

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LEÔNIDAS DOS REIS BALDASSO

**COMPARAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL ENTRE UM MOTOR PNEUMÁTICO
DE PALHETAS E UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO**

CAXIAS DO SUL

2014

LEÔNIDAS DOS REIS BALDASSO

**COMPARAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL ENTRE UM MOTOR PNEUMÁTICO
DE PALHETAS E UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO**

Relatório de Estágio Supervisionado II apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
de Caxias do Sul – UCS.

Orientadora: Prof. Ma. Andréa Cantarelli Morales

CAXIAS DO SUL

2014

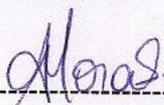
LEÔNIDAS DOS REIS BALDASSO

**COMPARAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL ENTRE UM MOTOR PNEUMÁTICO
DE PALHETAS E UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO**

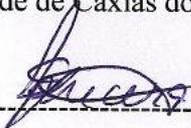
Relatório de Estágio Supervisionado II apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
de Caxias do Sul – UCS.

Aprovado em 28 de novembro de 2014.

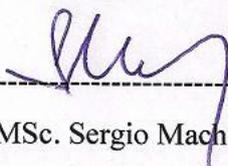
Banca Examinadora:



Prof. Ma. Andréa Cantarelli Morales
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. MSc. Sérgio da Silva Kucera
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. MSc. Sergio Machado de Godoy
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

O trabalho consiste em avaliar o custo de operação de um motor pneumático de palhetas de 1,5 cv, marca e modelo Startech MP 36.100, quando comparado a um motor elétrico de indução trifásico, marca e modelo Voges VTOP 80b 4 polos, de potência similar. São apresentadas as principais diferenças entre os motores, seus princípios de funcionamento, assim como o equacionamento que os descrevem. Os testes comparativos foram realizados nas dependências da Universidade de Caxias do Sul (UCS), no laboratório lamotriz, onde foi utilizada uma bancada dinamométrica com fins didáticos, visando a obtenção dos dados necessários para a elaboração das curvas de desempenho dos motores, possibilitando assim a comparação entre eles. Como metodologia aplicada nos testes foi realizada a alteração da fonte de alimentação, que para o motor pneumático foi a pressão de entrada e para o motor elétrico foi realizada a variação da frequência. Os resultados dos testes foram dispostos em gráficos e comparados no ponto que o motor elétrico teve o maior torque. Para verificar o custo operacional do motor elétrico foi considerado o consumo de energia elétrica em kWh e o pneumático, o consumo de ar em m³/h. Por fim foi verificado que, para os testes realizados, o menor custo de operação foi com o motor elétrico.

PALAVRAS-CHAVE: Custo de operação. Motor pneumático de palhetas. Motor elétrico de indução trifásico. Bancada dinamométrica. Consumo de energia.

ABSTRACT

The work consists of evaluating the cost of operating a vane air motor 1.5 hp , brand and model Startech MP 36,100, compared to a three-phase induction electric motor, brand and model Voges Vtop 80b 4-pole, of similar power . will be cited the main differences between the engines, their operating principles, as well as the equation that describe their functioning The comparative tests were carried out on the facilities of the University of Caxias do Sul (UCS) in lamotriz lab, where a dynamometric bench with didactic purposes will be used, in order to obtain the necessary data for the elaboration of engine performance curves, allowing the comparison between them. As the methodology applied in tests has been performed the variation of the power supply, that for the air motor was the inlet pressure and for the electric motor was the variation of frequency. The test results were graphed and compared at the point that the electric motor had the highest torque. To check the operating cost of the electric motor was considered the energy consumption in kWh and to the air motor, the air consumption in m³/h. In the end it was found that, for the tests, the lowest cost operation was with the electric motor.

KEYWORDS: Cost of operation. Vane air motor. Electric three phase induction motor. Dynamometric bench. Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação de cada setor no consumo de eletricidade no Brasil.....	12
Figura 2 – Motor pneumático de palhetas	16
Figura 3 – Representação do funcionamento do motor.....	17
Figura 4 – Desenho esquemático da referência das coordenadas.....	18
Figura 5 – Razão de expansão ao longo do ciclo	21
Figura 6 – Pressões atuantes na câmara de trabalho.....	23
Figura 7 – Ângulo da janela de entrada e saída.....	24
Figura 8 – Desenho esquemático para o torque.....	25
Figura 9 – Variação do torque instantâneo ao longo do ciclo para uma palheta.....	26
Figura 10 – Curva característica de motor pneumático de palhetas.	27
Figura 11 – Tipos de motores de corrente alternada	28
Figura 12 – Motor de Indução com rotor em gaiola.....	29
Figura 13 – Corrente elétrica de indução.....	30
Figura 14 – Polaridade de um motor de indução.....	31
Figura 15 – Triângulo de potências	34
Figura 16 – Curva característica de motor de indução elétrico tipo N: torque x rotação	38
Figura 17 – Bancada dinamométrica	39
Figura 18 – Tela do supervisorio.....	41
Figura 19 – Conjunto lubrificador.....	42
Figura 20 – Medidor eletromagnético de vazão	42
Figura 21 – Motor pneumático instalado na bancada.....	43
Figura 22 – Gráfico do motor pneumático: Torque x Rotação.....	45
Figura 23 – Gráfico do motor pneumático: Consumo de ar x Rotação.....	45
Figura 24 – Gráfico do motor pneumático: Potência x Rotação	46
Figura 25 – Curvas para frequência de 17, 34 e 50 Hz	47
Figura 26 – Curvas para frequência de 60, 68 e 85 Hz	48
Figura 27 – Torque x Rotação: 102 Hz	49
Figura 28 – Potência de eixo x Rotação: 102 Hz	49
Figura 29 – Torque máximo x Frequência	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais tipos de motores pneumáticos.....	15
Tabela 2 – Grandezas de um motor de indução.....	32
Tabela 3 – Velocidades síncronas	36
Tabela 4 – Dados do motor elétrico trifásico	39
Tabela 5 – Dados do motor pneumático de palhetas	40
Tabela 6 – Dados da fonte de alimentação trifásica	40
Tabela 7 – Dados do servomotor	40
Tabela 8 – Valores da frequência de entrada e rotações correspondentes.....	44
Tabela 9 – Valores para torque máximo do motor elétrico em cada frequência	50
Tabela 10 – Dados selecionados do motor pneumático para comparação	51
Tabela 11 – Comparativo entre motores.....	51

LISTA DE SIGLAS

ANELL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
LTDA	Limitada
UCS	Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

$2p$	Números de polos do motor [-]
A_{ADI}	Área no ponto adiantado em relação ao ângulo de referência [m ²]
A_{ATR}	Área no ponto atrasado em relação ao ângulo de referência [m ²]
$\cos \varphi$	Fator de Potência [-]
c_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kgK]
c_v	Calor específico a volume constante [kJ/kgK]
d	Descentralização entre os centros [m]
E_0	Energia máxima armazenada no volume de entrada [J]
f	Frequência [Hz]
F	Força aplicada [N]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Espessura da palheta [m]
I	Corrente [A]
k	Coefficiente isoentrópico [-]
m	Massa [kg]
n	Expoente politrópico [-]
N	Rotação [rpm]
n_s	Velocidade síncrona do motor [rpm]
N_p	Número de palhetas [-]
p	Pressão [kPa]
P_0	Pressão de entrada na câmara [kPa]
$P(\theta)$	Pressão da câmara de trabalho em relação ao ângulo de referência [kPa]
P_a	Pressão atmosférica [kPa]
P_{el}	Potência elétrica [kW]
P_{mec}	Potência mecânica [kW]
Q	Potência reativa [VAr]
R_{est}	Raio do estator [m]
R_m	Raio médio de referência [m]
R_{rot}	Raio do rotor [m]
R_v	Raio de varredura [m]
s	Escorregamento [rpm]

S	Potência aparente [VA]
t	Tempo [s]
T	Torque [Nm]
T_{total}	Torque instantâneo total [kNm]
U	Tensão [V]
V	Volume [m ³]
$V(\theta)$	Volume da câmara de trabalho em relação ao ângulo de referência [m ³]
$V_{inicial}$	Volume inicial na câmara após a janela de admissão for fechada [m ³]
$V_{palheta}(\theta)$	Volume ocupado por metade de cada palheta [m ³]
w	Profundidade do rotor [m]
W	Trabalho [Nm]
ε	Razão de expansão [-]
η	Eficiência mecânica [-]
θ	Ângulo de referência [°]
θ_{ADI}	Ângulo da palheta adiantada [°]
θ_{ATR}	Ângulo da palheta atrasada [°]
$\theta_{ENTRADA}$	Ângulo da janela de entrada de ar [°]
$\theta_{SAÍDA}$	Ângulo da janela de saída de ar [°]

SUMÁRIO

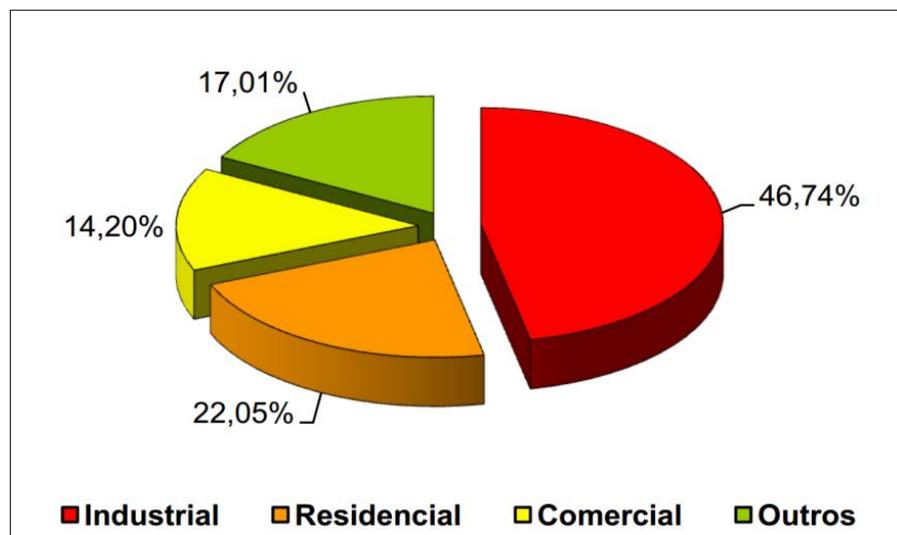
1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	13
1.2	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	14
1.3	AMBIENTE DO ESTÁGIO	14
1.4	OBJETIVOS DO TRABALHO	14
1.4.1	Geral	14
1.4.2	Específico.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	MOTORES PNEUMÁTICOS.....	15
2.1.1	Motores Pneumáticos de Palhetas.....	16
2.1.2	Equacionamento do Motor de Palhetas.....	17
2.1.2.1	Equacionamento Geométrico do Ciclo.....	17
2.1.2.2	Equacionamento Termodinâmico do Ciclo.....	21
2.1.2.3	Torque e Eficiência Mecânica	24
2.2	MOTORES ELÉTRICOS	28
2.2.1	Motor de indução trifásico.....	28
2.2.2	Princípio de funcionamento.....	30
2.2.3	Equacionamento do motor de indução trifásico.....	31
2.2.3.1	Potência mecânica	32
2.2.3.2	Potência elétrica	33
2.2.3.3	Fator de potência	33
2.2.3.4	Rendimento	35
2.2.3.5	Velocidade síncrona	36
2.2.3.6	Escorregamento e Velocidade do Motor	37
2.2.3.7	Torque	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5	CONCLUSÃO.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	APÊNDICE A	56
	APÊNDICE B.....	58

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o desenvolvimento sustentável, a diminuição no consumo de qualquer tipo de energia, e a diminuição de custos, têm aumentado ao longo dos anos. A partir disso o mercado vem aumentando a demanda por sistemas que possuem uma autonomia maior com o menor consumo energético possível. Em outras palavras, trabalhando com eficiência energética.

