



INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS - IFG  
COORDENAÇÃO DE INDÚSTRIA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

**DIEGO MORAES DE CARVALHO**

**Dimensionamento da potência mecânica de motores elétricos de indução trifásicos gaiola pelo critério do tempo de aceleração**

Jataí - GO

2013

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS  
COORDENAÇÃO DE INDÚSTRIA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

**DIEGO MORAES DE CARVALHO**

**Dimensionamento da potência mecânica de motores elétricos de  
indução trifásicos gaiola pelo critério do tempo de aceleração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
junto ao Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito  
parcial para obtenção do título superior de  
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Msc. Marcelo Semensato

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS  
COORDENAÇÃO DE INDÚSTRIA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

**DIEGO MORAES DE CARVALHO**

**Dimensionamento da potência mecânica de motores elétricos de indução trifásicos gaiola pelo critério do tempo de aceleração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial para obtenção do título superior de Engenheiro Eletricista.

---

Msc. Marcelo Semensato

**Orientador**

---

Dr. André Luiz Silva Pereira

**Coorientador**

---

Msc. Aline da Silva Magalhães

**Membro da Banca Examinadora**

---

Dr. Fernando Silva Pereira

**Membro da Banca Examinadora**

# **DEDICATÓRIAS**

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus por ter me dado a vida e todas as bênçãos que obtive até hoje, secundamente a toda minha família que sempre me apoiou em tudo aquilo em que tive fé e a todos os meus amigos que se sempre me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos professores Msc. Marcelo Semensato e Dr. André Luíz Silva Pereira por terem me orientado durante esse trabalho que fez com que eu adquirisse um grande conhecimento da área de motores elétricos, ao professor Dr. Luiz Henrique Alves Pazzini, professor da Mackenzie, que me respondeu várias dúvidas ao longo do trabalho sobre motores elétricos, a professora Patrícia Gomes de Souza Freitas por ter me auxiliado bastante na área de projetos elétricos sempre que precisei, a todos os outros professores do Instituto Federal de Goiás que foram meus professores e colaboraram para minha formação e a todos os meus colegas de sala que sempre me apoiaram e fizessem com que meu aprendizado fosse concretizado.

## RESUMO

Atualmente os motores elétricos de indução trifásicos com rotor gaiola tomam conta do meio industrial, o principal problema encontrado é o mal dimensionamento destes que causam inúmeros problemas, entre os principais, o desperdício de energia elétrica e a diminuição da vida útil. Dentre os vários métodos utilizados para dimensionar estes motores, este trabalho foca o dimensionamento pelo critério do tempo de aceleração. No primeiro momento são mostrados todos os tipos de conjugados, tanto da carga quanto do motor e seus respectivos conjugados médios. No segundo momento é feita uma análise do momento de inércia da carga, dos acoplamentos e do motor, e suas funções. No terceiro momento é feita a análise do tempo de aceleração e do tempo de rotor bloqueado, mostrando como eles devem ser usados e comparados. Por fim são mostrados três exemplos práticos bastante didáticos de utilização deste critério, deixando bem claro como este tipo de dimensionamento deve ser feito.

**Palavras-chave:** *Conjugado Resistente; Conjugado do Motor; Momento de Inércia; Tempo de Aceleração; Tempo de Rotor Bloqueado.*

# ABSTRACT

Currently the three-phase induction electric motors with cage rotor take over the industrial environment, the main problem is the sizing of these engines causing numerous problems between the main, wasting electricity and reduced life. Among the various methods used to scale these engines, this paper focuses on the design criteria for the acceleration time. At first there are shown all types of conjugates, either as the engine load and their conjugates mean. The second point is an analysis of the moment of inertia of the load, couplings and motor, and its functions. On the third time an analysis is made of the acceleration time and locked rotor time, showing how they should be used and compared. Finally three examples are shown quite didactic use of this criterion, making it clear how this type of design should be done.

**Keywords:** *Conjugate Resistant; Conjugate Engine; Inertia; Acceleration Time; Locked Rotor Time.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de captação de água em poços por manivela .....	18
Figura 2 – Conjugado resistente constante útil em relação à velocidade .....	23
Figura 3 – Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente constante útil .....	23
Figura 4 - Conjugado resistente linear útil em relação à velocidade.....	26
Figura 5 - Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente linear útil ..	26
Figura 6 - Conjugado resistente parabólico útil em relação à velocidade .....	27
Figura 7 - Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente parabólico útil.....	28
Figura 8 - Conjugado resistente hiperbólico útil em relação à velocidade.....	31
Figura 9 - Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente hiperbólico útil.....	32
Figura 10 – Exemplo de conjugado indefinido .....	32
Figura 11 – Região a ser integrada para obtenção do conjugado resistente médio .....	33
Figura 12 – Curva de conjugado do motor elétrico .....	38
Figura 13 – Maneira correta da escolha do motor em relação ao conjugado resistente .....	39
Figura 14 – Curvas Conjugado x Velocidade, das diferentes categorias de motores .....	40
Figura 15 – Momento de inércia de um cilindro em relação ao eixo Z. A direção +Z é para fora da página. ....	44
Figura 16 – Cilindro ou disco maciço .....	46
Figura 17 – Cilindro ou disco oco .....	47
Figura 18 – Barra fina em torno de uma linha perpendicular que passa pela sua extremidade	48
Figura 19 – Momento de inércia em velocidades diferentes .....	52
Figura 20 – Exemplo de talha.....	59
Figura 21 – Exemplo de esteira rolante .....	62
Figura 22 – Exemplo de tanque abastecido por bomba centrífuga.....	65

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil por níveis, de 2004 até 2011 .....	15
Tabela 2 - Momentos de inércia externos (J) para as potências normalizadas .....	50
Tabela 3 - Temperatura admissível para cada classe de isolamento . .....	56

# LISTA DE ABREVIATURAS

a	aceleração requerida para aceleração e desaceleração da carga [m/s <sup>2</sup> ]
A	área [m <sup>2</sup> ]
C	conjugado [Nm]
Ca	conjugado de aceleração [Nm]
Cmax	conjugado máximo [Nm]
Cmax'	conjugado máximo do motor com tensão diferente [Nm]
Cmin	conjugado mínimo [Nm]
Cmme	conjugado médio do motor [Nm]
d	
Cn	conjugado nominal ou de plena carga [Nm]
Co	conjugado da carga para rotação zero ou conjugado das perdas [Nm]
Cp	conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida [Nm]
Cp'	conjugado de partida com tensão diferente [Nm]
Cr	conjugado resistente da carga [Nm]
Crmed	conjugado resistente médio da carga [Nm]
Cu	conjugado útil [Nm]
cv	cavalo-vapor
D	distância [m]
dm	pequena parte dimensional [m]
F	força [N]
Fp	força peso [N]
g	aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
γ	peso específico [N/m <sup>3</sup> ]
h	altura do objeto [m]
J	momento de inércia [Kg.m <sup>2</sup> ]
Jc	momento de inércia da carga [rpm]
Jce	momento de inércia da carga referida ao eixo do motor [kgm <sup>2</sup> ]
Jci	momento de inércia do acoplamento i [Kg.m <sup>2</sup> ]

$J_m$	momento de inércia do motor [Kgm <sup>2</sup> ]
$J_t$	momento de inércia total [Kgm <sup>2</sup> ]
$K_c$	constante que depende da carga
$L$	comprimento da barra [m]
$m$	massa [Kg]
$n_1$	velocidade [m/s]
$n_2$	velocidade [rps]
$N_3$	velocidade do motor [rpm]
$N_c$	velocidade da carga [rpm]
$\eta_c$	rendimento da carga
$N_{ci}$	velocidade do acoplamento $i$ [rpm]
$\eta_r$	rendimento da transmissão
$\eta_t$	rendimento total
$p$	número de par de polos
$P'$	pressão [N/m <sup>2</sup> ]
$P''$	pressão total do ventilador [mmca]
$P_{dl}$	potência dinâmica [W]
$P_{est}$	potência estática [W]
$P_{mec}$	potência mecânica [W]
$P_n$	potência nominal do motor [KW]
$Q$	vazão [m <sup>3</sup> /s]
$r$	distância ao eixo ou raio [m]
$R$	raio do objeto [m]
$R_1$	raio superior do objeto [m]
$R_2$	raio inferior do objeto [m]
$Rel$	relação de transmissão
$r_i$	distância do eixo de rotação da partícula $i$ [m]
$S$	escorregamento [%]
$t$	tempo [s]
$TA$	temperatura ambiente [°C]
$t_a$	tempo de aceleração [s]
Total	temperatura do ponto mais quente [°C]
Trab	trabalho [J]

Trb	tempo de rotor bloqueado [s]
Trb'	tempo de rotor bloqueado com tensão diferente da nominal [s]
V	volume [m <sup>3</sup> ]
Vd	tensão diferente da nominal do motor [V]
Vn	tensão nominal do motor [V]
w	velocidade angular da carga [rad/s]
w1	velocidade angular 1 [rad/s]
w2	velocidade angular 2 [rad/s]
wn	rotação nominal do motor [rad/s]
ws	rotação síncrona do motor [rad/s]
x	parâmetro exponencial que depende da carga
$\alpha t$	diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média [°C]
$\Delta H$	diferença de altura ou altura manométrica [m]
$\Delta m_i$	massa da partícula i [Kg]
$\Delta P$	diferença de pressão [N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta T$	elevação de temperatura [°C]
$\Delta V_i$	pequeno volume ocupado pela parte i [m <sup>3</sup> ]
$\rho$	massa específica [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_i$	massa específica do material i [Kg/m <sup>3</sup> ]

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	16
<b>3. CONJUGADO</b> .....	18
3.1. DEFINIÇÃO DO CONJUGADO .....	18
3.2. RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA E CONJUGADO .....	19
3.3. CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA ( $C_r$ ) .....	21
3.3.1. CONJUGADO RESISTENTE CONSTANTE ( $X=0$ ).....	22
3.3.1.1. ENCONTRANDO CONJUGADO RESISTENTE CONSTANTE DE TALHAS (CASO ESPECÍFICO) .....	24
3.3.2. CONJUGADO RESISTENTE LINEAR ( $X=1$ ).....	25
3.3.3. CONJUGADO RESISTENTE PARABÓLICO ( $X=2$ ).....	27
3.3.3.1. ENCONTRANDO CONJUGADO RESISTENTE PARABÓLICO DE BOMBAS (CASO ESPECÍFICO) .....	28
3.3.3.2. ENCONTRANDO CONJUGADO RESISTENTE PARABÓLICO DE VENTILADORES (CASO ESPECÍFICO).....	30
3.3.4. CONJUGADO RESISTENTE HIPERBÓLICO ( $X=-1$ ).....	31
3.3.5. CONJUGADO RESISTENTE INDEFINIDO .....	32
3.3.6. CONJUGADO RESISTENTE NOMINAL PARA DEMAIS CARGAS ESPECÍFICAS .....	33
3.4. CONJUGADO RESISTENTE MÉDIO DA CARGA ( $C_{rmed}$ ).....	33
3.4.1. RELAÇÃO ENTRE O $C_{rmed}$ E A TRANSMISSÃO .....	36
3.5. CONJUGADO DO MOTOR.....	37
3.5.1. CONJUGADO DO MOTOR X VELOCIDADE .....	37
3.5.2. COMPONENTES DO CONJUGADO DO MOTOR.....	38
3.5.3. CATEGORIA DE MOTORES.....	39
3.6. CONJUGADO MÉDIO DO MOTOR .....	41
<b>4. MOMENTO DE INÉRCIA</b> .....	43
4.1. DEFINIÇÃO DE MOMENTO DE INÉRCIA .....	43

4.2. MOMENTO DE INÉRCIA DE COMPONENTES COMUMENTE ACOPLADOS AOS MOTORES .....	45
4.2.1. DISCO FINO OU CILINDRO, AMBOS MACIÇOS. ....	45
4.2.2. DISCO OU CILINDRO, AMBOS OCOS. ....	46
4.2.3. BARRA FINA EM TORNO DE UMA LINHA PERPENDICULAR QUE PASSA PELA SUA EXTREMIDADE .....	47
4.2.4. DEMAIS COMPONENTES QUE PODEM SER OBSERVADOS EM ACOPLAMENTOS .....	48
4.3. MOMENTO DE INÉRCIA DO MOTOR .....	49
4.4. MOMENTOS DE INÉRCIA DE MASSAS EXTERNAS.....	51
4.5. ASPECTOS RELEVANTES SOBRE O MOMENTO DE INÉRCIA.....	52
<b>5. TEMPO DE ACELERAÇÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>6. CLASSES DE ISOLAMENTO .....</b>	<b>56</b>
<b>7. TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO .....</b>	<b>57</b>
<b>8. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO .....</b>	<b>59</b>
8.1. EXEMPLO DE TALHA COM PARTIDA EM TENSÃO NOMINAL.....	59
8.2. EXEMPLO DE TRANSPORTADOR COM PARTIDA EM TENSÃO DIFERENTE DA NOMINAL.....	61
8.3. EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE BOMBA CENTRÍFUGA COM VELOCIDADE DIFERENTE DA NOMINAL .....	65
<b>9. CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>73</b>



# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente um dos maiores consumidores de energia elétrica do país são as indústrias, elas compõem grande parte da economia mundial. De maneira explícita nosso cotidiano está em torno de inúmeros produtos oriundos do meio industrial, desde o leite pasteurizado que tomamos no café da manhã processado por uma indústria alimentícia até o computador, do qual foi elaborado este trabalho, produzida por uma indústria eletro-eletrônica. Na Tabela 1 podemos observar o consumo de energia elétrica no Brasil e verificar que o setor industrial é o maior consumidor nacional.

**Tabela 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil por níveis, de 2004 até 2011 (EPE, 2012)**

<b>CONSUMO (GWh)</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
<b>BRASIL</b>	<b>329.707</b>	<b>344.284</b>	<b>356.129</b>	<b>377.030</b>	<b>388.472</b>	<b>384.306</b>	<b>415.683</b>	<b>433.034</b>
RESIDENCIAL	78.470	82.644	85.784	89.885	94.746	100.776	107.215	111.971
INDUSTRIAL	154.163	158.610	163.180	174.369	175.834	161.799	179.478	183.576
COMERCIAL	49.686	53.035	55.369	58.647	61.813	65.255	69.170	73.482
OUTROS	47.389	49.995	51.796	54.129	56.079	56.477	59.820	64.006

“Conforme mostram as estatísticas, cerca de 60-70% de toda a energia elétrica produzida é convertida em energia mecânica por meio de motores elétricos. Em setores industriais este percentual chega a 80% e em setores comerciais a 50%” (PEREIRA, 2007, p. 1).

Os principais elementos consumidores de energia elétrica presentes na indústria são: motores elétricos, fornos, refrigeração, iluminação, etc, destacando-se o motor elétrico como maior consumidor de energia elétrica. Um dos maiores problemas hoje encontrados na indústria é o mal dimensionamento mecânico destes motores, dos quais podemos destacar o sobre dimensionamento e o sub dimensionamento:

- Sobre dimensionamento: causa diminuição do fator de potencia da indústria, perda de rendimento, desperdício de energia, etc.;
- Sub dimensionamento: origina sobre aquecimento do motor, tendo como consequência diminuição da vida útil, queima, atuação de sistemas de proteção, aumento do consumo de energia elétrica devido ao sobre aquecimento, etc.

