



**PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**

**Euler Fernando Silva Britto**

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA O CÁLCULO DA  
POTÊNCIA REQUERIDA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS  
COM ROTOR EM GAIOLA**

**Belo Horizonte**  
**2013**

**EULER FERNANDO SILVA BRITTO**

**SOFTWARE PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA REQUERIDA EM  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS COM ROTOR EM GAIOLA**

**Monografia a ser apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I, o trabalho servirá como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica pelo Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.**

**Orientador: Prof. MSc. Fausto Maretti Junior**

**Belo Horizonte  
2013**

## RESUMO

Várias pesquisas demonstram que em muitas indústrias existem motores superdimensionados, o que acarreta em um desperdício de energia elétrica além dos custos mais elevados na compra deste motor. Este projeto visa documentar e levantar os requisitos para o desenvolvimento de um programa computacional interativo, onde o usuário irá inserir componentes como transmissão, cargas e motores. Em seguida definir alguns parâmetros mínimos, necessários para que o programa realize os cálculos para escolha adequada de um motor elétrico. O programa permitirá que seja simulada uma planta de acionamento, informando o motor utilizado atualmente e comparar inclusive em questões financeiras uma possível economia caso venha a fazer a substituição por um novo motor escolhido adequadamente.

**Palavras-chave:** Programa Computacional; Acionamento; Escolha de motor; Transmissão.

## **ABSTRACT**

Several researches have shown that in many industries there are oversized electric engines, resulting in a waste of electricity beyond the higher costs in the purchase of this engine. This project aims to document and get the requirements for the development of an interactive computer program, where the user will insert components like: transmission, charges and engine. Then set some minimum parameters required for the program to perform the calculations for proper choice of an electric motor. The program will allow to do simulations of an existent plant, stating the engine currently used and comparing financial matters including a possible savings if it were to make the change to a new engine chosen properly.

**Keywords: Computer Program; Drive; Engine, Transmission.**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. Esquema Simplificado de um Motor Elétrico .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 2. Estator Montado .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 3. Carcaça do estator .....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 4. Tabela IP - Grau de proteção dos invólucros dos materiais elétricos conforme a norma IEC 60 529 e NBR IEC 60529 .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 5. Núcleo magnético do estator .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 6. Enrolamento do estator .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 7. Conjunto do rotor .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 8. Motor Completo .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 9. Circuito equivalente do motor de indução.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 10. Circuito Equivalente de Thévenin.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 11. Curva Característica de Velocidade Versus Conjugado .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 12. Curvas Típicas dos Motores de Categorias D, H E N.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 13. Curva Característica Decrescente .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 14. Curva Característica Constante .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 15. Curva Característica Crescente.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 16. Curva Característica Parabólica .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 17. Tabela Classe de Isolamento Térmico.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 18. Composição das temperaturas das classes de isolamento térmico .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 19. Tabela de altitudes versus temperatura.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 20. Tabela de fator de correção da potência útil .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 21. Gráfico do motor em regime S2.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 22. Diagrama do Banco de Dados .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 23. Tela do programa.....</b>	<b>45</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
1.1. Objetivo .....	6
1.2. Abrangência e Relevância .....	6
1.3. Metodologia .....	7
<b>2. O MOTOR ELÉTRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1. O Estator .....	8
2.1.1. Carcaça .....	10
2.1.2. Núcleo magnético .....	12
2.1.3. Enrolamento .....	12
2.2. O Rotor .....	13
2.2.1. Eixo .....	15
2.2.2. Núcleo Magnético.....	15
2.2.3. Barras Condutoras .....	15
<b>3. CÁLCULO DA POTÊNCIA DO MOTOR.....</b>	<b>17</b>
3.1. Circuito Elétrico.....	18
3.1.1. Circuito equivalente de Thévenin .....	19
3.1.2. Potência eletromagnética e potência mecânica interna .....	20
3.2. Conjugado Mecânico .....	21
3.2.1. Tipos de conjugado.....	22
3.2.1.1 Conjugado nominal.....	23
3.2.1.2 Conjugado de partida.....	23
3.2.1.3 Conjugado máximo .....	24
3.2.1.4 Conjugado mínimo .....	24
3.3. Categorias dos Motores de Indução de Rotor em Gaiola .....	24
3.3.1. Características de conjugado .....	26
<b>4. CÁLCULO DE POTÊNCIA DA CARGA .....</b>	<b>27</b>
4.1. Características Mecânicas.....	28
4.1.1. Característica hiperbólica com a velocidade.....	28
4.1.2. Característica constante com a velocidade .....	28
4.1.3. Característica linear crescente com a velocidade.....	29

<b>4.1.4. Característica parabólica com a velocidade .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. Momento de Inércia.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3. Conjugado Resistente Referido .....</b>	<b>32</b>
<b>5. ACELERAÇÃO E FRENAGEM DO MIRC.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1. Tempo de Aceleração .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2. Tempo de Frenagem .....</b>	<b>34</b>
<b>6. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E ALTITUDE AMBIENTE NO MOTOR.....</b>	<b>35</b>
<b>6.1. Classe de Isolamento Térmico.....</b>	<b>35</b>
<b>6.2. Cálculo da Temperatura no Enrolamento .....</b>	<b>36</b>
<b>6.3. Fator de Serviço .....</b>	<b>39</b>
<b>6.4. Regimes de Serviço .....</b>	<b>39</b>
<b>6.5. Potência Equivalente .....</b>	<b>40</b>
<b>7. RESULTADOS ESPERADOS .....</b>	<b>42</b>
<b>7.1. Banco de Dados .....</b>	<b>42</b>
<b>7.1.1. Linguagem de programação .....</b>	<b>44</b>
<b>7.1.2. Esboço da tela .....</b>	<b>44</b>
<b>8. CRONOGRAMA DO TRABALHO .....</b>	<b>46</b>
<b>9. CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Motores elétricos de indução são equipamentos utilizados em larga escala nos sistemas industriais e são essenciais para acionamento de diversos tipos de cargas.

Várias pesquisas realizadas mostraram que os motores elétricos utilizados nas indústrias trabalham com uma folga excessiva, ou seja, são superdimensionados. Isto acarreta em custos mais elevados para a execução de uma tarefa que poderia ser realizada consumindo muito menos recursos.

### **1.1. Objetivo**

Esse trabalho tem por objetivo, capacitar as pessoas responsáveis pela escolha de motores elétricos nas indústrias com acionamento de cargas diversas e também servir de apoio didático em laboratórios que trabalham com estes motores.

No caso da utilização em uma indústria, a escolha mais adequada de um motor deve gerar uma economia significativa no consumo de energia elétrica e consequentemente nos custos dessa empresa.

### **1.2. Abrangência e Relevância**

Ao analisar-se um exemplo simples, pode-se ter uma idéia da abrangência do projeto. Pode-se supor que uma indústria produza um determinado produto, e no processo de produção deste é utilizada uma máquina que necessite de um motor elétrico para acioná-la e que este seja superdimensionado.

A indústria terá um custo mais alto na produção do produto, quando poderia gastar caso estivesse com um motor escolhido adequadamente. Com esta economia, os custos podem ser reduzidos principalmente para a empresa e podendo ser repassado para o consumidor final.

O foco dos estudos serão os motores de indução trifásicos com rotor em gaiola, pois segundo pesquisas, são os mais utilizados nas indústrias atualmente.



### **1.3. Metodologia**

O trabalho visa realizar o desenvolvimento de um programa computacional para que seja utilizado no auxílio da escolha para implantação de motores elétricos de indução com rotor em gaiola em plantas com variados tipos de cargas. Desta forma, irá melhorar a eficiência energética desses equipamentos que são utilizados no sistema, gerando uma economia considerável.

Para isso, é proposta a realização de uma metodologia simples onde será tomada a teoria e aplicação de fórmulas que permitem o cálculo da potência de motores através de critérios elétricos e mecânicos.

Desta forma, pretende-se que a pessoa responsável pela definição deste equipamento se familiarize e entenda os pontos relevantes para tomada de decisão.

É extremamente importante que o responsável pela escolha do motor tenha um conhecimento prévio sobre o assunto, e que utilize o programa somente como auxílio para adiantar a parte algébrica ou então para simulação de uma nova situação a qual se deseja implantar.

Quanto ao uso como apoio didático, poderá ser utilizado para simulações, analisando os efeitos de alterações em vários parâmetros de entrada e observando seus efeitos tanto através de gráficos quanto de valores brutos.

Serão ainda consultados livros, publicações técnicas de revistas e congressos, além de material disponível na internet, como fonte de consultas para embasamento do trabalho.

## 2. O MOTOR ELÉTRICO

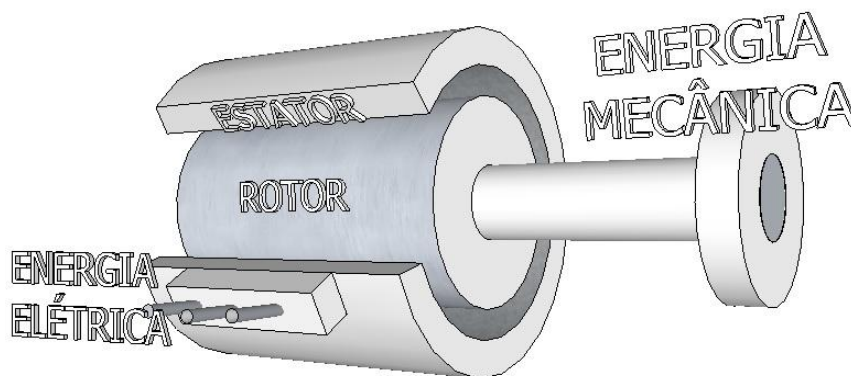
Para que seja mais tranquila a compreensão das fórmulas e termos utilizados para cálculo da potência requerida de motores elétricos, serão abordados conceitos gerais sobre este.