Pode-se verificar na figura 1 a distribuição do consumo de energia elétrica, dividido nos setores de maior demanda no Brasil.

Figura 1 – Participação de cada setor no consumo de eletricidade no Brasil



Fonte: ANEEL (2007)

Levando em consideração que o setor industrial representa 46,74% da demanda de energia elétrica no Brasil, a questão da eficiência energética no setor industrial se torna de suma importância.

Segundo Marumo e Tokhi (2006) os processos industriais, em geral, requerem que objetos sejam movidos, manipulados ou submetidos a alguma força. O uso de equipamentos elétricos, tais como motores ou equipamentos mecânicos através de dispositivos pneumáticos ou hidráulicos normalmente atingem essas tarefas.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os motores pneumáticos não são tão utilizados na indústria quanto os elétricos. Conforme Coelho (2010), o acionamento de máquinas e sistemas mecânicos por motores elétricos é responsável por cerca de 70% a 80% da energia elétrica consumida pelas indústrias. Porém os motores pneumáticos são mais utilizados em áreas de risco, é o que afirmam Cheng e Lan (2010), pois eles consomem ar comprimido em vez de eletricidade, o que os torna mais úteis em ambientes agressivos, especialmente ambientes voláteis.

Augusto Júnior e Chabu (2002) citam que no Brasil a escassez de recursos, o crescimento da demanda, o controle dos impactos ambientais e a longa maturação dos projetos voltados à eletricidade gerada pelas usinas hidrelétricas, indicam a necessidade pela busca da eficiência energética pelo lado do consumidor final, principalmente das indústrias.

De acordo com Cheng e Lan (2010) os motores pneumáticos rotativos funcionam transformando a energia potencial do ar comprimido para energia rotacional. Comparado com motores elétricos, exigem menos manutenção e podem ser operados em qualquer velocidade sem o uso de caixas de câmbio.

Os motores pneumáticos segundo Marumo e Tokhi (2006) são fontes de potência compactas, leves e com baixa vibração. Eles partem e param quase que instantaneamente, e não são afetados pela estagnação contínua ou sobrecarga e, portanto, são adequados para operação intermitente. Por isso, segundo Manuello et al (2001), os motores pneumáticos são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações industriais, graças à sua alta potência, amplo torque e grande faixa de velocidade.

Para Cabral e Hunold (1999) um motor pneumático é menos eficiente do que um motor elétrico. Porém, ao contrário deste, as perdas não são dissipadas na forma de calor no próprio motor. O motor pneumático pode ser travado ou invertido quantas vezes forem necessárias, e o nível de ruído, quando utilizando silenciadores adequados, é baixo. Além disso, o motor pneumático é mais compacto do que um elétrico, sendo seu tamanho equivalente a cerca de 1/3 do tamanho de um motor elétrico de mesma potência. Entretanto, o motor pneumático apresenta baixa rigidez, em razão da alta compressibilidade do ar a baixas pressões (cerca de 7 a 10 bar).

Em função de todas as diferenças identificadas acima, se faz necessário e justificável, além das observações sobre vantagens e desvantagens de um motor em relação ao outro, uma análise detalhada relacionada à comparação do custo operacional dos motores.

1.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Este trabalho foi apoiado pela empresa Startech Acionamentos Pneumáticos LTDA, localizada na cidade de Caxias do Sul. Há mais de onze anos no mercado, a empresa é especializada na fabricação e comercialização de motores de partida pneumáticos e à mola, motores de transmissão pneumáticos, e dispositivos mecânicos de proteção para motores de combustão interna.

1.3 AMBIENTE DO ESTÁGIO

O presente trabalho utilizou as dependências da Universidade de Caxias do Sul (UCS), Bloco D, laboratório sala 221, para realização dos devidos testes comparativos. No laboratório foi utilizada uma bancada dinamométrica com fins didáticos a fim de captar os dados necessários para a comparação.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.4.1 Geral

Têm-se como objetivo geral realizar um estudo comparativo entre um motor pneumático de palhetas e um motor de indução trifásico equivalente, voltado à analisar o custo operacional dos mesmos quando submetidos ao mesmo esforço em uma bancada dinamométrica.

1.4.2 Específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Rever a literatura sobre motores pneumáticos e elétricos, quanto ao seu princípio de funcionamento;
- Apresentar o equacionamento dos motores;
- Analisar as características de desempenho e consumo destes motores;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES PNEUMÁTICOS

Conforme Carfagni et al (2013) motores pneumáticos convertem a energia dinâmica do fluido em energia mecânica, através da expansão do ar comprimido pelo movimento linear ou rotativo. Movimento linear é gerado através de um diafragma ou mesmo de atuadores de pistão, enquanto que o de rotação é fornecido por motores de palhetas, de pistão, de engrenagens, ... Referente ao movimento de rotação, o deslocamento e a queda de pressão no motor determinam o torque que ele gera e, como consequência, a potência de saída é diretamente proporcional à velocidade. Motores pneumáticos podem também ser classificados em duas categorias principais: motores volumétricos e motores dinâmicos.

Os motores volumétricos são aqueles no qual o ar é admitido em uma câmara de compressão isolada do exterior. Para obter a compressão, reduz-se o volume de ar contido na câmara de modo que a pressão desse ar aumenta proporcionalmente. Já os motores dinâmicos são aqueles no qual o ar é acelerado por meio de um rotor girando a alta velocidade. Por meio da descarga de ar por um difusor, a energia cinética é transformada em pressão estática, é o que explica Carfagni et al (2013).

As características de funcionamento dos principais tipos de motores volumétricos e dinâmicos são mostrados na Tabela 1. Motores pneumáticos de palheta, do tipo de engrenagem, axial e de pistão radial são os mais utilizados para aplicações industriais.

Tabela 1 – Principais tipos de motores pneumáticos

	Característica			
	Potência (kW)	Velocidade Máxima (rpm)	Taxa Máxima de Expansão	Número de Cilindros ou Palhetas por Rodada
Motores Volumétricos				
Pistão Radial	1,5 - 3,0	6.000	1 : 2	4 - 6
Pistão Axial	1 - 6	5.000	1 : 1,5	4
Motor de Palhetas	0,1 - 18	30.000	1 : 1,6	2 - 10
Motor de Engrenagens	0,5 - 5	15.000	1 : 1	10 - 25
Motores Dinâmicos				
Turbina	0,01 - 0,2	120.000	-	um estágio

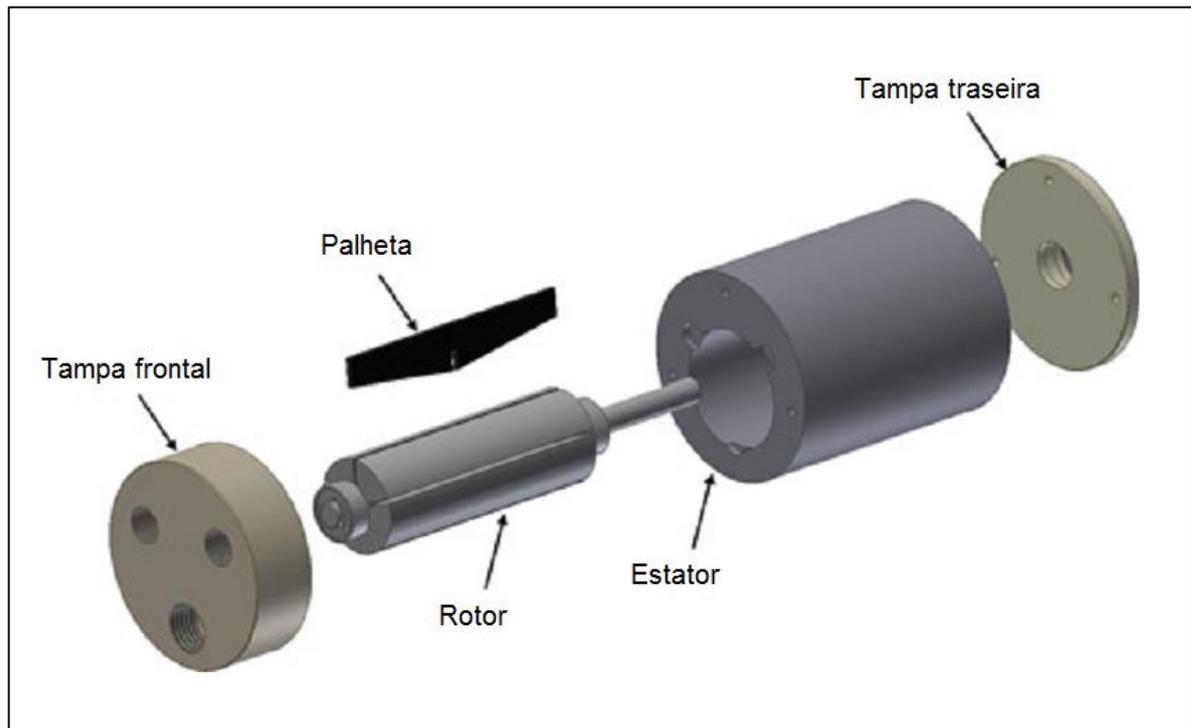
Fonte: Carfagni (2013)

2.1.1 Motores Pneumáticos de Palhetas

Conforme estudo de Naranjo, Kussul e Ascanio (2010) um motor de palhetas consiste basicamente de um corpo (estator), de um rotor excêntrico com fenda, das palhetas que podem se mover livremente para dentro e para fora, e das tampas frontal e traseira do motor. À medida que o rotor gira, as pás formam as câmaras em que o ar é comprimido e expandido. Durante o arranque as palhetas são mantidas em contato com as paredes internas do estator por meio de molas, e uma vez que o motor entrar em rotação, a força centrífuga ajuda a manter o contato entre as palhetas e a parede do estator, ajudando a selar as câmaras de ar.

A figura 2 mostra os principais componentes que formam um motor pneumático de palhetas.