Devido ao panorama mundial atual em busca da economia e uso eficiente da energia elétrica, é de elevada importância o bom dimensionamento dos motores e conseqüentemente a economia de energia elétrica. Para o correto dimensionamento mecânico dos motores é necessário analisar uma série de características requeridas pelo projeto e seguida uma série de etapas até se chegar ao valor correto do motor.

De acordo com Junior (2005) os motores elétricos podem ser mecanicamente dimensionados utilizando um dos cinco critérios básicos:

- Dimensionamento analisando a potência eficaz;
- Dimensionamento analisando o conjugado máximo do motor;
- Dimensionamento analisando o conjugado do motor e conjugado resistente de partida;
- Dimensionamento analisando o tempo de aceleração;
- Dimensionamento analisando a potência disponível.

No decorrer do trabalho serão apresentadas as etapas do dimensionamento pelo critério do tempo de aceleração contendo as informações necessárias ao seu entendimento.

## **2. OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho serão explicar de maneira satisfatória o dimensionamento mecânico do motor pelo critério do tempo de aceleração.

De maneira detalhada os objetivos do trabalho serão:

- Explicar de maneira clara o conceito de conjugado, desde o conceito simples até os conceitos de conjugado da carga e do motor, e relacioná-los com as características dos motores, como velocidade e potência;
- Mostrar as diferentes categorias de motores e suas funções;

- Explicar o conceito de momento de inércia, mostrar sua importância no dimensionamento do motor, equacionar o momento de inércia de componentes comuns acoplados aos motores como polias, engrenagens, cilindros, etc.;
- Explicar e demonstrar a equação do tempo de aceleração utilizando todos os itens anteriormente encontrados;
- Mostrar as diferentes classes de isolamento de motores e suas funções;
- Explicar o significado e a importância do tempo de rotor bloqueado para o dimensionamento;
- Exemplificar situações possíveis complementando o entendimento total do trabalho.

### 3. CONJUGADO

O primeiro passo para dimensionar um motor elétrico será calcular as necessidades de conjugado e velocidade da carga. A velocidade usualmente é determinada pela taxa de produção exigida pela natureza do processo ou então especificada pelo cliente ao qual é prestado o serviço. Estabelecer as necessidades de conjugado normalmente exige alguns cálculos, dependendo da natureza da carga e do movimento necessário. Não será utilizado nenhum tipo de software que faça o dimensionamento automático, e sim realizado o cálculo manual que pode ser utilizado em qualquer situação.

#### 3.1.DEFINIÇÃO DO CONJUGADO

“O conjugado (também chamado torque, momento ou binário) é a medida do esforço necessário para girar um eixo” (WEG, 2009, p. 3).

WEG (2009) analisa que para levantar certa carga presa a um sistema de tambor e manivela é sabido que quanto maior o tamanho da manivela, menor será a força aplicada sobre ela para erguer a carga. Sendo assim temos que o conjugado é o produto da força e da distância (ou do raio da circunferência formada). Abaixo podemos ver na Figura 1 um sistema utilizado para captação de água em poços e quanto maior o tamanho da manivela, ou seja, quanto maior o valor de (r), menor será o valor da força (F) aplicada pelo operador da alavanca para suspender o balde afixado.

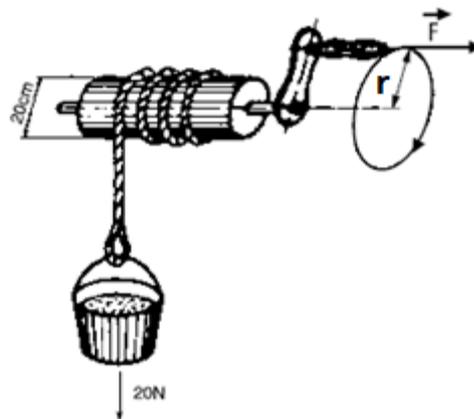


Figura 1 – Sistema de captação de água em poços por manivela (WEG, 2009)

$$C = F \cdot r \text{ [Nm]} \quad (1)$$

C: conjugado [Nm];

F: força [N];

r: distância ao eixo ou raio [m].

### 3.2. RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA E CONJUGADO

WEG (2009) mostra que a potência exprime a rapidez com que a energia é aplicada e se calcula dividindo a energia ou o trabalho total pelo tempo gasto em realizá-lo. Assim temos que:

$$Trab = F \cdot D \text{ [J]} \quad (2)$$

$$Pmec = \frac{Trab}{t} \text{ [W]} \quad (3)$$

Onde:

Trab: trabalho [J];

D: distância [m];

Pmec: potência mecânica [W];

t: tempo [s].

Por exemplo, se usarmos um motor elétrico capaz de erguer um saco de 50 Kg a uma altura de 10 m em 2s então teremos:

Sendo a força peso igual a:

$$Fp = m \cdot g \text{ [N]} \quad (4)$$

Onde:

Fp: força peso [N];

m: massa [Kg];

g: aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>].

Temos que:

$$Fp = m \cdot g = 50 \cdot 9,8 = 490N, \text{ adotando } g=9,8 \text{ m/s}^2.$$

$$P_{mec} = \frac{490[N] \cdot 10[m]}{2[s]} = 2450W$$

No exemplo acima estamos considerando valores ideais, no cotidiano para encontrarmos a potência mecânica requerida teríamos que dividir o valor da potência por um rendimento composto de variados fatores, mas que mostraremos no decorrer do trabalho.

A unidade mais usual para medida de potência mecânica é o cv (cavalo-vapor), que equivale a aproximadamente 736 W. Então a potência em cv do motor acima será:

$$P_{cv} = \frac{2450}{736} = 3,32 \text{ cv}$$

Ou seja:

$$P_{mec} = \frac{F \cdot D}{736 \cdot t} \text{ (cv)} \quad (5)$$

A equação da potencia mecânica pode ser mais detalhada se for decomposta da seguinte maneira:

$$P_{mec} = \frac{F \cdot D}{t} = F \cdot n1 \text{ [W]} \quad (6)$$

Onde:

n1: velocidade [m/s].

A partir daí temos que convertê-la para velocidade em rotações por segundo, então temos que:

$$n2 = \frac{n1}{2 \cdot \pi \cdot r} \text{ [rps]} \quad (7)$$

n2: velocidade [rps].

Pois  $2 \cdot \pi \cdot r$  é o comprimento da circunferência. Analogamente temos que:

$$n1 = n2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (8)$$

Juntando as equações 6 e 8 obtemos:

$$P_{mec} = F \cdot n2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \text{ [W]} \quad (9)$$

E juntando as equações 1 e 9 obtemos:

$$P_{mec} = 2 \cdot \pi \cdot n^2 \cdot C [W] \quad (10)$$

E ainda sabendo que:

$$w = 2 \cdot \pi \cdot n^2 \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (11)$$

Onde:

w: velocidade angular da carga [rad/s].

Temos que:

$$P_{mec} = w \cdot C [W] \quad (12)$$

### 3.3. CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA (Cr)

O conjugado resistente da carga é o conjugado requerido pela carga para movimentá-la em função da velocidade, neste conjugado está incluído o conjugado útil que a carga utiliza como também o conjugado das perdas, que é diferente para cada carga, devido às perdas por atrito da carga. Esse conjugado pode ser considerado como o mais complexo, pois cada tipo de situação desempenha um conjugado diferente, por exemplo, um transportador contínuo situado numa indústria automobilística desenvolve um conjugado constante em relação à velocidade do motor, enquanto que em um misturador de ingredientes em uma indústria alimentícia desenvolve um conjugado parabólico em relação à velocidade do motor. Os tipos de conjugados resistentes podem ser visualizados abaixo:

- Conjugado resistente constante;
- Conjugado resistente linear;
- Conjugado resistente parabólico;
- Conjugado resistente hiperbólico;
- Conjugado resistente indefinido.

Pazzini (2002) mostra que de modo geral o conjugado resistente da carga obedece a seguinte equação:

$$C_r = C_o + C_u \quad (13)$$

Onde:

Cr: conjugado resistente da carga [Nm];

Co: conjugado da carga para rotação zero ou conjugado das perdas [Nm];

Cu: conjugado útil [Nm].

Onde Cu seria o conjugado que a carga desenvolve ao realizar o trabalho ao qual foi construída, ou seja, o conjugado útil, e que se relaciona com uma constante e um parâmetro que depende da carga, e da velocidade angular, e Co seria o conjugado das perdas, ou seja, oriundo do atrito das partes móveis e fixas da carga. Sendo assim origina-se a seguinte equação:

$$Cr = Co + Kc \cdot w^x \quad (14)$$

Onde:

Kc: constante que depende da carga;

x: Parâmetro exponencial que depende da carga.

A seguir será feito a análise de cada um.

### 3.3.1. CONJUGADO RESISTENTE CONSTANTE (X=0)

Como o próprio nome diz, este conjugado se mantém constante mesmo havendo variação da velocidade do motor, enquanto que sua potência sofre aumento de maneira linear. Utilizando a equação do conjugado resistente da carga podemos substituir o “x” por “0”, já que o conjugado se equipara a uma reta, sabendo isso temos que:

$$Cr = Co + Kc \cdot w^x = Co + Kc \cdot w^0$$

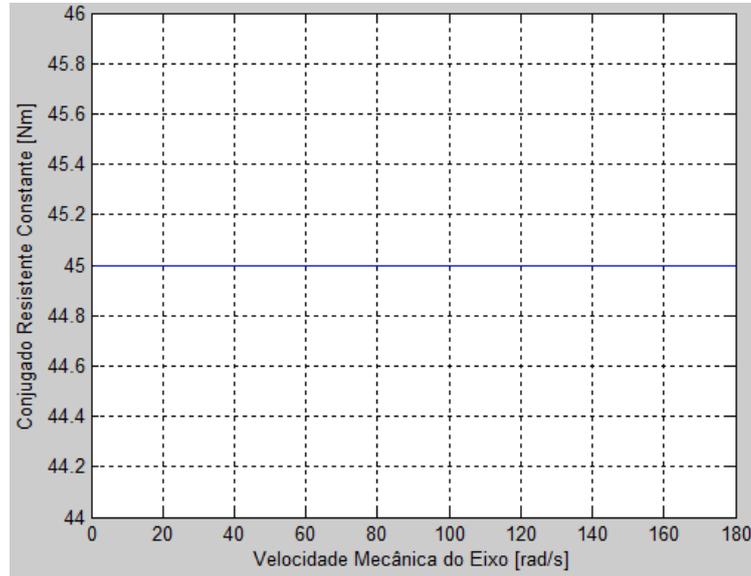
$$Cr = Co + Kc \quad (15)$$

Utilizando a equação (12), que relaciona a potência mecânica, sendo o produto entre o conjugado e a velocidade angular, temos que:

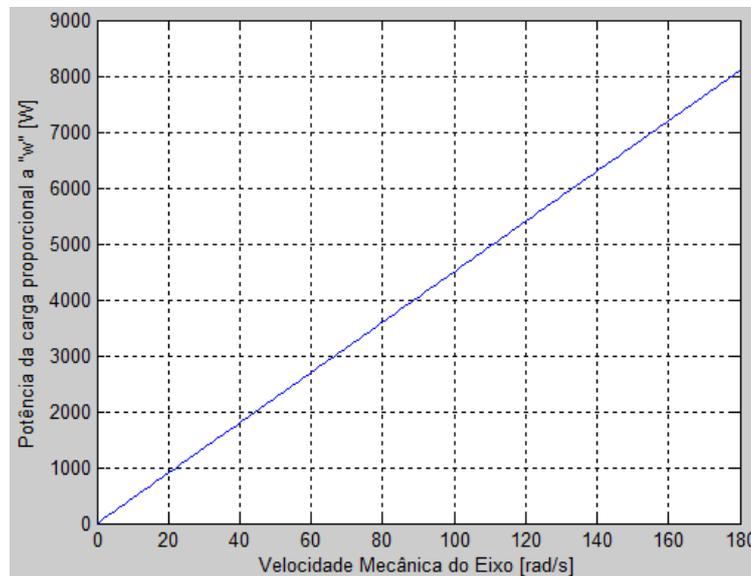
$$Pmec = (Co + Kc) \cdot w \quad (16)$$

A seguir podemos observar nas Figuras 2 e 3 como se comportam o conjugado resistente constante útil e a potência útil, em relação à velocidade.

Todas as figuras referentes ao t pico sobre conjugado resistente da carga usarão como dados uma carga fictícia com conjugado resistente nominal de 50 Nm, com conjugado de atrito valendo 5 Nm, velocidade angular de 180 rad/s, sendo considerado no gráfico apenas o conjugado útil, desprezando o conjugado de perdas para melhor visualiza o.



**Figura 2 – Conjugado resistente constante útil em rela o   velocidade**



**Figura 3 – Potência em rela o   velocidade para o caso de conjugado resistente constante útil**

As situa es que se comportam como conjugado resistente constante são na presença de: talhas, guias, transportadores contínuos, etc.

### 3.3.1.1. ENCONTRANDO CONJUGADO RESISTENTE CONSTANTE DE TALHAS (CASO ESPECÍFICO)

O objetivo principal deste trabalho é fazer a análise do tempo de aceleração, para encontrarmos este tempo são requisitadas varias variáveis como conjugado da carga, conjugado do motor, cálculo dos conjugados médios, momentos de inércia, etc. Nos tópicos específicos, dentro do tópico de conjugado resistente da carga, mostraremos como podemos encontrar o conjugado nominal de algumas cargas específicas comuns ao meio industrial como talhas, bombas, etc. Nem sempre é fácil encontrar o conjugado de uma carga, sendo que na maioria das vezes é mais fácil encontrarmos a potência mecânica necessitada por ela utilizando equações comuns e logo após isolarmos o conjugado, e é o que será feito.

Elementos como talhas são comumente encontrados nas indústrias, pois a suspensão e abaixamento de cargas são de vasta utilização, dispensando o uso de força braçal.

A potência mecânica requerida por uma carga pode ser dividida em potência estática e dinâmica. A potência estática é a força que move a carga com velocidade constante, já a potência dinâmica move a carga com uma aceleração definida pelo responsável pelo dimensionamento, na maioria das cargas a potência mecânica total é obtida a partir da soma dessas duas potências.

No caso de talhas a principal força resistente estática será a força peso, assim partindo da equação número (4) e (6) podemos equacionar um jeito prático de dimensionar a potência para estas situações, e assim temos que:

$$P_{est} = \frac{Fp \cdot D}{t} = m \cdot g \cdot n1 [W] \quad (17)$$

Onde:

Pest: potência estática [W].

A potência estática sendo calculada, o próximo passo é encontrarmos a potência dinâmica, caso seja requisitada. A maneira mais usual de encontrarmos essa potência é:

$$P_{dl} = m \cdot n1 \cdot a [W] \quad (18)$$

Onde:

Pdl: potência dinâmica [W];

a: aceleração requerida para aceleração e desaceleração da carga [m/s<sup>2</sup>].

Agora o próximo passo é encontrarmos a potência mecânica levando em conta o rendimento total, oriundo do produto entre o rendimento da carga e do rendimento da transmissão que pode ser direta, aumentar ou diminuir a velocidade. Por isso temos que:

$$P_{mec} = \frac{P_{est} + P_{dl}}{\eta_t} \quad (19)$$

$$\eta_t = \eta_c \cdot \eta_r \quad (20)$$

Onde:

$\eta_t$ : rendimento total;

$\eta_c$ : rendimento da carga;

$\eta_r$ : rendimento da transmissão.