O motor elétrico é um equipamento projetado para transformar energia elétrica em energia mecânica. De uma forma bem resumida, estes motores são formados por um estator e um rotor. Através de uma caixa de ligação, o motor é ligado à rede elétrica quando então ocorrem fenômenos eletromagnéticos em seu interior resultando no movimento rotativo em seu eixo. (CHAPMAN, 2002)

Como se forma este campo magnético, as relações entre potência de entrada e saída, parâmetros relevantes e outros valores serão vistos ao longo dos capítulos.

Na Figura 1 é apresentado um esquema simplificado de um motor elétrico.

**Figura 1. Esquema Simplificado de um Motor Elétrico**



Fonte: AUTOR, 2013

### 2.1. O Estator

O estator é a parte fixa do motor. Ele é composto basicamente por três peças: Carcaça, núcleo magnético e enrolamento. A Figura 2 apresenta um estator montado.

**Figura 2. Estator Montado**



**Fonte: WEG, 2013**

Do lado externo do estator é encontrada a caixa de ligação do motor e neste caso serão seis terminais, para que seja possível escolher se o motor será ligado na configuração de triângulo ou estrela.

O estator é constituído de várias lâminas finas de material magnético, prensadas para formar o conjunto do estator. Os materiais normalmente usados são os chamados materiais magnéticos macios, como o aço silício, que possui alta permeabilidade magnética e a quase nenhuma resistência ao campo magnético.

Estas são características importantíssimas que materiais candidatos a núcleo magnético devem possuir, além de ter baixo custo. O aço silício quase não possui predisposição a corrosão.

A utilização do aço silício também se deve ao fato de que as perdas por corrente de Foucault são muito menores devido ao fato de o aço silício não ser bom condutor elétrico. Com isto o fluxo que é transferido ao rotor é maior.

O aço silício é uma liga composta de silício, ferro e carbono, pode conter até 6,5% de silício no produto final, que é o responsável pela redução da condutividade elétrica do aço. (BUSTAMANTE, SILVA ET AL., 1998)

O rotor transfere, através de interações eletromagnéticas, para o rotor a força para que ele gire.

### **2.1.1. Carcaça**

A carcaça é a parte que fornece proteção ao equipamento, sua estrutura é feita de forma que seja facilitada a dissipação do calor gerado internamente pelo núcleo e enrolamentos.

Para construção da carcaça normalmente é utilizado o ferro fundido branco, devido a sua alta resistência, facilidade para usinar, baixo custo e possui excelente condutibilidade térmica, que facilita a dissipação de calor do motor. A carcaça é mostrada na Figura 3.











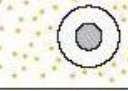



**Figura 3. Carcaça do estator**



**Fonte: FUNDIMIG, 2013**

Na carcaça ficam os contatos para ligação elétrica, especificações quanto ao grau de proteção do equipamento, conforme detalhado na Tabela da Figura 4.

**Figura 4. Tabela IP - Grau de Proteção dos Invólucros dos Materiais Elétricos**  
**Conforme a Norma IEC 60 529 e NBR IEC 60529**

1º algarismo proteção contra penetração de corpos sólidos			2º algarismo proteção contra penetração de líquidos		
IP	testes		IP	testes	
0		Sem proteção	0		Sem proteção
1		Corpos sólidos superiores a 50 mm (ex.: contatos involuntários da mão)	1		Quedas de gotas de água (condensação)
2		Corpos sólidos superiores a 12,5 mm (ex.: dedos da mão)	2		Quedas de água de até 15° de inclinação
3		Corpos sólidos superiores a 2,5 mm (ex.: chave de fenda, fios)	3		Chuva de até 60° de inclinação
4		Corpos sólidos superiores a 1 mm (ex.: ferramentas finas, pequenos fios)	4		Projeção de água de qualquer direção
5		Poeira e areia (sem depósito prejudicial)	5		Jato de água de qualquer direção (ex.: mangueira de bombeiro)
6		Totalmente protegido contra poeira	6		Projeção de água semelhante a vaga do mar
			7		Imersão
			8		Imersão prolongada sob pressão

Fonte: LEGRAND, 2012

### **2.1.2. Núcleo magnético**

O núcleo magnético tem a função de aumentar o fluxo magnético do campo gerado pelas bobinas. As bobinas são alojadas dentro das ranhuras do núcleo magnético. Estas estão na parede interna do núcleo, que tem a forma de um tambor, porém aberto em ambos os lados. O núcleo magnético, por sua vez, fica alojado dentro da carcaça e envolve o enrolamento trifásico. O núcleo magnético é mostrado na Figura 5.

**Figura 5. Núcleo Magnético do Estator**



Fonte: STEELCOI, 2013

### **2.1.3. Enrolamento**

Normalmente os condutores elétricos utilizados na produção dos enrolamentos são feitos de cobre. Os condutores ficam dentro das ranhuras do núcleo e apresentam tipicamente seção circular ou retangular. Esses condutores apresentam tipicamente a seção circular, padronizada, entre 2,5 mm a 3,0 mm e recomenda-se que a largura para condutores de seção retangular não ultrapasse 3,5 mm.

A seção reta total do condutor da espira depende da corrente de fase e da densidade de corrente.

Se a seção reta total do condutor é maior do que a seção reta do maior diâmetro de fio disponível, alguns condutores de diâmetro menor são conectados em paralelo e enrolados juntos. Na Figura 6 é mostrado o enrolamento de um estator. (BUSTAMANTE E SILVA, 2008).

**Figura 6. Enrolamento do Estator**



**Fonte: STEELCOI, 2013**

## **2.2. O Rotor**

Os motores elétricos podem ser organizados em vários grupos levando em conta diferentes características. Entre eles estão os motores assíncronos, síncronos, motores de passo, motores universais, servomotores dentre outros.

No grupo de motores de indução existem os do tipo rotor bobinado e o de rotor em gaiola, o qual será estudado.

Na Figura 7 é mostrado o conjunto do rotor, contendo a gaiola de esquilo, o eixo e os rolamentos.

**Figura 7. Conjunto do Rotor**



**Fonte: STEELCOI, 2013**

O rotor possui este nome pela semelhança física com uma gaiola de esquilo. O MIRG é o mais utilizado nas indústrias atualmente e alguns motivos disto são devido a sua simplicidade estrutural, por ter um nível de falha baixo e baixo custo se for comparado aos demais tipos.

Quando o estator é energizado, a corrente circula pelos enrolamentos, que estão dentro das ranhuras, que devido a sua geometria, induzem um grande campo magnético.

Devido à geometria que as bobinas são montadas no estator, defasadas de  $120^\circ$ , e por estarem cada uma delas alimentadas por uma fase que também são equidistantes de  $120^\circ$ , se comportam como ímãs fazendo com que o rotor tente seguir seu movimento.

A força que coloca o rotor em movimento é transferida do estator ao rotor através do espaçamento entre eles, também chamado de *gap*. Quando o estator é energizado, correntes são induzidas e as linhas do campo magnético girante cortam o rotor.

O rotor é fabricado por um material que é bom condutor de eletricidade, e estão em curto-circuito, a corrente no rotor vai aumentar de modo a tornar o rotor também um eletroímã. Desta forma ele tentará acompanhar o movimento do campo girante.



Os polos do rotor nunca irão girar na mesma velocidade que a do campo girante do estator, que é a velocidade síncrona. A diferença entre estas velocidades é chamada de escorregamento e é dada em porcentagem.

O escorregamento aumenta de acordo com o aumento da resistência proporcionada pela carga mecânica acoplada.

Um dos motivos de não conseguir se igualar as velocidades, é o fato de que no rotor existem conjugados resistentes, que irão dificultar o movimento do mesmo. (FITZGERALD, 2003).

Se os polos do rotor ficassem em fase aos do estator, as linhas de campo deste não mais cortariam o rotor, então não haveria correntes induzidas, não teria uma diferença de potencial, logo o motor pararia.

Em resumo, o rotor pode ser dividido em eixo, núcleo e barras condutoras.

### **2.2.1. Eixo**

O eixo é usualmente construído de aço-carbono e é realizado um tratamento térmico para que fique resistente aos esforços mecânicos que irão ocorrer a todo instante que houver carga conectado a ele. Nele é montado todo o resto do rotor e do sistema de ventilação.

A ponta do eixo possui diversas formas, usualmente possui geometria de forma a facilitar a instalação de acoplamentos para encaixe de redutores ou máquinas a serem acionadas.

### **2.2.2. Núcleo Magnético**

O núcleo do rotor, da mesma forma que o núcleo magnético do estator, é feito de material magnético, que é cortado em lâminas finas e prensadas em conjunto.