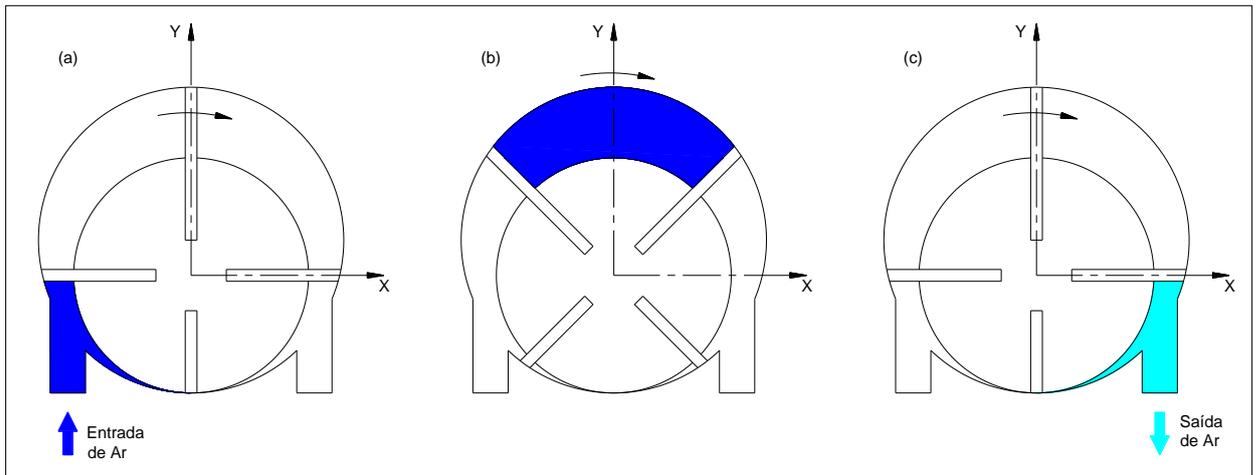
Figura 2 – Motor pneumático de palhetas



Fonte: Carfagni et al (2013)

A figura 3 apresenta o funcionamento do motor pneumático. O ar pressurizado entra pela janela de admissão, figura 3 (a). Esse ar pressurizado produz uma força na palheta que está pressionada contra o estator e, pela diferença de pressão existente no processo, é gerado torque no eixo do motor. Na figura 3 (b), é mostrada a câmara de trabalho e o deslocamento sofrido pela pressão de entrada. No final do processo, figura 3 (c), o ar é expelido pela janela de exaustão, é o que explica Naranjo, Kussul e Ascanio (2010).

Figura 3 – Representação do funcionamento do motor



Fonte: Oestreich (2012)

2.1.2 Equacionamento do Motor de Palhetas

Foi utilizado o equacionamento proposto por Cheng e Lan (2010), relativo ao motor rotativo de palhetas. O perfil geométrico e as dimensões usadas seguem as mesmas que os autores utilizaram no seu estudo. As considerações feitas por Tessaro (2012) também foram utilizadas para complementar o estudo referentes à termodinâmica do processo.

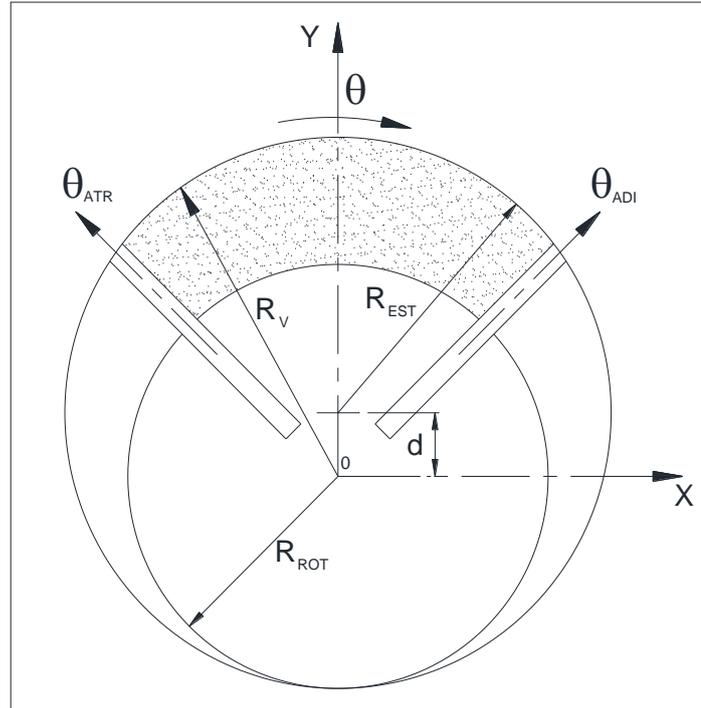
As simplificações adotadas para o presente trabalho são apresentadas abaixo:

- o ar atmosférico é tratado como gás perfeito;
- não são considerados vazamentos internos e recirculações;
- desconsideram-se as perdas de calor e de quantidade de movimento entre as paredes da câmara;
- o atrito é desprezado;
- eficiência volumétrica unitária, ou seja, o ar ocupa todo volume disponível até o fechamento da janela de admissão;
- é considerado apenas um ciclo de rotação.

2.1.2.1 Equacionamento Geométrico do Ciclo

No equacionamento proposto por Cheng e Lan (2010), a Figura 4 representa o desenho esquemático da posição das peças dentro da câmara de trabalho. O sistema de coordenadas é cartesiano com o centro em O . A rotação do sistema é dada no sentido horário pelo ângulo de referência centrado entre duas palhetas.

Figura 4 – Desenho esquemático da referência das coordenadas



Fonte: Oestreich (2012)

Onde:

R_{rot} [m] é o raio do rotor.

R_{est} [m] é o raio do estator.

d [m] é a descentralização entre raios.

θ [°] é o ângulo de referência.

R_v [m] é o raio de varredura.

θ_{ADI} [°] é o ângulo que representa a palheta adiantada em relação a θ .

θ_{ATR} [°] é o ângulo que representa a palheta atrasada em relação a θ .

Tanto o θ_{ADI} como o θ_{ATR} possuem uma relação inversamente proporcional com o número de palhetas. É possível definir os ângulos das palhetas conforme as equações (1) e (2).

$$\theta_{ADI} = \theta + \frac{180}{N_p} \quad (1)$$

Onde:

θ_{ADI} [°] é o ângulo que representa a palheta adiantada em relação a θ .

θ [°] é o ângulo de referência.

N_p [-] é o número de palhetas.

$$\theta_{ATR} = \theta - \frac{180}{N_p} \quad (2)$$

Onde:

θ_{ATR} [°] é o ângulo que representa a palheta atrasada em relação a θ .

θ [°] é o ângulo de referência.

N_p [-] é o número de palhetas.

A figura 4 apresenta a câmara de trabalho delimitada pela área hachurada. A espessura das palhetas não é considerada no volume de trabalho como mostrado. O eixo y coincide com o ângulo $\theta = 0^\circ$.

De acordo com as representações feitas por Cheng e Lan (2010) a respeito das coordenadas geométricas, pode-se especificar o raio de varredura através da equação (3).

$$R_v = d \cdot \cos \theta + \sqrt{R_{est}^2 - (d \cdot \sin \theta)^2} \quad (3)$$

Onde:

R_v [m] é o raio de varredura.

d [m] é a descentralização entre raios.

θ [°] é o ângulo de referência.

R_{est} [m] é o raio do estator.

Na equação (3) ao assumir $d = 0$, o raio de varredura R_v assume o valor do raio do estator R_{est} que coincide com o centro de coordenadas e com o centro do estator.

A partir da equação (3) é possível representar a variação da área na câmara dada pela equação (4).

$$A(\theta) = w \cdot [R_v - R_{rot}] \quad (4)$$

Onde:

$A(\theta)$ [m²] é a área na câmara de trabalho.

w [m] é a profundidade do motor.

R_v [m] é o raio de varredura.

R_{rot} [m] é o raio do rotor.

Com isso, ainda pode-se chegar na equação (5) do volume da câmara de trabalho $V(\theta)$ de acordo com a integral em coordenadas cilíndricas.

$$V(\theta) = \frac{w}{2} \cdot \int_{\theta_{ATR}}^{\theta_{ADI}} R_v^2 d\theta - \frac{w \cdot \pi \cdot (R_{rot})^2}{N_p} - V_{palheta} \quad (5)$$

Onde:

$V(\theta)$ [m³] é o volume da câmara de trabalho.

w [m] é a profundidade do motor.

θ_{ADI} [°] é o ângulo que representa a palheta adiantada em relação a θ .

θ_{ATR} [°] é o ângulo que representa a palheta atrasada em relação a θ .

R_v [m] é o raio de varredura.

R_{rot} [m] é o raio do rotor.

N_p [-] é o número de palhetas.

$V_{palheta}$ [m³] é o volume ocupado por metade de cada palheta na câmara

O primeiro termo da equação (5) representa o volume da câmara de acordo com o raio de varredura R_v descentralizado com os limites da integral variando de θ_{ATR} até θ_{ADI} . Já o segundo termo representa o volume do rotor que deve ser descontado da equação, e o último termo da equação é o volume ocupado por metade de cada palheta na câmara e pode ser representado pela equação (6).

$$V_{palheta} = \frac{w \cdot h}{2} \cdot [R_v(\theta_{ATR}) + R_v(\theta_{ADI}) - 2 \cdot R_{rot}] \quad (6)$$

Onde:

w [m] é a profundidade do motor.

h [m] é a espessura da palheta.

R_v [m] é o raio de varredura.

θ_{ATR} [°] é o ângulo que representa a palheta atrasada em relação a θ .

θ_{ADI} [°] é o ângulo que representa a palheta adiantada em relação a θ .

R_{rot} [m] é o raio do rotor.

Dessa forma, as equações (5) e (6) descrevem o comportamento do volume na câmara de trabalho.

Com o volume na câmara definido é possível representar a razão de expansão através da equação (7).

$$\varepsilon(\theta) = \frac{V(\theta)}{V_{inicial}} \quad (7)$$

Onde:

$\varepsilon(\theta)$ [-] é a razão de expansão.

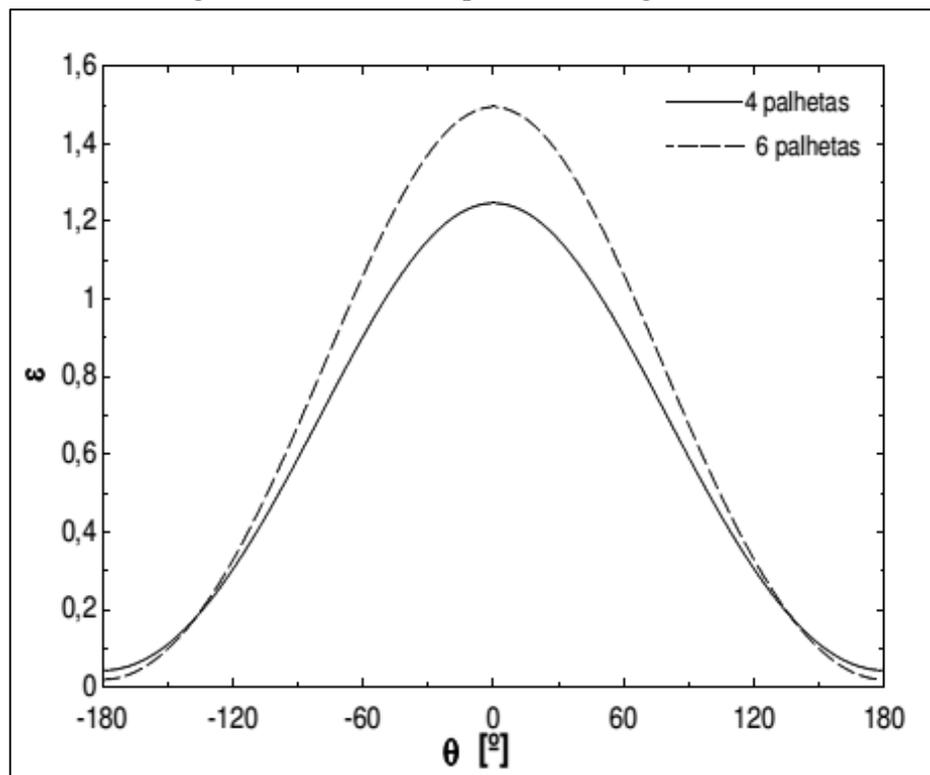
$V(\theta)$ [m³] é o volume da câmara de trabalho.