Agora podemos isolar o conjugado resistente nominal dividindo a potência mecânica pela velocidade angular, assim obtemos que:

$$Cr = \frac{m \cdot g \cdot n_1 + P_{dl}}{w \cdot \eta_t} [N \cdot m] \quad (21)$$

Na maioria dos casos envolvendo talhas é requisitada somente a potência estática e não é considerada a potência dinâmica, pois este tipo de aplicação requer uma velocidade constante.

### 3.3.2. CONJUGADO RESISTENTE LINEAR (X=1)

Este tipo de conjugado se comporta de maneira linear como o nome já pressupõe. À medida que a velocidade aumenta o conjugado também aumenta de forma linear e já sua potência se comporta como uma parábola em relação à velocidade. Substituindo o “x” por “1” podemos ver que:

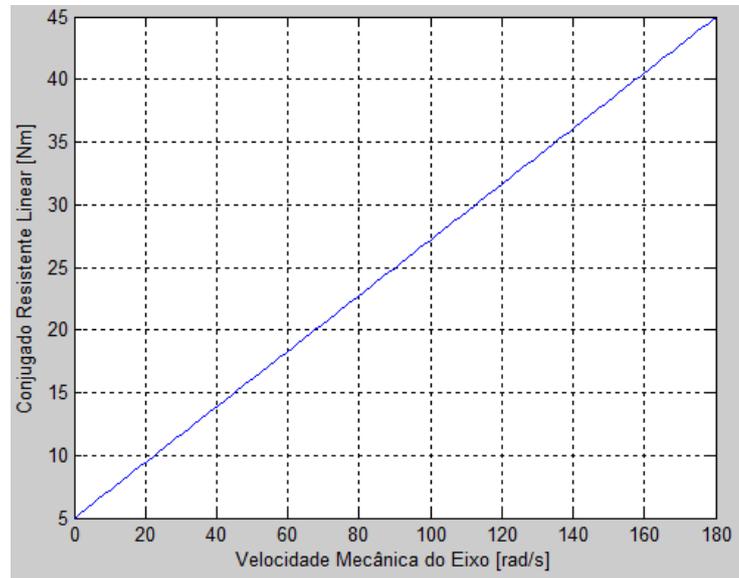
$$Cr = Co + Kc \cdot w^x = Co + Kc \cdot w^1$$

$$Cr = Co + Kc \cdot w \quad (22)$$

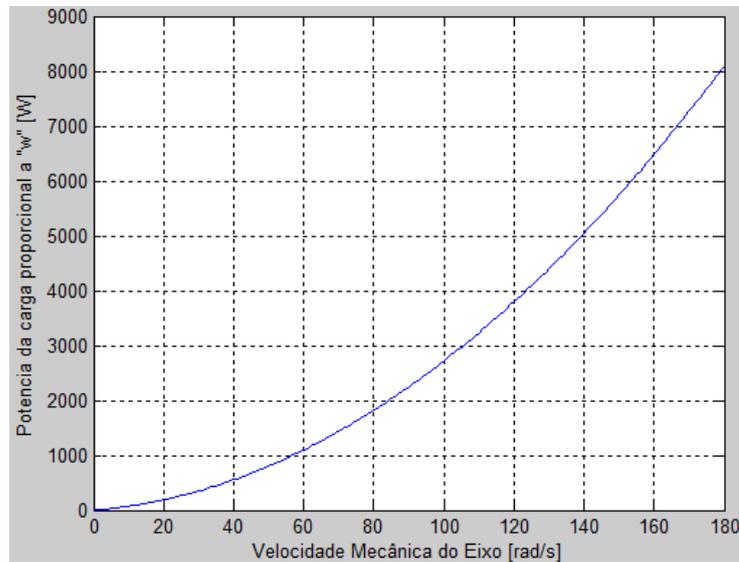
$$P_{mec} = (Co + Kc \cdot w) \cdot w$$

$$P_{mec} = Co \cdot w + Kc \cdot w^2 \quad (23)$$

A seguir podemos observar na Figura 4 como se comporta o conjugado resistente linear útil e na Figura 5 sua potência útil em relação à velocidade.



**Figura 4 - Conjugado resistente linear útil em relação à velocidade**



**Figura 5 - Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente linear útil**

As situações que se comportam como conjugado resistente linear são na presença de calandras, moinhos de rolos, alguns tipos de plainas, etc.

### 3.3.3. CONJUGADO RESISTENTE PARABÓLICO (X=2)

Nesse caso o conjugado da carga se comporta como uma parábola em relação à velocidade do motor enquanto que a potência se comporta de maneira semelhante. Substituindo o “x” por “2” agora obtemos que:

$$Cr = Co + Kc.w^x = Co + Kc.w^2$$

$$Cr = Co + Kc.w^2 \quad (24)$$

$$Pmec = (Co + Kc.w^2).w$$

$$Pmec = Co.w + Kc.w^3 \quad (25)$$

A seguir podemos observar na Figura 6 como se comporta o conjugado resistente parabólico útil e na Figura 7 sua potência em relação à velocidade.

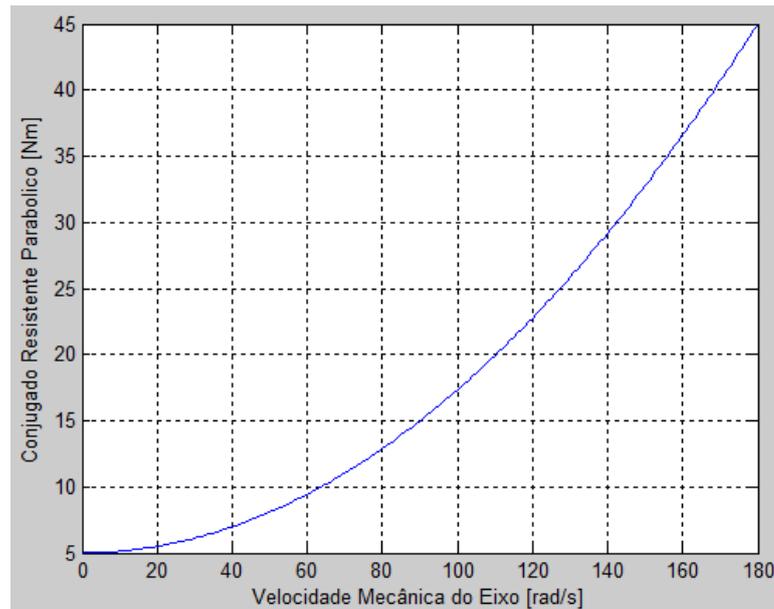
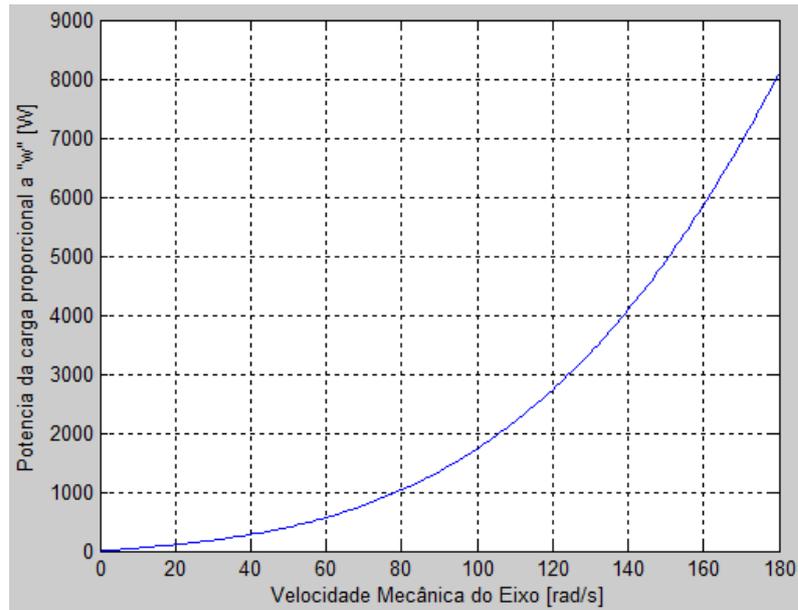


Figura 6 - Conjugado resistente parabólico útil em relação à velocidade



**Figura 7 - Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente parabólico útil**

As situações que se comportam como conjugado resistente parabólico são na presença de: bombas centrífugas, ventiladores, misturadores centrífugos, etc.

### **3.3.3.1.ENCONTRANDO CONJUGADO RESISTENTE PARABÓLICO DE BOMBAS (CASO ESPECÍFICO)**

Esse tipo de equipamento também é muito utilizado na indústria como também em todas as áreas, sua função é a sucção de líquidos para diversos fins.

No caso das bombas começaremos analisando a pressão. De acordo com o teorema de Stevin temos que: “A diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas dos dois pontos”. Como o peso específico é:

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} \left[ \frac{N}{m^3} \right] \quad (26)$$

Onde:

$\gamma$ : peso específico [N/m<sup>3</sup>];

V: volume [m<sup>3</sup>].

E a diferença de pressão é:

$$\Delta P = \gamma \cdot \Delta H \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (27)$$

Onde:

$\Delta P$ : diferença de pressão [N/m<sup>2</sup>];

$\Delta H$ : diferença de altura ou altura manométrica [m].

Sabendo que a massa específica é:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \quad (28)$$

Onde:

$\rho$ : massa específica [Kg/m<sup>3</sup>].

Podemos agora considerar:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta H \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (29)$$

Continuando analisando a pressão temos que ela também pode ser vista como:

$$P' = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (30)$$

Onde:

$P'$ : pressão [N/m<sup>2</sup>];

$A$ : área [m<sup>2</sup>].

Igualando as duas pressões e isolando a força temos que:

$$F = A \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H [N] \quad (31)$$

Como o produto da força e da velocidade origina a potência temos que:

$$P_{mec} = \frac{n_1 \cdot A \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H}{\eta t} [W] \quad (32)$$

De acordo com Qites (2003) a vazão pode ser escrita:

$$Q = n_1 \cdot A [m^3/s] \quad (33)$$

Onde:

$Q$ : vazão [m<sup>3</sup>/s].

Com isso temos que a equação da potência fica:

$$P_{mec} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H}{\eta t} [W] \quad (34)$$

E ao mesmo tempo temos que:

$$P_{mec} = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta t} [W] \quad (35)$$

Agora para obtermos o conjugado resistente nominal, precisamos repetir o método anterior, dividindo a potência pela velocidade angular, assim temos que:

$$Cr = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta t \cdot w} [N \cdot m] \quad (36)$$

### 3.3.3.2. ENCONTRANDO CONJUGADO RESISTENTE PARABÓLICO DE VENTILADORES (CASO ESPECÍFICO)

Elementos como ventiladores também são comumente encontrados nas indústrias, principalmente no uso de exaustores, muito utilizados na descontaminação de agentes químicos presentes no ar de um local.

De acordo com Lied (2011) a equação básica para se encontrar a potência dos ventiladores é:

$$P_{mec} = \frac{9,81 \cdot P'' \cdot Q}{\eta t} [W] \quad (37)$$

Onde:

$P''$ : pressão total do ventilador (mmca).

Podemos perceber que a equação para encontrar a potência de ventiladores é praticamente idêntica à equação de bombas, a única diferença é que no caso de ventiladores a pressão definida se encontra em milímetros de coluna de água (mmca), que é uma unidade de medida usual na especificação da pressão de ventiladores.

Com isso temos que o conjugado resistente nominal da carga é:

$$Cr = \frac{9,81 \cdot P'' \cdot Q}{w \cdot \eta t} [W] \quad (38)$$

### 3.3.4. CONJUGADO RESISTENTE HIPERBÓLICO (X=-1)

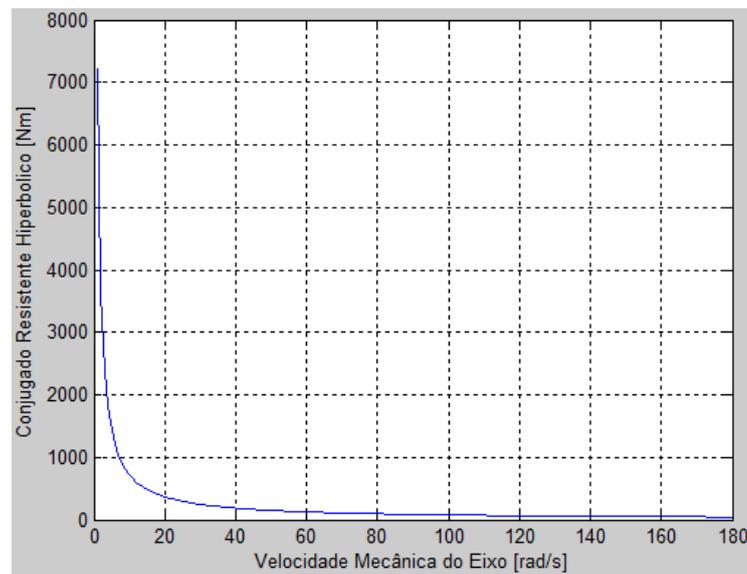
Nesse caso o conjugado da carga se comporta como uma hipérbole em relação à velocidade do motor enquanto que a potência se comporta como uma constante que depende da carga. Substituindo o “x” por “-1” agora obtemos:

$$Cr = Co + Kc \cdot w^{-1}$$

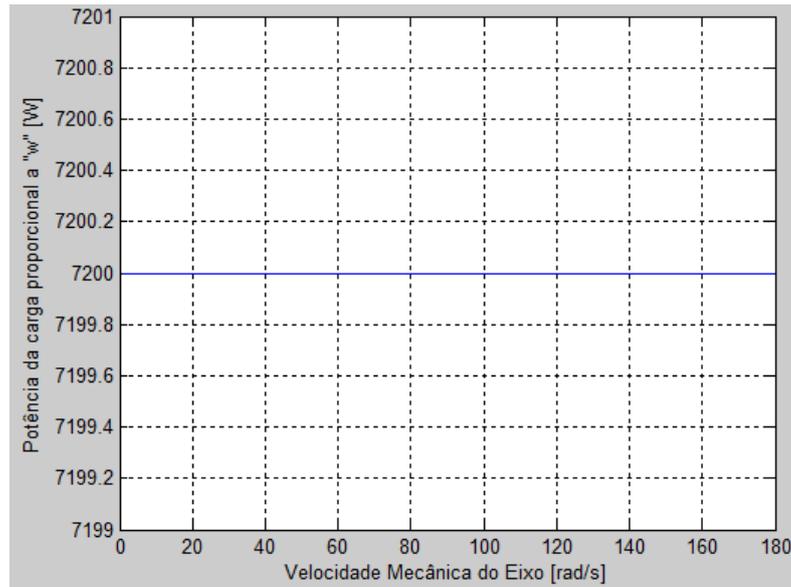
$$Cr = Co + \frac{Kc}{w} \quad (39)$$

$$Pmec = \left( Co + \frac{Kc}{w} \right) \cdot w \quad (40)$$

A seguir podemos observar na Figura 8 como se comporta o conjugado resistente hiperbólico útil e na Figura 9 sua potência constante em relação à velocidade.



**Figura 8 - Conjugado resistente hiperbólico útil em relação à velocidade**

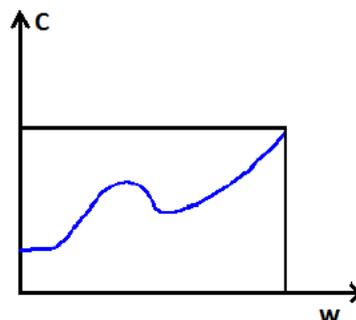


**Figura 9 - Potência em relação à velocidade para o caso de conjugado resistente hiperbólico útil**

As situações que se comportam como conjugado resistente hiperbólico são na presença de: descascadores de toras, bobinadeiras de papel, pano, fio, etc.