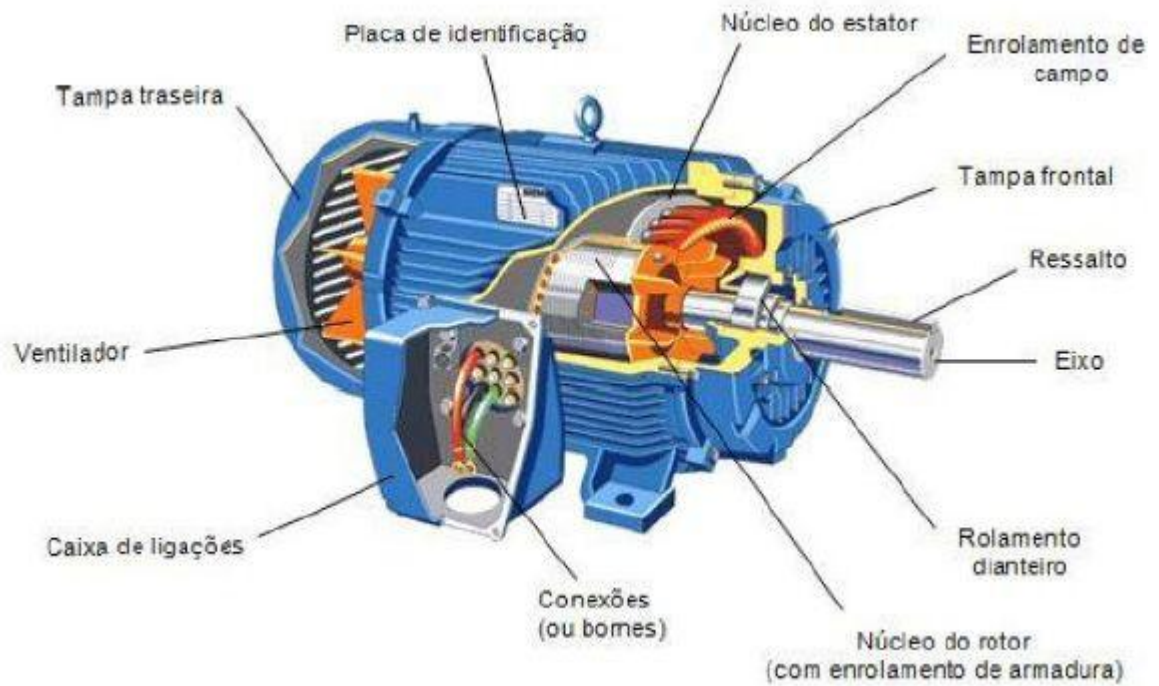
### **2.2.3. Barras Condutoras**

As barras são feitas através de um processo conhecido como injeção. O processo consta em fundir o material e derrama-lo dentro do núcleo magnético.

Desta forma é possível se conseguir grandes seções retas, para que seja capaz de suportar correntes de valores elevados.

A Figura 8 mostra um motor completo, citando cada componente.

**Figura 8. Motor Completo**



Fonte: SIEMENS, 2013

### 3. CÁLCULO DA POTÊNCIA DO MOTOR

Serão apresentadas teorias e fórmulas para cálculo de potência no eixo do motor, a partir de alguns parâmetros, definir a potência necessária para alimentação do mesmo. Serão explicadas também formas de análise e obtenção de dados necessários para cálculo da potência, como corrente elétrica, conjugado, tensão equivalente, número de polos, dentre outros dados.

Quando um motor é ligado à rede elétrica, seu estator é energizado e então uma corrente elétrica percorre seus enrolamentos. Desta forma gera correntes induzidas no rotor. A velocidade que o campo magnético gira pelo estator está diretamente ligada a quantidade de polos e frequência da rede, esta velocidade é chamada de velocidade síncrona. (FITZGERALD, 2003).

A fórmula abaixo mostra como são relacionadas as grandezas frequência, número de polos e velocidade síncrona. Para a velocidade síncrona:

$$n_s = \frac{f \times 120}{P}$$

Onde:

- $n_s$ : Velocidade síncrona, em RPM;
- $f$ : Frequência da corrente alternada da rede, em Hz;
- $P$ : Número de polos do motor.

A velocidade do rotor é dada pela relação do escorregamento e velocidade síncrona, da seguinte forma:

$$n = (1 - s) \times n_s$$

Onde:

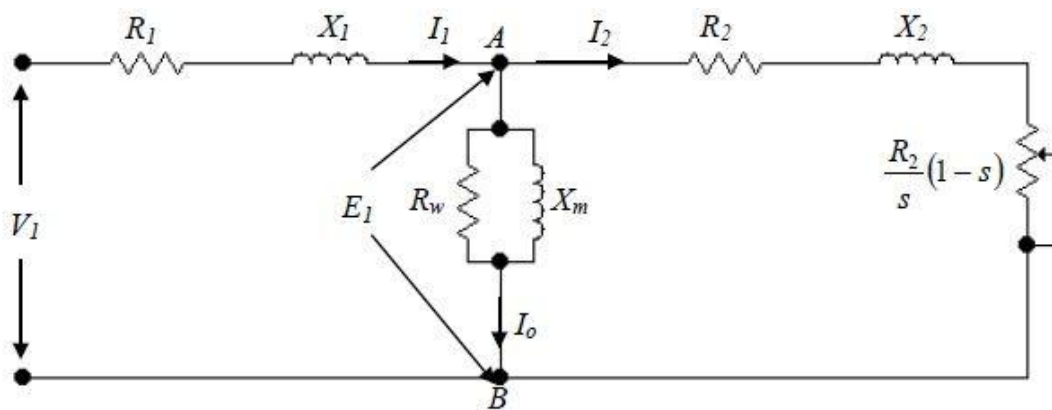
- $n$ : Velocidade nominal, dada em RPM;
- $s$ : Escorregamento, dado em porcentagem;
- $n_s$ : Velocidade síncrona, dada em RPM.

### 3.1. Circuito Elétrico

O MIRC pode ser representado por um circuito elétrico equivalente, conforme Figura 9.

Os valores para os parâmetros  $R_1$ ,  $X_1$  e  $I_1$  são referentes ao estator, os parâmetros  $R_2$ ,  $X_2$  e  $\frac{R_2}{s} \times (1-s)$  são referentes ao rotor e os parâmetros  $R_w$ ,  $X_m$  e  $I_0$  são devidos a indução magnética.

Figura 9. Circuito Equivalente do Motor de Indução



Fonte: BUSTAMANTE & SILVA, 1998

Onde:

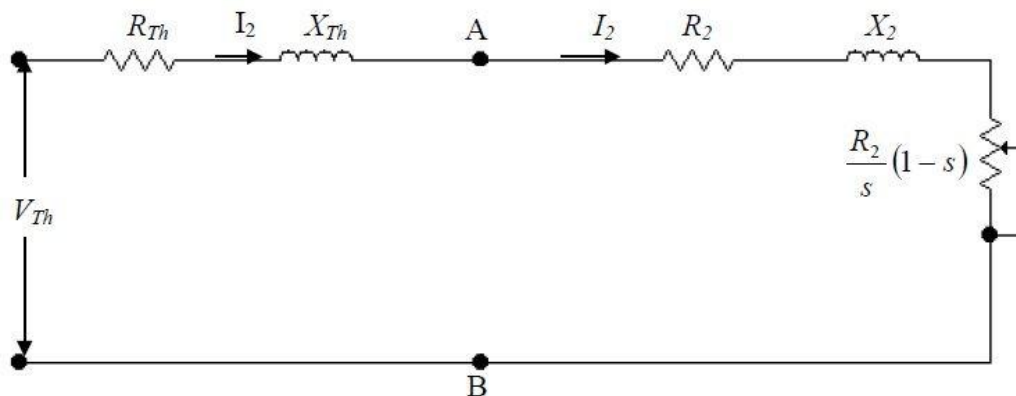
- $V_1$ : Tensão por fase aplicada a uma fase do enrolamento do estator;
- $E_1$ : Tensão induzida pelo fluxo girante em uma fase do enrolamento do estator, ambos em Volts.
- $I_1$ : Corrente do estator;
- $I_0$ : Corrente a vazio;
- $I_2$ : Corrente do rotor, referida ao estator, em Ampère.
- $R_1$ : Resistência ôhmica de uma fase do enrolamento do estator;
- $R_w$ : Resistência equivalente às perdas magnéticas do estator, para uma fase;
- $R_2$ : Resistência de uma fase do enrolamento do rotor, referida ao estator, estes valores em Ohm.

- $X_1$ : Reatância de dispersão de uma fase do enrolamento do estator;
- $X_m$ : Reatância de magnetização;
- $X_2$ : Reatância de dispersão de uma fase do rotor, referida ao estator, sendo estes valores em Henry.

### 3.1.1. Circuito equivalente de Thévenin

Uma das maneiras para calcular velocidade, torque, potência e outros dados de um motor elétrico através dos parâmetros elétricos, é através do circuito equivalente de Thévenin. A Figura 10 mostra o circuito equivalente.

Figura 10. Circuito Equivalente de Thévenin



Fonte: BUSTAMANTE & SILVA, 1998

O método consiste em substituir os circuitos referentes ao estator e da parte representativa da indução magnética do motor original pela impedância equivalente destas.

$$V_{th} = V_1 \times \left( \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right)$$

Onde:

- $V_{th}$  e  $V_1$ , tensão equivalente de Thévenin e Tensão vista pela carga, dados em Volts.
- $R_1$ , resistência do estator, em Ohm.

- $jX_1$  e  $jX_m$ , indutância do estator e indutância do entreferro, dados em Henry.

