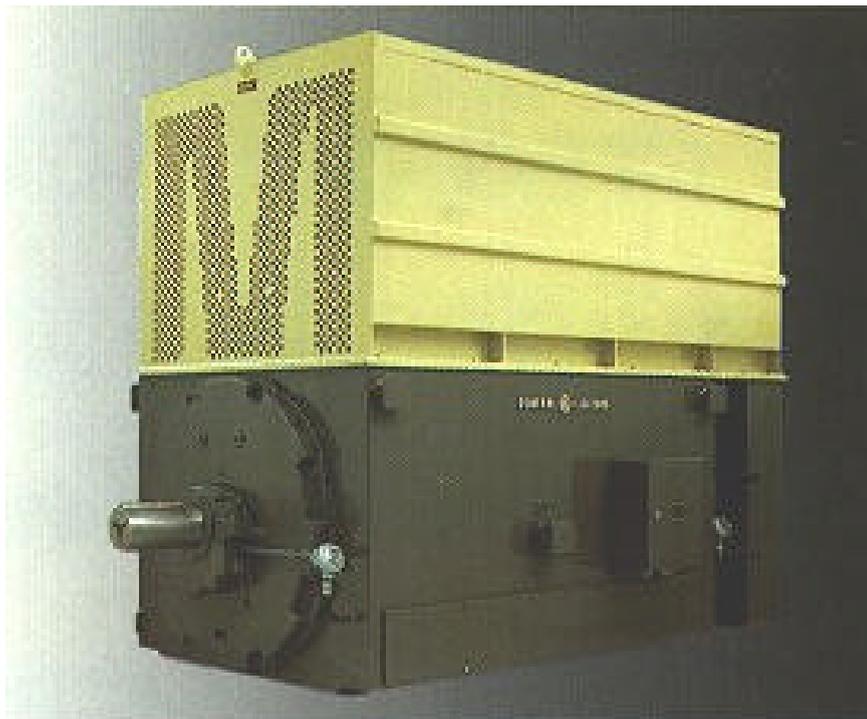
O primeiro motor trifásico, que atualmente domina a indústria, foi patenteado em 1889, por um cientista russo radicado na Alemanha, chamado Dobrowolsky. O motor já possuía rendimento de 80%, sendo até superior a alguns motores de pequeno porte fabricados atualmente.

No final do século XIX, já dominando as indústrias de maneira geral, o motor elétrico invade lares e comércios através de eletrodomésticos, uma vez que comparativamente era um acionamento discreto e silencioso.

No Brasil, a indústria de motores elétricos deslanchou no período entre as duas grandes guerras, através de fabricantes conhecidos até hoje, como Siemens, Arno, General Electric, Búfalo, Motores Brasil, Wagner, Indústria Paulista de Motores, WEG, Kohlbach e Eberle.

Hoje em dia, não obstante a participação industrial já citada, é raro encontrar uma residência que possua menos de 10 motores elétricos, aplicados em ventiladores, condicionadores de ar, espremedores de frutas, processadores de alimentos, esteiras de ginástica, portões automatizados, etc.

A Figura 1 mostra motores elétricos de rotor gaiola atualmente fabricados no Brasil.



a) Motor elétrico de indução de alta tensão – fabricante GE-GEVISA S.A.



b) Motor elétrico de indução de alta tensão – fabricante WEG Máquinas S.A.



b) Motor elétrico de baixa tensão – fabricante MetalCorte-Eberle Motores Elétricos.

**Figura 1 – motores elétricos de rotor gaiola**

## 2.2. PARTIDA E OPERAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR-CARGA

As cargas mecânicas pelos motores elétricos são as mais variadas possíveis. Porém, é possível agrupá-las, separando-as pelas similaridades de seu principal item de caracterização: a curva conjugado x velocidade.

Antes de descrever as cargas, se faz necessário então entender o que é a curva conjugado x velocidade da carga e do motor, bem como a dinâmica de partida desse conjunto.

### 2.2.1. A SEGUNDA LEI DE NEWTON

A Segunda Lei de Newton, doravante também nomeada como Equação do Movimento, é a lei que rege a dinâmica de partida motor-carga. Essa lei, para um objeto rígido em movimento translacional, é [03]:

$$\sum \vec{F} = M\vec{a} \quad 2-1$$

Onde:

$F$ : forças aplicadas ao objeto;

$M$ : massa do objeto;

$a$ : aceleração do objeto.

Obtém-se equivalente rotacional desta equação tomando, de forma simplificada, as grandezas translacionais como grandezas rotacionais, a saber:

$$\sum \vec{C} = J\vec{a} \quad 2-2$$

Onde:

$C$ : conjugados aplicados ao conjunto em rotação;

$J$ : momento de inércia do conjunto em rotação;

$a$ : aceleração angular do conjunto em rotação.

Aplicando, neste momento, qualitativamente a 2ª Lei de Newton ao conjunto motor-carga, as grandezas são as seguintes:

? C: conjugado líquido resultante no conjunto, conhecido também como conjugado de aceleração;

J: inércia total das partes girantes, ou seja, do rotor do motor, da carga acionada, e de acoplamentos mecânicos que por ventura existam;

a: é a aceleração angular, ou seja, o aumento (ou diminuição) da rotação do conjunto por unidade de tempo.

Geralmente, consideram-se dois conjugados no sistema:

$C_M$ : conjugado motriz, produzido pelo motor;

$C_R$ : conjugado resistente, produzido pela carga acionada.

De maneira geral, durante a partida do conjunto motor-carga há duas etapas distintas:

- a) o conjunto parte desde a velocidade (rotação) zero até a velocidade nominal de operação, quando a aceleração angular existe e é positiva;
- b) o conjunto opera em regime, com velocidade praticamente constante, e aceleração angular nula.

No próximo item, são descritos os principais tipos de carga acionadas por motores elétricos, classificando-as conforme suas características de conjugado resistente. Posteriormente, serão classificados os motores elétricos conforme suas curvas de conjugado.

## **2.2.2. TIPOS DE CARGAS ACIONADAS POR MOTOR ELÉTRICO**

Grande parte das cargas industriais acionadas por motores elétricos podem ser agrupadas da seguinte forma [01]:

- a) bombas hidráulicas;

- b) ventiladores;
- c) compressores;
- d) equipamentos de içamento e transporte.

Esses diferentes tipos de carga serão caracterizados pela curva conjugado x rotação, ou seja, o gráfico que demonstra para cada velocidade de rotação, desde nula até a nominal, o conjugado resistente que a carga produz. Por não ser relevante para o estudo de partida, as características nominais das cargas, como por exemplo altura manométrica, rendimento e potência hidráulica de bombas, não serão abordadas.

### **2.2.2.1. BOMBAS HIDRÁULICAS**

As bombas hidráulicas, sejam elas cinéticas – centrífugas, periféricas, especiais – ou de deslocamento direto – movimento alternado ou rotativo – de maneira geral obedecem aos seguintes parâmetros [01]:

- a) para partida com registro de descarga fechado, a curva conjugado x rotação é uma parábola partindo praticamente do zero, não sendo exatamente nulo devido a atritos nos mancais, vedações, etc.
- b) para partida com registro de descarga aberto, a curva é semelhante ao caso anterior, porém com conjugados maiores para rotações maiores;

A Figura 2 exemplifica a curva característica de bombas hidráulicas.

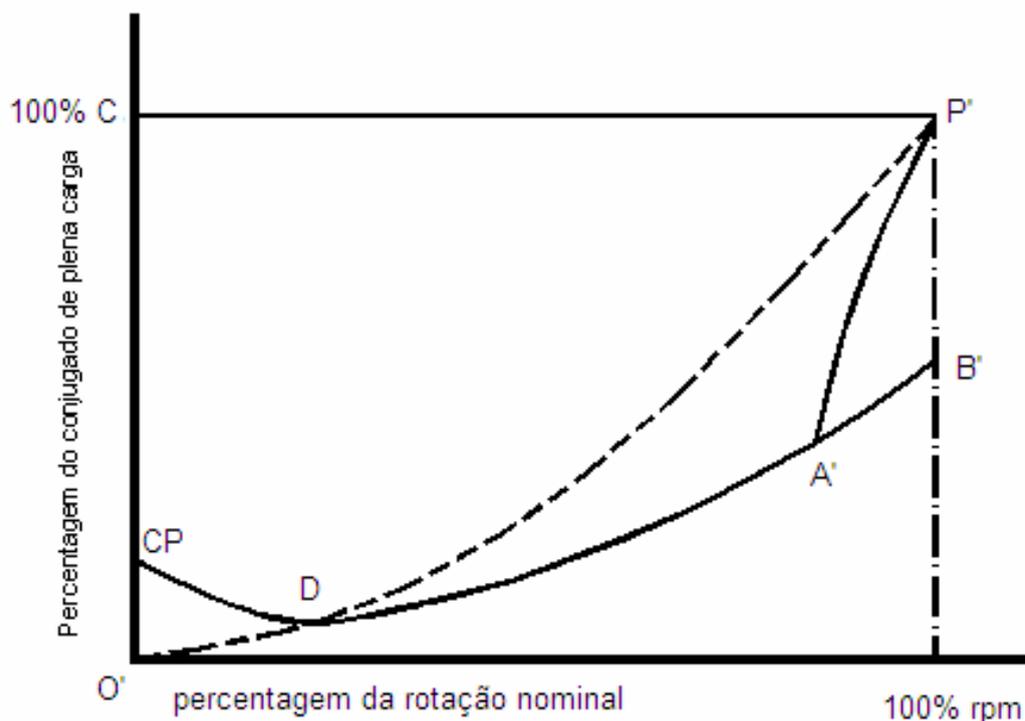


Figura 2 – curva característica de conjugado de bombas hidráulicas

Curva CP-A'-B'-P': partida com registro de saída fechado, com abertura do registro após conclusão da partida

Curva CP-A'-P': partida com registro de saída abrindo no ponto A'

Curva O'-P': partida com registro de saída aberto

Adaptado de Lobosco & Dias [01]

## 2.2.2.2. VENTILADORES

De maneira geral, a curva de conjugado resistente x velocidade de um ventilador – seja ele de fluxo axial ou centrífugo, e também de exaustores – apresenta comportamento parabólico, típico de equipamentos centrífugos e assemelhados, como foi o caso de bomba hidráulica [01].

Similarmente às bombas hidráulicas, os ventiladores apresentam um conjugado resistente com valor inicial (a rotação nula) mais alto que aquele encontrado em rotações baixas devido aos atritos estáticos imediatamente após a partida, que diminuem à medida que a rotação aumenta [01].

A Figura 3 mostra a característica de ventiladores tanto para partida com registro fechado quanto com registro aberto.

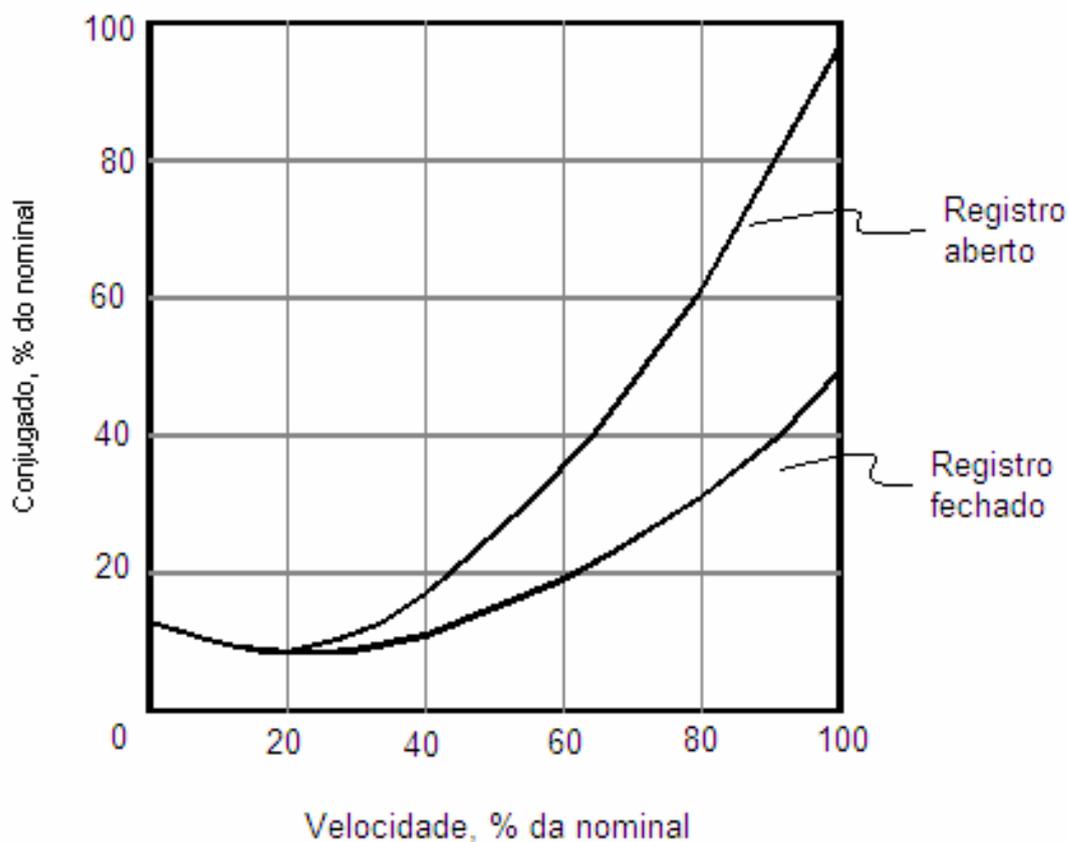


Figura 3 – curva característica de conjugado de ventiladores

Adaptado de Lobosco & Dias [01]

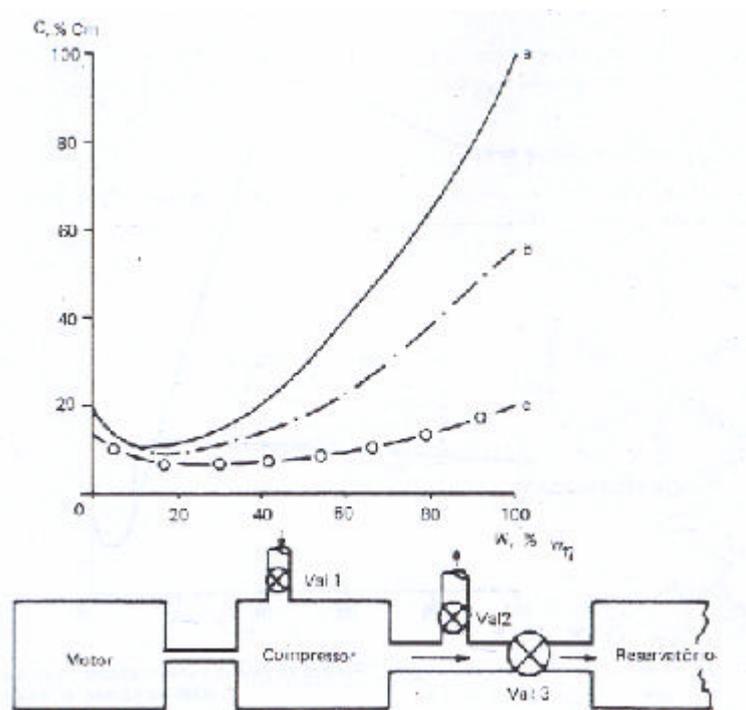
### 2.2.2.3. COMPRESSORES

A demanda por grandes quantidades de gases sob alta pressão na produção de plásticos, fertilizantes, em refinarias de petróleo e para a injeção de oxigênio em altos fornos levou ao desenvolvimento de grandes compressores.

Basicamente, os compressores podem ser [01]:

- a) a pistão recíprocos;
- b) a pistão rotativos ou
- c) centrífugos.

Os compressores centrífugos por terem características construtivas semelhantes às bombas hidráulicas, apresentam curva de conjugado resistente bastante semelhante à deste tipo de equipamento, conforme Figura 4.