### 3.3.5. CONJUGADO RESISTENTE INDEFINIDO

Nesse caso o conjugado da carga se comporta de maneira indefinida, ou seja, não sabemos como o conjugado de uma carga não constante irá agir. Por isso nesse caso não podemos criar uma equação onde ele se encaixe e sim determiná-lo através do método de integração gráfica. Usualmente quando o responsável pelo dimensionamento encontra uma situação assim ele utiliza o gráfico oriundo do conjugado da carga versus a velocidade e adota o motor que possui seu conjugado imediatamente superior ao máximo conjugado da carga presente no gráfico. Abaixo na Figura 10 podemos ver um exemplo de conjugado resistente indefinido.



**Figura 10 – Exemplo de conjugado indefinido (WEG, 2010)**

### 3.3.6. CONJUGADO RESISTENTE NOMINAL PARA DEMAIS CARGAS ESPECÍFICAS

Para as demais cargas específicas que não existem equações simplificadas para encontrar suas potências são realizados ensaios e observações do seu comportamento e são criadas equações empíricas específicas para cada caso.

### 3.4. CONJUGADO RESISTENTE MÉDIO DA CARGA ( $C_{rmed}$ )

Pazzini (2002) mostra que o conjugado resistente médio da carga é a média do conjugado resistente para cada caso, ou seja, para cada tipo de carga haverá uma equação diferente. Este conjugado serve para ser usado na confirmação do motor escolhido na hora de determinar o tempo de aceleração como será visto posteriormente. A melhor maneira de se descobrir esse conjugado médio é utilizar o cálculo integral, ou seja, integrar a região do gráfico abrangendo do menor ao maior conjugado resistente presente desde a menor até a maior velocidade, sendo que o conjugado resistente médio da carga será o valor médio dessa área abrangida pela integral. Podemos visualizar esse método na Figura 11 abaixo.

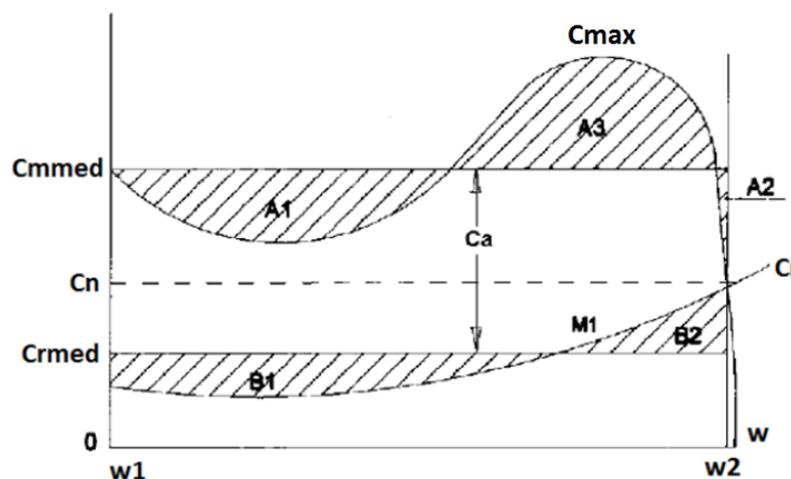


Figura 11 – Região a ser integrada para obtenção do conjugado resistente médio (KCEL, 2010)

Onde:

$w_1$ : velocidade angular 1 [rad/s];

$w_2$ : velocidade angular 2 [rad/s];

$C_n$ : conjugado nominal ou de plena carga [Nm];

$C_{med}$ : conjugado médio do motor [Nm];

$C_{rmed}$ : conjugado resistente médio da carga [Nm];

$C_{max}$ : conjugado máximo [Nm].

Imaginando que uma reta na horizontal corte a curva da carga de certa forma que a parte superior da área abrangida seja igual a área abrangida da região inferior, dizemos que este ponto em que a reta toca a curva é o conjugado médio da carga, ou seja, para isso se ocorrer a área de B1 deve ser igual à área de B2. Para generalizar uma equação que possa ser utilizada em qualquer um dos casos anteriormente demonstrados podemos integrar a região como mencionado, assim obtemos:

$$C_{rmed} = \frac{1}{w_2 - w_1} \cdot \int_{w_1}^{w_2} C_r dw \quad (41)$$

Utilizando a equação (13), podemos substituir:

$$C_{rmed} = \frac{1}{w_2 - w_1} \cdot \int_{w_1}^{w_2} (C_o + C_u) dw \quad (42)$$

E utilizando a equação (14) podemos considerar:

$$C_{rmed} = \frac{1}{w_2 - w_1} \cdot \int_{w_1}^{w_2} (C_o + K_c \cdot w^x) dw \quad (43)$$

Analiticamente obtemos a seguinte integral:

$$C_{rmed} = \int_{w_1}^{w_2} \frac{(C_o + K_c \cdot w^x)}{(w_2 - w_1)} dw \quad (44)$$

Temos que:

$$\begin{aligned} \int_{w_1}^{w_2} \frac{C_o + k_c \cdot w^x}{w_2 - w_1} dw &= \int_{w_1}^{w_2} \frac{C_o}{w_2 - w_1} dw + \frac{k_c \cdot w^x}{w_2 - w_1} dw = \\ \frac{C_o(w_2 - w_1)}{w_2 - w_1} + \int_{w_1}^{w_2} \frac{k_c \cdot w^x}{w_2 - w_1} dw &= C_o + \frac{k_c}{w_2 - w_1} \int_{w_1}^{w_2} w^x dw = \\ \rightarrow C_o + \frac{k_c}{w_2 - w_1} \cdot \left( \frac{w_2^{x+1}}{x+1} - \frac{w_1^{x+1}}{x+1} \right) &= C_o + \frac{k_c}{w_2 - w_1} \cdot \left( \frac{w_2^{x+1} - w_1^{x+1}}{x+1} \right) = \end{aligned}$$

$$Cr_{med} = C_o + kc \cdot \left( \frac{w_2^{x+1} - w_1^{x+1}}{(x+1) \cdot (w_2 - w_1)} \right) \quad (45)$$

Como o intuito final é descobrir o tempo de acionamento do motor desde a velocidade zero até a velocidade nominal podemos utilizar métodos aproximados e considerar  $w_1=0$  e  $w_2=w$ , e assim concluímos que:

$$\begin{aligned} \rightarrow C_o + kc \cdot \left( \frac{w^{x+1}}{(x+1) \cdot (w)} \right) &= C_o + kc \cdot \left( \frac{w^x \cdot w}{(x+1) \cdot (w)} \right) = \\ Cr_{med} &= C_o + kc \cdot \left( \frac{w^x}{x+1} \right) \end{aligned} \quad (46)$$

Tendo em mãos o resultado da integral definida, temos a equação geral do conjugado resistente médio da carga para qualquer situação. Sabendo disso podemos usar nos conjugados constante, linear, parabólico e hiperbólico (veremos que para este caso precisaremos fazer algumas mudanças) como será visto adiante.

Para o caso de conjugado resistente constante ( $X=0$ ) temos:

$$Cr_{med} = C_o + kc \cdot \frac{(w^0)}{(0+1)} = C_o + kc \quad (47)$$

A partir da equação (15) podemos analisar que  $Cr_{med}$  pode ser visto como:

$$Cr_{med} = Cr \quad (48)$$

Para o caso de conjugado resistente linear ( $X=1$ ) temos:

$$\begin{aligned} Cr_{med} &= C_o + kc \cdot \frac{(w^1)}{(1+1)} = C_o + kc \cdot \frac{(w)}{2} \\ &= \frac{C_o + C_o + kc \cdot (w)}{2} \end{aligned}$$

A partir da equação (22) podemos ver que  $Cr_{med}$  pode ser visto como:

$$Cr_{med} = \frac{C_o + Cr}{2} \quad (49)$$

Para o caso de conjugado resistente parabólico ( $X=2$ ) temos que:

$$Cr_{med} = C_o + kc \cdot \frac{(w^2)}{(2+1)} = C_o + kc \cdot \frac{(w^2)}{3} =$$

$$= \frac{(Co + Co + Co + kc \cdot w^2)}{3}$$

A partir da equação (24) podemos ver que  $Cr_{med}$  pode ser visto como:

$$Cr_{med} = \frac{(2 \cdot Co + Cr)}{3} \quad (50)$$

Para o caso de conjugado resistente hiperbólico ( $X=-1$ ) temos que:

$$Cr_{med} = Co + kc \cdot \frac{(w^{-1})}{(-1 + 1)} \rightarrow \infty \quad (51)$$

Como neste caso o conjugado médio da carga tende a infinito e sabemos que isso se torna impossível, neste caso devemos voltar e reanalisar entre os valores  $w_1$  e  $w_2$  e assim temos:

$$Cr_{med} = \int_{w_1}^{w_2} \frac{Cr}{w_2 - w_1} dw \quad (52)$$

Como já sabemos que para o caso hiperbólico o conjugado resistente “útil” é  $Cr = \frac{Kc}{w}$ , pois neste caso desprezaremos o valor de  $Co$ , por ser pequeno comparado ao conjugado útil e para facilitar a resolução da integral, assim obtemos:

$$\begin{aligned} Cr_{med} &= \int_{w_1}^{w_2} \frac{\frac{Kc}{w}}{w_2 - w_1} dw \rightarrow \frac{kc}{w_2 - w_1} \cdot \int_{w_1}^{w_2} \frac{1}{w} dw \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{kc}{w_2 - w_1} \cdot (\ln w_2 - \ln w_1) \rightarrow \\ Cr_{med} &= \frac{kc}{w_2 - w_1} \cdot \ln \frac{w_2}{w_1} \quad (53) \end{aligned}$$

### 3.4.1. RELAÇÃO ENTRE O $Cr_{med}$ E A TRANSMISSÃO

De acordo com WEG (2010) sempre que formos utilizar o conjugado resistente médio na equação do tempo de aceleração, precisamos referenciar esse conjugado com a velocidade do motor simplesmente multiplicando o conjugado resistente médio pela relação de redução, esse processo serve para todos os casos, isso pode ser visto nos exemplos presentes no final do trabalho.

$$Crmed \cdot Rel = Crmed \cdot \frac{Nc}{N3} \quad (54)$$

Onde:

Nc: velocidade da carga [rpm];

N3: velocidade do motor [rpm];

Rel: relação de transmissão.

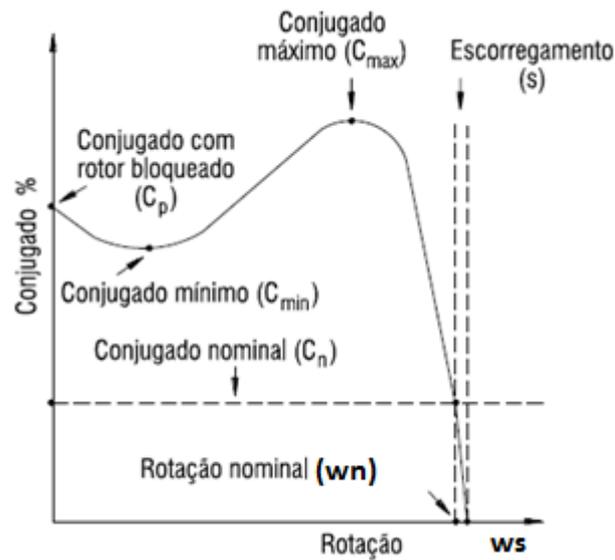
Obs.: caso não haja transmissão considerar Rel igual a 1.

### **3.5. CONJUGADO DO MOTOR**

#### **3.5.1. CONJUGADO DO MOTOR X VELOCIDADE**

WEG (2009) afirma que o motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. Isso significa que à velocidade síncrona ele não faz nenhum esforço, ou seja, não há conjugado, sabemos que esta situação se torna impossível devido ao escorregamento presente em motores de indução sendo impossível se chegar à velocidade síncrona.

À medida que a carga vai aumentando em seu eixo, a corrente necessitada pelo motor e seu conjugado vão aumentando e a rotação do motor vai caindo de maneira progressiva, até um ponto em que o conjugado atinge seu pico em condições normais. Caso o conjugado da máquina aumente mais que isso, ou seja, a carga requeira mais conjugado, a rotação do motor terá uma queda brusca, podendo chegar ao travamento do rotor, resultando em aquecimento e possível queima, dependendo do tempo de rotor bloqueado e dos sistemas de proteção, caso existam. Abaixo podemos observar na Figura 12 a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal de categoria N (as categorias serão explicadas no decorrer do trabalho), em condições normais de funcionamento. O significado de cada tipo de conjugado é explicado a seguir.



**Figura 12 – Curva de conjugado do motor elétrico (WEG, 2009)**

Onde:

$\omega_n$ : rotação nominal do motor [rad/s];

$\omega_s$ : rotação síncrona do motor [rad/s];

S: escorregamento do motor [%].

### 3.5.2. COMPONENTES DO CONJUGADO DO MOTOR

De acordo com KCEL (2010) temos as seguintes definições dos conjugados presenciados nos motores elétricos:

Conjugado nominal ou de plena carga ( $C_n$ ) – é o conjugado desenvolvido pelo motor em seu pleno funcionamento, quando o motor está sendo alimentado por sua tensão, frequência e potência, nominais.

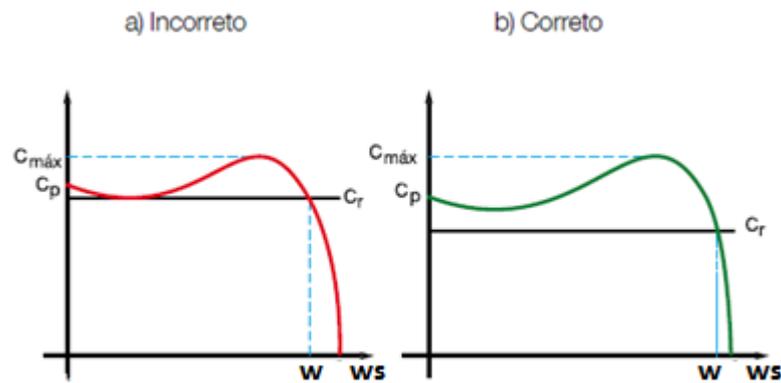
Conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ( $C_p$ ) – é o conjugado mínimo que o motor desenvolve quando se encontra com rotor bloqueado, sob suas condições nominais de alimentação e de todas posições angulares possíveis.

Conjugado mínimo ( $C_{min}$ ) – menor conjugado assíncrono, em regime permanente, que o motor desenvolve desde a velocidade zero até a velocidade que corresponde ao conjugado máximo, sob suas características de alimentação nominais.

Conjugado máximo ( $C_{max}$ ) – é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob suas características nominais de alimentação e sendo que não haja uma queda brusca de velocidade.

Conjugado de aceleração ( $C_a$ ) – é o conjugado necessário para levar sua carga à velocidade nominal.

Até se chegar à velocidade nominal o conjugado do motor sempre necessita ser maior que o conjugado da carga, se isso não ocorrer pode haver sérios problemas, como o travamento do rotor, isso se explica porque quando a curva do conjugado resistente da carga toca a curva que representa o conjugado do motor, o conjugado de aceleração é nulo. Isto pode ser visto na Figura 13.



**Figura 13 – Maneira correta da escolha do motor em relação ao conjugado resistente (WEG, 2009)**

A equação que define o conjugado de aceleração é:

$$C_a = C_{med} - C_{rmed} \quad (55)$$

A definição de conjugado resistente médio da carga já foi demonstrada e a definição de conjugado médio do motor será mostrada mais adiante.