As seguintes premissas são admitidas na solução dos problemas a partir do circuito equivalente:

- As tensões e correntes presentes na operação do motor são consideradas senoidais.
- A distribuição espacial do campo magnético girante ao longo do entreferro do motor é considerada senoidal.
- As perdas magnéticas do rotor são desprezadas.
- Todas as resistências e reatâncias são consideradas constantes.
- O conjugado mecânico interno traz embutido o conjugado associado às perdas rotacionais a vazio. Para se ter o conjugado útil disponível no eixo do motor deve-se subtrair do conjugado mecânico interno, dado pelas equações de conjugado mecânico interno ( $C_{mi}$ ), o valor do conjugado associado às perdas rotacionais a vazio.

### 3.1.2. Potência eletromagnética e potência mecânica interna

A potência transferida do estator para o rotor, que é a potência eletromagnética é dada pela seguinte proporção.

$$P_{em} = \frac{F R_2}{s} I_2^2 = F R_2 I_2^2 + F R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2$$

Onde:

- $P_{em}$ , potência entregue do estator para o rotor, dado em kW.
- $F$ , número de fases do motor.
- $R_2$ , resistência do rotor, em Ohm.
- $s$ , escorregamento, em percentual.
- $I_2$ , corrente que circula no rotor, em Ampère.

Para se calcular o valor da potência disponível no eixo do motor, é necessário que seja feita a subtração da potência perdida no entreferro pela potência de entrada, ou seja, é dado pela potência interna subtraída da potencia perdida devido ao escorregamento. Como é mostrado na equação a seguir.

$$P_{mi} = P_{em}(1 - s)$$

Onde:

- $P_{mi}$ , potência mecânica interna, em kW.
- $P_{em}$ , potência eletromagnética, em kW.
- $s$ , escorregamento, em percentual.

### 3.2. Conjugado Mecânico

Conjugado é a medida do esforço necessário para se girar um eixo. É muito comum ser confundido com força, que é na verdade um dos componentes do conjugado, também pode ser chamado de torque ou momento. O conjugado é o produto da distância e da força. (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)

O enrolamento do rotor do motor é distribuído por todo o seu perímetro. Cada condutor cortado por uma corrente, que está sujeito a uma força de repulsão do campo magnético. (MARTIGNONI, 1995)

Todas as forças são aplicadas na borda do eixo e em direção tangencial.

$$C = F \times d$$

Onde:

- $C$ , conjugado, em quilograma força vezes metro ou simplesmente Newton.
- $F$ , força, em quilograma força.
- $d$ , distância do eixo que a força está sendo aplicada, em metros.

O conjugado mecânico interno é dado pela seguinte expressão:

$$C_{mi} = \frac{F R_2}{s w_s} \times \frac{V_{Th}^2}{\left(R_{Th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{Th} + X_2)^2}$$

Onde:

- $C_{mi}$ , conjugado mecânico interno, dado em Nm.
- $F$ , número de fases do motor.
- $R_2$ , resistência do rotor, em Ohm.
- $s$ , escorregamento, em percentual.
- $I_2$ , corrente que circula no rotor, em Ampère.
- $w_s$ , velocidade síncrona do campo girante, em rad/s.
- $V_{Th}$ , tensão de Thévenin, em Volts.
- $R_{Th}$ , resistência de Thévenin, em Ohm.
- $X_{Th}$ , indutância de Thévenin, em Henry
- $X_2$ , indutância do rotor, em Henry.

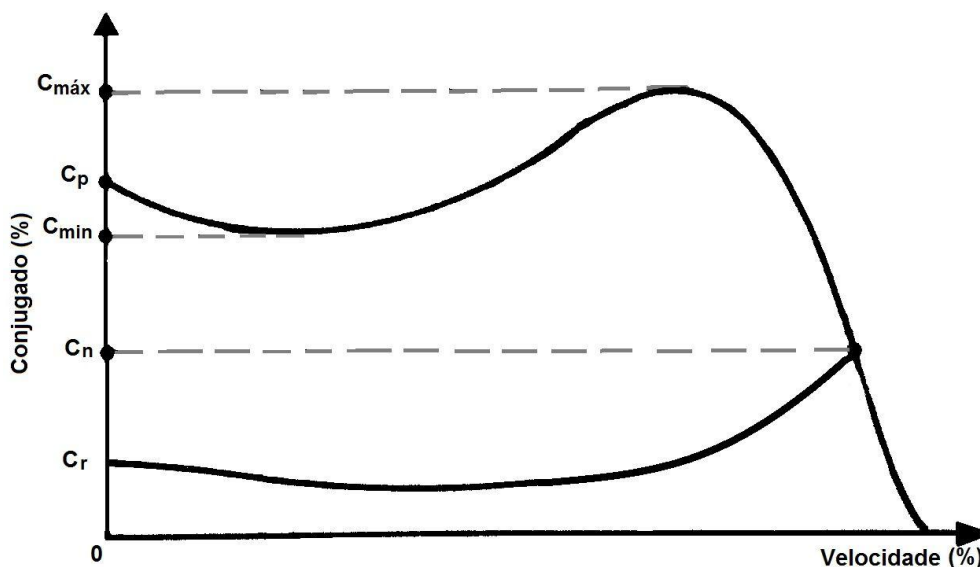
### 3.2.1. Tipos de conjugado

Para que seja possível realizar a escolha ideal de motores, é necessário que sejam conhecidos vários parâmetros, dentre eles informações sobre alguns tipos de conjugados.

Na Figura 11 é mostrado um gráfico especificando os pontos onde ocorre cada tipo de conjugado.



**Figura 11. Curva Característica de Velocidade Versus Conjugado**



Fonte: Autor, 2013

### **3.2.1.1 Conjugado nominal**

O conjugado nominal, também chamado de conjugado de plena carga é representado por  **$C_n$** , e é o conjugado desenvolvido quando são aplicadas tensão, corrente, frequência e velocidade nominais e fornecendo potencia nominal em seu eixo. São estes os valores que os fabricantes de motores informam em tabelas e catálogos.

### **3.2.1.2 Conjugado de partida**

O conjugado de partida, também chamado conjugado com rotor bloqueado, é representado por  **$C_p$** , é o conjugado do motor no momento que é ligado a rede elétrica com tensão e frequência nominais, com o rotor parado. O valor deste conjugado pode ser calculado se adotarmos o valor do escorregamento,  **$s$** , igual a 1 na última equação exposta.

Normalmente, o valor do conjugado de partida para motores de alta potência e maior número de pólos, é inferior a duas vezes o conjugado nominal. Nos motores de pequena e média potência, esse valor costuma de duas a três vezes o conjugado nominal.

### **3.2.1.3 Conjugado máximo**

O conjugado máximo ou conjugado crítico, representado por  **$C_m$** , é o valor de conjugado mais alto desenvolvido pelo motor e é um valor interessante a ser notado por ser o ponto de divisão da curva característica entre a região estável, que está a direita deste ponto e a região instável, que está a esquerda do conjugado máximo.

Se a carga solicitar do motor, mesmo que por um pequeno instante, um conjugado superior ao máximo, o motor não terá como suprir e então entrará em um processo de desaceleração até parar. Este ponto é utilizado para definir também o fator de sobrecarga mecânica do motor.

### **3.3.1.4 Conjugado mínimo**

Conjugado mínimo,  **$C_{min}$** , é o menor valor que o conjugado assume durante a aceleração, ocorre antes do conjugado máximo, representado na parte instável da curva característica.

Caso o conjugado mínimo seja menor que o conjugado resistente, no momento da aceleração o motor não conseguirá suprir a carga e então entrará em processo de desaceleração, até que pare.

## **3.3. Categorias dos Motores de Indução de Rotor em Gaiola**

A gaiola do rotor pode ser construída de algumas formas diferentes, de modo a proporcionar uma resistência rotórica maior ou menor, variando assim a curva característica de conjugado *versus* velocidade, que na prática, são os valores dos conjugados de partida, mínimo, máximo e nominal. Os motores de indução podem ser divididos nas categorias D, H e N.

Os motores de categoria D possuem uma resistência rotórica maior que os demais motores de mesma potência e número de pólos das outras categorias.

Os motores da categoria H são intermediários e por fim os da categoria N que desenvolvem um conjugado de partida mais baixo dentre os citados.

Os valores mínimos de conjugados que cada motor deve fornecer é estabelecido pela norma NBR-7094 por cada categoria. (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)

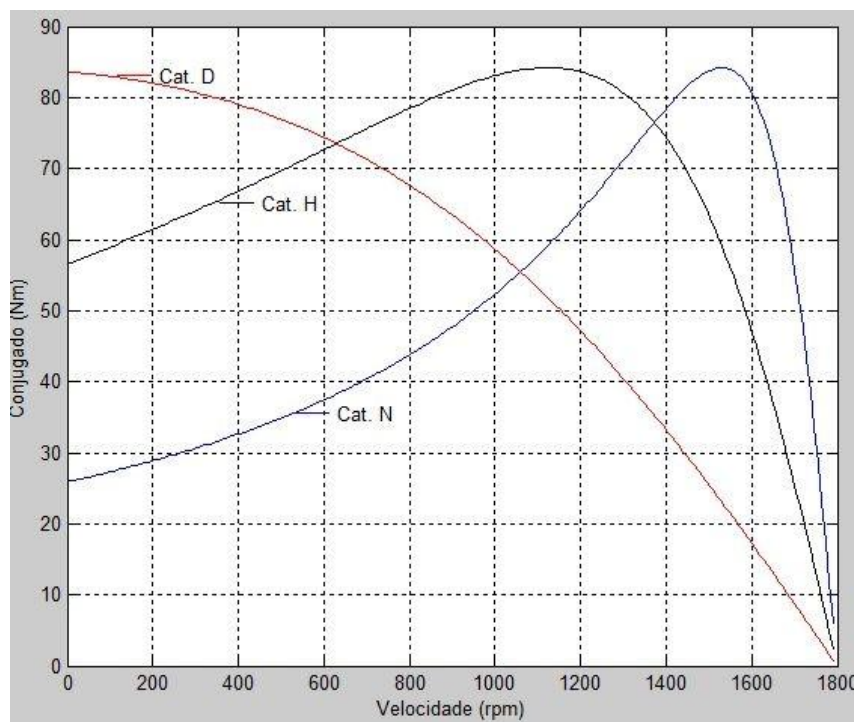
Desta forma, conhecendo as categorias dos motores de indução, possibilita que seja feita a especificação mais exata para cada tipo de carga.