**Figura 4 – curvas características de conjugado de compressores centrífugos**

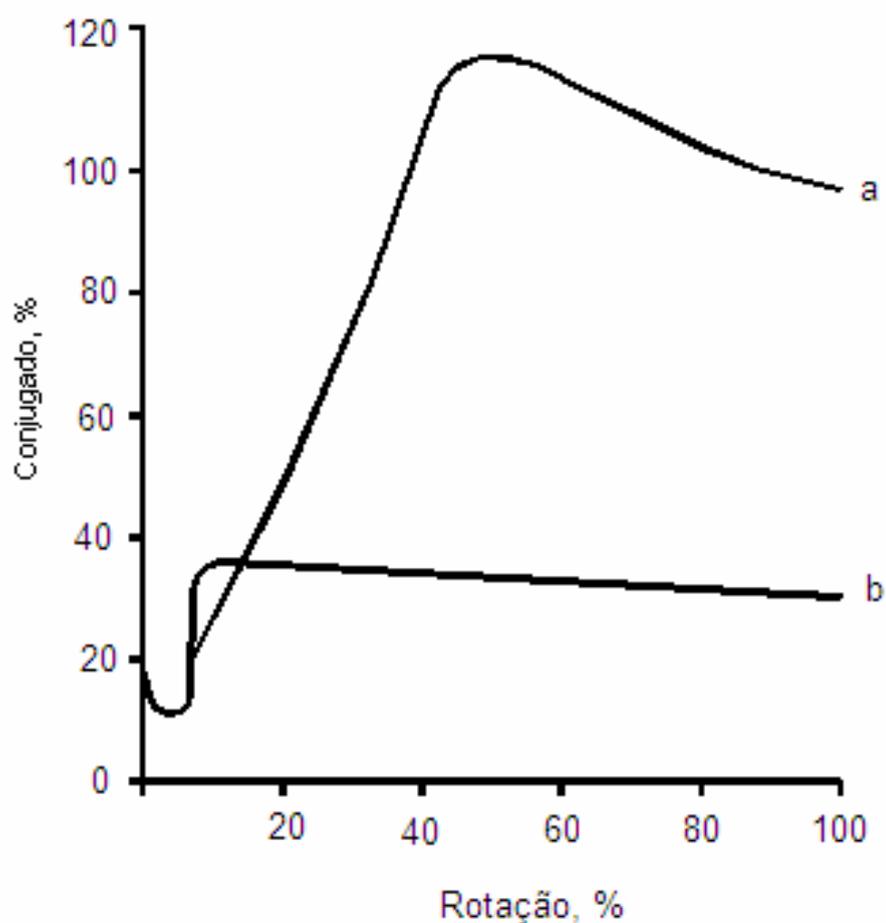
**Curva a: partida contra pressão: Válvulas 1 e 2 fechadas, 3 aberta**

**Curva b: partida em vazio: Válvulas 1 e 2 abertas, 3 fechada**

**Curva c: partida aspiração fechada, válvulas 1 e 3 fechadas, 2 aberta**

**Adaptado de Lobosco & Dias [01]**

Os compressores rotativos de palhetas ou de parafuso apresentam formas construtivas diferentes entre si, porém suas curvas típicas são semelhantes e podem ser representadas pela Figura 5.



**Figura 5 – curva característica de conjugado de compressores rotativos**

**Curva a: partida contra a pressão de operação**

**Curva b: partida em vazio**

**Adaptado de Lobosco & Dias [01]**

Os compressores recíprocos de pistão têm a peculiaridade de ter o conjugado resistente de partida significativamente maior que o conjugado nominal, quando a partida é realizada contra a pressão de operação, conforme mostra a Figura 6.

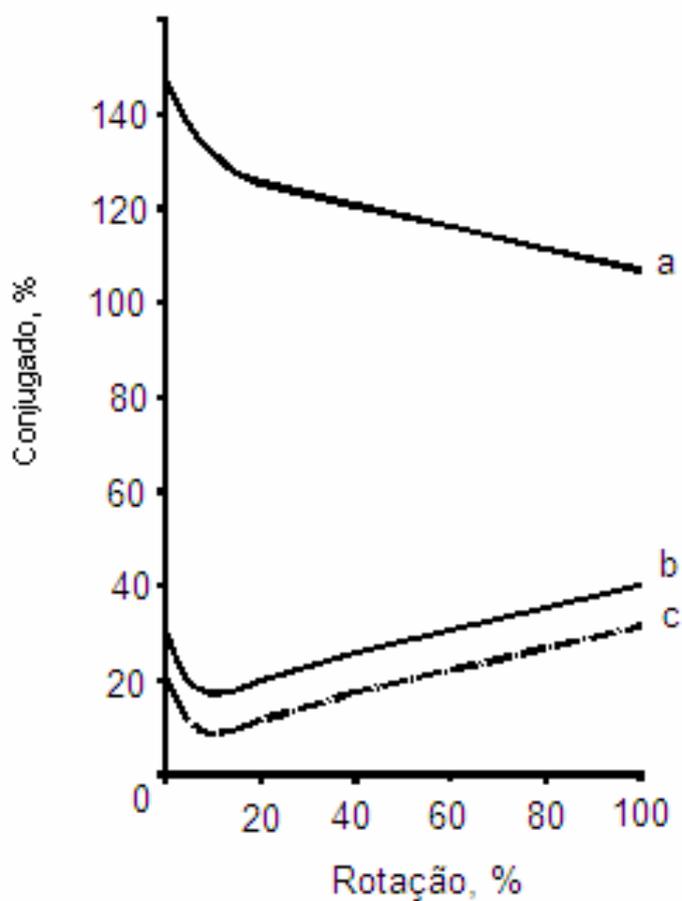


Figura 6 – curvas características de conjugado de compressores recíprocos de pistão

- Curva a: partida contra a pressão de operação  
 Curva b: partida com válvula de aspiração fechada  
 Curva c: partida em vazio

Adaptado de Lobosco & Dias [01]

#### 2.2.2.4. IÇAMENTO E TRANSPORTE

De forma geral, essas aplicações são destinadas a transporte de cargas com massa (e peso) considerada constante durante a operação e independente da velocidade. As aplicações típicas são transportadores de correia, pontes rolantes, elevadores e guindastes.

Não obstante às condições específicas de velocidade e aceleração / desaceleração de transporte e o rendimento das diversas transmissões envolvidas, o conjugado resistente da carga acionada é praticamente constante, independente da velocidade.

### **2.2.3. CURVAS DE CONJUGADO DE MOTORES ELÉTRICOS**

Assim como os diversos tipos de carga apresentam curvas típicas de conjugado x rotação, diferentes tipos de motores – gaiola simples, gaiola dupla, diferentes materiais e dimensões dos condutores do rotor – apresentam diferentes curvas típicas de conjugado x rotação.

Alguns autores [07] [18] afirmam que cada curva típica de conjugado é denominada Categoria ou Característica Mecânica, e que a categoria é a classificação comercial dos motores de indução.

A norma brasileira [05], de forma semelhante às normas NEMA e IEC, normatiza<sup>8</sup> para algumas faixas de potência curvas para categorias de conjugado, com o objetivo de se obter padronização independente do fabricante do motor.

Cabe ao comprador, conforme seus anseios e a aplicação do motor, definir se o motor fabricado será de categoria padronizada ou se terá curva de conjugado dita especial, ou seja, com valores despadronizados e sob encomenda. De maneira geral, sempre que possível tem se optado por motores de categoria de conjugado normatizada, que geralmente possuem menor custo por serem de projeto padrão e fabricados em série, e por terem maior possibilidade de intercambiabilidade com outros motores da planta industrial.

Visando facilitar a descrição das curvas de conjugado, em lugar de apresentar em gráficos, a norma brasileira [05] apresenta em tabelas os valores normatizados de 3

---

<sup>8</sup> Prefere-se e utiliza-se o termo “normatizar” para designar padronização obedecendo a alguma norma, seja técnica ou regulamentadora. E usa o termo “normalizar” para grandezas que estão calculadas em alguma base de referência, geralmente com unidade em % ou em p.u.

pontos notáveis, ditados a seguir, da curva conjugado x velocidade, também conhecida como curva de conjugado de partida<sup>9</sup>:

- Conjugado de rotor bloqueado (conjugado à rotação nula);
- Conjugado mínimo;
- Conjugado máximo.

A Figura 7 representa os pontos notáveis da curva de conjugado.

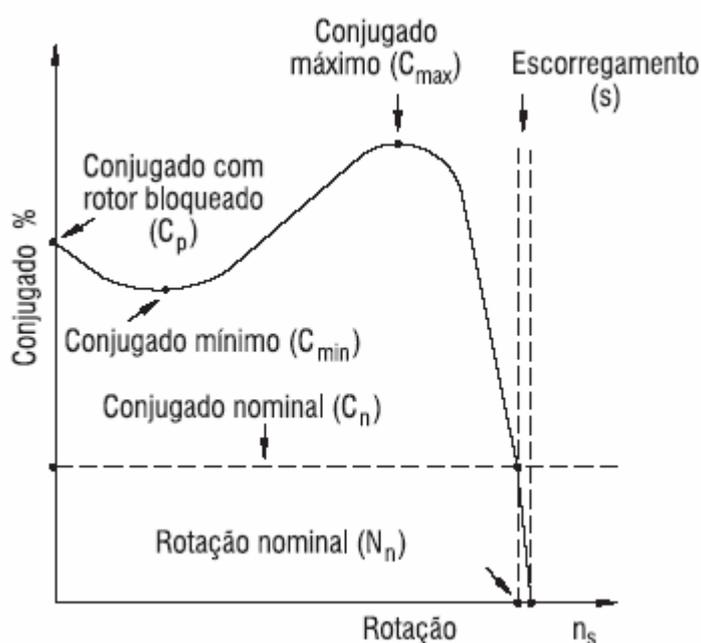


Figura 7 – pontos notáveis de conjugado do motor na curva de partida

Adaptado de WEG [23]

A norma brasileira [05] define as categorias de conjugado N, NY, H, HY e D, sendo que comercialmente os fabricantes têm ofertado somente as categorias N, H e D, que segundo a referida norma têm as características descritas nos itens a seguir.

<sup>9</sup> O termo “conjugado de partida” refere-se à toda a curva conjugado x rotação, desde a rotação nula até a rotação máxima, conforme definido pela norma NBR 7094. Erroneamente, algumas pessoas utilizam o termo para referenciar o conjugado de rotor bloqueado.

### **2.2.3.1. CATEGORIA N**

São chamados motores com conjugado de partida normal, e o conjugado resistente da carga acionada é proporcional ao quadrado da velocidade e igual ao conjugado nominal à velocidade (rotação) nominal. De maneira geral, esses motores são indicados para partida de ventiladores, exaustores, bombas hidráulicas e alguns tipos de compressores.

A norma define curvas para esta categoria para motores de até 856 cv de potência.

### **2.2.3.2. CATEGORIA H**

São chamados motores com conjugado de partida elevado, e o conjugado resistente da carga é suposto ser constante, independente da rotação. É indicado para acionamentos de içamentos e transportes.

A norma ABNT NBR 7094 define curvas para esta categoria para motores de até 217 cv. Motores acima dessa potência devem ser objeto de acordo entre fornecedor e comprador.

### **2.2.3.3. CATEGORIA D**

Esta categoria inclui motores com conjugado de rotor bloqueado elevado, na ordem de 275%<sup>10</sup>. À medida que a rotação aumenta, o conjugado diminui até atingir o valor nominal à rotação nominal.

Estes motores são indicados para acionamento de máquinas com alto conjugado resistente a baixas rotações, e em aplicações onde anomalias operacionais podem

---

<sup>10</sup> Os valores de conjugado para os pontos notáveis (rotor bloqueado, máximo e mínimo) geralmente são apresentados normalizados, em % ou em p.u., em relação ao conjugado nominal do motor [05].

implicar em partida com carga excessiva, como por exemplo moinhos, tesouras, prensas de perfuração.

Esses requisitos são válidos para todas as faixas de potência.

A Figura 8 mostra uma comparação qualitativa entre as curvas das diferentes categorias de conjugado.

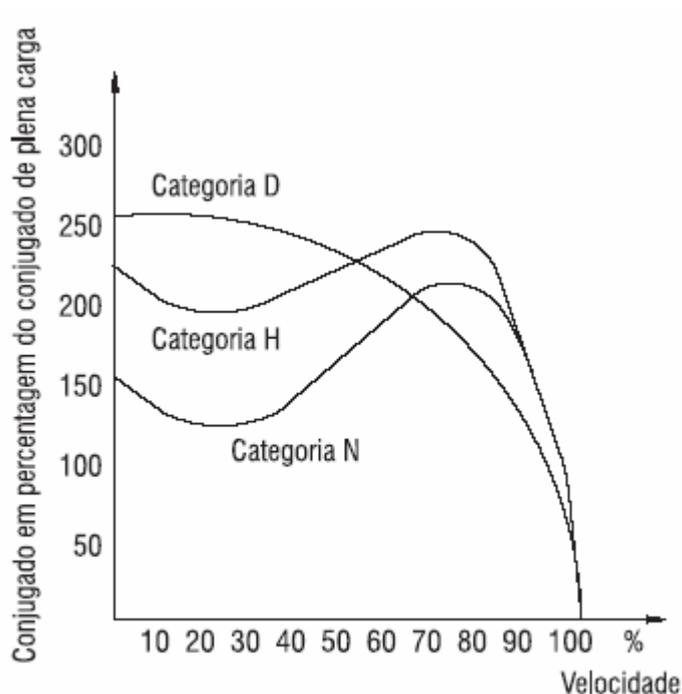


Figura 8 – comparação qualitativa entre as diferentes categorias de conjugado de motor

Adaptado de WEG [23]

A título de ilustração, a Tabela 1 faz uma comparação entre os valores de conjugado de partida de um motor elétrico de 200 cv de potência, e rotação síncrona de 1800 rpm. Ressalta-se que os valores percentuais de conjugado definidos pela norma ABNT NBR 7094 variam conforme a potência e a rotação síncrona do motor.

**Tabela 1 – valores de conjugado de partida para motor de indução trifásico, rotor gaiola, de 200 cv, 1800 rpm**

<b>Categoria de Conjugado</b>	<b><math>C_{RB} / C_N</math></b>	<b><math>C_{MÍN} / C_N</math></b>	<b><math>C_{MÁX} / C_N</math></b>
N	100 %	80 %	170 %
H	200 %	140 %	190 %
D	275 %	Não aplicável	Não aplicável

Fonte: NBR 7094 [05]

Onde:

$C_{RB} / C_N$ : conjugado de rotor bloqueado normalizado ao conjugado nominal;

$C_{MÍN} / C_N$ : conjugado mínimo, normalizado ao conjugado nominal;

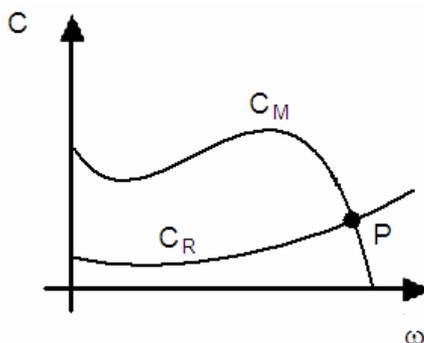
$C_{MÁX} / C_N$ : conjugado máximo, normalizado ao conjugado nominal.

Ressalta-se que, de maneira geral, apenas motores considerados pequenos, tipicamente de potência até 200 cv, geralmente fabricados em série, obedecem às categorias de conjugado. Para aplicações de maior porte, geralmente o comprador especifica uma curva de conjugado especial, sob medida para a aplicação do motor.

Uma vez descritas as principais cargas acionadas por motor elétrico, bem como suas principais características de conjugado, será explanado como o motor elétrico parte uma carga mecânica e a mantém acionada em situação de regime permanente.

#### **2.2.4. FUNCIONAMENTO EM REGIME**

O conjunto motor-carga funcionará em regime permanente, ou seja, com velocidade praticamente constante em torno da velocidade nominal, quando o conjugado resultante – conjugado motriz menos conjugado resistente – se anula, e a aceleração angular indicada na equação 2-2 torna-se nula, indicando velocidade constante. A Figura 9 mostra este ponto de equilíbrio, identificado como P.



**Figura 9 – ponto de operação do conjunto motor-carga**  
 $C_M$ : conjugado motriz;  $C_R$ : conjugado resistente da carga; P: ponto de equilíbrio  
 Adaptado de Lobosco & Dias [01]

Porém, talvez mais importante que o equilíbrio dos conjugados, é a estabilidade desse ponto operacional. A análise da estabilidade operacional em regime será, a seguir, mostrada qualitativamente e, em seguida, matematicamente [01]. Inicialmente, explica-se qualitativamente:

- a) se o surgimento de qualquer transitório de conjugado, seja ele resistente ou motriz, provocar um relativo aumento no conjugado resistente da carga, o ponto de equilíbrio se deslocará para uma velocidade menor, em uma região de maior conjugado do motor;
- b) se o transitório provocar uma relativa diminuição no conjugado da carga, o ponto de equilíbrio se deslocará para uma velocidade maior, em região de menor conjugado do motor.

Ou seja, se o conjugado da carga aumenta, o do motor também aumenta, fazendo com que novamente o conjugado resultante se anule, atingindo novo equilíbrio com velocidade constante. Se o conjugado da carga diminui, o do motor também diminui, atingindo novamente o equilíbrio em uma velocidade um pouco maior. Naturalmente, isso tudo dentro do limite máximo da potência nominal do motor<sup>11</sup>, e com variações de velocidade da ordem de 1 %.

<sup>11</sup> Em verdade, a norma brasileira prevê que todo motor deve ser capaz de operar continuamente em até 10% acima de sua potência nominal, mais a reserva térmica de seu fator de serviço [05].

Voltando à explanação matemática, para que o ponto P da Figura 9 seja estável, é necessário que [01]:

$$\frac{d\vec{C}_M}{d\vec{w}} > \frac{d\vec{C}_R}{d\vec{w}} \quad 2-3$$

Onde:

$C_M$ : conjugado motriz;

$C_R$ : conjugado resistente;

$w$ : velocidade angular (rotação).

A interpretação física da equação 2-3 é que toda vez que houver uma variação de conjugado resistente, o motor responderá com uma variação maior de conjugado motriz.

Por inspeção na Figura 9, nota-se que as inclinações das curvas  $C_M$  e  $C_R$  em torno do ponto P implicam em derivada positiva e negativa, respectivamente, atendendo o requisito da equação 2-3.