$V_{inicial}$ [m³] é o volume inicial na câmara logo após a janela de admissão ser fechada.

Cheng e Lan (2010) explicam a razão de expansão como sendo a proporção na qual o volume inicial sofre alteração de acordo com a variação do volume em dado ângulo θ .

Nota-se que a razão de expansão é diretamente proporcional ao número de palhetas, podendo ser comprovado através dos estudos realizados por Oestreich (2012), conforme figura 5.

Figura 5 – Razão de expansão ao longo do ciclo



Fonte: Oestreich (2012)

2.1.2.2 Equacionamento Termodinâmico do Ciclo

Tessaro (2012) descreve simplificações em relação às propriedades dentro da câmara de trabalho. Ele utiliza o ciclo padrão a ar para a modelagem do ciclo termodinâmico.

Segundo Tessaro (2012) o modelo termodinâmico para o processo segue de acordo com as transformações politrópicas¹ do ar, conforme a equação (8).

$$p \cdot V^n = \text{constante} \quad (8)$$

Onde:

p [kPa] é a pressão.

V [m³] é o volume.

n [-] é o expoente politrópico.

Portanto, o processo padrão a ar com a relação de volumes e pressões ao longo da câmara de trabalho segue conforme equação (8). Assim a equação da pressão na câmara de trabalho é descrita de acordo com a equação (9).

$$P(\theta) = P_0 \cdot \left(\frac{V_{inicial}}{V(\theta)} \right)^k = P_0 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^k \quad (9)$$

Onde:

$P(\theta)$ [kPa] é a pressão na câmara de trabalho.

P_0 [kPa] é a pressão de entrada na câmara

k [-] é o coeficiente isoentrópico², definido pela equação (10).

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (10)$$

Onde:

k [-] é o coeficiente isoentrópico.

c_p [kJ/kgK] é o calor específico a pressão constante.

c_v [kJ/kgK] o calor específico a volume constante.

¹ Transformação politrópica é um processo pelo qual passa um gás em que o produto de sua pressão pelo volume que ocupa elevado a um certo expoente, se mantém constante ($p \cdot V^n = \text{constante}$, equação 8). Onde, n é chamado de expoente politrópico e pode assumir qualquer valor entre $-\infty$ e $+\infty$, dependendo do processo pelo qual o gás é submetido. As transformações politrópicas podem ser divididas em: isobárica (transformação a pressão constante), isotérmica (transformação a temperatura constante), isovolumétrica ou isocórica (transformação a volume constante) e isoentrópica (transformação a entropia constante) (VAN WYLEN; SONNATAG; BORGNAKKEI, 2003).

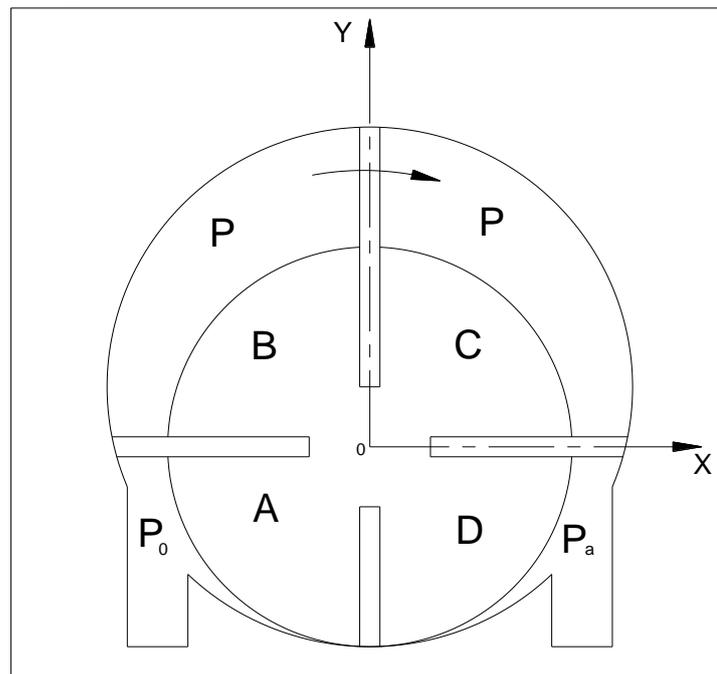
² Processo isoentrópico é um processo que ocorre onde a entropia do gás (s), grandeza termodinâmica que mensura o grau de irreversibilidade (quantidade de energia que não é convertida em trabalho mecânico) de um sistema, se mantém constante, onde o expoente politrópico (n) é igual ao coeficiente isoentrópico (k), portanto ($p \cdot V^k = \text{constante}$). (VAN WYLEN; SONNATAG; BORGNAKKEI, 2003)

Como o processo envolve ar, foi considerada a temperatura e pressão ambiente (298 K e 0,1 MPa, respectivamente). Portanto segundo Van Wylen, Sonntag e Borgnakke (2003) o $c_p = 1,0035 \text{ kJ/kgK}$ e $c_v = 0,7165 \text{ kJ/kgK}$.

$$k = \frac{1,0035}{0,7165} \cong 1,4$$

Na figura 6 o sistema é representado para quatro palhetas e para um ciclo completo.

Figura 6 – Pressões atuantes na câmara de trabalho



Fonte: Oestreich (2012)

Onde:

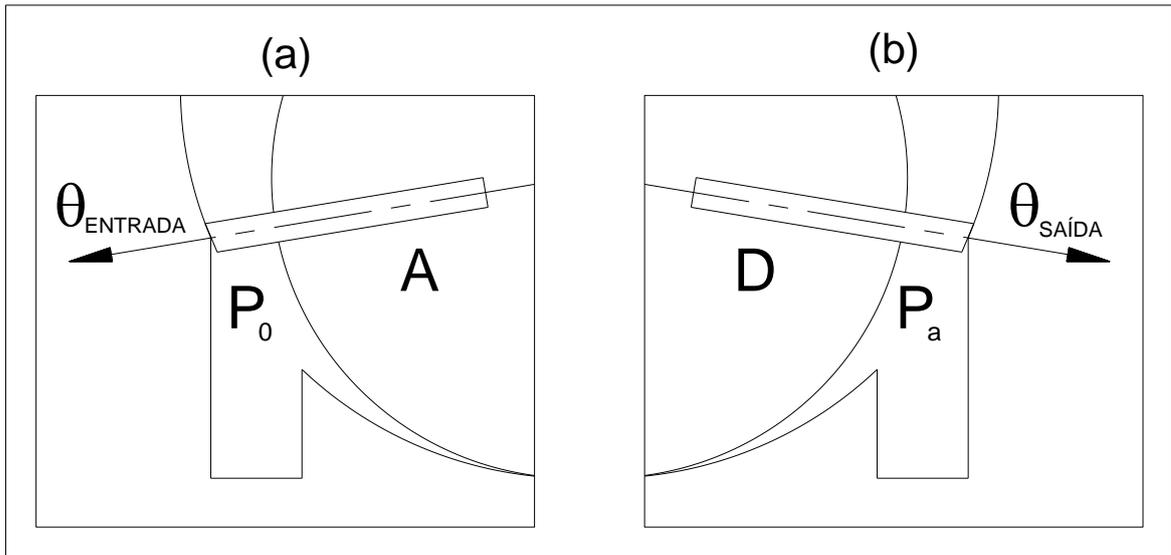
P_0 [kPa] é a pressão de entrada e a pressão na câmara A.

P [kPa] é a pressão nas câmaras B e C.

P_a [kPa] como a pressão de saída e a pressão na câmara D.

A pressão dentro da câmara de trabalho não é a mesma para todo o ciclo e depende do ângulo da janela de entrada de ar θ_{ENTRADA} [°] e do ângulo da janela de saída de ar $\theta_{\text{SAÍDA}}$ [°], conforme figura 7 (a) e (b), respectivamente, e da variação de volume V no ciclo.

Figura 7 – Ângulo da janela de entrada e saída



Fonte: Autor (2014)

Na câmara A, o ar pressurizado inicia no ciclo com a pressão de entrada P_0 [kPa] e no momento que a palheta atrasada passa pelo ângulo da janela de entrada θ_{ENTRADA} [°], a pressão exercida no ciclo é dado pela equação (9) e pode ser vista na câmara B e C.

Nesse momento, a pressão varia inversamente ao volume da câmara. Quando a palheta adiantada da câmara C passa pelo ângulo da janela de exaustão $\theta_{\text{SAÍDA}}$ [°], o ciclo assume o estado da câmara D e a pressão no ciclo é a pressão de saída, dada pela pressão atmosférica P_a [kPa].

2.1.2.3 Torque e Eficiência Mecânica

Para o equacionamento do torque no ciclo foi utilizado o proposto por Cheng e Lan (2010), onde a Figura 8 apresenta a referência tomada no sistema de coordenada. É representada uma linha tracejada no centro da câmara que será tomada como a linha média de referência R_m e definida pela equação (11).

$$R_m = \left(\frac{R_v + R_{rot}}{2} \right) \quad (11)$$

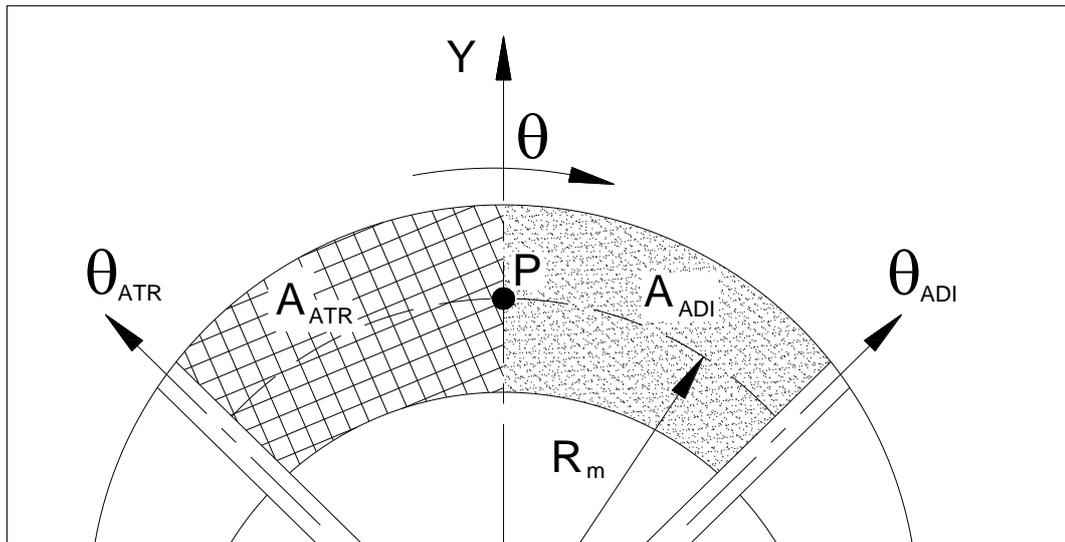
Onde:

R_m [m] é o raio médio de referência.

R_v [m] é o raio de varredura.

R_{rot} [m] é o raio do rotor.