Por exemplo: cargas como ventiladores, exaustores, bombas centrífugas, que normalmente tem um conjugado de partida mais baixo, podem utilizar os motores de categoria N.

Os de categoria D, para conjugados mais altos e em situações que o motor é ligado e desligado diversas vezes em um curto espaço de tempo. Os motores de categoria H são utilizado em situações intermediárias as citadas.

São mostradas na Figura 12, as curvas características de cada categoria.

**Figura 12. Curvas Típicas dos Motores de Categorias D, H E N.**



Fonte: Autor, 2013

### **3.3.1. Características de conjugado**

Nesse estudo, a categoria do motor servirá basicamente para que seja possível definir o valor do conjugado médio de um motor, representado por ***Cmm***, que poderá assumir diferentes valores de acordo com a categoria do motor. (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)

Para motores da categoria D, o conjugado motor médio será equivalente a 60% do valor do conjugado de partida do mesmo. Já para motores das categorias N e H, esse valor é de 45% da soma do conjugado de partida e conjugado máximo. E são matematicamente representados da seguinte forma:

$$\mathbf{Cmm = 0,6 \times Cp}$$

$$\mathbf{Cmm = 0,45 \times (Cp + Cm)}$$

## 4. CÁLCULO DE POTÊNCIA DA CARGA

Para que seja possível a definição do motor correto, é essencial que se conheça as características da carga. Informações como potência requerida, rendimento, conjugado e momento de inércia são alguns dos dados utilizados para se realizar os cálculos.

Assim como para o cálculo da potencia no eixo do motor, pode ser assumida a mesma equação para cálculo da potencia da máquina, que é normalmente chamada de potência requerida. A potência é o produto do conjugado pela velocidade, porém neste caso, o conjugado irá assumir valores diferentes para cada característica de máquina.

O conjugado resistente, que é o conjugado da carga, é basicamente a soma de duas partes, o conjugado de atrito,  $C_0$ , e o conjugado útil,  $C_u$ . O conjugado de atrito, é devido ao contato entre as partes móveis e as fixas no eixo do motor, o conjugado útil é o que a carga utiliza para funcionamento. (GILIO, 2003)

Para cálculo do conjugado resistente, é utilizada a seguinte equação:

$$C_r = C_0 + K_r \times w^x$$

Onde:

- $C_r$ : Conjugado resistente da máquina, dado em Nm;
- $C_0$ : Conjugado de atrito da máquina, em Nm;
- $K_r$ : É uma constante que irá variar de acordo com cada tipo de máquina;
- $w^x$ : Velocidade nominal da máquina em radianos por segundo, elevado a um expoente x.

#### 4.1. Características Mecânicas

Este valor de “x” será considerado -1, 0, 1 ou 2, dependendo das características da máquina. Estes valores foram adquiridos empiricamente e arredondados para facilidade nos cálculos.

##### 4.1.1. Característica hiperbólica com a velocidade

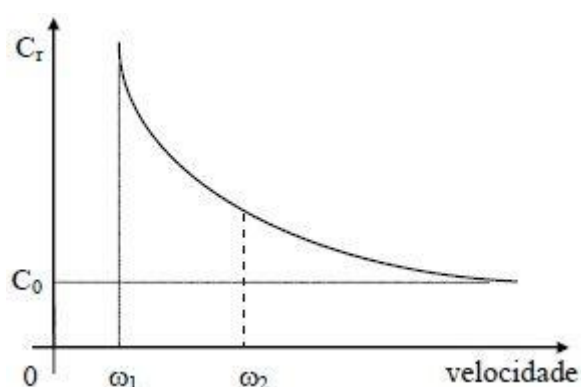
Neste tipo de característica, o valor de x é igualado a -1, para que seja possível representar a variação da queda do torque de acordo com o aumento da velocidade, que é característica deste tipo de máquina.

Bobinadeiras, serras de fita e serras de disco são alguns tipos de máquinas com este comportamento. Sabemos que é inatingível a velocidade ou conjugado infinito, a análise para este tipo de situação é limitada a uma faixa curta de velocidades.

A equação pode ser simplificada na seguinte expressão e o gráfico característico representado na Figura 13:

$$C_{rm} = \frac{K_r}{w_2 - w_1} \times \ln \frac{w_2}{w_1}$$

Figura 13. Curva Característica Decrescente



Fonte: Autor, 2013

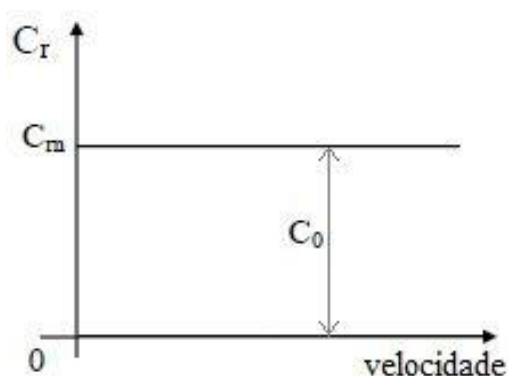
##### 4.1.2. Característica constante com a velocidade

O conjugado desenvolvido é constante com a velocidade. Este será alterado de acordo com a alteração do conjugado de atrito da máquina durante a operação.

Para representação matemática, o valor de  $x$  deve ser substituído por 0. Igualando ao próprio conjugado nominal. Figura 14

$$C_{rm} = C_n$$

**Figura 14. Curva Característica Constante**



Fonte: Autor, 2013

Sistema de elevação dos guindastes, pontes rolantes, talhas, gruas e correias transportadoras são exemplos de cargas que se comportam desta forma.

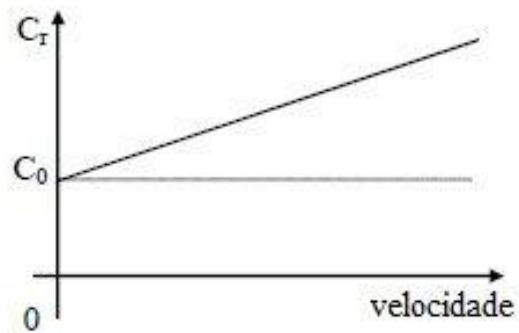
#### **4.1.3. Característica linear crescente com a velocidade**

Para este caso, o valor de  $x$  deve ser adotado como 1, formando a equação representativa como:

$$C_{rm} = \frac{C_0 + C_{rn}}{2}$$

O conjugado médio varia linearmente com a velocidade de rotação no eixo. Moinhos de rolos, máquinas de conformar chapas de aço e plainas são máquinas que se enquadram nesta característica. A curva é mostrada na Figura 15.

**Figura 15. Curva Característica Crescente**



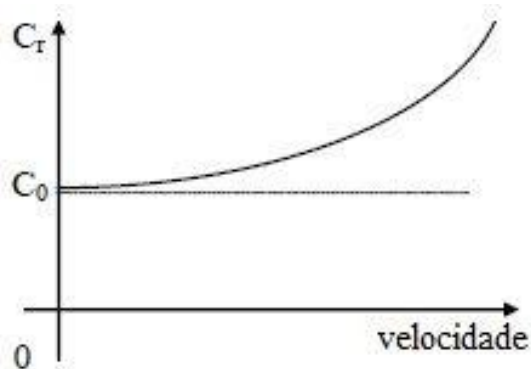
Fonte: Autor, 2013

#### **4.1.4. Característica parabólica com a velocidade**

Neste caso, considerando o valor de  $x$  igual a 2, são representadas as máquinas com característica parabólica, como os exaustores, sopradores, bombas centrífugas e compressores, onde o conjugado aumenta quadraticamente com o aumento da velocidade. A equação se iguala a equação a seguir e conforme mostrado na Figura 16.

$$C_{rm} = C_0 + \frac{C_{rm} - C_0}{3}$$

**Figura 16. Curva Característica Parabólica**



Fonte: Autor, 2013



## 4.2. Momento de Inércia

O momento de inércia, da forma mais simples, pode ser definido como a dificuldade de alterar o estado de movimento de um corpo girante. Este será mais um fator que entrará como resistência, dificultando o motor de girar a carga.

A energia cinética da massa girante é definida da seguinte forma:

$$E_c = \frac{J \times w^2}{2}$$

Para cálculo do momento de inércia, será levado em conta o momento de inércia total, que é do sistema como um todo, que será a soma dos momentos de inércia da carga, acoplamentos e motor. Esse dado é fornecido nos catálogos dos equipamentos.