A Figura 10, ampliação da Figura 9, ilustra a questão nas proximidades do ponto "P". Caso algum transitório de velocidade desloque o ponto de funcionamento P, originalmente à velocidade  $w$  para a velocidade  $w_1$ , o conjugado do motor aumenta, enquanto o conjugado resistente diminui, ou seja, o termo  $dC_M/dw$  terá valor maior que o termo  $dC_R/dw$ , pois a variação de  $C_M$  será positiva e a variação de  $C_R$  será negativa. Como resultado, o conjugado resultante irá acelerar sistema de volta à velocidade  $w$ . Análise semelhante pode ser feita caso haja um transitório que leve a velocidade para  $w_2$ .

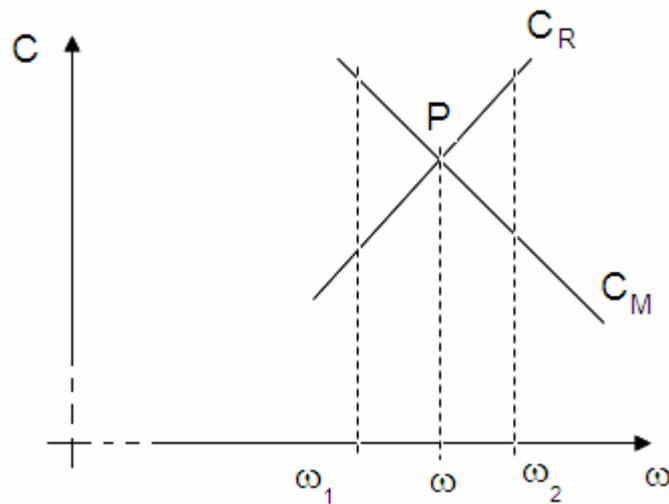


Figura 10 – análise da estabilidade operacional do ponto P

Adaptado de Lobosco & Dias [01]

Em resumo, a região após o conjugado máximo do motor é a região de funcionamento em regime com estabilidade, pois atende aos requisitos acima.

Para finalizar, uma questão básica porém não menos importante, e na verdade a primeira condição, é a de que o motor deve ser capaz de fornecer a potência demandada pela carga, através de conjugado e rotação específicos, que são correlacionados pela equação 2-4.

$$P = \vec{C} \cdot \vec{\omega} \quad 2-4$$

### 2.2.5. REQUISITOS DE PARTIDA

Uma vez explanados os principais aspectos para funcionamento em regime, se faz necessário entender como o conjunto motor-carga sai da situação de repouso, à velocidade de rotação nula, e atinge a velocidade nominal. Esse processo é conhecido como Partida do motor [01] [05].

Considerando que a aceleração angular é a taxa de variação da velocidade angular, reescreve-se a equação 2-2 da seguinte forma:

$$\vec{C} = J \frac{d\vec{w}}{dt} \quad 2-5$$

Onde o termo  $C$  está representando o conjugado resultante e assim será representado a partir deste ponto.

Um dos aspectos importantes na partida, principalmente para o motor, é o tempo necessário para a sua execução. Durante a partida, o motor é atravessado por uma corrente elétrica muito acima da nominal, tipicamente em torno de 600 %<sup>12</sup>, e está praticamente sem ventilação, uma vez que a maioria dos motores são auto-ventilados. Considerando o aquecimento do motor por efeito Joule devido à corrente elétrica, nessa condição o motor estaria dissipando a seguinte potência:

$$P_{Cu,N} \sim I^2$$

$$P_{Cu,RB} \sim (6I)^2 = 36 \times I^2 = 36 \times P_{Cu,N}$$

Onde:

$P_{Cu,N}$ : potência dissipada devido à corrente elétrica na operação em regime;

$P_{Cu,RB}$ : potência dissipada devido à corrente elétrica durante a partida;

$I$ : corrente elétrica em regime.

Nota-se que a potência dissipada pelo motor, devido à circulação de corrente elétrica, na partida é em torno de 36 vezes a potência dissipada na condição em regime.

Os fabricantes fornecem um dado chamado “tempo máximo de rotor bloqueado”, que pode ser definido como o tempo máximo que o motor suporta a corrente de partida, que é a corrente de rotor bloqueado. Assim, necessariamente, a partida do motor deve durar um tempo menor que o tempo máximo de rotor bloqueado.

---

<sup>12</sup> A norma brasileira [05] indica métodos de cálculo da corrente de partida máxima, que resultam em valores tipicamente da ordem de 600%.

Para o cálculo do tempo de partida, pode-se fazer, a partir da equação 2-5:

$$\int_0^t dt = \int_{w_1}^{w_2} \frac{J}{C} d\vec{w} \quad 2-6$$

Como de maneira geral o momento de inércia é constante durante a partida e a velocidade inicial é nula, tem-se:

$$t = J \int_0^{w_N} \frac{1}{C} d\vec{w} \quad 2-7$$

Onde:

C: conjugado resultante, ou seja, conjugado motriz menos conjugado resistente;

t: tempo de partida;

J: momento de inércia do conjunto motor-carga;

w: velocidade angular (rotação).

Existem várias formas, umas mais outras menos precisas, de se calcular esse tempo de partida. As mais precisas incluem métodos computacionais para cálculo da integral da equação 2-7. Outras menos precisas, porém de resultados satisfatórios (erros em torno de 1 a 5%), consideram o conjugado resultante C como constante em pequenos intervalos de velocidade, eliminando o cálculo da integral [01]. A Figura 11 apresenta um gráfico onde foi calculado ponto a ponto o conjugado de aceleração resultante da diferença entre o conjugado motriz e o conjugado resistente.

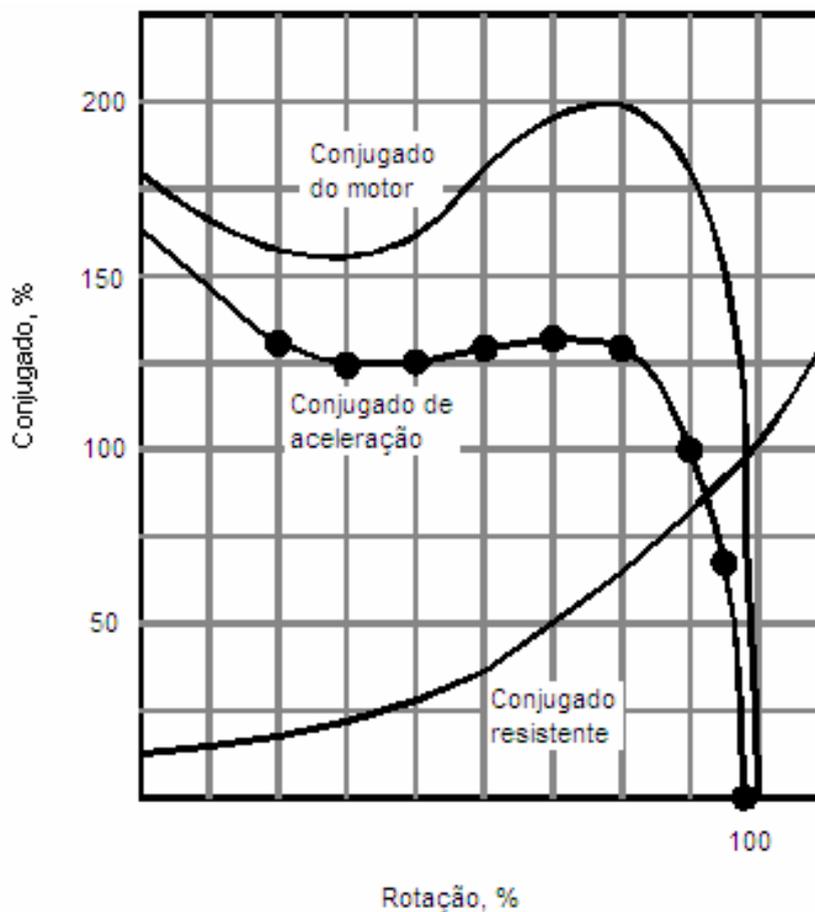


Figura 11 – verificação gráfica do conjugado de aceleração do conjunto motor-carga

Após essa discretização da curva de conjugado de aceleração em pequenos intervalos, o tempo de partida pode ser calculado a partir da equação 2-7, com a consideração de que o conjugado resultante  $C$  é praticamente constante em cada intervalo:

$$t = \frac{J}{C} \int_{w_1}^{w_N} dw$$

$$t = J \times \left[ \frac{1}{C_1} (w_2 - w_1) + \frac{1}{C_2} (w_3 - w_2) + \frac{1}{C_3} (w_4 - w_{13}) + \dots \right]$$

Desde a equação acima e nas próximas equações, todas as grandezas serão consideradas como escalares, uma vez somente seus módulos serão utilizados.

De fato, do ponto de vista do motor elétrico, o fator preponderante para o tempo de partida é sua curva de conjugado de partida, caracterizada pelos pontos notáveis de conjugado de rotor bloqueado, conjugado mínimo e conjugado máximo.

Uma condição necessária e essencial é que em nenhum momento da partida o conjugado motor seja igual ou inferior ao conjugado resistente, sob pena de se alcançar o equilíbrio nessa região e a partida não ser concluída, conforme é apresentado na Figura 12. Atendendo a este requisito, o motor consegue partir a carga em tempo inferior ao seu tempo máximo de rotor bloqueado, sem risco eminente de falha catastrófica.

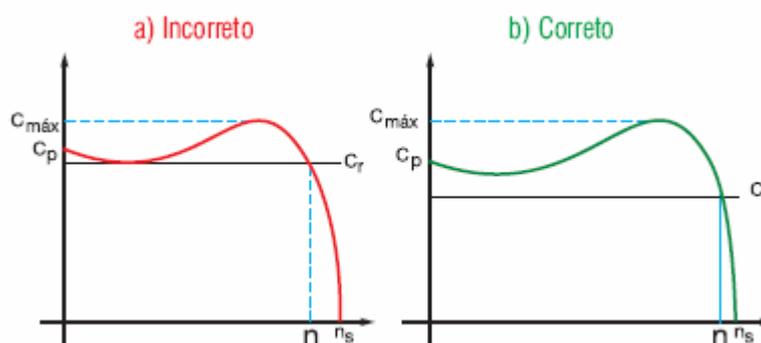


Figura 12 – requisito de conjugado motriz ser superior ao conjugado resistente em todos os pontos

Adaptado de WEG [23]

## 2.2.6. ASPECTOS ADICIONAIS DE PARTIDA

Naturalmente, os aspectos intrínsecos ao motor elétrico – limites térmicos de diversas partes, não linearidades de magnetização, variações de conjugado de rotor bloqueado conforme a posição do rotor – e os aspectos inerentes ao meio e à fonte de energia elétrica – queda de tensão elétrica nos cabos de alimentação e conseqüente diminuição do conjugado do motor, temperatura ambiente, etc – são considerados pelo projetista, mas não são aqui relatados por não impactarem no escopo do trabalho.

A Figura 13 apresenta as curvas de partida reais de um motor elétrico de indução trifásico, rotor gaiola, potência de 1200 kW (1609 HP), 3.330 Volts, 1.200 rpm, que aciona um ventilador. Nota-se que o projetista considera uma curva de conjugado de partida do motor, com valores reduzidos, para uma suposição de queda de tensão

elétrica de 10% nos cabos de alimentação durante a partida. O valor exato da queda de tensão depende principalmente da corrente de partida do motor, da impedância dos cabos de alimentação, e da impedância e potência do transformador que alimenta o motor. Porém, 10 % de queda de tensão tem sido um limite prático adotado nos projetos de instalações elétricas.

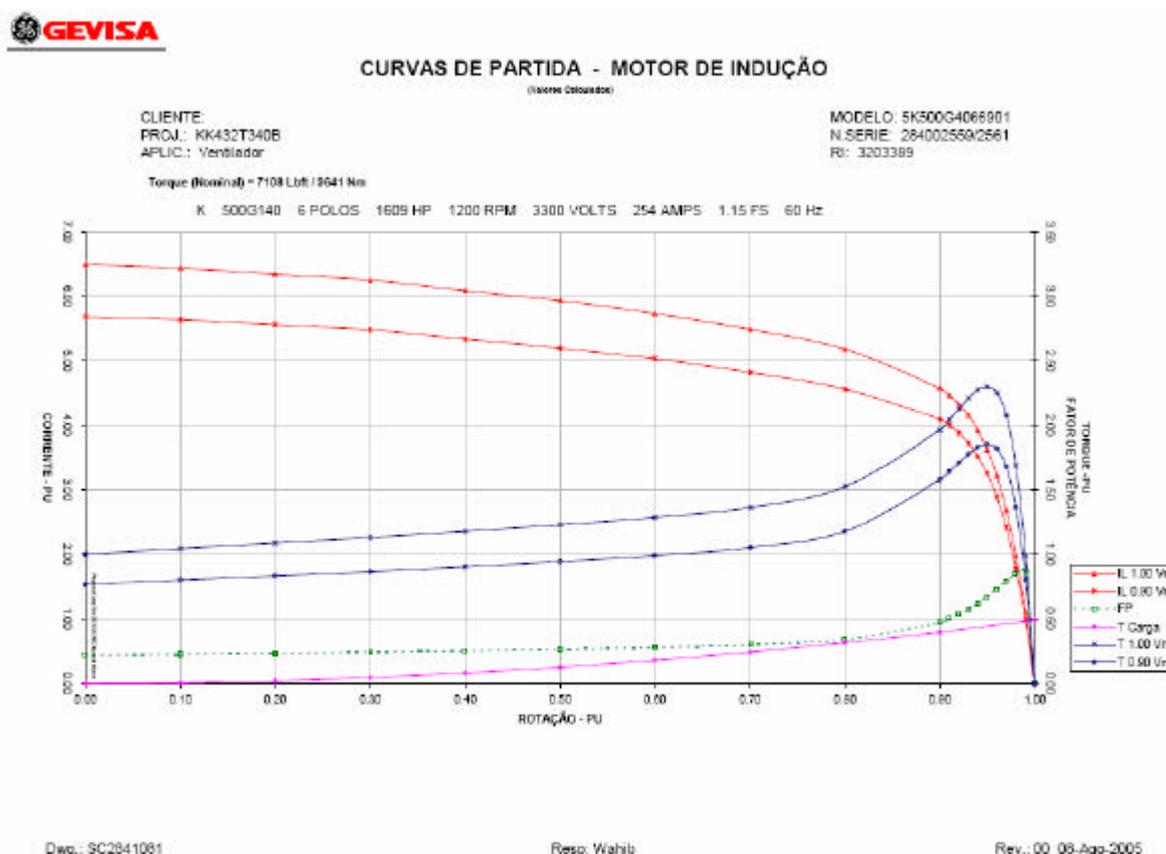


Figura 13 – curvas de conjugado de partida de motor elétrico e carga acionada (ventilador)

Figura: Cortesia Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST

Fabricante do motor: GE-GEVISA

Uma prática atraente, porém errônea, ao se especificar a compra de motor sobressalente, quando não são conhecidas as características de conjugado do motor original, é majorar os valores de forma a garantir a partida do conjunto motor-carga. Essa prática não deve ser adotada porque as diversas partes físicas que compõem a instalação do motor e da carga – além dos próprios, o acoplamento, redutores, bases de fixação – foram projetados para suportar determinados limites de conjugado e outros esforços mecânicos. Caso esses limites sejam

desrespeitados, pode haver falha por fadiga em determinado prazo, ou até falha catastrófica na primeira operação.

## 2.3. ESPECIFICAÇÃO PARA COMPRA DE MOTOR ELÉTRICO

Expostas as questões inerentes ao conjugado de partida, e à própria partida do motor elétrico, cabe agora descrever como o comprador especifica um motor para o fabricante.

O comprador, seja em um projeto de uma nova planta industrial ou na compra de um sobressalente, deve minimamente, conforme a norma brasileira [05], especificar e / ou descrever os seguintes itens<sup>13</sup>:

- a) Ambiente (temperatura, altitude, etc);
- b) Aspectos construtivos (forma construtiva, terminais de alimentação e aterramento, etc);
- c) Alimentação (tensão e frequência elétrica, etc);
- d) Potência nominal;
- e) Aspectos de desempenho e operação (rendimento, regime operacional, etc.);
- f) Conjugado nominal;
- g) Conjugado de rotor bloqueado;
- h) Conjugado máximo;
- i) Momento de inércia;
- j) Tipo de partida;
- k) Tipo de acoplamento;
- l) Acessórios;
- m) Ensaio e inspeções a realizar.

Nota-se que os valores de conjugado de partida naturalmente são itens de especificação sob responsabilidade do comprador. Em um projeto de uma nova planta operacional, este item não é problemático visto que se conheceriam as características da carga acionada.

Um outro ponto é o fato do conjugado mínimo estar perdendo cada vez mais a importância de especificação, visto que não traz grandes impactos no tempo de

---

<sup>13</sup> Mais detalhes de especificação de compra de motores elétricos podem ser encontrados na norma ABNT NBR 7094 [05].

partida e os fabricantes têm feito os projetos com o conjugado mínimo sendo o próprio conjugado de rotor bloqueado. A norma brasileira [05] já não exige a especificação desse valor por parte do comprador.

Um problema que pode ser encontrado, e que é a motivação deste trabalho, é a necessidade de compra de um motor sobressalente ou substituto, por qualquer que seja o motivo, para um motor em operação, para o qual não se conheçam os valores do conjugado de partida e as características de conjugado da carga acionada. Em muitos casos, por questões de custo e/ou operacionais, não é possível remover o motor da planta para se realizar testes em laboratório e levantar esses dados.