### 3.5.3. CATEGORIA DE MOTORES

Para melhor atender a diversos e diferentes tipos de cargas, os motores elétricos são divididos em categorias e diferem um do outro a respeito das características de conjugado em

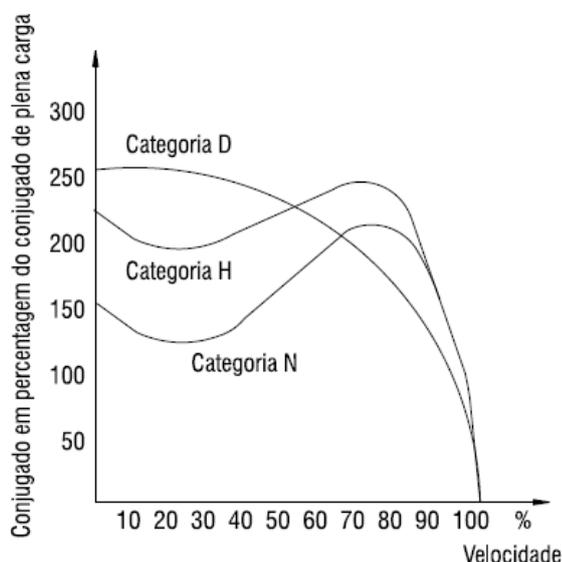
relação à velocidade e corrente de partida. Essas categorias foram definidas pela norma NBR 7094 e são as seguintes:

**Categoria N:** “Conjugado de partida normal, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, ventiladores” (WEG, 2009, p. 18). Como este motor se encaixa para a maioria das cargas ele é utilizado normalmente para cargas com baixo conjugado de partida como ventiladores, exaustores, bombas, etc.

**Categoria H:** “Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc” (WEG, 2009, p. 18). Este tipo de motor se encaixa em cargas onde o conjugado de partida não é pequeno, mas também não é gigante, sendo intermediário entre as categorias N e D, sendo mais comumente utilizado em ventiladores de grande potência e com alta inércia.

**Categoria D:** Conjugado de partida alto, corrente de partida normal; alto escorregamento. Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos ou cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos (WEG, 2009, p. 18).

Na Figura 14 podemos verificar como se comportam as três principais categorias de motores de indução de gaiola em função da velocidade.



**Figura 14 – Curvas Conjugado x Velocidade, das diferentes categorias de motores (WEG, 2009).**

Categoria NY: Esta categoria inclui os motores semelhantes aos de categoria N, porém, previstos para partida estrela-triângulo (WEG, 2009).

Categoria HY: Esta categoria inclui os motores semelhantes aos de categoria H, porém previstos para partida estrela-triângulo (WEG, 2009).

### 3.6. CONJUGADO MÉDIO DO MOTOR

Da mesma maneira que encontramos o conjugado resistente médio da carga também temos o dever de calcular o conjugado médio do motor, pois ambos serão utilizados juntamente com o momento de inércia, que será analisado e calculado no decorrer do trabalho, para enfim encontrarmos o tempo de aceleração do motor, ao qual o trabalho objetiva estudar.

O conjugado médio do motor é o conjugado médio que o motor exerce para girar a carga e seus próprios componentes, como principal componente o rotor, que no nosso caso é o gaiola, que é constituído de barras de material condutor, chapas e anéis e obviamente o conjunto possui massa e resistência ao movimento rotatório, ou seja, o momento de inércia, que será estudado no decorrer do trabalho.

Como já mostrado anteriormente existem diversos tipos de categorias de motores em relação ao conjugado de partida, corrente de partida, escorregamento, etc., e cada um possui em seu projeto características diferentes um do outro, por isso não podemos formular uma equação geral que inclua todas as categorias e que mostre o conjugado médio do motor, mas de acordo com WEG (2009) podemos observar como é definido o conjugado médio do motor ao qual eles oferecem duas equações, a primeira para motores de categoria N e H que são motores mais usados por se tratarem de projeto mais simples, já a segunda representa o conjugado médio do motor de categoria D que é um motor que requer alto conjugado de partida. As equações podem ser visualizadas abaixo:

$$C_{mmed} = 0,45 \cdot \left[ \left( \frac{C_p}{C_n} \right) + \left( \frac{C_{max}}{C_n} \right) \right] \cdot C_n \quad (56)$$

, para categoria N e H.

$$C_{mmed} = 0,60 \cdot \left( \frac{C_p}{C_n} \right) \cdot C_n \quad (57)$$

, para categoria D.

De acordo com Assunção et. al. (2009) o conjugado médio do motor muda seu valor se o motor partir com uma tensão diferente da nominal, isso é bastante compreensível, pois o conjugado é dependente da tensão, assim os conjugados de partida e máximos podem ser vistos abaixo com a variação da tensão:

$$Cp' = Cp \cdot \left(\frac{Vd}{Vn}\right)^{2,2} \quad (58)$$

$$Cmax' = Cmax \cdot \left(\frac{Vd}{Vn}\right)^2 \quad (59)$$

Onde:

Vn: tensão nominal do motor [V];

Vd: tensão diferente da nominal do motor [V];

Cp': conjugado de partida com a tensão diferente [Nm];

Cmax': conjugado máximo do motor com tensão diferente [Nm].

Isso é bastante útil na hora da partida, pois quando partimos com tensão nominal não há mudança no conjugado motor, mas quando partimos com tensão reduzida veremos que o conjugado médio do motor sofre uma queda, diminuindo o conjugado de aceleração e consequentemente aumentando o tempo de partida, e em certas vezes nem conseguindo partir, é o caso da partida estrela triângulo no qual as referências bibliográficas da área não recomendam que nessa situação o motor parta com carga, pois no momento da partida o conjugado de aceleração pode ser zero.

## 4. MOMENTO DE INÉRCIA

Depois de todo o estudo do conjugado tanto do motor quanto da carga, o próximo passo para o dimensionamento de motores é o estudo sobre o momento de inércia do motor, da carga e dos principais componentes acoplados ao motor, mas para isso, antes de tudo, precisamos conhecer o significado desta propriedade, o que será visto a seguir.

### 4.1. DEFINIÇÃO DE MOMENTO DE INÉRCIA

“O momento de inércia de um objeto em relação a um eixo é a propriedade do objeto que o faz resistir a uma variação em sua velocidade vetorial angular em relação àquele eixo.” (KELLER, F.; GETTYS, E.; SKOVE, M., 1993, p. 321).

Vimos no parágrafo acima que o momento de inércia pode ser referenciado em diferentes eixos, por exemplo, imaginemos um objeto tridimensional, um prisma, por exemplo, podemos afirmar que ele possui componentes dimensionais nos eixos x, y e z (comprimento, largura e altura), e podemos girá-lo em qualquer um desses eixos, para cada eixo que o girarmos o momento de inércia terá uma equação diferente (em alguns casos como na esfera as equações são as mesmas). Para todos os objetos que iremos calcular o momento de inércia neste trabalho iremos referenciar em qual eixo está se rotacionando.

De acordo com Keller, F.; Gettys, E.; Skove, M. (1993) podemos determinar o momento de inércia de um objeto contínuo imaginando um objeto constituído de diversas partes e cada uma dessas partes é tão pequena quanto uma partícula. Essa partícula tem sua massa dada pela seguinte equação:

$$\Delta m_i = \rho_i \Delta V_i \quad (60)$$

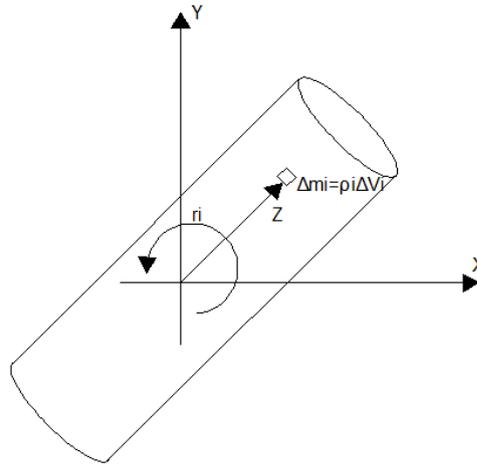
Onde:

$\Delta m_i$ : massa da partícula i [Kg];

$\rho_i$ : massa específica do material i [Kg/m<sup>3</sup>];

$\Delta V_i$ : pequeno volume ocupado pela parte i [m<sup>3</sup>].

Essa ideia pode ser mais bem entendida analisando a Figura 15, em um exemplo de momento de inércia de um cilindro em torno do eixo Z.



**Figura 15 – Momento de inércia de um cilindro em relação ao eixo Z. A direção +Z é para fora da página.**

Sabendo que o momento de inércia de uma partícula é:

$$J = \sum \Delta m_i r_i^2 \quad (61)$$

Onde:

J: momento de inércia [Kg.m<sup>2</sup>];

r<sub>i</sub>: distância do eixo de rotação da partícula i[m].

Ou seja, o produto entre a massa e o quadrado da distância do eixo de rotação.

Seguindo este raciocínio podemos usar a equação (60) na equação (61) obtendo:

$$J = \sum \Delta m_i r_i^2 = \sum \rho_i \Delta V_i r_i^2 \quad (62)$$

E quando o volume  $\Delta V_i$  tende a um valor tão infinitamente pequeno a soma resultará em uma integral:

$$J = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \sum \rho_i \Delta V_i r_i^2 = \int \rho r^2 dV \quad (63)$$

E no caso de ser um material com densidade uniforme, podemos fazer  $\rho$  como uma constante levando-o para fora da integral obtendo:

$$J = \rho \int r^2 dV \quad (64)$$

A maioria dos componentes acoplados ao motor a serem calculados seus momentos de inércia são fabricados de ferro, aço, alumínio, plástico, etc., e conseguimos encontrar facilmente suas massas específicas. Para facilitar o cálculo iremos supor que todos estes materiais são fabricados com elementos puros e homogêneos para podermos utilizar as equações anteriores.

Sabendo da equação principal para o cálculo do momento de inércia (equação 64), agora podemos calculá-lo para os principais acoplamentos referentes aos motores de indução trifásicos, o que será feito a seguir.

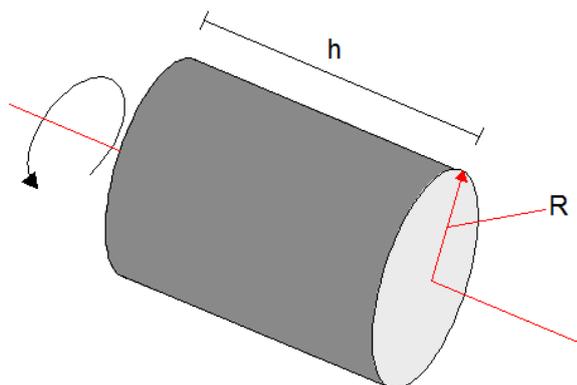
## **4.2.MOMENTO DE INÉRCIA DE COMPONENTES COMUMENTE ACOPLADOS AOS MOTORES**

Nos tópicos a seguir serão demonstrados os momentos de inércia de componentes comumente acoplados aos motores como polias, cilindros, hélices, etc., porém devemos ressaltar que nem sempre esses componentes possuem uma massa considerável que possa fazer diferença na hora da partida do motor, não dificultando praticamente nada sua partida. Sabendo disso podemos na maioria das vezes ignorar os momentos de inércia de componentes muito leves, por exemplo, no dimensionamento de um motor que aciona uma carga de duas toneladas não devemos nos preocupar com o momento de inércia de uma engrenagem de cinco quilos, mas por outro lado, devemos nos preocupar com o momento de inércia de um cilindro acoplado ao motor de trezentos quilos.

### **4.2.1. DISCO FINO OU CILINDRO, AMBOS MACIÇOS.**

O cálculo de discos finos ou cilindros maciços servem para descobrir o momento de inércia de elementos semelhantes a estes comumente acoplados aos motores, como cilindros para transportadores, engrenagens, polias, etc., entre outros elementos que podem ser considerados semelhantes pelo responsável pelo dimensionamento.

Na Figura 16 podemos observar o elemento que terá o seu momento de inércia calculado e lembrando que um disco nada mais é que um cilindro de pequena altura.



### Figura 16 – Cilindro ou disco maciço

Onde:

R: raio do objeto [m];

h: altura do objeto [m].

Escolhemos como elemento de volume uma casca cilíndrica de altura h, circunferência  $2\pi r$  e espessura infinitesimal  $dr$ . Assim temos que:

$$dV = h2\pi r dr \quad (65)$$

Substituindo a equação (65) na equação (64) obtemos:

$$J = \rho \int_0^R r^3 h2\pi dr = \rho h2\pi \int_0^R r^3 dr = \frac{\rho h2\pi R^4}{4}$$

$$J = \frac{\rho h\pi R^4}{2} \quad (66)$$

Sabendo que a massa do círculo formado é:

$$m = \rho V = \rho h\pi R^2 \quad (67)$$

Então temos que:

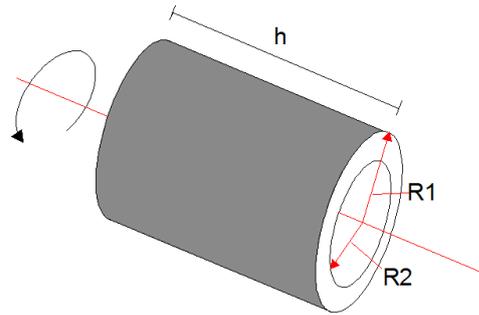
$$J = \frac{\rho h\pi R^4}{2} = \frac{\rho h\pi R^2 R^2}{2}$$

$$J = \frac{mR^2}{2} \quad (68)$$

#### 4.2.2. DISCO OU CILINDRO, AMBOS OCOS.

O cálculo de discos ou cilindros ocos serve para descobrir o momento de inércia de elementos semelhantes a estes comumente acoplados aos motores, como cilindros para transportadores, engrenagens, polias, etc., que podem ser maciços, mas como também, neste caso, ocos, entre outros elementos que podem ser considerados semelhantes pelo responsável pelo dimensionamento.

Na Figura 17 podemos observar o elemento a ser calculado seu momento de inércia.



**Figura 17 – Cilindro ou disco oco**

Onde:

R1: raio superior do objeto [m];

R2: raio inferior do objeto [m].

Para o cálculo deste momento de inércia podemos utilizar a mesma ideia do tópico anterior mudando apenas alguns detalhes.