O momento de inércia da carga deverá ser referenciado ao eixo do motor. A equação se resume a:

$$J_T = 1,2 \times J_m + J_1 \left( \frac{w_{maq}}{w_{motor}} \right)^2$$

Onde:

- $J_T$ : momento de inércia total, dado em kgm<sup>2</sup>;
- $J_m$ : momento de inércia do motor, também em kgm<sup>2</sup>;
- $J_1$ : momento de inércia da máquina, em kgm<sup>2</sup>;
- $w_{maq}$ : velocidade angular da máquina, em radianos por segundo;
- $w_{motor}$ : velocidade angular do motor, em radianos por segundo.

A constante **1,2** é devido a um acréscimo de 20% no valor do conjugado do motor, que é atribuído ao acoplamento, quando utilizado.

Quando a carga envolver um tambor ao qual se enrola um cabo para içamento ou algo semelhante, deverá ser somado ao momento de inércia total, o momento de inércia devido a este tambor, dado por:

$$J_{tambor} = m \left( \frac{v}{w} \right)^2$$

Onde:

- $J_{tambor}$ : momento de inércia do tambor, em kgm<sup>2</sup>;
- $m$ : massa do tambor, dado em kg;
- $v$ : velocidade que a carga está sendo içada, em metros por segundo;
- $w$ : velocidade angular, em radianos por segundo.

Resultando na seguinte equação:

$$J_T = 1,2 \times J_m + J_1 \left( \frac{w_{maq}}{w_{motor}} \right)^2 + m \left( \frac{v}{w} \right)^2$$

### 4.3. Conjugado Resistente Referido

A máquina, muitas vezes, gira em uma velocidade diferente a do motor, portanto, desenvolve um conjugado diferente. Este então deve ser referenciado ao eixo do motor respeitando a relação de redutor ou multiplicador.

Este conjugado resistente referido pode ser dado por:

$$C_{r.ref.} = C_r \times \frac{1}{\eta} \times \frac{w_1}{w}$$

Onde:

- $C_{r.ref.}$ : Conjugado resistente referido ao motor, em Newton x metro;
- $C_r$ : Conjugado resistente nominal, em Newton multiplicado por metro;
- $\eta$ : rendimento da transmissão, dado em percentual;
- $w_1$ : velocidade angular da máquina, radianos por segundo;
- $w$ : velocidade angular do motor, radianos por segundo.

## 5. ACELERAÇÃO E FRENAGEM DO MIRC

Para que seja escolhido corretamente o motor para uma determinada carga, além dos vários itens já citados, o tempo de aceleração ( $t_a$ ) é essencial para esta escolha, pois se o motor não conseguir colocar a máquina acoplada em uma velocidade que esteja na área de estabilidade antes de um determinado, poderão ocorrer avarias nos enrolamentos devido a alta temperatura gerada no momento da aceleração e partida.

### 5.1. Tempo de Aceleração

O tempo de aceleração deverá ser menor que o chamado tempo de rotor bloqueado,  $t_b$ , que normalmente é um dado de catálogo.

O tempo de aceleração é dado pela seguinte fórmula:

$$t_a = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{C_{am}}$$

Onde:

- $t_a$ , tempo gasto para acelerar o motor, em segundos;
- $J$ , momento de inércia equivalente de todo o conjunto, em  $\text{kgm}^2$ ;
- $\omega_1$ , velocidade inicial, normalmente considera-se igual a zero, indicando que o motor está partindo do repouso, em radianos por segundo;
- $\omega_2$ , velocidade a qual se deseja atingir, comumente a velocidade nominal, em radianos por segundo;
- $C_{am}$ , Conjugado de aceleração médio equivalente, em Newton multiplicado por metro.

O valor do conjugado de aceleração médio pode ser calculado, de forma simplificada, através da diferença entre o conjugado resistente médio referido ao motor e conjugado médio motor.

$$C_{am} = C_{mm} - C_{rm.ref}$$

Os quais foram citados no item 3.3.1 e ao longo do Capítulo 4.

## 5.2. Tempo de Frenagem

A definição do tempo de frenagem é bem similar ao tempo de aceleração, porém não é considerado o conjugado motor médio, uma vez que é assumimos que o acionador foi desligado da rede elétrica, restando assim, somente o conjugado resistente referido ao mesmo. Esta é a forma de desaceleração natural.

Para o cálculo do tempo de desaceleração com a utilização de um freio, basta que seja somado ao conjugado resistente o valor do conjugado frenante.

## 6. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E ALTITUDE AMBIENTE NO MOTOR

A vida útil de um motor finaliza quando ocorre algum rompimento de isolamento no enrolamento. É possível recuperar através do rebobinamento, porém o custo se aproxima da metade do valor de um motor novo, tornando isto inviável.

Para que o motor tenha uma vida útil prolongada, é importante conhecer os parâmetros que influenciam neste ponto.

### 6.1. Classe de Isolamento Térmico

Ao realizar a especificação de um motor elétrico de indução, deve-se observar também se o motor possui capacidade de suportar sobrecarga mecânica em seu eixo ao menos por um curto período e também se a temperatura do enrolamento do estator não excederá a temperatura máxima permitida para a classe de isolamento daquele motor específico.

Em relação à sobrecarga mecânica, deve ser verificado e garantido que o valor do conjugado máximo do motor seja maior que o conjugado resistente nominal.

Desta forma é possível definir o *Fator de Sobrecarga Momentânea*, representado pela letra  $\lambda$ , que possui a seguinte relação.

$$\lambda = \frac{C_m}{C_n}$$

Sendo o conjugado máximo maior que o valor do conjugado resistente nominal, o valor de  $\lambda$  indica o quanto a potência requerida poderá aumentar durante um curto intervalo de tempo, sem prejudicar o isolamento térmico do motor.

A temperatura do ponto mais quente do motor não deve ser maior do que o da classe de isolamento térmico.

A Figura 17 mostra a tabela com as classes de isolamento e com as respectivas temperaturas.

Figura 17. Tabela Classe de Isolamento Térmico

CLASSE	TEMPERATURA (°C) SITUAÇÃO A	TEMPERATURA (°C) SITUAÇÃO B
A	105	200
E	120	215
B	130	225
F	155	250
H	180	275

Fonte: WEG, 2013

Os valores representados na situação “A” mostram a temperatura máxima para os casos de elevação de temperatura que ocorrem em regime contínuo, ou seja, para um período prolongado de tempo. Já os valores da situação “B”, são permissíveis em outros regimes de funcionamento, onde os motores poderão sofrer sobrecargas térmicas mais intensas, porém devem ser apenas momentâneas.

## 6.2. Cálculo da Temperatura no Enrolamento

Uma das formas para cálculo da temperatura do enrolamento é realizado através da obtenção de valores da resistência do enrolamento em sua temperatura ambiente e dessa mesma resistência quando o motor estiver em operação. Os valores são relacionados como mostrado na equação a seguir.

$$t_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + t_1) + t_1$$

Onde:

- $t_2$ , temperatura do enrolamento, em °C;
- $R_2$ , resistência do enrolamento no final da medição, quando o motor já estiver em operação após cinco constantes de tempo de aquecimento quando a temperatura estiver igual a  $t_2$ , dado em Ohm;
- $R_1$ , resistência do enrolamento antes do início do teste, em Ohm;
- $t_1$ , temperatura no início do teste, que provavelmente será a temperatura ambiente.

O valor de  $t_2$  é o valor médio da temperatura de uma fase do enrolamento e não de um ponto específico, então através de medições, foram tabelados valores prováveis do ponto mais quente do enrolamento, baseando-se em uma temperatura ambiente padrão, e a elevação permitida para cada classe.

A Figura 18 mostra os valores das temperaturas de referência, elevação de temperatura, constante aditiva do ponto mais quente em relação ao valor médio e a temperatura da classe de isolamento.

**Figura 18. Composição das Temperaturas das Classes de Isolamento Térmico**

CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO	CLASSE A	CLASSE E	CLASSE B	CLASSE F	CLASSE H
TEMPERATURA DE REFERÊNCIA °C	40	40	40	40	40
ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA °C	60	75	80	105	125
CONSTANTE K °C	5	5	10	10	15
CLASSE DE ISOLAMENTO °C	105	120	130	155	180

**Fonte: (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)**

Durante a operação do motor é gerado um calor, que é dissipado pela carcaça para o meio, esse calor é devido às perdas referentes à transformação da energia elétrica em energia mecânica.

Há algumas relações entre as perdas no motor em relação à temperatura e em relação o calor gerado pelas perdas, como é mostrado na equação a seguir.

$$\frac{\theta}{\theta_m} = \frac{Q}{Q_n} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}$$

Onde:

- $\theta$ : Elevação de temperatura, em graus Celsius;
- $\theta_m$ : Temperatura máxima da classe, em graus Celsius;
- $Q$ : Quantidade de calor gerado, em Watts ou Joules/segundo;

- $Q_n$ : Quantidade de calor gerado em condições nominais, em Watts ou Joules/segundo;
- $\Delta P$ : Perdas no núcleo, em Watts ou em percentual;
- $\Delta P_n$ : Perdas no núcleo em condição nominal, em Watts ou em percentual.

Para altitudes superiores a 1000 metros, a rarefação do ar começa a fazer um efeito relevante, dificultando a troca de calor com o meio ambiente.