Dessa forma, evidencia-se que a especificação do conjugado de partida do motor elétrico é uma tarefa criteriosa, onde valores acima ou abaixo do correto podem até impedir o funcionamento do conjunto motor-carga. Também pode ser uma tarefa complicada quando, em compra de sobressalente, não se conhece as características do motor original.

No próximo capítulo, serão descritos os métodos em uso para ensaio de conjugado de partida de motor elétrico. Posteriormente, será apresentado o desenvolvimento da metodologia de levantamento desses dados sem remoção do motor da planta operacional.

### **3. MÉTODOS DE LEVANTAMENTO DE CONJUGADO DE PARTIDA DE MOTOR ELÉTRICO**

Os métodos de ensaio<sup>14</sup> para levantamento de curva de conjugado de partida de motores elétricos considerados serão os descritos na norma NBR 5383-1, que é aceita e obedecida pelos fabricantes de motores brasileiros consultados – GE-GEVISA, MetalCorte Eberle e WEG. As normas internacionais das organizações *National Electrical Manufacturers Association – NEMA*, dos Estados Unidos da América, e *International Electrical Commission – IEC*, da Europa, prescrevem praticamente os mesmos métodos da norma brasileira.

Ressalta-se que normas técnicas por si só não possuem poder regulamentador, não tendo força de lei. Cabe ao comprador decidir sob qual norma seu motor será fabricado, ou mesmo fazer solicitações específicas não baseadas em normas.

Ao longo da descrição desses métodos, serão apresentados outros ainda não normatizados, mas já desenvolvidos em pesquisas acadêmicas.

#### **3.1. MÉTODOS MECÂNICOS**

Esses métodos serão denominados nesta dissertação como mecânicos porque consistem de se colocar carga mecânica no eixo do motor elétrico e, de alguma maneira, medir o seu conjugado e a velocidade de rotação.

##### **3.1.1. MÉTODO DA POTÊNCIA DE SAÍDA**

Neste método, é acoplado mecanicamente ao eixo do motor um gerador de eletricidade. Gradativamente, aumenta-se a potência gerada por esse gerador e mede-se o valor da potência elétrica de saída e a rotação. Para cada medição de

---

<sup>14</sup> Faz-se distinção entre o termo Ensaio, usado para designar atividades realizadas em laboratório para verificação de conformidade entre o produto fabricado e o que foi especificado / projetado, e o termo Teste, que são atividades de campo e/ou de oficina para, geralmente, verificação de problemas ou verificação de eficácia de manutenção realizada.

potência e velocidade de saída, calcula-se o conjugado exercido pelo motor da seguinte forma [06]:

$$C = \frac{(P_{g0} + P_{g1})}{\omega} \quad 3-1$$

Onde:

C: conjugado desenvolvido pelo motor;

$P_{g0}$ : é a potência elétrica de saída do gerador de eletricidade;

$P_{g1}$ : é a perda de potência do gerador (atrito, ventilação, etc);

$\omega$ : é a velocidade de rotação do motor.

Nota-se que este método é de conceituação bastante simples, porém exige montagens mecânicas laboriosas no que tange a alinhamento entre motor sob ensaio e gerador, bem como instrumentos de alta precisão e respostas rápidas. Outra dificuldade é a necessidade de conhecimento das perdas de potência do gerador utilizado como carga mecânica. Essas perdas, além de difícil determinação, podem ser variáveis conforme a velocidade, a temperatura ambiente ou até mesmo com o tempo em que o gerador permanece em funcionamento.

### 3.1.2. MÉTODO DA ACELERAÇÃO

Este método consiste em ligar o motor em vazio, ou seja, sem carga acoplada, e fazer medições sucessivas de velocidade de rotação no tempo, durante sua aceleração [06].

Monta-se uma tabela, como o exemplo da Tabela 2, e para cada intervalo de medição da velocidade calcula-se a aceleração. Conhecendo-se o mometo de inércia do motor, calcula-se o conjugado com a equação 2-5.

Ao se fazer as medições com intervalos de tempo suficientemente pequenos, propiciando que a relação  $\Delta\omega/\Delta t$  possa ser interpretada como  $d\omega/dt$ , tem-se a aceleração calculada em quantidade de pontos suficientes para a construção da curva de conjugado de partida.

**Tabela 2 – cálculo do conjugado de partida pelo método da aceleração**

<b>Tempo - t (medido)</b>	<b>Velocidade - n (medida)</b>	<b>Aceleração (calculada – <math>d\omega/dt</math>) = <math>(\omega_n - \omega_{n-1}) / (t_n - t_{n-1})</math></b>	<b>Conjugado (calculado Equação 2-5)</b>
$t_1$	$\omega_1$	$a_1$	$C_1$
$t_2$	$\omega_2$	$a_2$	$C_2$
$t_N$	$\omega_N$	$a_N$	$C_N$

Não se tem informação da utilização deste método, da maneira como é descrito, através de instrumentos de campo de medição de rotação que não necessitem de preparativos adequados no motor, por exemplo instrumentos de leitura ótica na ponta de eixo do motor. Isso pode ser atribuído ao fato de que a partida em vazio de um motor elétrico tipicamente não demora mais que 300 milisegundos, e que motores possuem rotação nominal na ordem de grandeza de 1.000 rpm. Ou seja, há um entrave tecnológico em instrumentação que consiga medir em suficientes pontos a velocidade do motor, que durante a partida a vazio perfaz no máximo algumas dezenas de rotações. Tipicamente, os instrumentos de medição de rotação disponíveis no mercado têm resolução de 1 segundo. Atualmente, esse método seria aplicável em laboratório com instrumentos adequados de medição de rotação, que geralmente necessitam de 2ª ponta de eixo disponível e de dimensões adequadas no motor.

Uma evolução deste método, que apresentou resultados satisfatórios em experimento realizado, foi obtida através da medição do deslocamento angular do rotor durante a partida, e não da velocidade angular [12]. Os dados coletados durante a partida do motor são montados em tabela semelhante à Tabela 2, tendo

uma coluna a mais para os dados de deslocamento angular. A velocidade, então, em lugar de ser obtida diretamente no ensaio é calculada como sendo a derivada do deslocamento angular.

Isso foi exeqüível através de uma mudança de conceito que considerou a instalação de instrumentos mecanicamente acoplados ao eixo do motor, com alta taxa de amostragem de deslocamento angular, conhecidos como *encoders* ou geradores de pulso. Com essa mudança de conceito, podem ser utilizados também instrumentos denominados taco-geradores que, acoplados ao eixo do motor sob ensaio, fornecem diretamente um sinal analógico de tensão elétrica proporcional à velocidade do motor sob ensaio, porém com menor precisão que com os instrumentos de medição de deslocamento angular [12].

### **3.1.3. MÉTODO DA MEDIÇÃO DIRETA**

Neste método, acopla-se mecanicamente ao eixo do motor um dinamômetro. Para cada velocidade de rotação, na medida em que é variado o conjugado resistente do dinamômetro, são tomadas as leituras diretamente.

Este método possui a vantagem de as medições serem diretas, porém é de difícil execução considerando a instabilidade na região de conjugado motriz entre o início da partida e o conjugado máximo. Também implica em cuidadosa montagem do sistema, considerando o alinhamento.

## **3.2. MÉTODOS ELETRO-MECÂNICOS**

Esses métodos serão assim chamados nesta dissertação por envolverem basicamente alguns componentes mecânicos acoplados ao motor, geralmente de menor complexidade do que dos métodos anteriores, e medições elétricas na alimentação do motor.

### 3.2.1. MÉTODO DO DIAGRAMA CIRCULAR

Em consultadas realizadas a fabricantes e oficinas de motores elétricos, constatou-se ser o método mais utilizado. Além de medições elétricas e dispositivos mecânicos, envolve também métodos computacionais iterativos.

Este método consiste em se realizar, basicamente, um ensaio em vazio no motor e também um ensaio em rotor bloqueado. No ensaio em vazio, são medidas as grandezas elétricas de alimentação – corrente, tensão e potência elétricas. No ensaio em rotor bloqueado, trava-se o rotor com algum dispositivo mecânico, energiza-se o motor e as mesmas medidas são tomadas [06]. A Figura 14 mostra dispositivos típicos de travamento do rotor.

Tomadas essas medidas, é levantado um circuito elétrico que representa o motor, conforme Figura 15. Os componentes desse circuito são:

$r_1$ : resistência elétrica referente aos enrolamentos do estator;

$x_1$ : reatância elétrica relativa à dispersão de campo magnético no estator;

$x_M$ : reatância mútua, de acoplamento entre estator e rotor;

$r_{fe}$ : resistência elétrica relativa às perdas de potência no núcleo;

$x_2$ : reatância elétrica relativa à dispersão de campo magnético no rotor;

$r_2/s$ : resistência elétrica referente ao rotor, combinada com os efeitos da carga mecânica aplicada ao eixo.

$s$ : escorregamento, diferença normalizada entre a velocidade real do eixo do motor e a velocidade síncrona (velocidade do campo magnético girante) do motor.

Através de método iterativo, varia-se a grandeza “s”, denominada escorregamento, do termo “ $r_2/s$ ”, desde 1 (escorregamento máximo, velocidade nula) até 0 (escorregamento mínimo, velocidade máxima). Em toda a faixa de escorregamento, obtém-se a potência entregue pelo motor à carga. Dessa forma, obtém-se o funcionamento do motor em toda a faixa de velocidade, incluindo a curva de conjugado de partida.

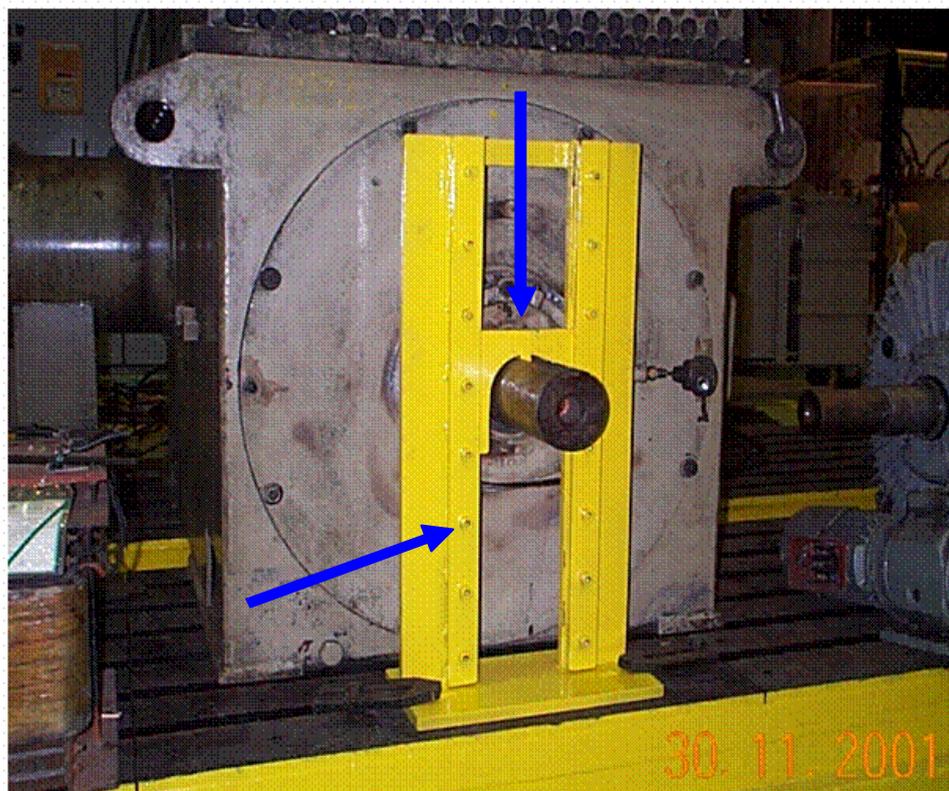


Figura 14 - dispositivos de travamento de rotores para ensaio de rotor bloqueado

Cortesia: Companhia Siderúrgica de Tubarão – Oficina Elétrica Central

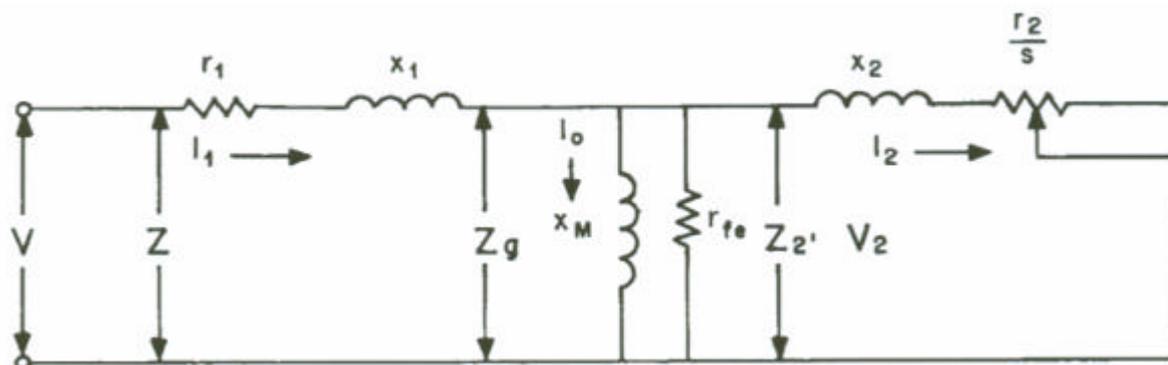


Figura 15 – circuito elétrico equivalente do motor de indução rotor gaiola

Adaptado de ABNT NBR 5383 [06]

Esse método tem o inconveniente de ser arriscadamente destrutivo ao motor e perigoso à segurança das pessoas e equipamentos ao redor, durante o ensaio de rotor bloqueado. Isso porque o motor encontra-se sem refrigeração, uma vez que a maioria dos motores são autoventilados, e exerce conjugado sobre um dispositivo que, se rompido, pode projetar-se tangencialmente ao eixo de rotação do motor.

### 3.2.2. MÉTODO DA POTÊNCIA DE ENTRADA

Este método consiste em medir a potência de entrada do motor durante a partida, e subtrair desta as perdas internas do motor, obtendo-se a potência entregue ao eixo e, por conseguinte, o conjugado exercido [06].

Apesar de este método ter influenciado a metodologia a ser proposta neste trabalho, sua aplicação não é adotada pelos seguintes motivos:

- a) Em laboratório, onde de maneira geral o motor se encontra em vazio, a partida não perdura mais que 300 milisegundos. O mesmo limitante de instrumentação visto na seção 3.1.2, acontece neste caso, uma vez que a instrumentação de medição de potência disponível no mercado possui taxa de atualização da leitura em torno de 1 Hz.

- b) No instante da energização do motor seu núcleo não está magnetizado, não havendo em verdade conjugado desenvolvido pelo motor. E a magnetização do motor responde de maneira relativamente lenta em relação ao degrau de tensão aplicado na energização [13]. Dessa forma, nos primeiros milissegundos em que o motor está energizado, seu comportamento não é linear e de difícil modelamento pelos métodos tradicionais. Na partida a vazio, então, quando esses transitórios estão terminando, a partida do motor já está sendo concluída, não exercendo o motor a curva de conjugado de partida normalmente desenvolvida em uma partida mais longa, ou seja, na aplicação com carga na planta operacional.

A metodologia proposta nesta dissertação, consistindo também de um método de medição da potência de entrada, emprega outros meios de medição da potência onde se tem seus valores praticamente de forma contínua. O que a difere é o fato dos métodos usuais exigirem taxas de amostragem de medição de potência que inviabilizam a execução, bem como serem afetadas pelos transitórios de partida dos motores, que serão vistos ao longo desta dissertação.

### **3.2.3. COMPARATIVO GERAL ENTRE OS MÉTODOS**

Todos os métodos aqui apresentados têm em comum a característica de se necessitar que o motor fique fora de operação, com demanda de logística e tempo disponível para envio a um laboratório de ensaios, caso se necessite levantar suas características de conjugado de partida.

Os métodos mecânicos e eletromecânicos, de maneira geral, exigem criteriosa e demorada montagem mecânica, inclusive com alinhamentos, para que os ensaios possam ser realizados. A metodologia mais usual, do diagrama circular, apesar de não exigir essas montagens com alinhamentos, impõe ao motor sob ensaio uma condição de rotor travado que pode ser destrutiva e perigosa aos operadores e equipamentos circunvizinhos.

A maioria dos métodos mecânicos tem ainda o inconveniente de utilização de instrumentos pressupostamente capazes, porém na tecnologia atual com desempenho aquém do ideal para a precisão dos ensaios.

O método da aceleração, mesmo considerando as evoluções apresentadas quanto à instrumentação, fica restrito a uso em laboratório, visto que com o motor instalado na planta operacional dificilmente ter-se-ia acessível uma ponta de eixo para instalação de um instrumento de medição. Também seria necessário, para uso em campo, conhecer os valores da inércia do motor, da carga acionada e de demais elementos girantes, tais como acoplamentos e redutores.

Finalizando, o método da medição da potência de entrada em verdade não é exeqüível devido à rápida partida do motor na condição a vazio, não sendo possível ter resultados aproveitáveis.