O volume  $dV$  é idêntico à equação (65) e na equação (64) agora integramos de R2 até R1 como é visto abaixo:

$$J = \frac{\rho h 2\pi (R1^4 - R2^4)}{4} \quad (69)$$

$$J = \frac{\rho h \pi (R1^2 - R2^2)(R1^2 + R2^2)}{2} \quad (70)$$

Sabendo que sua massa agora é:

$$m = \rho h \pi (R1^2 - R2^2) \quad (71)$$

Podemos unir as equações 70 e 71:

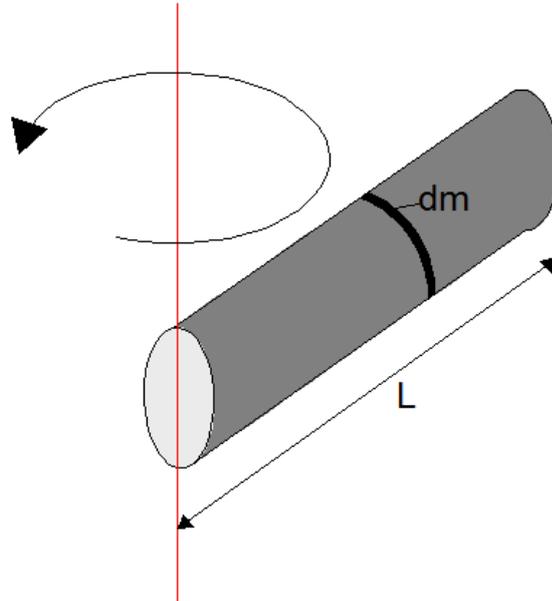
$$J = \frac{m(R1^2 + R2^2)}{2} \quad (72)$$

#### **4.2.3. BARRA FINA EM TORNO DE UMA LINHA PERPENDICULAR QUE PASSA PELA SUA EXTREMIDADE**

O cálculo de barras serve para descobrir o momento de inércia de elementos semelhantes a estes comumente acoplados aos motores, como hélices de ventiladores e centrífugas, entre

outros elementos que podem ser considerados semelhantes pelo responsável pelo dimensionamento.

Na Figura 18 podemos observar o elemento que será calculado o momento de inércia.



**Figura 18 – Barra fina em torno de uma linha perpendicular que passa pela sua extremidade**

Onde:

L: comprimento da barra [m];

dm: pequena parte dimensional [m].

Neste caso temos que:

$$dm = \frac{m}{L} dx \quad (73)$$

$$J = \int_0^L x^2 \frac{m}{L} dx = \frac{mL^2}{3} \quad (74)$$

#### **4.2.4. DEMAIS COMPONENTES QUE PODEM SER OBSERVADOS EM ACOPLAMENTOS**

Os momentos de inércia calculados até agora são os mais utilizados no dimensionamento do motor, mas pode haver outros componentes que requeremos seus momentos de inércia, como esferas, chapas, etc. No apêndice, no final do trabalho, podemos

observar as equações de alguns momentos de inércia adicionais que também podem servir para o dimensionamento, caso seja necessário.

### **4.3.MOMENTO DE INÉRCIA DO MOTOR**

Os momentos de inércia dos motores são dados pelo fabricante, pois eles devem seguir a norma NBR 7094 (Máquinas elétricas girantes – Motores de indução) que fornecem a tabela informando o momento de inércia que cada motor deverá ter em relação a sua potência. Abaixo podemos verificar na Tabela 2 alguns momentos de inércia de motores em função da potência e da quantidade de polos:

**Tabela 2 - Momentos de inércia externos (J) para as potências normalizadas (Parte da tabela 3, NBR 7094, 2003)**

Potência nominal		Número de polos			
KW	cv	2	4	6	8
		J Kgm <sup>2</sup>	J Kgm <sup>2</sup>	J Kgm <sup>2</sup>	J Kgm <sup>2</sup>
0,18	1/4	0,008	0,048	0,133	0,273
0,25	1/3	0,011	0,064	0,179	0,367
0,37	1/2	0,016	0,092	0,255	0,523
0,55	3/4	0,023	0,132	0,364	0,747
0,75	1	0,031	0,175	0,481	0,988
1,1	1,5	0,044	0,247	0,679	1,39
1,5	2	0,058	0,326	0,898	1,84
2,2	3	0,081	0,46	1,27	2,6
3	4	0,108	0,608	1,68	3,44
3,7	5	0,13	0,735	2,02	4,16
4,5	6	0,155	0,876	2,41	4,95
5,5	7,5	0,186	1,05	2,89	5,94
7,5	10	0,242	1,37	3,78	7,75
9,2	12,5	0,295	1,67	4,59	9,43
11	15	0,346	1,96	5,4	11,1
15	20	0,458	2,59	7,13	14,6
18,5	25	0,553	3,13	8,62	17,7
22	30	0,646	3,65	10,1	20,7
30	40	0,854	4,83	13,3	27,3

Ainda de acordo com NBR 7094 (2003) podemos dizer que a equação que define o valor do momento de inércia do motor em função da sua potência e quantidade de polos é:

$$J = 0,04 \cdot Pn^{0,9} \cdot p^{2,5} \quad (75)$$

Onde:

p: número de par de polos;

Pn: potência nominal do motor [KW].

#### 4.4. MOMENTOS DE INÉRCIA DE MASSAS EXTERNAS

Sempre que fazemos o cálculo do momento de inércia de um conjunto devemos fazer o cálculo primeiramente da carga, depois dos componentes de massa mais significativa presentes no conjunto de transmissão, caso exista, e depois finalmente somarmos com o momento de inércia do motor.

De acordo com SEW (2007) a equação que define o momento de inércia de cargas movimentadas linearmente é:

$$J = 91,2. m. \left(\frac{n1}{N3}\right)^2 \quad (76)$$

Referenciando n1 e N3 em função de n2 temos que:

$$n2 = \left(\frac{n1}{2. \pi. r}\right)$$

$$n2 = \left(\frac{N3}{60}\right) \quad (77)$$

$$J = 91,2. m. \left(\frac{n2.2. \pi. r}{n2.60}\right)^2 = 91,2. m. \left(\frac{2. \pi. r}{60}\right)^2 = 91,2. m. \left(\frac{1}{91,2}\right). r^2$$

$$J = m. r^2 \quad (78)$$

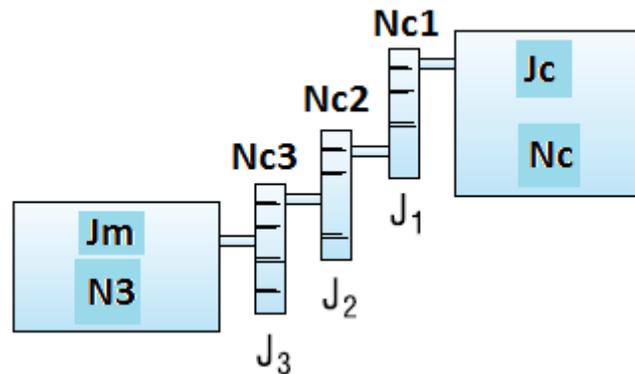
Assim podemos perceber que no caso de calcularmos o momento de inércia de cargas externas em movimento linear utilizaremos a equação básica do momento de inércia.

Caso seja necessário calcular o momento de inércia de outras cargas podemos utilizar as equações mostradas anteriormente ou então utilizar o momento de inércia que já vem especificado de fábrica, em alguns tipos de carga, por exemplo, uma bomba que enche um tanque com água é acionada por um motor de certa potência, neste caso o momento de inércia total é composto do momento de inércia da bomba, que pode vir especificado de fábrica, ou então, calculado a partir das hélices da bomba, somado com o momento de inércia do motor que já é dado, já no caso de um ventilador teremos a mesma maneira, seria a soma do momento de inércia do motor com o momento de inércia das hélices do ventilador.

#### 4.5.ASPECTOS RELEVANTES SOBRE O MOMENTO DE INÉRCIA

O cálculo do momento de inércia é um dos principais tópicos na hora do dimensionamento, pois influi diretamente no cálculo do tempo de aceleração como veremos adiante.

A principal preocupação que temos ao final do cálculo do momento de inércia é saber como vamos utilizá-lo, como é muito comum a presença de redutores e multiplicadores nos motores, prezando a redução ou aumento da velocidade da carga e conseqüente mudança de conjugado, devemos modificar de certa forma este momento de inércia, pois com a presença deste elemento o novo momento chamado de “Momento de inércia da carga referida ao eixo do motor” é oriundo do produto do quadrado da razão entre a velocidade da carga e da velocidade do motor, e do momento de inércia inicialmente calculado como podemos ver abaixo na Figura 19, e a equação correspondente.



**Figura 19 – Momento de inércia em velocidades diferentes (WEG, 2009)**

De acordo com WEG (2009) temos que:

$$J_{ce} = J_c \cdot \left(\frac{N_c}{N_3}\right)^2 + J_1 \cdot \left(\frac{N_{c1}}{N_3}\right)^2 + J_2 \cdot \left(\frac{N_{c2}}{N_3}\right)^2 + J_3 \cdot \left(\frac{N_{c3}}{N_3}\right)^2 \quad (79)$$

Onde:

$N_{ci}$  (i=1,2,3): velocidade do acoplamento i [rpm];

$J_c$ : momento de inércia da carga [Kg.m<sup>2</sup>];

$J_{ci}$  (i=1,2,3): momento de inércia do acoplamento i [Kg.m<sup>2</sup>].

E o momento de inércia total será:

$$J_t = J_m + J_{ce} \quad (80)$$

Onde:

$J_{ce}$ : momento de inércia da carga referida ao eixo do motor [Kg.m<sup>2</sup>];

$J_m$ : momento de inércia do motor [Kg.m<sup>2</sup>];

$J_t$ : momento de inércia total [Kg.m<sup>2</sup>].

Podemos perceber que no caso de conjugado resistente médio da carga a relação que se tem com a transmissão é a simples multiplicação de um pelo outro, já no caso do momento de inércia, eles se relacionam multiplicando o momento de inércia da carga pelo quadrado da razão entre as diferentes velocidades.

## 5. TEMPO DE ACELERAÇÃO

Depois de especificar as características e equações dos conjugados da carga e do motor, de demonstrar as equações resultantes dos momentos de inércias dos principais componentes acoplados aos motores, chegamos finalmente ao propósito principal do trabalho que é relacionar todas essas informações com o tempo de aceleração do motor.

O tempo de aceleração nada mais é do que o tempo que o motor gasta para sair do seu estado estático (parado) até chegar à velocidade nominal, específica de cada motor em função de sua quantidade de polos, frequência e escorregamento.

De acordo com Pazzini (2002) a equação do tempo de aceleração pode ser demonstrada de dois métodos diferentes, pelo método da integração gráfica e pelo método dos conjugados médios. Como estamos fazendo análises de conjugados médios neste trabalho, iremos seguir o método dos conjugados médios.

A equação que relaciona o conjugado de aceleração, momento de inércia e a aceleração angular é:

$$C_{med} - C_{rmed} = C_a = Jt \cdot \frac{dw_1}{dta} \quad (81)$$

Explicitando  $dta$ , podemos obter:

$$dta = \frac{Jt \cdot dw_1}{C_a} \quad (82)$$

Como o intuito é descobrir o tempo do momento inicial, velocidade zero, até o momento final, velocidade nominal, podemos integrar  $w_1$ , de 0 até  $w$ , com isso temos que:

$$\int dta = Jt \int_0^{w_n} \frac{dw_1}{C_a}$$

Como já desenvolvemos uma equação para o conjugado de aceleração, podemos também considerá-lo uma constante e retirá-lo da integral, assim obtemos que:

$$ta = Jt \int_0^{w_n} \frac{dw_1}{C_a} \rightarrow ta = \frac{Jt}{C_a} \cdot \int_0^{w_n} dw_1 \rightarrow ta = \frac{Jt \cdot w_n}{C_a}$$

Utilizando as equações 11, 55 e 80 obtemos:

$$t_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot n^2 \cdot (J_{ce} + J_m)}{C_{mmed} - C_{rmed}} \quad [s] \quad (83)$$

Onde:

$t_a$ : tempo de aceleração [s].

Por exemplo, um motor que tem seu tempo de aceleração de seis segundos, significa que neste período ele consegue sair do repouso e levar sua carga à rotação nominal.

Agora sabendo da equação do tempo de aceleração a nossa próxima preocupação é saber se esse tempo encontrado é adequado ou não, podendo levar a um sobreaquecimento e possível danificação do motor, e para isso teremos que analisar as classes de isolamento dos motores e seu tempo de rotor bloqueado, para posterior comparação, o que veremos a seguir.

## 6. CLASSES DE ISOLAMENTO

Como já mencionado algumas vezes neste trabalho, uma das principais preocupações que devemos ter em relação aos motores elétricos é sua temperatura de operação, cada motor possui um tipo de classe de isolamento que nada mais é que um tipo diferente de isolante em seus enrolamentos (ou a quantidade dele), esses isolantes servem, como o próprio nome diz, para isolar os fios um dos outros das bobinas, no caso dos motores gaiola, da bobina do estator.

KCEL (2010) mostra que se um motor funciona sempre em sua temperatura nominal, ou seja, não sofre sobrecargas, e trabalha em condições ideais de clima, ou seja, em altitudes menores que 1000 metros, temperaturas ambientes menores que 40 graus Celsius e não sofre por meio de ambientes agressivos ou vibrações excessivas, este motor envelhece tão devagar que sua vida é considerada quase infinita, isso mostra que com a conservação de seu material isolante podemos prolongar sua vida.

KCEL (2010) demonstra em uma tabela de forma resumida as classes de isolamento referidas na norma NBR 7094, podemos observá-las na Tabela 3.

**Tabela 3 - Temperatura admissível para cada classe de isolamento (KCEL, 2010).**

Temperatura	Classe de Isolamento				
	A	E	B	F	H
TA (°C)	40	40	40	40	40
$\Delta T$ (°C)	60	75	80	105	125
$\alpha t$ (°C)	5	5	10	10	15
Total (°C)	105	120	130	155	180

Onde:

TA: temperatura ambiente [°C];

$\Delta T$ : elevação de temperatura [°C];

$\alpha t$ : diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média [°C];

Total: temperatura do ponto mais quente [°C].

## 7. TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO

Quando o motor está em operação, funcionando em suas condições nominais e de certa maneira algo trave o rotor do motor, de um modo que sua velocidade decaia até certo ponto que ele fique imóvel, causado, por exemplo, por uma carga extremamente demasiada em seu eixo ultrapassando sua capacidade. O período desde o início do travamento até o momento em que a isolação do motor não agüente mais a altíssima temperatura (ou então o rotor não agüente a temperatura), causando a degradação e possível queima do motor, ou atuação de sistema de proteção, se houver, devido ao grande aumento da corrente por longo período, é chamado de tempo de rotor bloqueado, ou seja, o tempo que o motor suporta ficar com seu rotor travado requisitando a corrente de partida sem ocasionar a queima, sendo alimentado em condições nominais. Esta situação de travamento do rotor também pode ocorrer durante a partida quando o motor precisa acionar uma carga maior que aquela que ele consegue originando um conjugado de aceleração nulo ou negativo.

Quando o motor está partindo, ele sofre variados processos para vencer tanto seu momento de inércia quanto o da carga, o maior problema é a grande corrente elétrica requisitada da rede de energia elétrica, nesse período em que ele requisita toda essa corrente elétrica, chamada de corrente de partida, ele sofre um sobreaquecimento. Esse período de partida é usualmente comparado com o tempo de rotor bloqueado, pois quando o motor parte de certa forma ele está bloqueado pela sua própria massa como também pela massa da sua carga. Vejamos que é apenas uma comparação, não podemos dizer que são a mesma coisa, pois o motor suporta mais o tempo de aceleração que o tempo de rotor bloqueado, sendo que no caso do tempo de aceleração à medida que o tempo passa e a carga passa a se movimentar é cada vez menor o conjugado requerido e cada vez menor a corrente requisita e já no caso do rotor bloqueado a todo instante o rotor está requerendo altos conjugados e altas correntes. Essa comparação é usualmente feita para verificar se o motor não vai aquecer além do máximo permitido na hora da partida.

O tempo de rotor bloqueado é dado pelo fabricante, pois eles executam todo um cálculo levando em conta a potência, a classe de isolamento, graus de proteção, etc., dos motores e estipulam um período máximo de rotor bloqueado para cada tipo de motor. A principal responsabilidade do responsável pelo dimensionamento é fazer a comparação entre este período e o tempo de aceleração.