Na Figura 19 é mostrada a temperatura ambiente máxima para cada classe de isolamento, demonstrando assim a temperatura limite do local da instalação para que o motor não seja sobrecarregado termicamente, mesmo em condições nominais.

**Figura 19. Tabela de Altitudes Versus Temperatura**

Altitude (m)	TEMPERATURA °C				
	CLASSIFICAÇÃO TÉRMICA				
	A	E	B	F	H
2000	34	33	32	30	28
3000	28	26	24	19	15
4000	22	19	16	9	3

Fonte: (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)

A Figura 20 mostra os valores dos fatores de correção da potência em função da temperatura e da altitude, esse fator também é representado pela letra  $\delta$ .

**Figura 20. Tabela de Fator e Correção da Potência Útil**

TEMPERATURA °C	ALTITUDE (m)						
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10							1,05
15						1,05	0,99
20					1,05	0,99	0,93
25				1,05	0,98	0,93	0,88
30			1,04	0,97	0,92	0,87	0,82
35		1,02	0,95	0,91	0,86	0,81	0,77
40	1	0,94	0,89	0,85	0,8	0,76	0,72
45	0,92	0,87	0,83	0,78	0,74	0,7	0,67
50	0,85	0,8	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62
55	0,77	0,74	0,7	0,66	0,63	0,6	0,57
60	0,71	0,67	0,64	0,6	0,57	0,55	0,52

Fonte: (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)



### **6.3. Fator de Serviço**

Fator de serviço é uma característica que pode ou não existir em um motor, e está relacionado com a eficiência com que este troca calor com o meio ambiente. O fator de serviço pode ser visto como uma reserva de potência para que seja utilizada continuamente em situações que o demandem. Esta parcela a mais é referente a sobrecarga térmica, e não irá prejudicar o isolamento do enrolamento.

### **6.4. Regimes de Serviço**

Regime de serviço é a característica de funcionamento dos motores no que diz respeito o tempo de operação e o tempo de repouso. O mais comum são os motores que trabalham em regime contínuo, chamado regime S1, que é característico das bombas centrífugas e dos ventiladores industriais, por exemplo, que uma vez ligados, permanecem o dia inteiro ligados, que é uma carga constante durante todo o tempo.

Motores de regime S2 são aqueles que operam por um período relativamente curto e permanecem um longo período em repouso, chegando a temperatura ambiente novamente. Como exemplo pode ser citado motores de portões residenciais.

Motores de regime S3 são caracterizados por regimes de trabalho idênticos e intermitentes como carga constante;

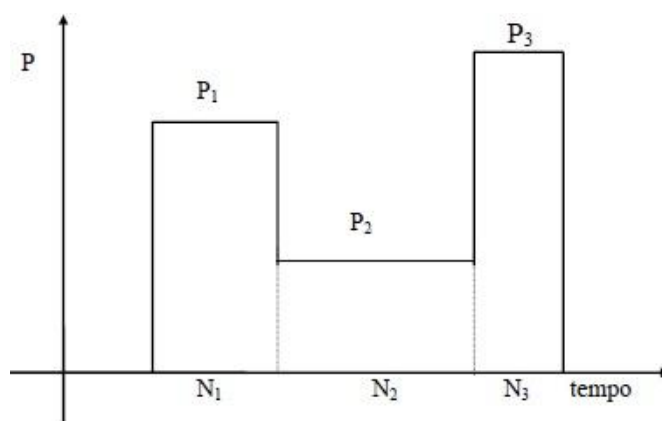
Existem padronizados ainda os regimes S4, S5, S6, S7, S8, variando a relação entre o tempo de operação e tempo de repouso, carga constante ou variável, número de partidas por hora, etc.

Com exceção do motor de regime S1, estes são motores fabricados sob encomenda, o que faz com que o custo seja um pouco mais alto. Portanto será abordado um método para especificação de motores de regime S1 que operem em situações características de outros regimes, devido a vantagem destes motores serem seriados, os chamados motores de prateleira, podendo ser encontrados para compra com certa facilidade.

### 6.5. Potência Equivalente

Para o cálculo da potência equivalente de um ciclo de funcionamento, será apresentado na Figura 21 um exemplo genérico de um ciclo S2, quando se tem variação da potência sem intervalo entre as variações e após isto, um período suficiente para que o motor atinja a temperatura ambiente.

**Figura 21. Gráfico do Motor em Regime S2**



Fonte: (BUSTAMANTE & SILVA, 1998)

O cálculo da potência equivalente é feito através da seguinte equação:

$$P_{eq.} = \sqrt{\frac{P_1^2 \times N_1 + P_2^2 \times N_2 + P_3^2 \times N_3}{N_1 + N_2 + N_3}}$$

Onde:

- **$P_n$** : Potência em cada trecho específico, em Watts;
- **$N_n$** : Tempo de duração de cada intervalo de potência, em minutos.

Após realizado o cálculo da potência requerida, deve-se certificar que o valor da potência nominal multiplicado pelo coeficiente  $\lambda$  seja maior que a maior potência requerida.

$$P_m < \lambda \times P_n$$

O fator de sobrecarga térmica do motor é representado por  $P_T$ , que é a relação entre o calor produzido em condições nominais em regime S2 e regime S1; e o fator de sobrecarga mecânica, que é definido como a relação entre a máxima potência que o motor pode fornecer em um regime de trabalho diferente de S1, denominada potência admissível, e a sua potência nominal definida para o regime contínuo S1.

Abaixo estão as equações de sobrecarga térmica e mecânica.

$$P_T = \frac{\Delta P}{\Delta P_{nom}} = \frac{\alpha + P_M^2}{\alpha + 1}$$

$$P_M = \frac{P}{P_{nom}}$$

Onde  $\alpha$  representa a relação entre as perdas rotacionais a vazio e as perdas elétricas na condição nominal de operação do motor em regime S1.

Na análise final devem ser verificados e certificado se o valor de lambda ( $\lambda$ ) é maior que o valor da potência máxima mais 20%, em p.u e deverá ser realizado o ajuste da potência equivalente através do fator de correção, onde potência do motor deverá ser pelo menos a razão entre a potência equivalente e  $\delta$ . (FISP, 2002)

## 7. RESULTADOS ESPERADOS

Após a explicação de como são realizados os cálculos de potência requerida em motores de indução com rotor em gaiola, será explicado o objetivo final do projeto.

As equações, de forma geral, foram explicitadas de um modo que fique mais fácil a compreensão e também para que seja mais simples e rápido o processamento computacional, ainda com esta preocupação, foram abordados tópicos para que não seja complicada a abordagem sobre bancos de dados, definições de tabelas, definições de parâmetros chave, modelagem de dados, linguagem de programação e demais particularidades.

### 7.1. Banco de Dados

O agrupamento de informações que se relacionam de forma que façam sentido é a definição de um banco de dados. Para este projeto, será utilizado o conceito de banco de dados relacional, que deverá gerir os seus dados usando apenas suas capacidades relacionais, onde toda informação deve ser representada de uma única forma, como dados em uma tabela. (CORONEL & PETER, 2011)

O banco de dados é constituído por tabelas, que por sua vez são constituídas por campos, que é onde cada informação é armazenada. Todo o dado pode ser acessado logicamente de forma geral ou selecionando dados por características específicas, que são os critérios de pesquisa.

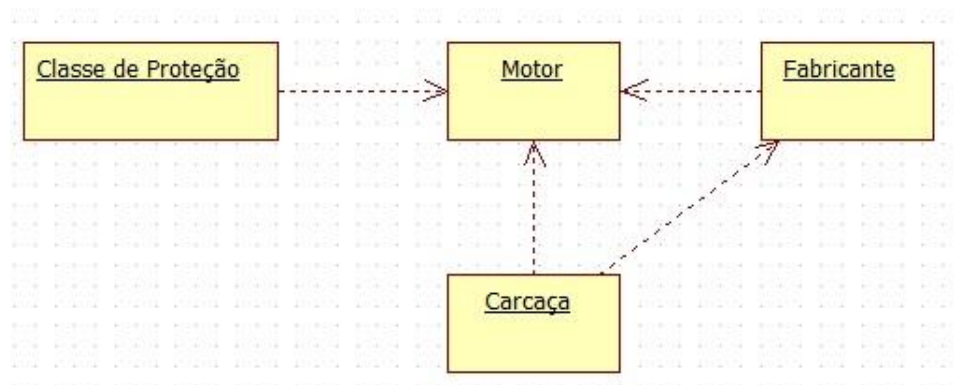
Para realização deste projeto será utilizado o Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) MySQL que utiliza a linguagem SQL (Linguagem de Consulta Estruturada), é um programa gratuito, muito bem documentado, muito estável e com ótimo desempenho e baixo consumo de recursos computacionais.

Para uma melhor organização do banco de dados é comum utilizar os conceitos de UML, que é a Linguagem de Modelagem Unificada, que adota práticas e regras para otimizar e estruturar quaisquer processos. (ULLMAN ET AL. 2001)

A Figura 22 mostra uma visão macro das tabelas e seus relacionamentos, porém, passível de alterações, pois com o andamento do projeto, pode ocorrer

alguma situação onde seja necessário alterar um relacionamento ou criar novos ou mesmo que passe a ser mais interessante a exclusão de alguma parte que se tornou desnecessária.