Em resumo, apenas dois métodos têm sido executados pelos fabricantes:

- a) Diagrama circular, que implica em realização de ensaio de rotor bloqueado, conforme dito pode ser destrutivo e perigoso;
- b) Método da medição direta, que devido às características de instabilidade na região anterior ao conjugado máximo, tem sido utilizado apenas para a medição deste, com grande imprecisão, visto que este ponto é instável.

Esses dois métodos excluem a possibilidade de realização na planta operacional, objetivo da metodologia proposta neste trabalho. No próximo capítulo, é apresentada a metodologia proposta para levantamento do conjugado de partida do motor elétrico, com o motor instalado na planta operacional.

## 4. METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme já explanado, a metodologia proposta é baseada no método da potência de entrada, visto no capítulo anterior. Obtendo-se a potência de entrada durante a partida do motor e eliminando-se as perdas, obtém-se a potência desenvolvida pelo eixo e, por conseguinte, o conjugado.

A grande vantagem do método é que foi desenvolvido para realização com o motor instalado na planta operacional, diferentemente dos outros métodos que são aplicados em laboratório.

### 4.1. ASPECTOS GERAIS

Uma consideração importante é que as curvas de conjugado de motores elétricos possuem usualmente um grau de imprecisão que preciosismos nos métodos de ensaio não agregam valor ao resultado final [01]. Essas imprecisões, de maneira geral, são oriundas dos seguintes fatos [01] [06]:

a) Motor:

- o conjugado de rotor bloqueado varia conforme a posição angular em que o motor se encontra, uma vez que por melhores que sejam os processos produtivos o motor não terá os enrolamentos de estator e o rotor fabricados com perfeita simetria;
- o conjugado varia sensivelmente com aspectos climáticos, tais como temperatura e altitude / pressão atmosférica.

b) Instrumentação:

- toda instrumentação utilizada possui um erro de medição mais incerteza e todas as vezes que valores medidos são processados (multiplicados, somados, etc), esses erros e incertezas são amplificados.

O próprio autor já teve a oportunidade de participar como inspetor de um ensaio de motor elétrico, no laboratório do fabricante, onde o ensaio de rotor bloqueado foi realizado três vezes, com a mesma instrumentação, obtendo-se três resultados diferentes com variação da ordem de 5 %.

Dessa forma, serão utilizados modelos matemáticos de motores, bem como pressuposições aceitas e recomendadas por normas técnicas, por autores cujas obras são reconhecidas e utilizadas no meio acadêmico e também de experiências adquiridas por este autor.

A instrumentação utilizada no experimento, conforme é apresentada no Apêndice A, pode gerar imprecisão em torno de 6% nos resultados levantados, que é da mesma ordem de grandeza da imprecisão obtida pelos métodos clássicos. Ressalta-se que a instrumentação utilizada é das mais precisas disponíveis no mercado para a indústria.

## **4.2. A MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA DE ENTRADA**

O grande entrave da utilização do método da medição da potência de entrada durante a partida do motor são os medidores disponíveis no mercado. De maneira geral, a taxa de medição da potência está em torno de 1 segundo, sendo que alguns motores têm tempo de partida até menor que isso. Como exemplo, cita-se o medidor modelo 3710 ACM, do fabricante Power Measurement [09], cujo erro de medição de potência (acumulado com incerteza) é da ordem de 0,5 %. Este instrumento possui resolução de 1 segundo.

Excluída a utilização dos instrumentos disponíveis, o método adotado foi oscilografar a tensão elétrica e a corrente elétrica de alimentação, e calcular a potência de entrada de forma discretizada. Uma vez que a instrumentação utilizada tinha capacidade suficiente, não serão utilizados recursos matemáticos para reconstrução das grandezas a partir de sinais amostrados a baixas taxas. De maneira geral, taxas

de amostragem da ordem de 10 vezes a frequência fundamental são suficientes para tal objetivo [25].

Uma vez que a metodologia proposta tem como característica a não remoção do motor de sua planta operacional, será utilizado método de cálculo das potências de entrada e de saída do motor que evite ao máximo a necessidade de cálculo de parâmetros internos e equivalentes do motor, de forma a se obter a melhor precisão possível. Portanto, será utilizado o método conhecido como Potência Desenvolvida pelo Rotor [07], que evita a necessidade de cálculos de parâmetros do rotor, conforme será visto no decorrer desta dissertação.

O método da Potência Desenvolvida pelo Rotor calcula o conjugado desenvolvido por este da seguinte forma:

$$C_g = \frac{P_g}{\omega_s} \quad 4-1$$

Onde:

$P_g$ : potência entregue ao rotor;

$\omega_s$ : velocidade síncrona, ou seja, do campo eletromagnético do estator do motor.

A partir do conjugado desenvolvido pelo rotor, é possível calcular o conjugado líquido no eixo do motor subtraindo as perdas rotacionais, a serem explanadas nos itens seguintes.

Voltando ao circuito equivalente do motor, que foi apresentado na Figura 15, pode-se modelar o motor com as seguintes considerações:

- a) as perdas elétricas no estator ocorrem totalmente nos enrolamentos do estator, ou seja, na resistência  $r_1$ ;
- b) as perdas no núcleo ocorrem praticamente todas no estator;
- c) as perdas rotacionais, notadamente atrito e ventilação, ocorrem no rotor;
- d) as perdas adicionais ocorrem praticamente todas no estator, visto que são principalmente devido aos dentes das ranhuras do núcleo do estator;

- e) as perdas elétricas no rotor ocorrem totalmente nas barras condutoras do rotor, ou seja, na resistência  $r_2$ .

Para obter-se a potência de entrada, pode-se a partir da tabela dos dados oscilografados de tensão e corrente calcular a potência elétrica de entrada, com a seguinte equação [17]:

$$p = v \times i = v \cdot \text{sen}(\omega t) \times i \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad 4-2$$

Onde:

p: potência de entrada calculada;

v: tensão de entrada oscilografada;

i: corrente de entrada oscilografada;

$\omega$ : frequência angular;

$\varphi$ : ângulo de defasamento entre corrente e tensão.

O resultado esperado para a potência calculada é uma função no tempo em 120 Hz, mais um *offset*<sup>15</sup> variável que representará o valor médio da função ao longo do tempo. Isso porque a tensão e a corrente são senóides em 60 Hz com fases diferentes e, ao serem multiplicados, produziram um termo em cosseno de 120 Hz e um outro termo em cosseno de um ângulo que varia durante a partida, conforme pode-se notar na relação trigonométrica abaixo [17]:

$$\text{sen}(\mathbf{a}) \times \text{sen}(\mathbf{b}) = \frac{1}{2} \times \cos(\mathbf{a} - \mathbf{b}) - \frac{1}{2} \times \cos(\mathbf{a} + \mathbf{b})$$

Aplicando-se o cálculo da potência na relação trigonométrica, obtém-se:

$$p = v \cdot \text{sen}(\omega t) \times i \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} \times v \times i \times \cos(\omega t - (\omega t + \varphi)) - \frac{1}{2} \times v \times i \times \cos(\omega t + (\omega t + \varphi))$$

---

<sup>15</sup> O termo *offset* está sendo utilizado para representar um deslocamento vertical em uma curva senoidal que, sem esse deslocamento, tinha valor médio nulo.

$$p = v \cdot \text{sen}(\omega t) \times i \cdot \text{sen}(\omega t + \mathbf{j}) = \frac{1}{2} \times v \times i \times \cos(-\mathbf{j}) - \frac{1}{2} \times v \times i \times \cos(2\omega t + \mathbf{j})$$

O termo “cos(-φ)” refere-se ao *offset* variável que ajuda a compor o valor médio da potência, e o termo “cos(2ωt+φ)” é basicamente a forma de onda em 120 Hz da potência, pois a frequência ω fica multiplicada por 2. Nota-se que neste termo também há o ângulo φ, que varia durante a partida, alterando a fase e a amplitude.

### 4.3. CÁLCULO DAS PERDAS DE POTÊNCIA

Entre o ponto de medição da potência e o eixo do motor, as perdas podem ser separadas basicamente em:

- a) perdas nos cabos de alimentação;
- b) perdas no motor.

#### 4.3.1. PERDAS NOS CABOS DE ALIMENTAÇÃO

As perdas nos cabos de alimentação do motor ocorrem por aquecimento, ou seja, por efeito Joule. Podem ser calculadas da seguinte forma [10]:

$$P_{CABO} = 3 \cdot \frac{\Omega}{Km} \cdot l \cdot I^2 \quad 4-3$$

Onde:

$P_{CABO}$ : perdas de potência nos cabos de alimentação;

$\Omega/km$ : resistência elétrica por quilômetro do cabo, conforme características construtivas e tipo de instalação, fornecida pelo fabricante do cabo;

$l$ : comprimento do cabo entre o ponto de medição da potência e o motor;

I: corrente elétrica que flui pelos cabos.

### 4.3.2. PERDAS NO MOTOR ELÉTRICO

As perdas de potência no motor podem ser agrupadas em [07] [18]:

- a) perdas elétricas;
- b) perdas adicionais;
- c) perdas rotacionais;
- d) perdas no núcleo.

#### 4.3.2.1. PERDAS ELÉTRICAS

As perdas elétricas ocorrem por efeito Joule na passagem de corrente pelos condutores – enrolamentos do estator e barras no rotor.

As perdas elétricas no estator são a soma das perdas elétricas em cada uma das 3 fases do motor [07]. Como geralmente o valor da resistência ôhmica disponível em relatórios de ensaios de motores é o valor medido entre dois terminais de alimentação, esse valor corresponde à medição de duas fases em série, esteja o motor ligado em estrela ou em triângulo. Dessa forma, o valor da resistência disponível neste tipo de relatório deve ser dividido por 2, e em seguida multiplicado por 3 para se obter as perdas nas 3 fases.

Assim, podem ser calculadas as perdas no estator:

$$P_{EST} = 3 \cdot \frac{R_{EST}}{2} \cdot I^2 = 1,5 \cdot R_{EST} \cdot I^2$$

Onde:

$P_{EST}$ : perdas de potência nos enrolamentos do estator;

$R_{EST}$ : resistência elétrica medida de 2 fases dos enrolamentos do estator;

$I$ : corrente de alimentação do motor.

A resistência elétrica do estator pode ser determinada através da medição diretamente nos terminais do motor, com o motor desligado, através de instrumento conhecido como microohmímetro, dedicado à medição de resistência elétrica de baixo valor (da ordem de micro ou miliOhms).

Essa medição fornecerá valores de resistência elétrica medidos com circulação de corrente contínua. Como o motor elétrico em questão funciona com corrente alternada, acontecerá o fenômeno conhecido como efeito pelicular, onde a corrente tende a circular pelas áreas externas do condutor, reduzindo a densidade de corrente na região central da seção do condutor. Em última análise, haverá menos seção transversal dos condutores onde efetivamente há circulação de corrente, fazendo com que a resistência elétrica dos condutores do estator em corrente alternada seja ligeiramente maior, da ordem de 25 a 50 %, que a resistência em corrente alternada [27]. Como esse fenômeno não é tratado quantitativamente pelas normas ABNT, não será considerado neste trabalho.

Para a determinação das perdas elétricas no rotor se faz necessário determinar a resistência rotórica. Para isso poderia ser utilizado o método descrito por Richardson (1978) [27]. Nesse método, através dos dados de corrente e potência a rotor bloqueado poderia ser calculada a resistência rotórica.

Porém, um recurso engenhoso e simples largamente utilizado por fabricantes para se aumentar o conjugado de partida de motores elétricos é projetar as dimensões das barras do rotor de forma que na partida, quando o escorregamento é alto e a corrente no rotor possui uma frequência alta, próxima à do estator, a densidade de corrente na seção dessas barras seja diferente de quando o motor esteja em velocidade nominal, quando a frequência da corrente do rotor é baixa. Esse recurso aproveita a existência do efeito pelicular, descrito acima. Considerando que a

metodologia desenvolvida neste trabalho pressupõe o desconhecimento dessas características do motor, o valor da resistência rotórica obtido no instante de rotor bloqueado não pode ser usado para o motor em outras regiões de operação [26].

Assim, as perdas elétricas no rotor não serão calculadas a partir do valor da resistência rotórica, e sim consideradas iguais às do estator. Conforme consulta informal ao fabricante WEG (Brasil), essa aproximação não deve gerar erros significativos, uma vez esses dois enrolamentos (estator e rotor) estão submetidos a potências de mesma ordem de grandeza, e as perdas totais do motor de grande porte, acima de 200 cv, são da ordem de 5% de sua potência nominal.

#### **4.3.2.2. PERDAS ADICIONAIS**

As perdas adicionais são de difícil determinação e variam muito de motor para motor, inclusive motores de mesmo projeto, visto que muitas delas são devido a imperfeições de fabricação [07]. São compostas basicamente de fluxo magnético disperso nos dentes e cantos de ranhura [07].

Para motores elétricos de potência acima de 200 cv, que são o escopo deste trabalho, são usualmente estabelecidas como 1% da potência de saída [07].

#### **4.3.2.3. PERDAS ROTACIONAIS**

Neste grupo enquadram-se as perdas que são constantes a uma velocidade constante, e podem ser consideradas como diretamente proporcionais à velocidade e independente da carga do motor [07] [18]. É sabido que o conjugado resistente de ventiladores possui variação proporcional ao quadrado da velocidade conforme explanado na seção 2.2.2.2, o que implicaria nas perdas de potência serem proporcionais ao cubo da velocidade, pois a potência é calculada através da multiplicação do conjugado pela velocidade, conforme equação 2-4. Porém, Kosow (2005) [07] realiza o agrupamento de todas as perdas que são diretamente

proporcionais à velocidade com as perdas que são proporcionais ao cubo da velocidade de maneira a permitir interpretar que todas essas perdas somadas tenham variação diretamente proporcional à velocidade, com boa precisão. Essa prática é adotada neste trabalho.

Conhecendo-se as perdas rotacionais à velocidade nominal, e considerando-as nulas à velocidade zero, seus valores podem ser determinados a qualquer velocidade de rotação.

#### **4.3.2.4. PERDAS NO NÚCLEO**

Considerando-se acionamento a frequência constante, no caso 60 Hz, as perdas no núcleo – por histerese e por correntes parasitas – são proporcionais à tensão elétrica aplicada ao motor [07].

Em verdade, deveria ser descontada a queda de tensão nos enrolamentos do estator do motor ( $r_1$  e  $x_1$  da Figura 15). Porém, desde a situação de menor corrente elétrica (a vazio) até a situação maior corrente (partida), essa queda de tensão possui valores em torno de 0,5 a 3% da tensão de alimentação, não impactando consideravelmente no cálculo das perdas no núcleo.

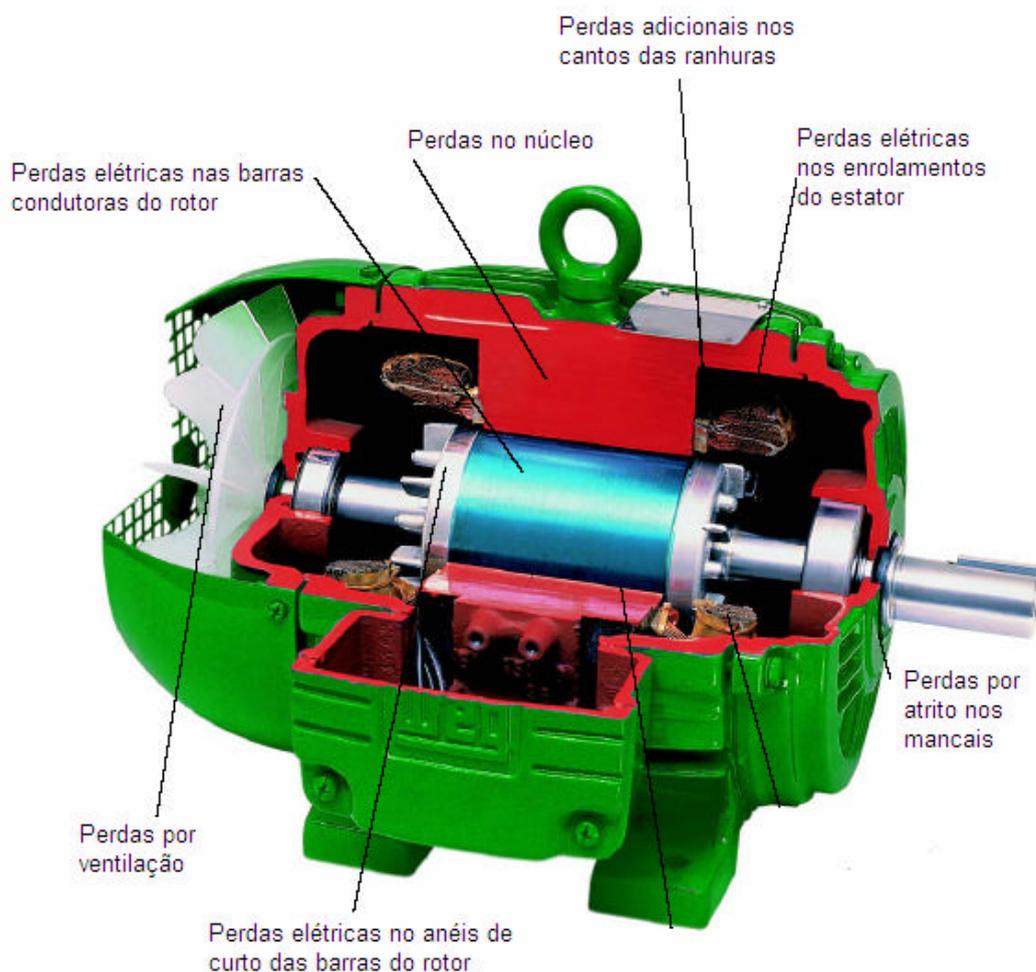
A determinação das perdas rotacionais e no núcleo sem ensaio de rotor bloqueado e a vazio se torna praticamente impossível. Para isso, é adotada a seguinte metodologia:

- a) calcular as perdas totais nominais do motor, considerando sua potência nominal e seu rendimento (dados de placa);
- b) subtrair as perdas elétricas do estator e do rotor já calculadas;
- c) subtrair as perdas adicionais já estimadas;
- d) das perdas restantes, dividir em partes iguais para as perdas no núcleo e rotacionais;

- e) as perdas no núcleo são consideradas constantes para alimentação sob tensão nominal;
- f) as perdas rotacionais são consideradas nulas na situação de rotor bloqueado.