Figura 8 – Desenho esquemático para o torque



Fonte: Oestreich (2012)

Assim pode-se representar o torque instantâneo no ciclo gerado pela equação (12).

$$T(\theta) = P \cdot [A_{ADI} \cdot R_m - A_{ATR} \cdot R_m] \quad (12)$$

Onde:

$T(\theta)$ [Nm] é o torque instantâneo no ciclo.

P [kPa] é a pressão referenciada no ponto central da câmara.

A_{ADI} [m²] é a área no ponto adiantado da câmara referente ao ângulo θ .

R_m [m] é o raio médio de referência.

A_{ATR} [m²] é a área no ponto atrasado da câmara referente ao ângulo θ [°].

A média entre os raios de varredura e do rotor, respectivamente, representa o braço de alavanca.

A partir da equação (12) o torque instantâneo total para a câmara com número N de palhetas é dado pelo somatório dos torques instantâneo conforme equação (13).

$$T_{total} = \sum_{i=1}^N T(\theta) \cdot \left[\frac{2 \cdot (i - 1) \cdot \pi}{N_p} \right] \quad (13)$$

Onde:

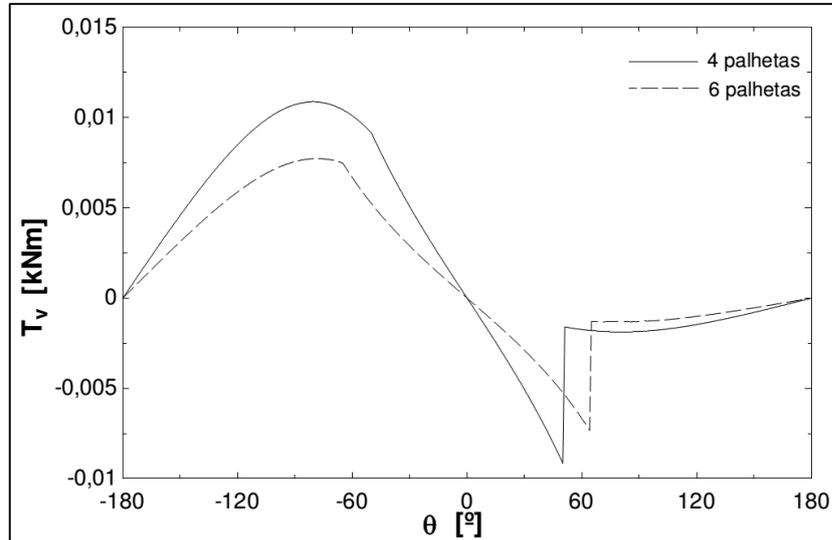
T_{total} [kNm] é o torque instantâneo total.

$T(\theta)$ é o torque instantâneo no ciclo.

N_p [-] é o número de palhetas.

Nota-se que o torque instantâneo total é inversamente proporcional ao número de palhetas, o que é comprovado através dos estudos realizados por Oestreich (2012) e ilustrado através da figura 9.

Figura 9 – Variação do torque instantâneo ao longo do ciclo para uma palheta



Fonte: Oestreich (2012)

Com isso, a eficiência mecânica (η) é definida como o torque produzido no rotor dividido pela energia de entrada por período, conforme equação (14).

$$\eta = \int_{\theta_{ATR}}^{\theta_{ADI}} \frac{T_{total} d\theta}{E_0} \quad (14)$$

Onde:

η [-] é a eficiência mecânica.

θ_{ADI} [°] é o ângulo da palheta adiantada.

θ_{ATR} [°] é o ângulo da palheta atrasada.

T_{total} [kNm] é o torque instantâneo total

E_0 [J] é a energia máxima armazenada no volume de entrada, definida pela equação (15).

$$E_0 = P_0 \cdot V_{inicial} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_a}\right) \quad (15)$$

Onde:

E_0 [J] é a energia máxima armazenada no volume de entrada.

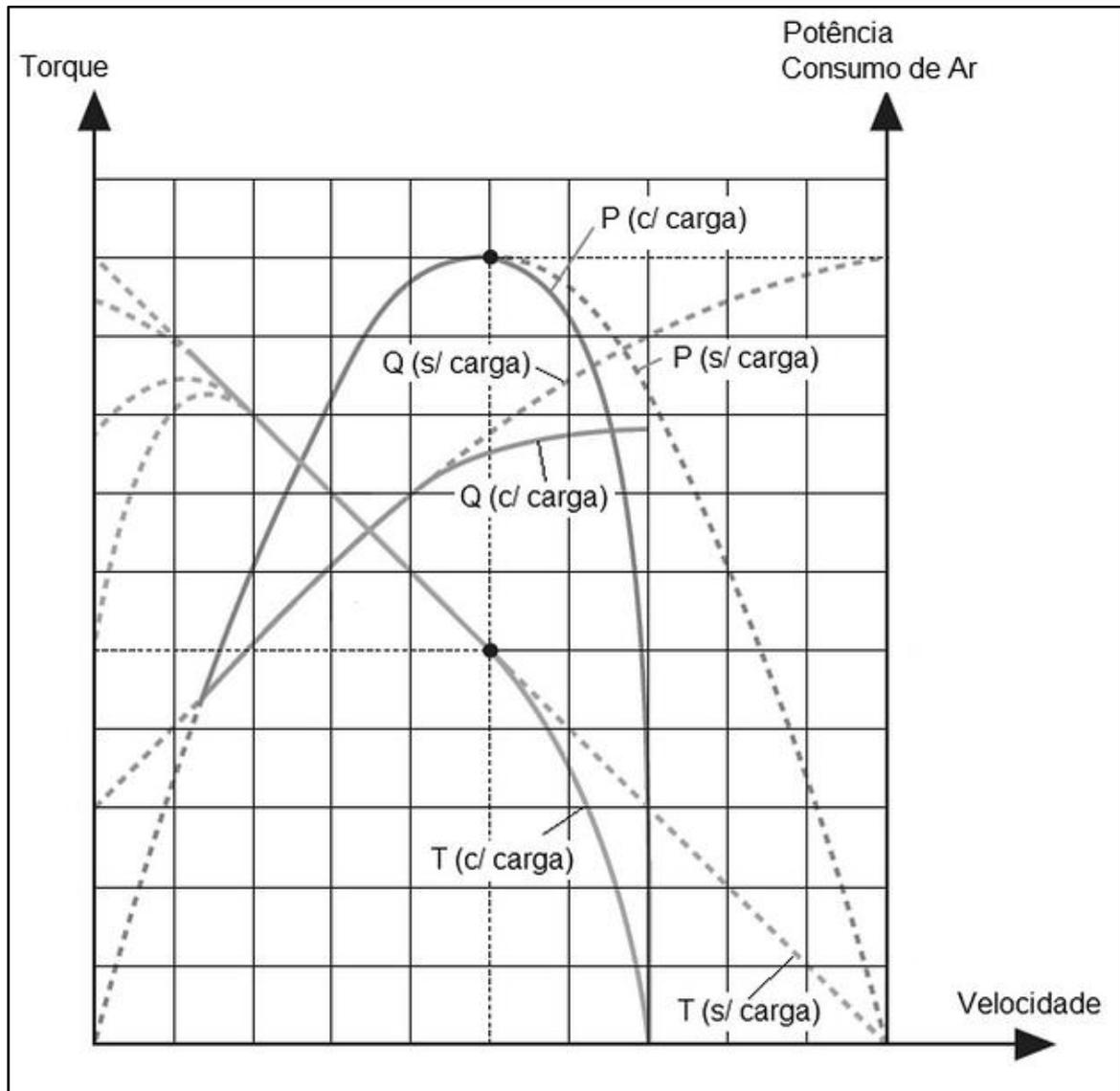
P_0 [kPa] é a pressão de entrada.

$V_{inicial}$ [m³] é o volume inicial.

P_a [kPa] é a pressão de saída.

A figura 10 mostra como é o comportamento padrão dos motores pneumáticos de palhetas quanto ao seu torque de eixo, potência, consumo de ar e rotação.

Figura 10 – Curva característica de motor pneumático de palhetas.



Fonte: Deprag (2008)

Onde:

Q é o consumo de ar.

P é a potência de eixo.

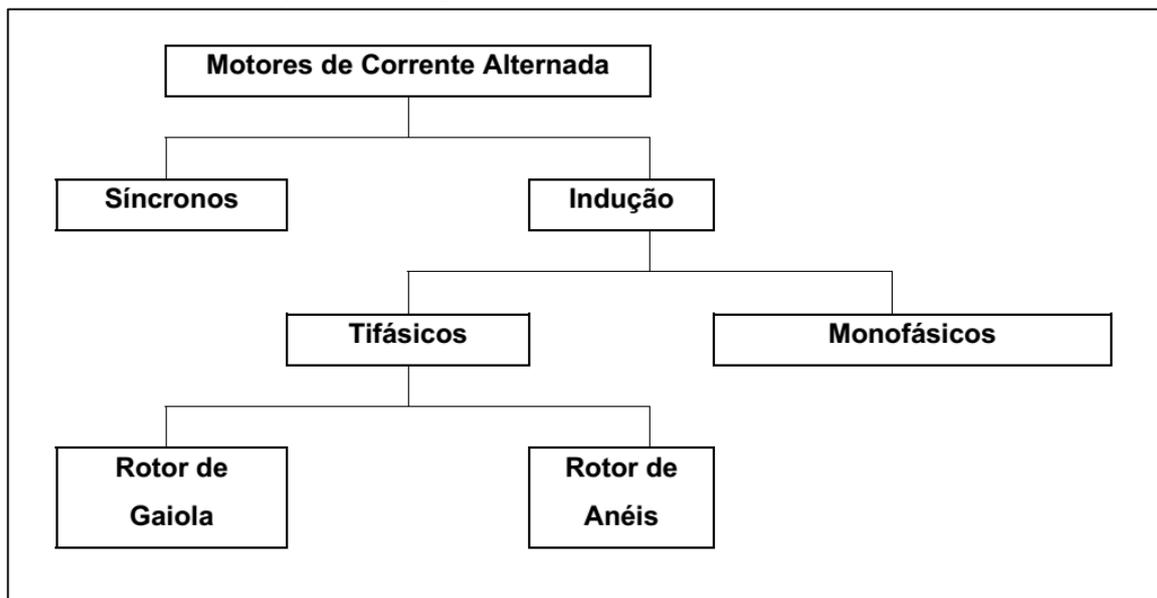
T é o torque de eixo.

2.2 MOTORES ELÉTRICOS

Motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica, sendo concebido no século XIX e, hoje é o principal uso final da energia elétrica.

De acordo com Filippo Filho (2000), existem vários tipos de motores elétricos e, de uma maneira geral, eles são classificados conforme as características de sua alimentação. Atualmente, devido à robustez e baixo custo, a grande maioria dos motores usados é de corrente alternada, sendo uma pequena parcela de corrente contínua. Os motores de corrente alternada são ainda classificados conforme o comportamento da sua velocidade de funcionamento e da sua ligação, trifásica ou monofásica, na rede de alimentação. A figura 11 mostra a subdivisão dos motores de corrente alternada.