**Figura 22. Diagrama do Banco de Dados**



**Fonte: Autor, 2013**

O diagrama está representando uma tabela principal e três tabelas auxiliares.

A tabela principal, denominada 'Motor', é a tabela onde irão conter informações exclusivamente do motor; informações como potência, corrente nominal, corrente de partida, tempo de rotor bloqueado, conjugado máximo, conjugado de partida, etc.

A tabela 'Classe de Proteção' é onde ficarão armazenadas as informações sobre as classes de proteção, desta forma, no momento de realizar o cadastro de um motor na tabela principal basta informar o código da classe de proteção.

Na tabela 'Fabricante' será possível armazenar dados como nome do fabricante e possíveis informações de contatos para manutenção.

A tabela 'Carcaça' irá conter dados como modelo da carcaça, o fabricante, tipo de ventilação, se há suporte ou não, etc.

Uma das vantagens de se ter tabelas exclusivas para armazenar esses tipos de informações é a de se ter garantia que não haverá cadastramentos como, por exemplo 'WEG' e 'W.E. G', fazendo com que em casos de pesquisas por nome de fabricantes retorne um resultado equivocado.

Para garantir que na tabela de motores serão utilizados dados válidos será utilizado um recurso muito comum nos bancos de dados relacionais, que é a chave estrangeira. Este recurso tem a função de checar e garantir que apenas dados previamente gravados em uma tabela poderão compor outra tabela, compondo assim um registro válido.

Para garantir a unicidade dos registros, evitando que exista mais de um registro de motor de dois polos de 5 kW para o mesmo fabricante e com a mesma carcaça por exemplo; ou seja, um provável problema de duplicidade de registro, será utilizado um outro recurso, a chave primária, que é obrigatório em pelo menos um dos campos de cada tabela.

#### ***7.1.1. Linguagem de programação***

A linguagem de programação é forma que o programador tem de passar informações para que o computador processe. Um programa é uma sequência de comandos que o computador deverá seguir, levando em conta os dados processados, selecionados, gerados, informados pelo usuário ou proveniente de qualquer outra fonte.

Para esse projeto será utilizada a linguagem de programação Pascal, que pode ser desenvolvida em um famoso compilador chamado Delphi, porém neste caso será utilizada a ferramenta Lazarus; que é extremamente parecida com o Delphi e é gratuita.

#### ***7.1.2. Esboço da tela***

O funcionamento do programa ocorrerá basicamente da seguinte forma:

O usuário irá selecionar se deseja informar um motor, tipo de acoplamento e uma carga já existente no banco de dados ou se ele mesmo irá preencher os parâmetros. Este primeiro passo é mostrado na Figura 23, na seção 1;

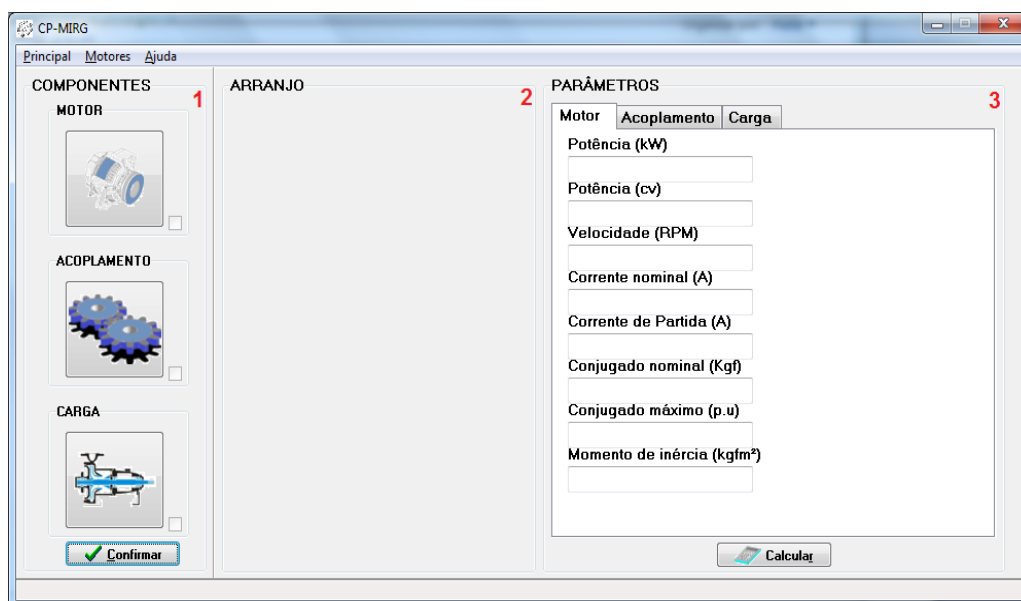
Depois de realizadas estas escolhas, o usuário deverá pressionar o botão “Confirmar”. Neste momento o programa irá realizar a consistência das informações fornecidas;

Caso esteja tudo correto, será montado um diagrama de ligação dos componentes, mostrado na seção 2 da Figura 23;

Em seguida, na seção 3 da mesma figura é mostrado o local onde o usuário irá entrar com os dados do motor, ou onde irão aparecer tais informações, dependendo da escolha realizada anteriormente;

Após este processo, deverá clicar no botão "Calcular". Neste momento o programa irá realizar os cálculos para especificação de motor para a carga escolhida ou realizar o cálculo do acoplamento, caso tenha, traçar um gráfico típico de conjugado *versus* velocidade.

**Figura 23. Tela do Programa**



**Fonte: Autor, 2013**





## 9. CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento do programa computacional foi abordada a teoria de máquinas elétricas, focando a parte de motores elétricos de indução com rotor em gaiola, para que então pudesse fazer a associação dos parâmetros e referenciá-los ao *software* de uma forma mais objetiva.

Este tipo de motor foi escolhido como objeto principal da pesquisa devido ao fato de ser extremamente utilizado nas indústrias dos mais diversos segmentos.

O objetivo desse projeto é facilitar a escolha ou verificação de um motor para uma determinada carga.

Em um caso hipotético de um motor que esteja superdimensionado, foi possível notar uma economia significativa caso outro tivesse sido escolhido adequadamente, levando em consideração o custo do próprio motor, custos de redutores e custos com consumo de energia elétrica dentre outros fatores.

O trabalho se estendeu além do previsto, pois com seu desenvolvimento, alguns assuntos não levantados se mostraram extremamente relevantes e necessários para que pudesse ser realizado um cálculo mais preciso da potência requerida.

Durante o desenvolvimento, também houve a preocupação em se analisar as técnicas de arranjos de dados para realizar implementações que garantissem um melhor desempenho do banco de dados e do programa em si.

Isto foi possível, em alguns casos, apenas explicitando determinadas variáveis levando a um aperfeiçoamento do programa e relacionamento entre campos das diversas tabelas previstas.

## REFERÊNCIAS

BUSTAMANTE, Éderson; SILVA, Márcio J. **Apostila de Acionamentos Elétricos**, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1997.

CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery and Power Systems**, 1ª edição. McGraw Hill, 2002

CORONEL, Carlos; PETER, Robert. **Sistemas de Banco de Dados - Projeto, Implementação e Administração**. 8ª Edição. Norte-americana, 2011

FISP – Faculdades Integradas de São Paulo. **Acionamentos elétricos**. Disponível em: <http://www.engonline.fisp.br/3ano/acionamentoseletricosAcionamentos20029.pdf> . Acessado em: 19 de maio de 2013.

FITZGERALD, A.E; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Electric Machinery**, 6ª edição. McGraw Hill, 2003

GARCIA, Agenor Gomes Pinto. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2003.

GILIO, Aluisio Simone. **Máquinas de Indução Trifásicas**, 9ª edição. Érica, 2003

GUIMARÃES, Célio C. **Fundamentos de bancos de dados**. Unicamp, 2010

HARMAN, Paul; WATSON, Mark. **Understanding UML**. 1ª edição. Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1997

INFOESCOLA. **Momento de Inércia**. Disponível em: <http://www.infoescola.com/mecânica/momento-de-inercia>. Acessado em: 19 de maio de 2013.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de Corrente Alternada**, 6ª edição. Globo, 1995

MSPC. **MSPC - Eletromagnetismo**. Disponível em: [http://www.mspc.engbr/elemag/ac\\_0710.shtml](http://www.mspc.engbr/elemag/ac_0710.shtml). Acessado em: 19 de maio de 2013.

STEELCOIL. **Iron Loss Electrical Stator With High Magnetic Induction For Engine**. Disponível em: [http://portuguese.galvanized-steelcoil.com/china-low\\_iron\\_loss\\_electrical\\_stator\\_with\\_high\\_magnetic\\_induction\\_for\\_engine\\_motor-32938.html](http://portuguese.galvanized-steelcoil.com/china-low_iron_loss_electrical_stator_with_high_magnetic_induction_for_engine_motor-32938.html). Acessado em: 19 de maio de 2013 às 20:00h

ULLMAN, Jeffrey D; WIDOM, Jennifer. **Implementação de Sistemas de Bancos de Dados**. Campus, 2001

UNIVERSO ELÉTRICO. **Motores de Indução Trifásicos - Dados da Placa**. Disponível: <http://eletricidade-eletronica-telecom.blogspot.com.br/2012/08/motores-de-inducao-trifasicos-dados-da.html>. Acessado em: 19 de maio de 2013.

WEG. **Catálogo de Motores Elétricos**, WEG Equipamentos Elétricos S/A, Jaraguá do Sul, 2008.