Para essas separações de perdas, apesar das suposições colocadas, é esperado um bom grau de precisão, tendo em vista as considerações já feitas de que as perdas totais do motor são da ordem de 5% de sua potência nominal.

A Figura 16 mostra um motor em corte localizando as perdas no motor descritas neste capítulo.



**Figura 16 – motor em corte e suas perdas de potência**

Adaptado de WEG [23]

#### 4.4. CÁLCULO DO CONJUGADO DESENVOLVIDO NO EIXO DO MOTOR NOS PONTOS DE INTERESSE

Conforme exposto na seção 2.3, onde foram explanados os aspectos para especificação de compra de motor elétrico, os pontos denominados Conjugado de Rotor Bloqueado e Conjugado Máximo têm sido utilizados como representativos da curva de conjugado de partida. Esses pontos serão considerados no método proposto.

Antes, porém, será necessário calcular as perdas e outras grandezas na condição nominal do motor.

##### 4.4.1. PERDAS À CONDIÇÃO NOMINAL

As perdas totais nominais do motor são calculadas da seguinte forma:

$$Perdas = P_{IN} - P_{NOM} = \frac{P_{NOM}}{h} - P_{NOM}$$

$$Perdas = P_{NOM} \times \left( \frac{1}{h} - 1 \right) \quad 4-5$$

Onde:

Perdas: perdas totais nominais do motor;

$P_{IN}$ : potência de entrada no motor;

$P_{NOM}$ : potência nominal do motor;

$\eta$ : rendimento nominal do motor.

As perdas elétricas nominais no estator são calculadas conforme equação 4-4.

As perdas elétricas no rotor são consideradas iguais às do estator.

As perdas adicionais são consideradas como 1% da potência nominal do motor.

As perdas no núcleo e rotacionais, nominais, são calculadas da seguinte forma:

$$P_{NUC} + P_{ROTAC} = Perdas - P_{EST} - P_{ROT} - P_{ADIC} \quad 4-6$$

Onde:

$P_{NUC}$ : perdas no núcleo;

$P_{ROTAC}$ : perdas rotacionais;

$P_{ADIC}$ : perdas adicionais.

Como as perdas no núcleo e rotacionais estão sendo consideradas iguais para a condição nominal, estão calculadas essas duas grandezas.

#### 4.4.2. CÁLCULO DO CONJUGADO

Voltando ao circuito equivalente do motor, que foi apresentado na Figura 15, pode-se modelar o motor com as seguintes considerações:

- f) as perdas elétricas no estator ocorrem totalmente nos enrolamentos do estator, ou seja, na resistência  $r_1$ ;
- g) as perdas no núcleo ocorrem praticamente todas no estator;
- h) as perdas rotacionais, notadamente atrito e ventilação, ocorrem no rotor;
- i) as perdas adicionais ocorrem praticamente todas no estator, visto que são principalmente devido aos dentes das ranhuras do núcleo do estator;
- j) as perdas elétricas no rotor ocorrem totalmente nas barras condutoras do rotor.

Dessa forma, descontando-se da potência de entrada as perdas inerentes ao estator, a potência líquida resultante pode ser denominada como a potência transferida do estator para o rotor, ou seja:

$$P_g = P_{IN} - P_{CABO} - P_{EST} - P_{NUC} - P_{ADIC} \quad 4-7$$

Obtida essa potência, o conjugado eletromagnético desenvolvido pelo rotor pode ser calculado com a equação 4-1 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** [07] [26].

Para o cálculo do conjugado efetivamente desenvolvido pelo motor, ainda se faz necessário descontar as perdas rotacionais, que são proporcionais à rotação do motor.

#### 4.4.2.1. CONJUGADO A ROTOR BLOQUEADO

Considerando que a partida com carga de motor elétrico de grande porte demanda geralmente alguns segundos, certamente alguns milisegundos após a energização o motor ainda estará numa velocidade de rotação muito próxima à velocidade nula, e desenvolvendo um conjugado muito próximo ao conjugado de rotor bloqueado, conforme pode ser visto na curva de conjugado da Figura 13.

Assim, por inspeção visual, determina-se o primeiro ciclo onde esses efeitos são cessados, e calcula-se a potência de entrada conforme a equação 4-2. Em verdade, esse valor de potência é obtido do gráfico da partida do motor construído com essa equação.

Calcula-se também a potência dissipada nos cabos de alimentação através da equação 4-3.

Já tendo sido determinadas todas as perdas para a condição nominal, podem ser calculadas as perdas na condição de rotor bloqueado:

- a) As perdas no estator são calculadas através da equação 4-4, considerando-se o valor da corrente de partida verificada na oscilografia;
- b) As perdas rotacionais são consideradas nulas;

- c) As perdas no núcleo e as adicionais são consideradas como as mesmas da condição nominal.

Segundo a norma NBR 5383-1:2002 [06], o conjugado a rotor bloqueado poderia ser calculado da seguinte forma:

$$C_{rb} = \frac{(P_{si} - P_{cu} - P_c) \cdot C_1}{\omega_s}$$

Onde:

$C_{rb}$ : conjugado a rotor bloqueado;

$P_{si}$ : potência de entrada no motor;

$P_{cu}$ : perdas elétricas no estator;

$P_c$ : perdas no núcleo;

$C_1$ : fator de redução (variando entre 90 % e 100 %) para levar em conta as perdas adicionais;

$\omega_s$ : velocidade de rotação síncrona.

Porém, conforme definido em 4.3.2.2, as perdas adicionais estão sendo consideradas como 1% da potência nominal. Dessa forma, a equação acima pode ser reescrita como:

$$C_{rb} = \frac{P_{IN} - P_{EST} - P_{NUC} - P_{ADIC}}{\omega_s} \quad 4-8$$

#### 4.4.3. CONJUGADO MÁXIMO

Em uma dada rotação, tipicamente próxima da rotação nominal do motor, ocorre uma situação em que o escorregamento produz no circuito elétrico equivalente do motor (Figura 15) a situação de máximo conjugado desenvolvido pelo motor. Neste momento, a alternativa correta a ser adotada seria desenvolver literalmente a

equação do conjugado máximo e, através da derivada de primeira ordem, calcular seu máximo, confirmando-o através da derivada de segunda ordem. Como metodologia proposta não levanta o circuito elétrico equivalente do motor demonstrado na Figura 15, esse procedimento se torna inviável.

Considerando a equação 2-4, que diz que o conjugado é a relação entre a potência e a rotação, e como a rotação onde acontece o conjugado máximo é definida, uma boa aproximação é dizer que esse conjugado irá acontecer quando houver máxima entrega de potência ao rotor do motor<sup>16</sup>.

As perdas de potência no motor foram calculadas conforme as equações já demonstradas neste capítulo. As perdas no cabo foram calculadas com a equação 4-3, no estator com a equação 4-4. A queda de tensão nos cabos de alimentação será calculada com a equação 4-13. As perdas rotacionais são calculadas de forma proporcional à rotação do motor. As perdas no núcleo e adicionais foram consideradas iguais às nominais, aplicando-se a correção da diferença de tensão entre o momento do experimento e a tensão nominal.

A Tabela 3 representa um modelo de planilha eletrônica a ser utilizado para o cálculo da potência entregue ao rotor durante a partida do motor, para posterior cálculo do conjugado nos pontos de interesse.

Uma vez obtida a potência máxima entregue ao rotor, para o cálculo do conjugado máximo se faz necessário o valor de rotação onde ocorre essa potência, para o cálculo do conjugado com a equação 4-1.

---

<sup>16</sup> Em verdade, o conjugado máximo ocorre quando há a máxima transferência de potência do estator para o rotor, o que é bastante próximo de quando ocorre a potência máxima de entrada [26].

Tabela 3 - cálculo da potência entregue ao rotor

Corrente	Tensão	Potência Entrada	Perdas Cabo	Queda Tensão Cabo	Perdas Estator	Perdas Núcleo	Perdas Adicionais	Potência entregue ao rotor
A	B	C	D	E	F	G	H	I
$I_1$	$V_1$	= A * B	Equação 4-3	Equação 4-13	Equação 4-4	Nominais	Nominais	Erro! A origem da referência não foi encontrada.=C- D-F-G-H
$I_2$	$V_2$							
$I_3$	$V_3$							

Segundo Fitzgerald (1975) [26], o escorregamento onde acontece o conjugado máximo pode ser calculado através da Equação de Kloss, da seguinte forma:

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\max C}} + \frac{s_{\max C}}{s}}$$

Onde:

C: conjugado a um determinado escorregamento s;

$C_{\max}$ : conjugado máximo;

s: escorregamento;

$s_{\max C}$ : escorregamento para conjugado máximo.

Particularizando a equação para conjugado e escorregamento nominais, obtém-se:

$$\frac{C_{\text{nom}}}{C_{\max}} = \frac{2}{\frac{s_{\text{nom}}}{s_{\max C}} + \frac{s_{\max C}}{s_{\text{nom}}}} \quad 4-9$$

Adotando a aproximação de que o conjugado e a potência máxima são relacionados através da rotação (e escorregamento) de conjugado máximo, podemos adequar a equação 2-4 da seguinte forma:

$$C_{\max} = \frac{P_{\max}}{(1 - s_{\max C}) \cdot W_s} \quad 4-10$$

Substituindo a equação 4-10 na equação 4-9, obtém-se:

$$\frac{C_{nom}}{\frac{P_{\max}}{(1 - s_{\max C}) \cdot W_s}} = \frac{2}{\frac{s_{nom}}{s_{\max C}} + \frac{s_{\max C}}{s_{nom}}} \quad 4-11$$

Assim, obtendo o escorregamento de máximo conjugado através da equação 4-11, é possível calcular a potência desenvolvida pelo rotor, que é a potência entregue a este se excetuando as perdas elétricas [16]:

$$P_d = (1 - s) \cdot P_g \quad 4-12$$

Onde:

$P_d$ : potência desenvolvida pelo rotor;

$P_g$ : potência entregue ao rotor.

Para cálculo da potência efetivamente entregue à carga, se faz necessário descontar as perdas rotacionais, que são proporcionais à velocidade de rotação do motor [16].

Obtida a potência efetivamente entregue à carga, o conjugado máximo pode ser calculado com essa potência através da equação 4-10 [16].

A queda de tensão no cabo de alimentação pode ser calculada da seguinte forma [10]:

$$V_{CABO} = \frac{Z}{km} \times I \times I \quad 4-13$$

Onde:

Z/km: impedância por quilômetro, obtida através do fabricante do cabo;

l: comprimento do cabo entre o ponto de medição da tensão e o motor;

I: corrente elétrica que flui através do cabo.

Os valores de conjugado calculados devem ser corrigidos, de forma a referenciá-los à tensão nominal do motor, quando as oscilografias não forem realizadas nesta condição [06]. A correção pode ser feita da seguinte forma:

$$C_{COR} = \left( \frac{V_{NOM}}{V_{ENSAIO}} \right)^2 \cdot C_{CALC} \quad 4-14$$

Onde:

$C_{COR}$ : Valor de conjugado corrigido à tensão nominal do motor;

$V_{NOM}$ : tensão nominal do motor;

$V_{ENSAIO}$ : tensão nos terminais do motor durante as oscilografias de tensão e corrente;

$C_{CALC}$ : conjugado calculado a partir dos ensaios.

No próximo capítulo, será descrito estudo de caso aplicando a metodologia proposta em um motor de 842 cv de potência, fazendo o levantamento do conjugado de partida.

Ao longo da utilização da metodologia, algumas considerações e introdução de conceitos serão realizados nos momentos oportunos.

## 5. ESTUDO DE CASO

O experimento, com o objetivo de verificar a metodologia proposta, foi realizado em 23 de fevereiro de 2006, nas instalações da Central Termoelétrica I da Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST. Foi ensaiado o motor de acionamento da Bomba de Alimentação de Água da Caldeira da Central Termoelétrica I.

### 5.1. MOTOR ENSAIADO

O motor, de indução, trifásico, rotor gaiola, considerado de relativa alta potência, é de alta tensão (3.300 V), e de grandes dimensões (altura de ponta de eixo de 450 mm). Em caso de remoção do motor para ensaio em laboratório, essas características dificultariam muito a logística de desmontagem, transporte e montagem, bem como a obtenção de um laboratório com capacidade adequada.

Os dados de placa do motor ensaiado que são de interesse para a metodologia proposta estão listados na TABELA 4. A Figura 17 mostra uma fotografia do motor, retirada durante manutenção preventiva em oficina.



Figura 17 – motor utilizado no experimento

Cortesia: Companhia Siderúrgica de Tubarão – Oficina Elétrica Central

Os resultados de ensaio no laboratório do fabricante, que serão utilizados para comparação com os resultados obtidos pela metodologia proposta, são listados na TABELA 5 e na TABELA 6.

Através do método do diagrama circular, calculou-se o valor de conjugado máximo, obtendo-se 247 %.

Para o cálculo do conjugado de rotor bloqueado, devem ser utilizados os resultados do ensaio a rotor bloqueado, atentando para a tensão de ensaio, que foi de 685 V (21% da tensão nominal). Fazendo um comparativo entre a literatura técnica, segundo a norma NBR 5383 [06], o conjugado de rotor bloqueado ensaiado deve ser extrapolado para a tensão nominal através da relação entre a tensão nominal e a tensão de ensaio com um expoente tipicamente maior que 2. Lobosco (1988) [01] recomenda coeficiente de 2,2 para tensões na ordem de 60% da tensão nominal. Em consulta aos fabricantes Baldor (EUA) e WEG (Brasil), e também conforme experiência do autor, o coeficiente adequado a grande parte dos motores para essa proporção de tensão seria 2,3. Isso acontece porque para níveis baixos de tensão, o motor se encontra numa região de magnetização que ainda não é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação. Tipicamente, somente desde 80 % até 110 % da tensão nominal pode ser utilizado o coeficiente 2.

A Figura 18 ilustra graficamente como o campo magnético varia com a tensão.

TABELA 4 – DADOS DE PLACA DO MOTOR ENSAIADO

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Fabricante	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.	
Ano de fabricação	1980	
Potência	620	kW
	842	cv
Tensão	3.300	Volts
Freqüência	60	Hz
Corrente	125	Ampères
Número de pólos	2	
Elevação de temperatura	80	°C
Temperatura ambiente máxima	40	°C
Rotação nominal	3560	rpm
Fator de potência	93,6	%
Rendimento	94,4	%

Fonte: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. e Kawasaki Steel Corporation [11]

TABELA 5 – ENSAIO A VAZIO NO LABORATÓRIO DO FABRICANTE

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Freqüência	60	Hz
Tensão	3.300	Volts
Corrente	26,1	Ampères
Potência	27,0	kW

Fonte: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. e Kawasaki Steel Corporation [11]

TABELA 6 – ENSAIO A ROTOR BLOQUEADO NO LABORATÓRIO DO FABRICANTE

Grandeza	Valor	Unidade
Frequência	60	Hz
Tensão	685	Volts
Corrente	125	Ampères
Potência	24,8	kW

Fonte: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. e Kawasaki Steel Corporation [11]

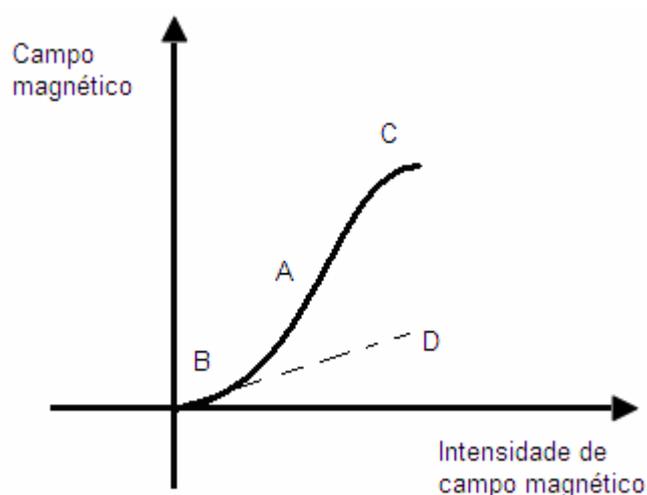


Figura 18 – variação do campo magnético com a intensidade de campo

Região “A”: o campo magnético varia com o quadrado da tensão

Região “B”: caso se extrapole o campo magnético utilizando o quadrado da tensão, obter-se-ia o campo magnético da região “D”. Dessa forma, na extrapolação nessa região utiliza um coeficiente maior que 2 para obtenção do campo magnético da região “A”.