Figura 11 – Tipos de motores de corrente alternada

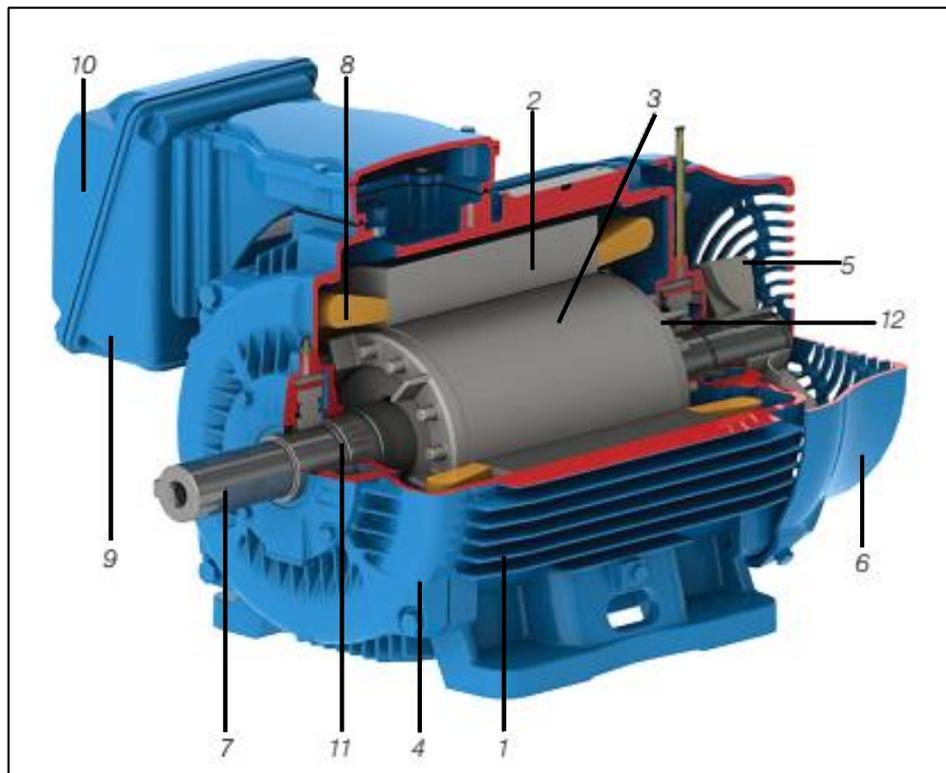


Fonte: Filippo Filho (2000).

2.2.1 Motor de indução trifásico

O motor de indução trifásico funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo, de acordo com a WEG (2013). É o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica - baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, simplicidade de comando - com sua construção simples e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos, segundo explica Garcia (2003). Atualmente é possível o controle da velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência. A figura 12 mostra um motor elétrico em corte com seus principais componentes.

Figura 12 – Motor de Indução com rotor em gaiola



Fonte: WEG (2013)

Os componentes indicados na figura 12 são descritos de forma resumida a seguir:

Estator:

- Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e normalmente com aletas.
- Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço magnético.
- Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.

Rotor

- Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.
- Núcleo de chapas (3) - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.
- Barras e anéis de curto-circuito (12) - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

Outras partes do motor de indução trifásico:

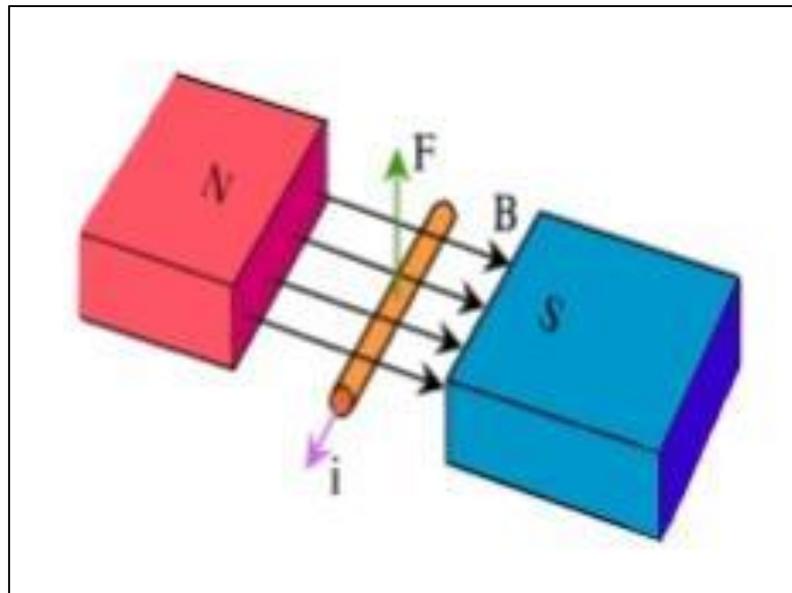
- Tampa (4)
- Ventilador (5)
- Tampa defletora (6)
- Caixa de ligação (9)
- Terminais (10)
- Rolamentos (11)

(WEG, 2013, p. 13)

2.2.2 Princípio de funcionamento

De acordo com Garcia (2003), todo motor elétrico de indução funciona a partir da propriedade de a corrente elétrica gerar um campo magnético e este, quando varia em relação a um condutor, provocar neste último uma corrente elétrica através da indução. A grosso modo formam-se dois ímãs, um no estator e outro no rotor, cuja interação provoca o movimento do motor. Pode-se visualizar melhor esta afirmação na figura 13, na qual N e S representam os polos dos ímãs, norte e sul respectivamente, B representa o campo magnético gerado, i representa a corrente elétrica e F representa o vetor força gerada.

Figura 13 – Corrente elétrica de indução



Fonte: Garcia (2003)

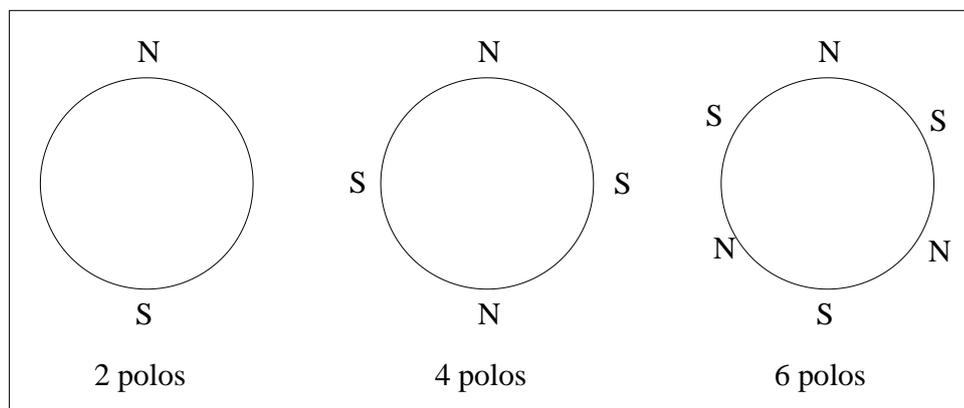
No motor trifásico, a distribuição das bobinas das três fases no estator, defasadas de 120° , faz com que a soma dos campos magnéticos provocados por cada uma delas seja um campo uniforme e girante, conforme Filippo Filho (2000). Este campo circula nos núcleos magnéticos do estator e do rotor, provocando nas barras do rotor, uma circulação de corrente. Daí o nome motor de indução porque, ao contrário de outros motores no qual a corrente do rotor é injetada do exterior através de anéis fixados ao eixo, a corrente do rotor é induzida pelo campo magnético formado no estator. Conforme explica Kosow (1998, p. 300), esta corrente de rotação gera, por sua vez, um campo magnético que tende a opor-se ao movimento que o gerou (Lei de Lenz) de polos opostos ao do estator. O resultado é que o campo do estator arrasta o rotor girando, entretanto, sempre a uma velocidade maior do que este, com isso o rotor escorrega em relação ao campo girante. Segundo Kosow (2008) nas máquinas assíncronas (indução) o rotor gira com uma velocidade diferente da do campo girante, isto é, o rotor

escorrega em relação à velocidade síncrona a fim de que se produza torque. Já as máquinas síncronas tem sua rotação fixa (sincronizada), ou seja, a rotação e a frequência trabalham em sincronismo, conforme Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006).

Segundo Garcia (2003), quando uma carga é colocada no eixo do motor, o rotor reduz a sua velocidade, aumentando o escorregamento. Para mensurar este escorregamento é necessário conhecer a velocidade do motor e a sua velocidade síncrona, o que será mostrado no decorrer do trabalho. Com o aumento do escorregamento, segue-se uma sucessão de eventos: aumenta a velocidade com que o campo magnético corta as barras do rotor, aumenta a corrente do rotor, aumenta o campo magnético gerado pelo rotor, diminui o campo magnético total, aumenta a corrente no estator e aumenta a potência elétrica fornecida ao motor. O motor, portanto, se auto regula para atender à carga no eixo.

Dependendo da forma como são dispostas as bobinas do estator, podem-se formar apenas dois polos (KOSOW, 1998, p. 298-299), um norte e um sul, ou quatro, seis, oito, para citar os mais comuns, como na Figura 13.

Figura 14 – Polaridade de um motor de indução



Fonte: Garcia (2003)

Quando a corrente de alimentação completa um ciclo ($1/60 \text{ Hz} = 16,7 \text{ ms}$), o campo vai de “norte a norte”. Em um segundo, o campo no motor de 2 polos dá 60 voltas, no de 4, 30 voltas, no de 6, 20 voltas e assim por diante, o que corresponde, em rotações por minuto (rpm), a 3.600, 1.800 e 1200 rpm respectivamente.

2.2.3 Equacionamento do motor de indução trifásico

São diversas as grandezas que variam na operação de um motor elétrico, conforme tabela 2.

Tabela 2 – Grandezas de um motor de indução

Grandeza	Símbolo	Unidade	Descrição
Potência mecânica	P_{mec}	kW	Potência fornecida no eixo do motor.
Potência elétrica	P_{el}	kW	Potência fornecida ao motor.
Torque	T	Nm	Torque (conjugado) desenvolvido no eixo do motor.
Rotação	N	rpm	Rotação do eixo do motor.
Corrente	I	A	Corrente absorvida da rede elétrica pelo motor.
Tensão	U	V	Tensão da rede que alimenta o motor (tensão entre fases).
Escorregamento	s	rpm	Diferença relativa entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona
Fator de Potência	$\cos \varphi$	-	Atraso da corrente em relação à tensão, medido pelo cosseno do ângulo de atraso
Rendimento	η	-	Relação entre as potências mecânica e elétrica.

Fonte: Garcia (2003)

Utilizando o equacionamento proposto por WEG (2013) relativo ao motor de indução trifásico é possível definir os termos citados na tabela 2, conforme abaixo.

2.2.3.1 Potência mecânica

A potência mecânica mede a força que um motor produz para movimentar uma carga com uma certa velocidade, conforme equação (15).

$$P_{mec} = \frac{W}{1000 \cdot t} = \frac{F \cdot d}{1000 \cdot t} \quad (15)$$

Onde:

P_{mec} [kW] é a potência mecânica.

W [Nm] é o trabalho ou energia gasta.

t [s] é o tempo.

F [N] é a força aplicada.

d [m] é a distância.

Por exemplo, se usar um motor elétrico capaz de erguer um saco de 50 kg a uma altura de 10 m em 2s então tem-se:

Sendo a força peso igual a:

$$F = m \cdot g \quad (16)$$

Onde:

F [N] é a força aplicada.

m [kg] é a massa

g [m/s²] é a aceleração da gravidade a qual é adotada o valor de 9,81 m/s².