De acordo com Pereira (2007) o tempo ideal de aceleração do motor é não superar a 80% do tempo de rotor bloqueado, isso significaria os problemas já anteriormente citados.

$$t_a < 0,8 \cdot Trb \quad (84)$$

Onde:

$Trb$ : tempo de rotor bloqueado [s].

Da mesma maneira que o conjugado médio do motor sofre alterações de acordo com a tensão aplicada ao motor, o tempo de rotor bloqueado também sofre algumas mudanças, pois havendo uma tensão diferente no motor o seu isolamento se comporta de maneira diferente, aguentando mais ou menos tempo. De acordo com Assunção et. al. (2009) o tempo de rotor bloqueado com tensão diferente da nominal é visto como:

$$Trb' = Trb \cdot \left( \frac{Vn}{Vd} \right)^2 \quad (85)$$

Onde:

$Trb'$ : tempo de rotor bloqueado com tensão diferente da nominal [s].

## 8. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 8.1. EXEMPLO DE TALHA COM PARTIDA EM TENSÃO NOMINAL

Em uma talha que eleva uma carga nominal de 1 tonelada, a uma velocidade constante de 0,4 m/s, rendimento da carga  $\eta_c=0,95$ , rendimento do redutor  $\eta_r=0,80$ , raio do cilindro maciço com 0,20 m, massa do cilindro 200 Kg, com regime de operação contínuo S1. Abaixo podemos especificar a potência do motor.

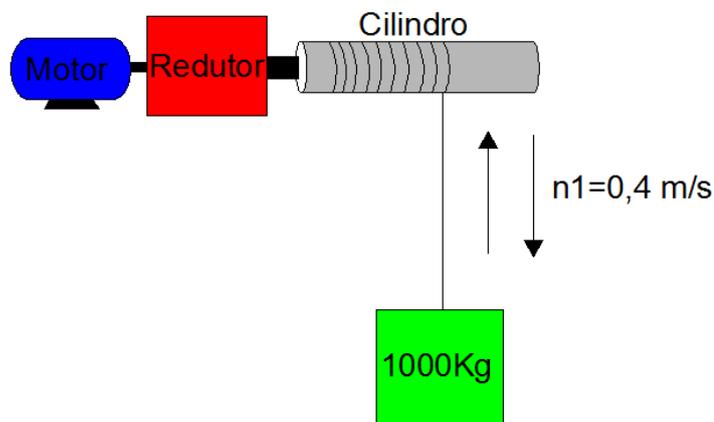


Figura 20 – Exemplo de talha

Inicialmente encontramos sua potência com o uso da equação (19) e como a velocidade é constante desprezaremos a potência dinâmica:

$$P_{mec} = \frac{F_p \cdot n_1}{\eta_r \cdot \eta_c} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,4}{0,95 \cdot 0,80} = 5,16 \text{ KW}$$

Agora podemos especificar uma potência imediatamente superior. Olhando no catálogo WEG, adotamos um moto freio, 5,5 KW, 880 rpm, classe de isolamento F, categoria N, freio com pastilhas, com momento de inércia 0,14364 Kgm<sup>2</sup> e tempo de rotor bloqueado de 36 s.

Para encontrarmos a velocidade angular da carga usamos a equação (11):

$$w = n_2 \cdot 2 \cdot \pi = \frac{n_1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{n_1}{r} = \frac{0,4}{0,2} = 2 \text{ rad/s}$$

Já a velocidade do motor tem velocidade angular (multiplicando sua velocidade rps por  $2\pi$ ):

$$\frac{880}{60} \cdot 2 \cdot \pi = 92,15 \text{ rad/s}$$

A relação entre essas duas velocidades nos permite calcular a redução, assim temos que:

$$\frac{2}{92,15} = 0,02170$$

De acordo com a equação (48) sabemos que no caso de talhas o conjugado resistente médio pode ser visto como:

$$Cr_{med} = Cr$$

Então podemos utilizar a potência anteriormente calculada e conseguirmos o conjugado resistente nominal da carga dividindo a potência nominal da carga por sua velocidade angular, assim temos que:

$$Cr = Cr_{med} = \frac{P_{mec}}{w} = \frac{5,16 \cdot 10^3}{2} = 2580 \text{ N.m}$$

O passo seguinte é referirmos o conjugado encontrado com a relação de transmissão de acordo com a equação (54):

$$Cr_{med} = 2580 \cdot 0,02170 = 55,98 \text{ N.m}$$

Agora o objetivo é encontrar o conjugado médio do motor a partir da equação (56). Como estamos utilizando um motor de categoria N temos que:

$$C_{mmed} = 0,45 \cdot \left( \frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{max}}{C_n} \right) \cdot C_n = 0,45 \cdot (2,2 + 2,6) \cdot 59,74 = 129,03 \text{ N.m}$$

A partir da equação (55) temos que o conjugado de aceleração é:

$$C_a = C_{mmed} - Cr_{med} = 129,03 - 55,98 = 73,05 \text{ N.m}$$

O próximo passo é encontrarmos os momentos de inércia da carga e do acoplamento e somarmos com o do motor. Inicialmente encontraremos o momento de inércia da carga e do cilindro, então temos:

$$Jc = m \cdot r^2 = 1000 \cdot 0,2^2 = 40 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \text{ (Equação 78)}$$

$$Jr = \frac{m \cdot r^2}{2} = \frac{200 \cdot 0,2^2}{2} = 4 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \text{ (Equação 68)}$$

O próximo passo é referirmos estes momentos de inércia com a velocidade do motor e em seguida somar ao momento de inércia do motor consequentemente obtendo o valor total do momento de inércia do sistema todo (a partir das equações 79 e 80):

$$Jt = Jm + Jce = 0,14364 + 40 \cdot 0,02170^2 + 4 \cdot 0,02170^2 = 0,1643 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Agora finalizando o processo podemos calcular o tempo de aceleração a partir da equação (83):

$$ta = \frac{wn \cdot Jt}{Ca} = \frac{92,15 \cdot 0,1643}{73,05} = 0,20 \text{ s}$$

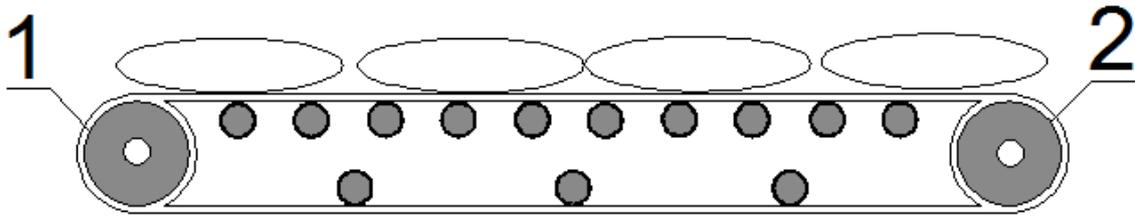
Como no catálogo do motor, temos que o tempo máximo com rotor bloqueado é de 36 segundos podemos perceber claramente que o tempo de partida do motor adotado é bastante compatível, pois é inferior a 80 % do tempo de rotor bloqueado. Para o pior caso podemos analisar:

$$36 \cdot 0,8 = 28,8 \text{ s}$$

$$0,20 \text{ s} < 28,8 \text{ s} \text{ (Equação 84)}$$

## **8.2.EXEMPLO DE TRANSPORTADOR COM PARTIDA EM TENSÃO DIFERENTE DA NOMINAL**

Imaginemos uma esteira rolante situada em uma fábrica de rações caninas, com conjugado resistente nominal da carga de 4300 Nm, momento de inércia da carga com 88 Kgm<sup>2</sup>. O conjunto é composto da correia que sustenta e movimenta os sacos, de dois cilindros parcialmente ociosos de massa 200 Kg cada um, com 20 cm de raio superior e 10 cm de raio inferior, responsáveis por girar a esteira, e também por outros 13 pequenos cilindros maciços de 5 Kg de massa cada, responsáveis por auxiliar a esteira. O proprietário da fábrica deseja que a esteira tenha 0,6 m/s de velocidade constante. O rendimento da carga é 0,8 e da transmissão é 0,9. A tensão de linha da indústria é 220 V. Regime de operação S1.



**Figura 21 – Exemplo de esteira rolante**

Sabendo que a carga precisa se movimentar a 0,6 m/s podemos antes de tudo especificar quanto será a velocidade angular da carga (equação 11), assim temos que:

$$w = n2 \cdot 2 \cdot \pi = \frac{n1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{n1}{r} = \frac{0,6}{0,2} = 3 \text{ rad/s}$$

Agora podemos encontrar facilmente a potência mecânica utilizando a equação (12), e claro, considerando os rendimentos impostos:

$$P_{mec} = \frac{4300 \cdot 3}{0,8 \cdot 0,9} = 17,9 \text{ KW}$$

Assim adotamos um motor de 18,5 KW, WEG, 875 rpm, 220 V, categoria N, classe de isolamento F, momento de inércia de 0,3686 Kgm<sup>2</sup>. Assim a velocidade angular do motor é:

$$\frac{875}{60} \cdot 2 \cdot \pi = 91,62 \text{ rad/s}$$

E a redução fica sendo a velocidade angular da carga dividida pela velocidade angular do motor, assim obtemos:

$$\frac{3}{91,62} = 0,03274$$

Como o momento de inércia da carga é dado, o próximo passo é calcularmos os momentos de inércia internos ao processo, no caso, dos dois cilindros de 200 Kg de massa cada, os cilindros de menor massa desprezaremos seus momentos de inércia por serem desprezíveis comparados às massas dos rolos e das cargas. Para o cálculo do momento de inércia dos rolos utilizaremos a equação (72), cilindros ocios, assim temos que o momento de inércia de cada rolo é:

$$J_r = \frac{m(R1^2 + R2^2)}{2} = \frac{200(0,2^2 + 0,1^2)}{2} = 5 \text{ [Kg. m}^2\text{]}$$

Continuando devemos referenciá-los à velocidade do motor, então temos que:

$$J_{ce} = 88 \cdot 0,03274^2 + 2 \cdot 5 \cdot 0,03274^2 = 0,1050 \text{ [Kg.m}^2\text{]} \text{ (Equação 79)}$$

Para finalizarmos, somamos o momento de inércia da carga referido ao eixo do motor, calculada acima, com o momento de inércia do motor, podemos dizer que o momento de inércia total então vale:

$$J_t = J_{ce} + J_m = 0,1050 + 0,3686 = 0,4736 \text{ [Kg.m}^2\text{]} \text{ (Equação 80)}$$

O próximo passo é encontrarmos o conjugado resistente médio da carga e sabendo que no caso de transportadores contínuos o conjugado resistente médio pode ser visto como:

$$C_{rmed} = C_r \text{ (Equação 48)}$$

Temos que:

$$C_{rmed} = 4300$$

O passo seguinte é referirmos o conjugado encontrado com a relação de transmissão:

$$C_{rmed} = 4300 \cdot 0,03274 = 140,78 \text{ N.m} \text{ (Equação 54)}$$

Agora o objetivo é encontrar o conjugado médio do motor. Utilizando a equação do conjugado médio do motor de categoria N (equação 56) e utilizando dados da tabela do motor temos que:

$$C_{mmed} = 0,45 \cdot \left( \frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{max}}{C_n} \right) \cdot C_n = 0,45 \cdot (1,7 + 1,8) \cdot 202,08 = 318,276 \text{ N.m}$$

Com isso temos que o conjugado de aceleração é:

$$C_a = C_{mmed} - C_{rmed} = 318,276 - 140,78 = 177,496 \text{ N.m} \text{ (Equação 55)}$$

Mas então o electricista que foi mandado para a instalação do motor lembrou se que como era um motor de 18,5 KW (25 cv) ele não poderia partir o motor com tensão nominal e sim teria que efetuar uma partida com redução da tensão para consequentemente diminuir a corrente de partida. A partir daí a primeira partida em mente foi a partida estrela-triângulo, então ele lembrou se que assim haveria redução do conjugado médio do motor e utilizou as equações 58 e 59, assim obtendo:

$$Cp' = 202,08 \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{2,2} = 102,59 \text{ (Equação 58)}$$

$$Cmax' = 202,08 \cdot 1,8 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 = 121,25 \text{ (Equação 59)}$$

$$Cmmed = 0,45 \cdot (102,59 + 121,25) = 100,73 \text{ N.m (Equação 56)}$$

Assim o conjugado de aceleração ficou sendo:

$$Ca = Cmmed - Crmed = 100,73 - 140,78 = -40,05 \text{ N.m (Equação 55)}$$

Quando ele encontrou este conjugado negativo percebeu que com a partida estrela triângulo o motor não partiria, pois o conjugado de aceleração estava negativo, neste caso o motor ficaria travado e não conseguiria efetuar a partida. A sua ideia seguinte foi trocar por um motor com a mesma potência, mas de categoria D, com conjugado de partida 3,2 vezes o conjugado nominal, assim o conjugado médio do motor ficou sendo:

$$Cp' = 202,08 \cdot 3,2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{2,2} = 193,12 \text{ (Equação 58)}$$

$$Cmmed = 0,60 \cdot (193,12) = 115,87 \text{ N.m (Equação 57)}$$

$$Ca = Cmmed - Crmed = 115,87 - 140,78 = -24,91 \text{ N.m (Equação 55)}$$

Vendo que mesmo assim o conjugado de aceleração continuava negativo decidiu ligar para o engenheiro eletricista responsável da empresa que ao chegar logo viu o erro básico que o eletricista havia cometido, pois a partida estrela triângulo não é ideal para partidas com carga. Sua atitude foi mudar para uma partida com autotransformador com tap de 80 % e manteve o motor de categoria N, assim os novos conjugados de partida ficaram sendo:

$$Cp' = 202,08 \cdot 1,7 \cdot (0,8)^{2,2} = 219,86 \text{ (Equação 58)}$$

$$Cmax' = 202,08 \cdot 1,8 \cdot (0,8)^2 = 232,8 \text{ (Equação 59)}$$

$$Cmmed = 0,45 \cdot (219,86 + 232,8) = 203,69 \text{ N.m (Equação 56)}$$

E assim o conjugado de aceleração para o caso de autotransformador fica sendo:

$$Ca = Cmmed - Crmed = 203,69 - 140,78 = 62,91 \text{ N.m (Equação 55)}$$

E o tempo de aceleração fica:

$$t_a = \frac{wn \cdot Jt}{Ca} = \frac{91,62 \cdot 0,4736}{62,91} = 0,69 \text{ s (Equação 83)}$$

Olhando novamente no catálogo do motor vemos que seu tempo de rotor bloqueado é 23 segundos, e como a tensão é reduzida podemos analisar o novo tempo de rotor bloqueado a partir da equação (85):

$$Trb' = Trb \cdot \left(\frac{Vn}{Vd}\right)^2 = 23 \cdot \left(\frac{1}{0,8}\right)^2 = 35,9 \text{ s (Equação 85)}$$

Com isso temos que o motor escolhido é ideal, pois seu tempo de partida é inferior ao tempo de rotor bloqueado:

$$35,9 \cdot 0,8 = 28,72 \text{ s}$$

$$0,69 \text{ s} < 28,72 \text{ s (Equação 84)}$$

### 8.3.EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE BOMBA CENTRÍFUGA COM VELOCIDADE DIFERENTE DA NOMINAL

O proprietário de uma fábrica de bebidas contratou seu engenheiro para dimensionar uma bomba para encher de água um tanque a uma altura de 10 metros em relação ao piso, com uma vazão de 0,02 m<sup>3</sup>/s (20 litros por segundo). Ele precisa dimensionar a bomba e depois um motor para movimentá-la. Sabendo que a massa específica da água é 1000 Kg/m<sup>3</sup>. Regime de operação S1.