Região “C”: o aumento da tensão já não produz mais aumento no campo magnético com relação quadrática.

Dessa forma, o conjugado a rotor bloqueado é calculado da seguinte forma:

$$C_{RB} = \left( \frac{V_{NOM}}{V_{ENSAIO}} \right)^E \times \frac{\frac{P_{RB}}{w_S}}{\frac{P_{NOM}}{w_N}} \quad 5-1$$

Onde “E” é o coeficiente de extrapolação do conjugado devido a diferença de tensão, tipicamente ligeiramente maior que 2.

Na condição de rotor bloqueado, as perdas rotacionais são nulas. Como a tensão está ao nível de 21% da tensão nominal, as perdas adicionais e as perdas no núcleo podem ser desprezadas [06]. Assim, devem ser consideradas as perdas elétricas nos enrolamentos do estator e nas barras do rotor.

A resistência elétrica dos enrolamentos do estator é 0,209 Ohms. O escorregamento nominal do motor pode ser calculado com a definição já colocada de que é a diferença normalizada entre a rotação nominal e a rotação síncrona (rotação do campo girante) do motor.

$$s_N = \frac{3.600 - 3.560}{3.600} = 0,011111$$

As perdas no estator podem ser calculadas com a equação 4-4.

$$P_{EST} = 1,5 \times R_{EST} \times I^2 = 1,5 \times 0,209 \times 125^2 = 4,9[kW]$$

Assim, a potência de rotor bloqueado é:

$$P_{RB} = P_{ENSAIO(rb)} - P_{EST} = 24,8 - 4,9 = 19,9[kW]$$

O conjugado de rotor bloqueado então é calculado pela equação 5-1.

$$C_{RB} = \left( \frac{V_{NOM}}{V_{ENSAIO}} \right)^{2,3} \times \frac{\frac{P_{RB}}{w_S}}{\frac{P_{NOM}}{w_N}} = \left( \frac{3.300}{685} \right)^{2,3} \times \frac{19,9}{620} \times \frac{3.560}{3.600} = 118\%$$

Então, o conjugado de rotor bloqueado obtido a partir dos ensaios realizados no laboratório do fabricante, considerando um coeficiente de extrapolação do conjugado, em função da tensão, de 2,3, é de 118 %.

A título de ilustração, a TABELA 7 mostra a comparação entre os valores de conjugado do motor sob ensaio e de um motor de mesma potência, mesma rotação e categoria N, ditados pela norma NBR 7094 [05]. Para a aplicação do motor ensaiado, acionamento de bomba hidráulica, a referida norma recomenda a aplicação de um motor dessa categoria. Numa eventual especificação para compra de sobressalente, caso o especialista opta-se por escolher a categoria de conjugado recomendada pela norma - N, provavelmente o conjunto motor-carga não partiria adequadamente, ou até mesmo não partiria.

**TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE O CONJUGADO DO MOTOR SOB ENSAIO E O DE UM MOTOR CATEGORIA N**

<b>Conjugado</b>	<b>NBR 7094 Categoria N</b>	<b>Motor sob ensaio</b>
A rotor bloqueado	65 %	118 %
Máximo	160 %	247 %

Fonte: NBR 7094 e Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. [05] [11]

## **5.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA**

### **5.2.1. ASPECTOS GERAIS**

Seguindo os passos descritos no capítulo 4, serão calculados os conjugados de rotor bloqueado e máximo do motor ensaiado. Estando o motor em operação, foi realizado desligamento da alimentação e após o motor estar parado, foi dada nova partida, que teve a tensão e a corrente elétrica oscilografadas.

Foi utilizada taxa de amostragem de 8.000 amostras por segundo (8kS/s). Essa taxa de amostragem foi escolhida por dois motivos:

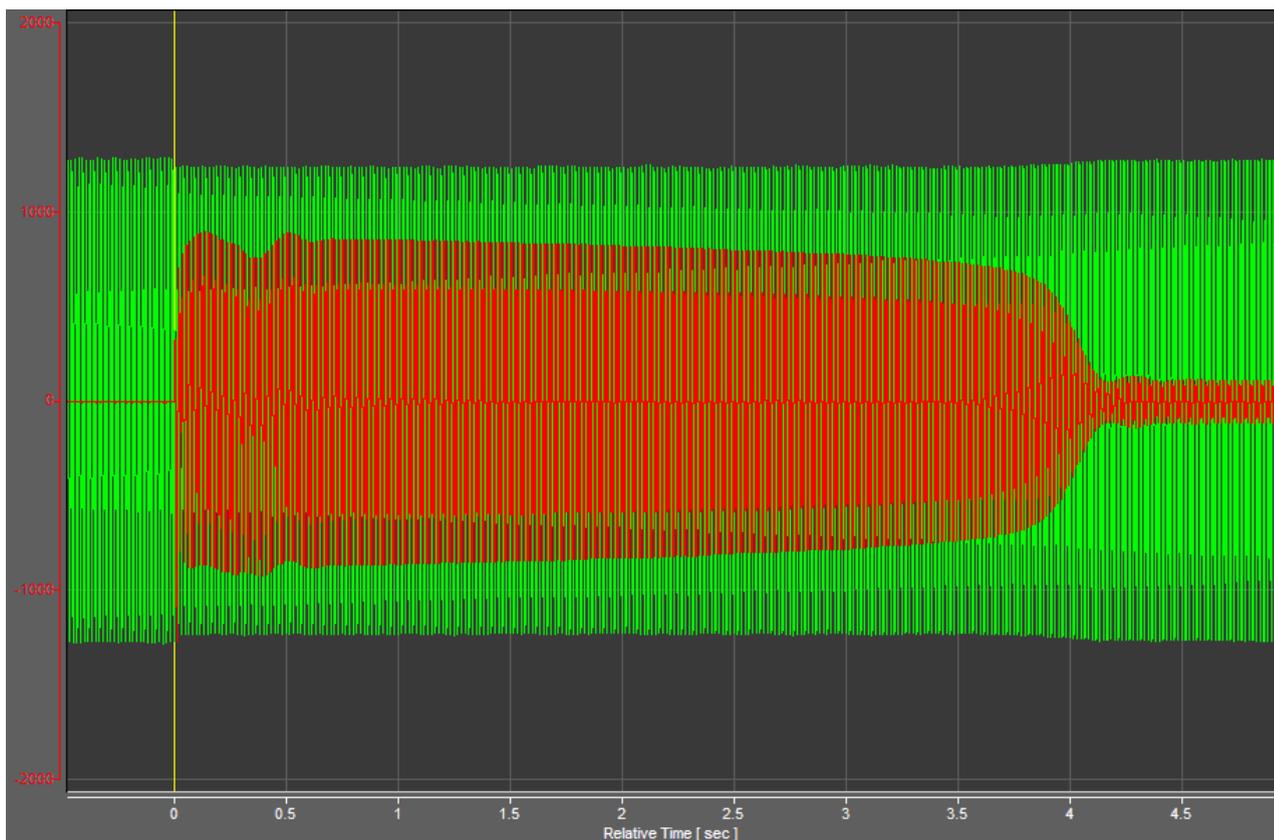
- a) evitar uso de modelos matemáticos para reconstrução da forma das formas de onda contínuas a partir de dados discretos amostrados;
- b) considerando os 360° de cada ciclo da tensão de alimentação, tem-se 1 amostra a cada 0,045°. Assim, os erros provenientes da multiplicação entre

tensão e corrente serão, conforme equação 4-2, desprezíveis, tendo em vista que influenciarão nos elementos de seno e cosseno com erros na ordem de 0,1%.

### **5.2.2. OSCILOGRAFIA DA PARTIDA**

A partida foi oscilografada com a instrumentação descrita no apêndice A. Devido à configuração do Transformador de Potencial - TP e do Transformador de Corrente - TC do painel de acionamento, foram oscilografadas a tensão de linha  $V_{RT}$  e a corrente de fase  $I_T$ , sendo que o registrador oscilógrafo foi ajustado para já apresentar os valores tanto de tensão quanto de corrente referidos a valores de linha. Para que as análises e cálculos possam ser efetuados, a tensão e a corrente devem estar referidas à mesma fase. Para isso, no gráfico da oscilografia, a tensão deverá ser adiantada em  $150^\circ$ , ou seja, 6,94444 milissegundos, uma vez que a frequência é 60 Hz.

O gráfico da oscilografia de partida é mostrado na Figura 19. Percebe-se que a partida demandou aproximadamente 4 segundos.



**Figura 19 – oscilografia de partida do motor**  
**Vermelho: corrente elétrica**  
**Verde: tensão de alimentação**

Agora, serão calculadas as perdas, e outras grandezas para a condição nominal do motor, para posterior cálculo das potências e conjugados a rotor bloqueado e máximo.

### 5.2.3. CÁLCULO DAS PERDAS À CONDIÇÃO NOMINAL

As perdas totais nominais do motor são calculadas com a equação 4-5.

$$Perdas = P_{NOM} \times \left( \frac{1}{h} - 1 \right) = 620 \times \left( \frac{1}{0,944} - 1 \right) = 36,8[kW]$$

As perdas elétricas nominais no estator são calculadas com a equação 4-4.

Para isso, se faz necessário corrigir a resistência elétrica dos enrolamentos do estator para a temperatura efetiva de trabalho do motor. A resistência elétrica do enrolamento de cobre eletrolítico pode ser corrigida da seguinte forma [05] [06]:

$$R_{NOM} = R_{ENSAIO} \times \frac{T_{NOM} + 234,5}{T_{ENSAIO} + 234,5} \quad 5-2$$

Onde:

$R_{NOM}$ : resistência elétrica nominal à temperatura nominal de operação;

$R_{ENSAIO}$ : resistência elétrica obtida a partir de medição em determinada temperatura;

$T_{NOM}$ : temperatura nominal de operação dos enrolamentos;

$T_{ENSAIO}$ : temperatura dos enrolamentos durante a medição de resistência elétrica.

Como para o motor ensaiado, em seu histórico consta o valor de 0,209 Ohms a 17°C, e sua elevação de temperatura é 80°C com temperatura ambiente de 40°C, os valores serão corrigidos para 120°C:

$$R_{NOM} = 0,209 \times \frac{120 + 234,5}{17 + 234,5} = 0,295[\Omega]$$

Obtido o valor da resistência dos enrolamentos do estator à condição nominal, as perdas nesses enrolamentos para a condição podem ser calculadas:

$$P_{EST} = 1,5 \times R_{EST} \times I^2 = 1,5 \times 0,295 \times 125^2 = 6,9[kW]$$

As perdas no rotor, para a operação em potência nominal, são consideradas iguais às do estator.

As perdas adicionais, sendo consideradas como 1% da potência nominal do motor, são 6,2 kW.

Pode-se então agora calcular as perdas no núcleo e as perdas rotacionais, ambas para a condição nominal, conforme a equação 4-6.

$$P_{NUC} = P_{ROTAC} = \frac{Perdas - P_{EST} - P_{ROT} - P_{ADIC}}{2} = \frac{36,8 - 6,9 - 6,9 - 6,2}{2} = 8,4[kW]$$

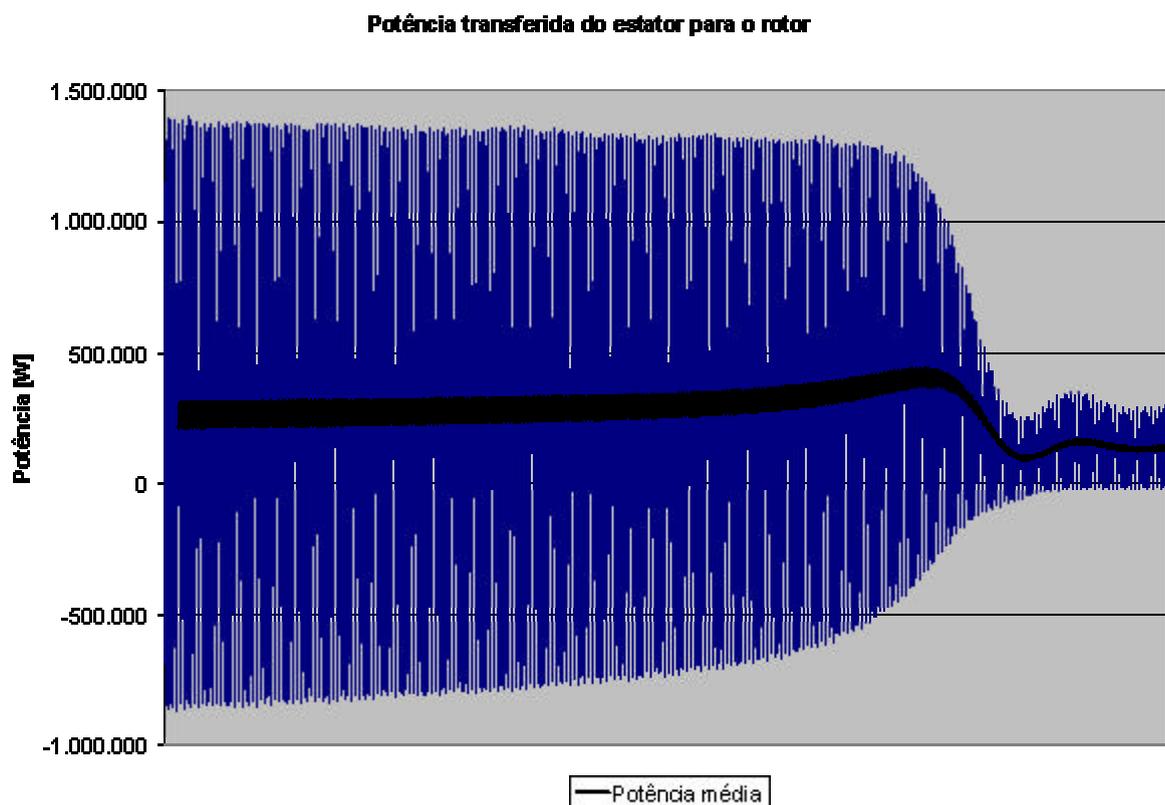
#### 5.2.4. CÁLCULO DA POTÊNCIA DE ENTRADA E DA POTÊNCIA ENTREGUE AO EIXO

Através de tabela de dados de tensão e corrente elétricas obtidas na oscilografia do motor, exemplificada na Figura 20, foi montada uma planilha eletrônica para o cálculo da potência entregue ao rotor e gerado um gráfico desta, mostrado na Figura 21.

No gráfico nota-se claramente o explanado no item 4.2, onde se vê uma potência de valor alternado com frequência de 120 Hz, com um valor médio que varia durante a partida, destacado em linha negra.

Relative Time [sec]	CH2 [A]	CH3 [V]
0.243875	-834.29	-2785.7
0.244000	-820.00	-2946.4
0.244125	-797.14	-3117.9
0.244250	-782.86	-3278.6
0.244375	-754.29	-3417.9
0.244500	-734.29	-3567.9
0.244625	-705.71	-3728.6
0.244750	-680.00	-3825.0
0.244875	-645.71	-3942.9
0.245000	-620.00	-4050.0
0.245125	-588.57	-4146.4
0.245250	-554.29	-4253.6
0.245375	-522.86	-4339.3
0.245500	-485.71	-4382.1
0.245625	-445.71	-4425.0
0.245750	-414.29	-4521.4
0.245875	-371.43	-4585.7
0.246000	-334.29	-4596.4
0.246125	-291.43	-4575.0
0.246250	-251.43	-4596.4
0.246375	-214.29	-4596.4
0.246500	-177.14	-4596.4
0.246625	-134.29	-4575.0
0.246750	-91.429	-4542.9
0.246875	-51.429	-4467.9
0.247000	-14.286	-4435.7
0.247125	28.571	-4371.4
0.247250	65.714	-4307.1

Figura 20 – Tabela de dados obtida a partir da oscilografia



**Figura 21 – gráfico da potência transferida ao rotor**

Para o cálculo das perdas nos cabos de alimentação, as seguintes estimativas foram feitas:

- a) comprimento do cabo entre o ponto de medição e os terminais do motor: 30 metros;
- b) seção nominal do cabo: 25 mm<sup>2</sup>;
- c) tipo de instalação: em bandeja;
- d) isolamento: 3,6 / 6,0 kV.

Com essas considerações, através de consulta ao fabricante FICAP [10], obtém-se o valor de 0,927 Ohms/km para a resistência elétrica. Com a equação 4-3, calcula-se então as perdas no cabo.

### 5.2.5. CÁLCULO DO CONJUGADO A ROTOR BLOQUEADO

Para o cálculo do conjugado a rotor bloqueado, se faz necessário calcular o conjugado desenvolvido pelo rotor nesta condição.

A partir dos dados do gráfico da Figura 21, obtém-se que a potência entregue ao rotor nesta condição é 237,5 kW. Como o gráfico foi montado para a potência monofásica, e o motor é trifásico, a potência de entrada total é multiplicada por 3, obtendo-se o valor de 712,5 kW. Nessa região de rotor bloqueado, o valor da tensão é 3.264 V, e a corrente 613,4 A.