Tem-se que:

$$P_{mec} = \frac{50 \cdot 9,81 \cdot 10}{2 \cdot 1000} = 2,4525 \text{ kW ou } 3,33 \text{ cv}$$

2.2.3.2 Potência elétrica

Embora a energia seja uma coisa só, ela pode se apresentar de formas diferentes. Ao ligar-se uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passará uma corrente elétrica que irá aquecê-la. A resistência absorve energia elétrica e a transforma em calor, que também é uma forma de energia. Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a transforma em energia mecânica, disponível na ponta do eixo.

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad (17)$$

Onde:

P_{el} [kW] é a potência elétrica.

U [kV] é a tensão de linha.

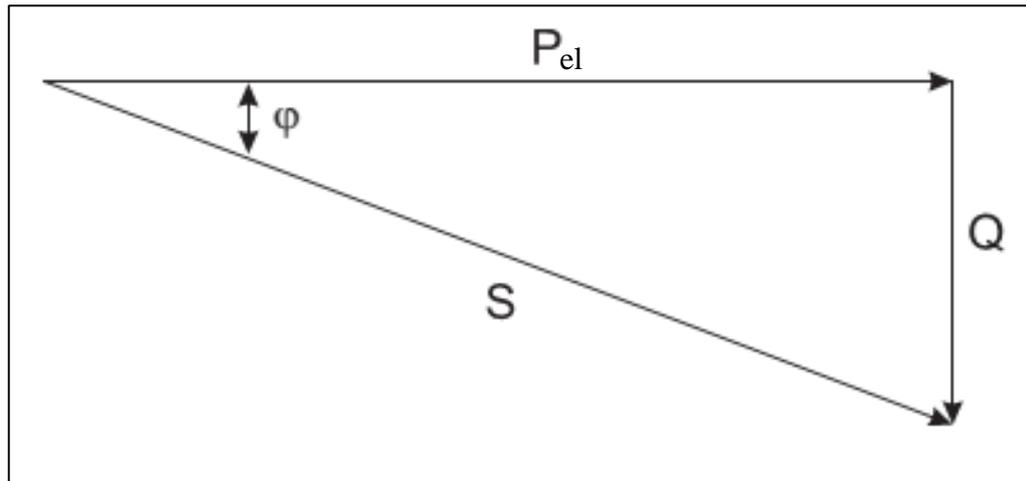
I [A] é a corrente de linha.

$\cos \varphi$ [-] é o fator de potência.

2.2.3.3 Fator de potência

O fator de potência, indicado por $\cos \varphi$, ao qual φ é o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente, é a relação entre a potência elétrica ativa (P_{el}) e a potência reativa (Q) conforme figura 15.

Figura 15 – Triângulo de potências



Fonte: WEG (2013)

Onde:

P_{el} [kW] é a potência elétrica.

S [kVA] é a potência aparente e é definida pela equação (18).

Q [kVAr] é a potência reativa e definida pela equação (19).

$$S = U \cdot I \cdot \sqrt{3} = \frac{P_{el}}{\cos \varphi} \quad (18)$$

Onde:

S [kVA] é a potência aparente.

U [kV] é a tensão de linha.

I [A] é a corrente de linha.

P_{el} [kW] é a potência elétrica.

$\cos \varphi$ [-] é o fator de potência.

$$Q = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi \quad (19)$$

Onde:

Q [kVAr] é a potência reativa.

U [kV] é a tensão de linha.

I [A] é a corrente de linha.

Portanto o fator de potência é definido através da equação (20), para sistemas trifásicos.

$$\cos \varphi = \frac{P_{el}}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}} \quad (20)$$

Onde:

$\cos \varphi$ [-] é o fator de potência.

P_{el} [kW] é a potência elétrica.

U [kV] é a tensão de linha.

I [A] é a corrente de linha.

Segundo WEG (2013), visando otimizar o aproveitamento do sistema elétrico brasileiro, reduzindo o trânsito de energia reativa nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, a portaria do Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE) número 85, de 25 de março de 1992, determinou que o fator de potência de referência das cargas passasse de 0,85 para 0,92. A mudança do fator de potência dá maior disponibilidade de potência ativa no sistema, já que a energia reativa limita a capacidade de transporte de energia útil (ativa). Logo, é imprescindível a utilização de motores com potência e características bem adequadas a sua função, pois o fator de potência varia com a carga do motor.

2.2.3.4 Rendimento

O rendimento dos motores de indução é semelhante ao de qualquer dispositivo de transformação de energia, ou seja, é a relação entre as potências de saída e a de entrada, conforme WEG (2013). No caso dos motores, é a relação entre a potência mecânica de saída entregue à carga pelo eixo do motor e a potência elétrica de entrada, consumida da rede elétrica. Portanto, o rendimento define a eficiência com que é feita a conversão da energia elétrica absorvida da rede pelo motor, em energia mecânica disponível no eixo, conforme equação (21).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} \quad (21)$$

Onde:

η [-] é o rendimento do motor

P_{mec} [kW] é a potência mecânica

P_{el} [kW] é a potência elétrica.

Percebe-se que o rendimento do motor é inversamente proporcional à potência elétrica consumida. Portanto com o aumento no consumo da potência elétrica, o rendimento do motor diminui.

2.2.3.5 Velocidade síncrona

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos do motor e da frequência da rede, conforme equação (22).

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2 \cdot p} \quad (22)$$

Onde:

n_s [rpm] é a velocidade síncrona do motor

f [Hz] é a frequência

$2p$ [-] é o número de polos do motor.

A tabela 3 mostra valores da velocidade síncrona para alguns modelos de motores conforme o número de polos e a frequência de funcionamento.

Tabela 3 – Velocidades síncronas

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hertz	50 Hertz
2	3.600	3.000
4	1.800	1.500
6	1.200	1.000
8	900	750
10	720	600

Fonte: WEG (2013)

2.2.3.6 Escorregamento e Velocidade do Motor

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor “corta” as linhas de força magnética do campo e circularão nele correntes induzidas³.

A diferença entre a velocidade do motor e a velocidade síncrona chama-se escorregamento, que pode ser expresso em rpm ou porcentagem da velocidade síncrona, conforme equações (23) e (24) respectivamente.

$$s \text{ (rpm)} = n_s - N \quad (23)$$

Onde:

s [rpm] é o escorregamento.

n_s [rpm] é a velocidade síncrona.

N [rpm] é a velocidade do motor e é definida conforme a equação (25).

$$s \text{ (%) } = \frac{n_s - N}{n_s} \cdot 100 \quad (24)$$

Onde:

s [%] é o escorregamento.

n_s [rpm] é a velocidade síncrona.

N [rpm] é a velocidade do motor.

$$N = n_s \cdot \left(1 - \frac{s \text{ (%)}}{100}\right) \quad (25)$$

Onde:

N [rpm] é a velocidade do motor.

n_s [rpm] é a velocidade síncrona.

s [%] é o escorregamento.

³ A circulação de correntes induzidas é devido às leis do eletromagnetismo, também conhecidas como lei de Faraday-Neumann-Lenz, ou lei da indução eletromagnética. A Lei de Faraday comenta que a magnitude da tensão induzida é proporcional à variação do fluxo magnético. Neumann escreveu a Lei em uma forma matemática:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Na qual ε representa a força eletromotriz induzida, $\Delta\Phi_B$ a variação do fluxo e Δt o intervalo de tempo.

O sinal negativo é contribuição fundamental de Lenz. A corrente induzida no circuito é gerada por um campo magnético, e a lei de Lenz afirma que o sentido da corrente é o oposto ao do campo magnético que a gera.

2.2.3.7 Torque

Através da equação (25), é possível encontrar o Torque desenvolvido no eixo do motor, representado pela equação (26).

$$T = \frac{P_{mec} \cdot 9555}{N} \quad (26)$$

Onde:

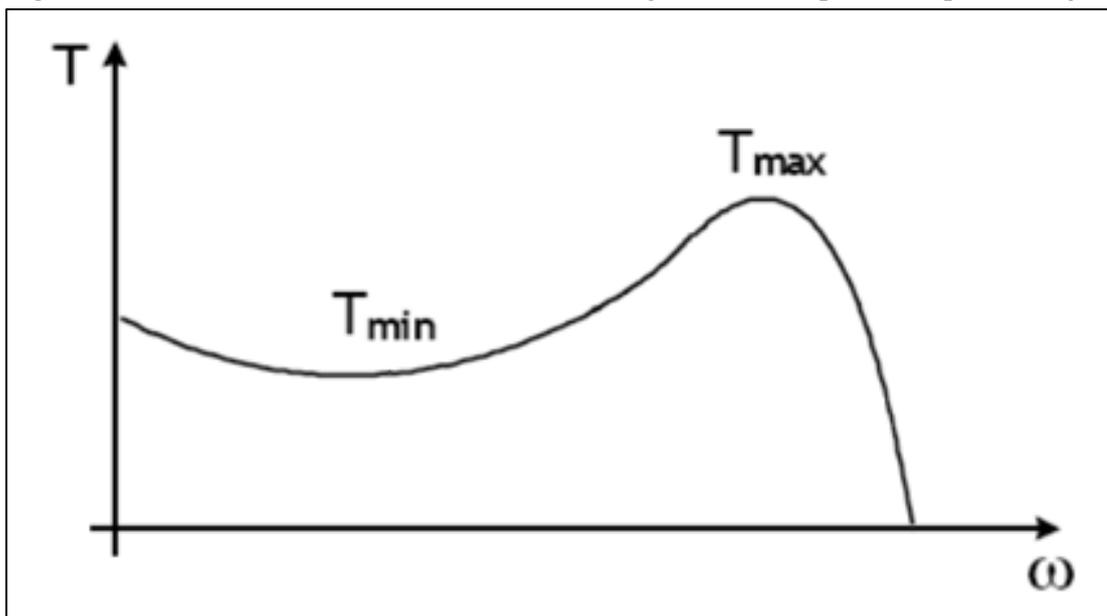
T [Nm] é o torque,

N [rpm] é a rotação

P_{mec} [kW] é a potência mecânica.

A figura 16 mostra como é o comportamento padrão dos motores elétricos tipo N quanto ao seu torque de eixo e rotação.

Figura 16 – Curva característica de motor de indução elétrico tipo N: torque x rotação



Fonte: WEG (2013)

Onde:

T é o torque.

T_{min} é o torque mínimo.

T_{max} é o torque máximo.

ω é a rotação do motor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utilizou as dependências da Universidade de Caxias do Sul (UCS), Bloco D, laboratório sala 221 para realizar os devidos testes comparativos entre motores elétrico e pneumático. No laboratório utilizou-se uma bancada dinamométrica com fins didáticos, visando captar os dados necessários para a comparação.

A bancada dinamométrica, conforme figura 17, tem como finalidade ensaiar motores elétricos de até 6,8cv (5kW). O motor elétrico utilizado foi da marca VOGES modelo VTOP 80b com características conforme tabela 4.

Figura 17 – Bancada dinamométrica



Fonte: Autor (2014)

Tabela 4 – Dados do motor elétrico trifásico

Potência (cv)	1,5
Potência (kW)	1,1
Rotação (rpm)	1725
Frequência (Hz)	60
Categoria	N
Rendimento (%)	81,5
Fator de Potência (-)	0,84
Corrente Nominal (A)	4,25

Fonte: Autor (2014)

O motor pneumático de palhetas utilizado foi da marca STARTECH modelo MP 36.100 com as características demonstradas na tabela 5.