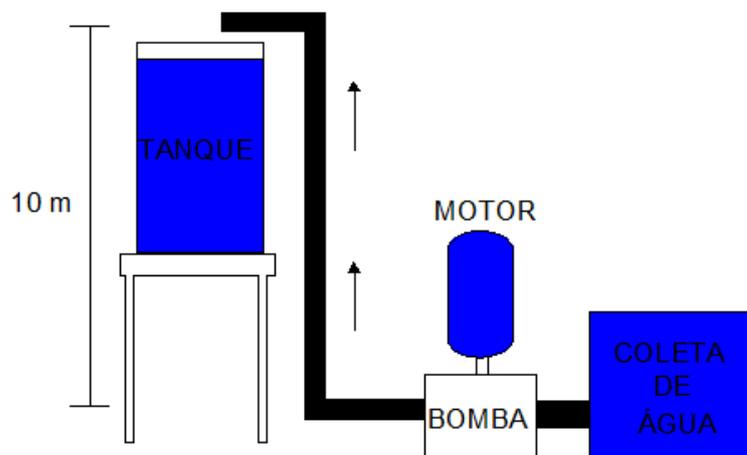


Figura 22 – Exemplo de tanque abastecido por bomba centrífuga

O primeiro passo é descobrir a potência necessária pela bomba a partir da equação (34):

$$P_{mec} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H}{\eta t} = 0,02 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 10 = 1,962 \text{ KW}$$

Foi adotada uma bomba centrífuga de 2500 W, rendimento de 0,8, 1750 rpm (183,25 rad/s), conjugado resistente nominal  $C_r$  de 13,64 Nm, conjugado de atrito  $C_o$  de 1,3 Nm, momento de inércia de 0,4123, assim sua potência útil é de:

$$2500 \cdot 0,8 = 2 \text{ KW}$$

Ou seja, ela atende bem a demanda. Esta foi acoplada a um motor de 3 KW, 860 rpm (90,05 rad/s), categoria N, momento de inércia de 0,0838 Kgm<sup>2</sup> e tempo de rotor bloqueado de 32 segundos. Este motor foi comprado pelo gerente de compras da fábrica, que comprou um motor com velocidade menor que estava na promoção e pensou que não haveria problema de ser imposta uma velocidade menor, mas, ao operar a bomba, percebeu-se que esta estava trabalhando bem menos que aquilo que se esperava, demorando bastante tempo para encher o tanque.

A primeira análise que precisamos fazer é que a bomba centrífuga tem característica parabólica, então podemos isolar seu conjugado útil nominal e mais especificamente, encontrarmos o  $K_c$  (constante que depende da carga), para posteriormente sabermos com qual conjugado a bomba está trabalhando com esta velocidade reduzida. Assim a partir da equação (24) podemos obter:

$$13,64 = 1,3 + K_c \cdot 183,25^2$$

$$K_c = 0,000367$$

Agora podemos conferir qual o conjugado resistente que a bomba está desenvolvendo com esta velocidade reduzida, assim temos que:

$$C_r = 1,3 + 0,000367 \cdot 90,05^2 = 4,27 \text{ Nm}$$

Podemos ver claramente que com o acoplamento de um motor com velocidade reduzida a bomba está operando com um conjugado muito menor que o nominal de fábrica, assim como sua potência está menor que a nominal:

$$P_{mec} = 4,27 \cdot 90,05 = 384,51 \text{ W (Equação 25)}$$

$$\frac{384,51}{2000} = 0,192$$

Ou seja, podemos perceber que essa redução da velocidade fez com que a bomba operasse com apenas 19 % de sua potência nominal útil. A partir daí o engenheiro responsável acoplou um multiplicador de velocidade ao motor de relação 2, com 0,8 de rendimento, e a velocidade da bomba ficou sendo:

$$860 \cdot 2 = 1720 [rpm] = 180,11 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

E agora, o conjugado que a bomba está executando é igual a:

$$Cr = 1,3 + 0,000367 \cdot 180,11^2 = 13,2 \text{ Nm (Equação 24)}$$

E a potência que ele requer do motor é igual a:

$$P_{mec} = \frac{13,2 \cdot 180,11}{0,8} = 2,97 \text{ KW}$$

Ou seja, neste caso o motor irá conseguir fornecer potência necessária à bomba, falta saber se este conseguirá partir, calculando seu tempo de aceleração, mas antes vamos calcular o momento de inércia total:

$$J_t = 0,4123 \cdot \left( \frac{180,11}{90,05} \right)^2 + 0,0838 = 1,73 \text{ (Equações 79 e 80)}$$

Em seguida podemos verificar qual é o conjugado médio da carga e o conjugado médio do motor:

$$C_{rmed} = \frac{(2 \cdot C_o + C_r)}{3} = \frac{(2 \cdot 1,3 + 13,2)}{3} = 5,26 \text{ Nm (Equação 50)}$$

$$C_{rmed} = 5,26 \cdot 2 = 10,52 \text{ N.m (Equação 54)}$$

$$C_{mmed} = 0,45 \cdot (2,45 + 2,7) \cdot 33,35 = 77,29 \text{ N.m (Equação 56)}$$

E agora sim o tempo de aceleração:

$$t_a = \frac{\omega_n \cdot J_t}{C_a} = \frac{90,05 \cdot 1,73}{77,29 - 10,52} = 2,33 \text{ s (Equação 83)}$$

Sendo assim temos que:

$$32 \cdot 0,8 = 25,6 \text{ s}$$

$$2,33 \text{ s} < 25,6 \text{ s} \text{ (Equação 84)}$$

Assim temos que o engenheiro conseguiu resolver o problema. Pois o motor foi bem dimensionado e o multiplicador conseguiu fazer seu serviço.

## 9. CONCLUSÃO

O método da escolha do motor a partir do tempo de aceleração pode ser feito seguindo os seguintes passos:

1. Definição do tipo de carga a ser acionada;
2. Obtenção da potência mecânica da carga e respectivo conjugado resistente nominal;
3. Adoção do motor que é imediatamente superior à potência mecânica e análise de seu catálogo;
4. Definição do tipo de conjugado da carga (constante, linear, parabólico,...);
5. Definição da velocidade da carga e do motor;
6. Definição da transmissão;
7. Definição do conjugado médio da carga e referi-lo à relação de transmissão;
8. Definição do conjugado médio do motor levando em conta a existência de uma possível partida com tensão diferente da nominal;
9. Definição do conjugado de aceleração;
10. Definição dos momentos de inércia da carga, do motor e de componentes da transmissão;
11. Obtenção do tempo de aceleração do motor;
12. Comparação do tempo de aceleração com o tempo de rotor bloqueado;
13. Caso o tempo de aceleração seja igual ou superior a 80% do tempo de rotor bloqueado adotar um motor imediatamente superior e refazer o cálculo.

O critério do tempo de aceleração é bastante utilizado atualmente no dimensionamento de motores elétricos, mesmo sendo um método bastante minucioso ele não leva em conta o regime de operação do motor. De acordo com a norma NBR 7094 que trata de motores elétricos de indução, são especificados dez regimes de operação dos motores, cada um com um regime típico de funcionamento, em cada regime a temperatura do motor se comporta de maneira diferente, pois os regimes consideram a duração dos ciclos de funcionamento e a quantidade de partidas executadas em uma hora. Um motor que é escolhido apenas pelo critério do tempo de aceleração pode ficar subdimensionado sendo que não foi considerada sua quantidade de partidas por hora fazendo com que se essa quantidade for elevada

ocasionará elevação de temperatura do motor fazendo com que haja diminuição de sua vida útil.

Mesmo havendo esse problema no momento da utilização do dimensionamento do motor apenas pelo critério do tempo de aceleração, este tipo de dimensionamento pode ser feito para motores que operam no regime de funcionamento S1, previsto em norma, sendo chamado de contínuo, nesse regime o motor parte e continua em operação por um tempo longo o bastante para deixar sua temperatura no estado nominal, não havendo partidas sucessivas que ocasionam o sobreaquecimento. Mesmo um motor em outro regime não sendo ideal para ser dimensionado apenas pelo critério do tempo de aceleração, no momento de seu dimensionamento, o responsável utilizará este critério como um dos muitos outros adotados atualmente. Outro uso do tempo de aceleração é no momento do dimensionamento de algum sistema de proteção do motor.

Atualmente os catálogos de fabricantes orientam o responsável pelo dimensionamento a levantar os seguintes dados além dos citados anteriormente:

- Sobrecargas ocasionais;
- Regime de operação;
- Características do ambiente como altitude, temperatura, umidade;
- Local de instalação (ao tempo, sujeito a pó,...);
- Corrente equivalente;
- Número permitido de partidas por hora.

Sendo assim podemos concluir que o critério do tempo de aceleração no momento do dimensionamento é muito importante e pode ser utilizado para o dimensionamento de motores que operem em todos os regimes de operação, porém não é ideal que se utilize somente este critério, a não ser que o regime de operação do motor seja o S1.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7094 – **Máquinas elétricas girantes, Motores de indução**, 2003.

ASSUNÇÃO, J. T.; ASSUNÇÃO, T. C. B. N.; MIARELLI, D. A. **Ferramenta didática para a seleção e especificação de motores elétricos**. Recife, PE: 2009. Artigo apresentado ao Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2009/artigos/550.pdf>> Acesso em 30 mai. 2013.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Vector Mechanics for Engineers: Statics**. 4<sup>o</sup> edição. York, Pa, EUA: McGraw-Hill, 1984. 421 p.

EPE. **Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) – 1995-2012**. Disponível em:

<[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Box%20Mercado%20de%20Energia/Consumo%20anual%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20por%20classe%20\(nacional\)%20-%201995-2011.xls](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Box%20Mercado%20de%20Energia/Consumo%20anual%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20por%20classe%20(nacional)%20-%201995-2011.xls)>. Acesso em 30 mai. 2013.

JUNIOR, Norberto Augusto. **Motores trifásicos de indução: Dimensionamento**. São Paulo, SP, n. 42, p. 243-250, 2005. Disponível em: <[ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/243\\_42.pdf](ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/243_42.pdf)>. Acesso em: 02 mar. 2013.

KCEL, Motores e Fios LTDA. **Manual de Motores Elétricos**. Joinville, SC: 2010. 61 p. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/f/f7/Manual\\_de\\_Motores\\_El%C3%A9tricos\\_Kcel.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/f/f7/Manual_de_Motores_El%C3%A9tricos_Kcel.pdf)> Acesso em 30 mai. 2013.

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. **Física - Volume 1**. 1<sup>o</sup> edição. São Paulo, SP: Makron Books, 1999. 626 p.

LIED, Eduardo Borges. **Dimensionamento de sistema de ventilação local exaustora (VLE): estudo de caso de uma indústria de móveis, em ST<sup>a</sup> Terezinha de Itaipu, PR, Brasil**. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Química, UNIOESTE. Toledo, PR: 2011. 11 p. Disponível em: <<http://www.estudostecnologicos.unisinos.br/pdfs/168.pdf>>. Acesso em 31 mai. 2013.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de Máquinas**. 9º edição. Érica, 2009. 376 p.

PAZZINI, Luiz Henrique Alves. **Acionamentos Elétricos**. São Paulo, SP, 2002. 169 p. Disponível em: <[http://www.engonline.fisp.br/3ano/acionamentos\\_eletricos/conteudo.htm](http://www.engonline.fisp.br/3ano/acionamentos_eletricos/conteudo.htm)>. Acesso em: 30 mai. 2013.

PARKER, Automation. **Tecnologia Eletromecânica**. Jacareí, SP: 2003. 60 p. Disponível em: <<http://www.parker.com/literature/Brazil/eletromecanica.pdf>>. Acesso em 30 mai. 2013.

PEREIRA, Luís Alberto. **Seleção e Aplicação de Motores de Indução Standard e de Alto Rendimento**. Porto Alegre, RS: 2007. 19 p. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/15260609/Motores-de-inducao>>. Acesso em 30 mai. 2013.

QUITES, Eduardo Emery Cunha. **Fenômenos de Transportes**. 2003. 66 p. Disponível em: <[http://www.enq.ufsc.br/muller/operacoes\\_unitarias\\_a/Apostilafenomenos.pdf](http://www.enq.ufsc.br/muller/operacoes_unitarias_a/Apostilafenomenos.pdf)>. Acesso em 30 mai. 2013.

SEW, Eurodrive. **Seleção de Acionamentos, Métodos de Cálculo e Exemplos**. Volume 1. Guarulhos, SP: 2007. 157 p. Disponível em: <[http://www.sew-eurodrive.com/download/pdf/BR\\_10523801.pdf](http://www.sew-eurodrive.com/download/pdf/BR_10523801.pdf)>. Acesso em 30 mai. 2013.

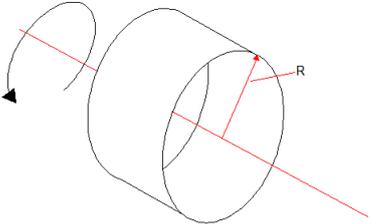
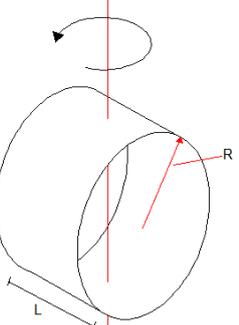
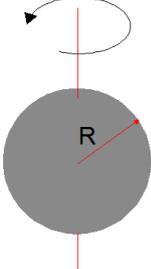
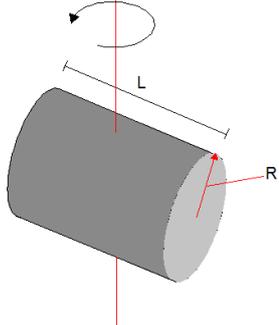
VOGES, Motores. **Manual de Motores Elétricos**. Caxias do Sul, SC: 2011. 126 p. Disponível em: <[http://www.voges.com.br/download.php?path=\\_images/materiais/PDF/PDF\\_128\\_manual.pdf](http://www.voges.com.br/download.php?path=_images/materiais/PDF/PDF_128_manual.pdf)>. Acesso em 30 mai. 2013.

WEG. **Motores Elétricos de Corrente Alternada**. Jaraguá do Sul, SC: 2009. 107 p. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/35118692/WEG-Apostila-Sobre-Motores-Eletricos>>. Acesso em: 01 mai. 2013.

WEG. **W22, Motor Elétrico Trifásico**. Catálogo Técnico. Jaraguá do Sul, SC: 2012. 52 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em 30 mai. 2013.

WEG, Centro de Treinamento de Clientes. **Seleção e aplicação de motores elétricos**. 2010. 70 slides. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/76519835/38111354-3-Selecao-de-motores>>. Acesso em 30 mai. 2013.

## ANEXOS

Corpo	Eixo de Rotação	Momento de Inércia	Representação
Cilindro de Parede Delgada	Em torno de seu próprio eixo	$J = m \cdot R^2$	
Cilindro de Parede Delgada	Linha que atravessa a superfície plana do cilindro	$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2$	
Esfera Sólida	Passando pelo seu centro	$J = \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2$	
Cilindro Sólido	Linha que atravessa a superfície plana do cilindro	$J = \frac{1}{4} \cdot m \cdot R^2 + \frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2$	
Chapa Retangular	Linha perpendicular ao seu centro	$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (a^2 + b^2)$	