Após consulta ao fabricante FICAP [10], obtém-se a impedância de 0,993 Ohms/km. Assim, a queda de tensão no cabo pode ser calculada com a equação 4-13:

$$V_{CABO} = \frac{Z}{km} \times l \times I = 0,993 \times 0,03 \times 613,4 = 18[V]$$

O conjugado a rotor bloqueado é calculado então com a equação 4-8.

$$C_{rb} = \frac{P_{IN} - P_{EST} - P_{NUC} - P_{ADIC}}{w_s} = \frac{712,5 \cdot 10^3}{2 \cdot p \cdot 60} = 1890,0 Nm$$

Referenciando o conjugado de rotor bloqueado em relação ao conjugado nominal, bem como corrigindo para a tensão nominal do motor, obtém-se o seguinte valor:

$$C_{RB} = \left( \frac{3.300}{3.264 - 18} \right)^2 \frac{1.890,0}{\frac{620 \cdot 10^3}{2p \frac{3560}{60}}} = 114\%$$

Assim, o conjugado a rotor bloqueado obtido pelo metodologia proposta é de 114 %.

## 5.2.6. CÁLCULO DO CONJUGADO MÁXIMO

A partir do gráfico da Figura 21, obtém-se que o valor da potência máxima transferida ao rotor de 441,5 kW. Como o gráfico foi montado para a potência monofásica, e o motor é trifásico, a potência máxima transferida ao rotor deve ser multiplicada por 3, obtendo-se o resultado de 1.324,5 kW. Nessa região, o valor da tensão é 3.285 V, e a corrente 284,9 A.

A queda de tensão no cabo pode ser calculada com a equação 4-13:

$$V_{CABO} = \frac{Z}{km} \times l \times I = 0,993 \times 0,03 \times 284,9 = 8,5[V]$$

O escorregamento onde ocorre o conjugado máximo é calculado com a equação 4-11:

$$\frac{\frac{620 \cdot 10^3}{2 \cdot p \cdot 3560}}{\frac{60}{1324,5 \cdot 10^3}} = \frac{2}{\frac{0,011111}{s_{\max C}} + \frac{s_{\max C}}{0,011111}}$$

$$s_{\max C} = 0,0412$$

A potência efetivamente entregue ao rotor pode ser calculada com a equação 4-12:

$$P_d = (1 - 0,0412) \cdot 1324,5 = 1269,9 kW$$

As perdas rotacionais podem ser calculadas como proporcionais à rotação do motor:

$$P_{rot, \max C} = \frac{w_{\max C}}{w_{nom}} \cdot P_{rot, nom} = \frac{(1 - s_{\max C})}{(1 - s_{nom})} \cdot P_{rot, nom} = \frac{(1 - 0,0412)}{(1 - 0,0111)} \cdot 8,4 = 8,1 kW$$

A potência líquida entregue ao eixo do motor é então:

$$P_{eixo,max} = P_d - P_{rot,max} = 1269,9 - 8,1 = 1261,8kW$$

O conjugado máximo entregue ao rotor pode, então, ser calculado com a equação 4-10:

$$C_{eixo,max} = \frac{1261,8 \cdot 10^3}{(1 - 0,0412) \cdot 2 \cdot p \cdot 60} = 3490,9Nm$$

Referenciando ao valor do conjugado nominal, o conjugado máximo se torna:

$$C_{MÁX} = \left( \frac{3.300}{3.285 - 8,5} \right)^2 \cdot \frac{3490,9}{\frac{2 \cdot p \cdot 3560}{60}} = 213\%$$

Assim, o conjugado máximo obtido pelo metodologia proposta é de 213 %.

No Apêndice B é descrito o cálculo do conjugado do motor através de seu modelamento no referencial dq, também denominado modelo de Park.

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados de conjugado desenvolvido pelo motor obtidos através da metodologia proposta serão comparados com os valores obtidos nos ensaios no laboratório do fabricante. Essa comparação é mostrada na TABELA 8.

**TABELA 8 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE CONJUGADOS OBTIDOS, COM OS VALORES DO FABRICANTE**

<b>Conjugado</b>	<b>Laboratório do fabricante</b>	<b>Metodologia proposta</b>	<b>Diferença percentual</b>
A rotor bloqueado	118 %	114 %	- 3,4 %
Máximo	247 %	213 %	- 13,8 %

Considerando que a instrumentação utilizada forneceu medições de potência, que refletirão no resultado do cálculo do conjugado, com imprecisão de até 6 %, considerando que os instrumentos do laboratório do fabricante também possuem imprecisão de medição, e sabendo que a metodologia proposta não determina o circuito elétrico equivalente do motor, o que implicou na realização de algumas considerações de aproximação, entende-se que a metodologia proposta apresentou resultados de conjugado do motor ensaiado coerentes com os valores obtidos pelo fabricante em seu laboratório, que são os considerados “reais” e tomados como base de comparação, tendo sua eficácia comprovada.

Considera-se ainda que o motor objeto do estudo de caso está em operação contínua há aproximadamente 25 anos, o que de maneira geral causa trincas em barras rotóricas, diminuindo os valores de conjugado em relação aos valores de fábrica [24], o que é coerente com os valores obtidos ligeiramente abaixo dos valores de fábrica adotados como base de comparação.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

Naturalmente, toda proposta de uma nova idéia na área de engenharia é passível e geralmente passa por refinamentos e melhorias ao longo do tempo, durante o uso.

Deve ser considerado ainda que os trabalhos de realização de contas devem preferencialmente ser realizados de forma automatizada por computadores.

Assim, sugerem-se pelo menos dois trabalhos futuros como continuidade:

- a) Estudo de levantamento do circuito elétrico equivalente do motor sob ensaio, utilizando a metodologia deste trabalho, de forma a produzir resultados mais precisos, principalmente para o valor de conjugado máximo;
- b) Desenvolvimento de um software onde a entrada de dados fosse os dados de placa do motor sob ensaio, e a oscilografia de partida do motor, fornecendo como saída os valores de conjugado de rotor bloqueado e conjugado máximo do motor.

Vislumbra-se ainda a utilização da metodologia proposta neste trabalho como ferramenta de manutenção preditiva de motores elétricos através da análise de tendência dos valores de conjugado desenvolvidos pelo motor, uma vez que reduções neste desempenho geralmente são oriundas de problemas no circuito elétrico do rotor, que não é acessível com o motor montado na planta industrial. Atualmente, utiliza-se isoladamente a técnica de análise espectral da corrente elétrica como ferramenta de manutenção preditiva de falhas em rotores [24].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LOBOSCO, O. S.; DIAS, J. L. C. **Seleção e aplicação de motores elétricos:** volumes 1 e 2. São Paulo: McGraw-Hill : Siemens, 1988.
2. WEG. **O motor elétrico:** uma história de energia, inteligência e trabalho. Jaraguá do Sul: UNERJ, 2004.
3. KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. **Física:** volume 1. 1ª ed. São Paulo: Makron Books, 1997.
4. FERREIRA, A. B. H. **O minidicionário da língua portuguesa.** 2ª ed. São Paulo: Nova Fronteira, 2001.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7094:** Máquinas elétricas girantes – Motores de indução – Especificação. Rio de Janeiro, 2003.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383-1:** Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios. Rio de Janeiro, 2002.
7. KOSOW, I. I. **Máquinas elétricas e transformadores.** 15ª ed. São Paulo: Globo, 2005.
8. MOTOR LIFE. **Iron and steel engineer**, New York, August 1978, páginas 48-53. KOHN, L.S.; GRAY, C. E.
9. POWER MEASUREMENT. **3710 ACM:** Advanced digital power instrumentation package – installation & operation manual. Rev. B. Saanichton, Canadá: 1995.

10. CABOS Fipex de media tensão. **FICAP**. Disponível em <[www.ficap.com.br](http://www.ficap.com.br)> . Acesso em: 27 fev. 2006.
11. KAWASAKI STEEL CORPORATION; MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES. **Shop inspection results**: power and blower plant – electrical equipment – 620 kW boiler feed water pump motors cage type. [Nagasaki]: Melco, 1980.
12. CARDOSO, Marcio Pereira. **Determinação das características de motores através de medidas de aceleração angular**. 1988. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1988.
13. NOVOTNY, D. W.; LIPO, T.A. **Principles of vector control and field orientation**. 1989.
14. MISIARI, José Antonio Urcia. **Análise de defeitos no motor de indução trifásico para predição de falhas incipientes**. 1997. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.
15. MUNIZ, Pablo Rodrigues. In: 2005 Iris Machine Conference, 2005, Scottsdale. **Improvement of ac motor reliability from technique standardization**.
16. YEADON, William H.; YEADON, Alan W.. **Handbook of small electric motors**. New York: McGraw-Hill, 2001.
17. GIECK, Kurt. **Manual de formulas técnicas**. 2ª edição. São Paulo: Hemus, 1979.
18. BELOV, Nicolai V. **Máquinas elétricas**. 1ª edição. Caxias do Sul: EducS, 1996.
19. KRAUSE, Paul C. **Analysis of electric machinery and drive systems**. 2ª edição. John Wiley, 2002.

20. ARIZA, Cláudio Fernandes. **Manutenção corretiva de máquinas elétricas rotativas**. 1ª edição. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.
21. MUNIZ, Pablo Rodrigues. In: Encontro técnico de riscos de eletricidade no trabalho – Divisão de Engenharia Elétrica e Eletrônica da CST. **Aspectos técnicos, econômicos e de segurança na substituição de motores cc por motores ca acionados por inversor de frequência**.
22. MUNIZ, Pablo Rodrigues. **Análise de intercambiabilidade motores de baixa tensão de alta criticidade**. CST
23. WEG. **Motores elétricos de corrente alternada**. Setembro / 2002.
24. EI HACHEMI BENBOUZID, M. **A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection**. IEEE transactions on industrial electronics, Volume 47, Issue 5, October 2000. Pages 984 – 993.
25. YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION, OR100E/OR300E Handy osillográfico recorder – User's manual. 1<sup>st</sup> edition, 1999.
26. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. 1ª ed. São Paulo: Makron, 1975.
27. RICHARDSON, Donald V. **Rotating electric machinery and transformer technology**. 1ª ed. Reston, Virginia, USA: Reston, 1978.

## APÊNDICE A - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

### REGISTRADOR OSCILÓGRAFO

O registrador utilizado é o de modelo OR300E, do fabricante Yokogawa.

Seu certificado de calibração mais recente foi emitido pelo Laboratório de Calibração da CST, sob N° 38207 de 31/05/2005, rastreável à Rede Brasileira de Calibração – INMETRO. Segundo esse certificado, o erro de medição do instrumento, acumulado com a incerteza, é de 0,26 %.

O registrador é mostrado na Figura 22.



Figura 22 – registrador oscilógrafo

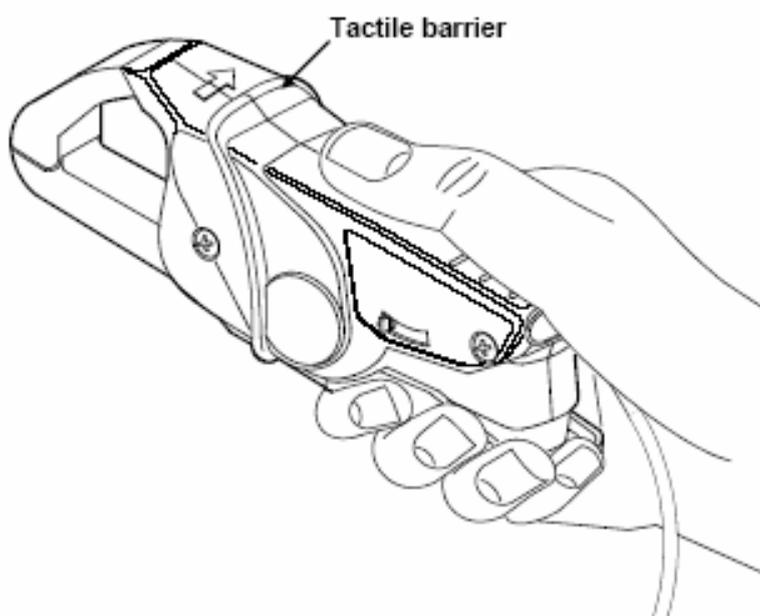
### ALICATE TRANSDUTOR DE CORRENTE

O alicate transdutor utilizado é o modelo i200s, do fabricante Fluke. Foi utilizada a escala de 20 A, uma vez que as medições foram feitas no secundário do TC de

medição do painel de acionamento do motor. Nessa escala, o transdutor fornece uma relação de 100 miliVolts / Ampère.

Seu certificado de calibração mais recente foi emitido pelo Laboratório de Calibração da CST, sob Nº 38546 de 13/06/2005, rastreável à Rede Brasileira de Calibração – INMETRO. Segundo esse certificado, o erro de medição do instrumento, acumulado com a incerteza, é de 3,8 %.

O instrumento é mostrado na Figura 23.



**Figura 23 – alicate transdutor de corrente**

## **TRANSFORMADORES DE POTENCIAL E DE CORRENTE**

As medições foram realizadas nos secundários dos TCs e TPs de medição, no painel de acionamento do motor.

Segundo documentação técnica do projeto, a classe de precisão nominal desses instrumentos é 0,6 %.

## SOFTWARE

O software de visualização dos dados oscilógrafos é o “Handy OR Viewer”, versão R2.02.01, fornecido pela Yokogawa, licenciado para a CST.

## PRECISÃO ESPERADA NAS MEDIÇÕES

Como os valores de conjugado obtidos com a metodologia proposta são oriundos de valores de potência, que por sua vez são provenientes de multiplicação de valores de tensão e corrente oscilografados, é de se esperar que os resultados apresentem erros conforme calculado abaixo.

$$Potência = Tensão \times Corrente$$

$$Potência = Tensão \times (TP \pm 0,6\%) \times (oscilógrafo \pm 0,26\%) \times \\ \times Corrente \times (TC \pm 0,6\%) \times (transdutor \pm 3,8\%) \times (oscilógrafo \pm 0,26\%)$$

Considerando tensão de 3.300 Volts e corrente de 600 Ampères, teríamos o seguinte resultado:

$$Potência = 3.300 \times (1 \pm 0,6\%) \times (1 \pm 0,26\%) \times 600 \times (1 \pm 0,6\%) \times (1 \pm 3,8\%) \times (1 \pm 0,26\%)$$

$$Potência = (1.980 \pm 5,6\%) [kVA]$$

Dessa forma, é esperada uma imprecisão nos resultados da ordem de grandeza de 6% devido aos instrumentos de medição utilizados.

## APÊNDICE B – CÁLCULO DO CONJUGADO ATRAVÉS DO MODELO dq DO MOTOR

Uma outra forma de se calcular a curva de conjugado do motor sob ensaio é através de seu modelo dq, onde suas 3 correntes de alimentação são transformadas para um referencial fictício de 2 correntes que gira juntamente ao estator, sendo uma corrente no eixo direto e uma no eixo em quadratura [19]. Esse referencial que gira solidário ao campo magnético do estator é denominado referencial síncrono.

Fixando-se as referências adequadamente, tipicamente como a velocidade angular do campo magnético girante no entreferro do motor, o cálculo do conjugado se torna relativamente simples. Isso porque a equação fundamental do conjugado do motor elétrico envolve o ângulo entre a corrente rotórica e o campo magnético. Com o referencial adequadamente escolhido, não se faz necessário o cálculo desse ângulo e o conjugado pode ser obtido através de multiplicações diretas entre fluxos concatenados e correntes elétricas.

A equação 7-1 é a equação fundamental do conjugado [07] e a equação 7-2 é o cálculo do conjugado com utilização do modelo dq, conhecido também como modelo de Park.

$$C = K_t \cdot \Phi \cdot I_r \cdot \cos(\mathbf{q}_r) \quad 7-1$$

$$C = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \left(\frac{P}{2}\right) \cdot (I_{ds} \cdot i_{qs} - I_{qs} \cdot i_{ds}) \quad 7-2$$

Onde:

$k_t$ : constante relativa ao número de pólos do motor, adaptação de unidades empregadas, características construtivas dos enrolamentos, etc;

$\Phi$ : fluxo magnético girante que concatena os condutores do rotor;

$I_r \cos(\theta_r)$ : componente da corrente do rotor em fase com o fluxo magnético;

$\lambda$ : fluxos concatenados no referencial adotado;

$i$ : correntes elétricas no referencial adotado.

Todas as considerações realizadas de ângulos de defasamento, notadamente entre tensão e corrente, realizadas nos cálculos se tornam desnecessárias ao se adotar o modelo dq.

Neste trabalho não é adotado tal procedimento por não se ter tido acesso às 3 correntes do motor ensaiado, bem como pelo fato de que na grande maioria das aplicações industriais ter-se também somente acesso a uma corrente elétrica, que geralmente é monitorada através de um TC para proteções e medições elétricas do motor. O procedimento de se multiplicar a corrente amostrada por 3 produziria valores de conjugado, principalmente de conjugado de rotor bloqueado, não coerentes com os valores reais, devido às assimetrias do motor no início da partida. Tendo somente a corrente de uma fase adquirida durante a partida, o modelo dq seria útil para cálculo do conjugado máximo, porém este cálculo já foi feito com boa precisão na seção 5.2.6.