Tabela 5 – Dados do motor pneumático de palhetas

Potência* (cv)	1,5
Consumo de ar* (m ³ /h)	96
Rotação* (rpm)	2300
Fixação	Por pé/ flange
Sentido de Giro	Reversível
Pressão Max.	10 bar

*Dados obtidos com pressão de 7,0 bar

Fonte: Autor (2014)

Para acionamento do motor elétrico, utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica, parametrizada, modelo Supplier FCATH 450-38-50 e características conforme tabela 6.

Tabela 6 – Dados da fonte de alimentação trifásica

Tensão de entrada	380Vac±10%
Frequência de entrada	50/60Hz
Tensão de saída	0-380V
Corrente de saída	12A (max)
Potência de saída	4500VA (max)
Frequência de saída	15-500Hz
Fusível	16A/500V

Fonte: Autor (2014)

Como fonte de alimentação para o motor pneumático, utilizou-se uma tomada de ar localizada junto ao laboratório, com pressão de alimentação variável.

Para simular um esforço aos motores ensaiados foi utilizado um servomotor de corrente alternada, marca YASKAWA, modelo SGMSH-50ACA61, cuja características podem ser vistas na tabela 7.

Tabela 7 – Dados do servomotor

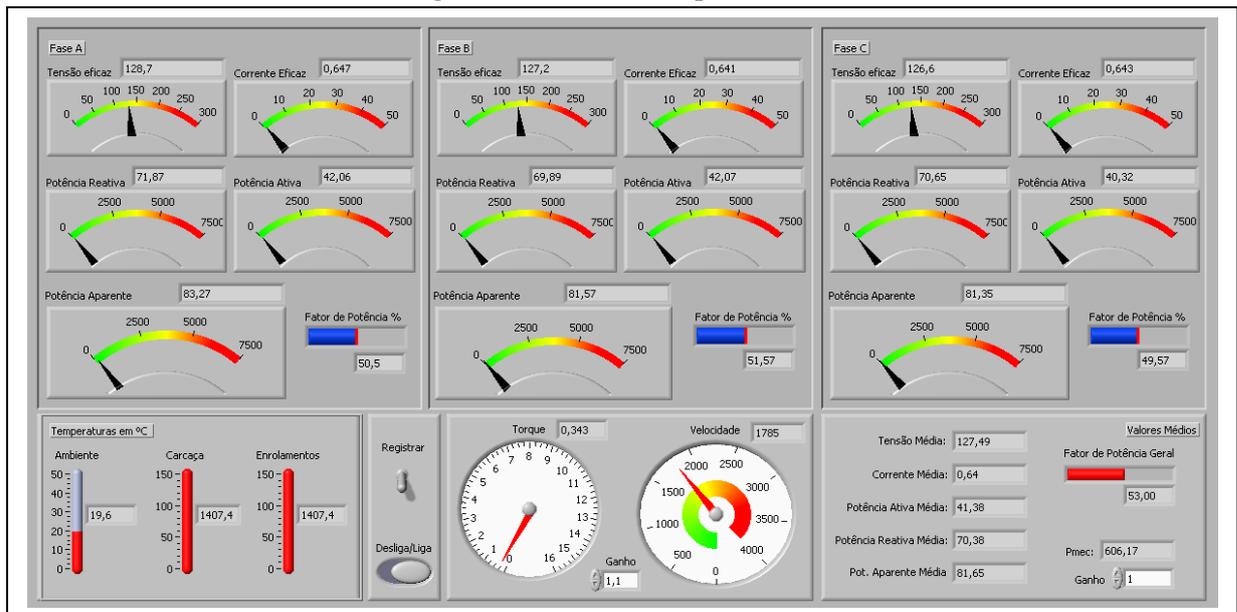
Potência	5 kW
Torque	15,8 N.m
Corrente	28,6 A
Voltagem	200 V
Rotação Max.	3000 rpm

Fonte: Autor (2014)

O servomotor é comandado através de um servo drive também de marca YASKAWA cujo modelo é o SGDH-50AE. Para medir os dados referente ao torque e rotação foi utilizado um sensor de marca e modelo modelo Hottinger Baldwin Messtechnik T20WN/20NM.

Os parâmetros do ensaio são processados por meio do software LabVIEW 8.6 instalado a um computador, denominado de supervisor. Na sua tela podem ser observados os principais parâmetros em valores instantâneos e médios, como pode ser observado na figura 18.

Figura 18 – Tela do supervisor



Fonte: Autor (2014)

Quanto aos testes utilizando o motor pneumático de palhetas, os dados captados no supervisor foram somente o torque gerado e a velocidade de rotação, uma vez que os outros dados referem-se exclusivamente para motores elétricos.

A comparação entre os motores foi feita seguindo-se o procedimento abaixo.

Com o motor pneumático foram realizados testes tendo a pressão de entrada variável. Com os dados sobre a rotação e o torque no eixo do motor coletados através da tela do supervisor e com a equação (27) foi definida a potência de eixo do motor.

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot T}{60000} \quad (27)$$

Onde:

P [kW] é a potência de eixo do motor.

N [rpm] é a rotação do motor.

T [Nm] é o torque do motor.

Com estes dados foram construídas as seguintes curvas de desempenho: potência x rotação, torque x rotação e consumo de ar x rotação).

Para o motor elétrico foram realizados testes similares, mas variando-se a frequência à partir da fonte de alimentação trifásica. Com os dados coletados através do supervisor, foram geradas as curvas características de potência de eixo x rotação e torque x rotação.

Com as curvas características dos motores elaboradas foi feita a comparação da eficiência de um motor em relação ao outro.

Para que fosse possível a realização dos testes com o motor pneumático na bancada dinamométrica realizou-se a montagem dos equipamentos necessários à regulagem da pressão do ar de entrada e do medidor de vazão do ar na linha de alimentação para a aferição do seu consumo. Para tanto utilizou-se o conjunto lubrifil (filtro de ar, regulador de pressão e lubrificador) mostrado na figura 19. Foram adotados valores de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 bar para a pressão de entrada.

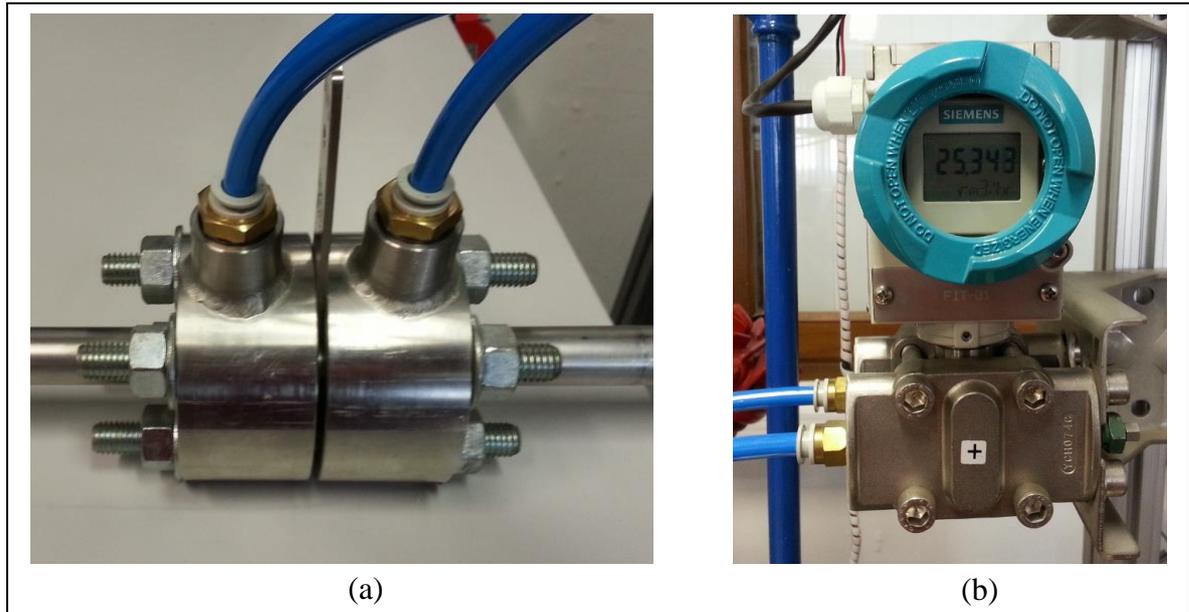
Figura 19 – Conjunto lubrifil



Fonte: Autor (2014)

A aferição do consumo de ar do motor pneumático foi feita por meio de um medidor eletromagnético de vazão, mostrado na figura 20 (a), instalado entre o conjunto lubrifil e a entrada do motor. A leitura das vazões foram feitas através do visor mostrado na figura 20 (b).

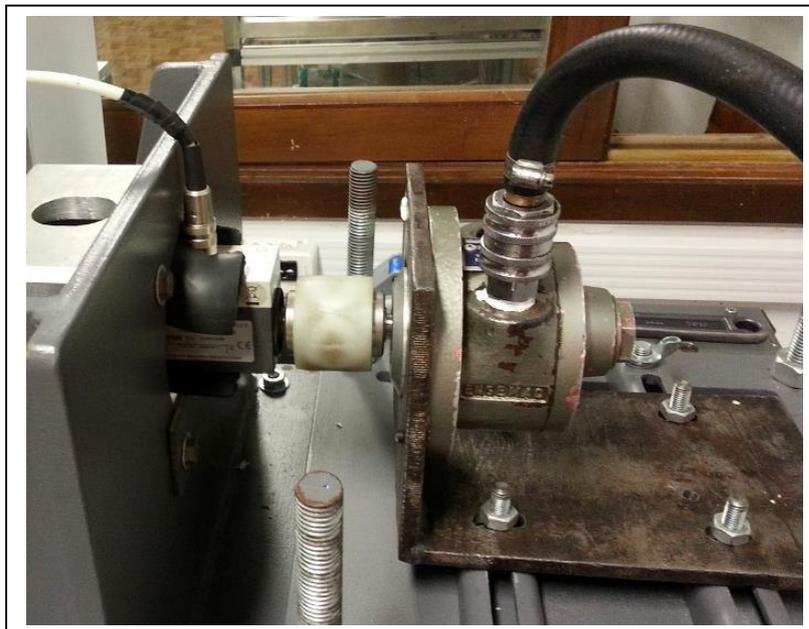
Figura 20 – Medidor eletromagnético de vazão



Fonte: Autor (2014)

Para que pudesse ser feito o acoplamento do motor pneumático com a bancada dinâmométrica foi necessário a utilização de um suporte específico para o motor. A figura 21 mostra o motor pneumático acoplado na bancada dinâmométrica com o auxílio do suporte.

Figura 21 – Motor pneumático instalado na bancada



Fonte: Autor (2014)

A partir da fonte trifásica presente na bancada dinâmométrica alterou-se o valor da frequência de alimentação do motor elétrico. A tabela 8 mostra os valores utilizados de frequência e suas respectivas rotações. Para cada frequência presente na tabela foi realizado um

teste de esforço, no qual aumentava-se a força de frenagem do eixo implicando em uma mudança no torque de eixo do motor.

Tabela 8 – Valores da frequência de entrada e rotações correspondentes

Frequência (Hz)	Rotação (rpm)
17	510
34	1010
50	1510
60	1780
68	2010
84	2510
102	3010

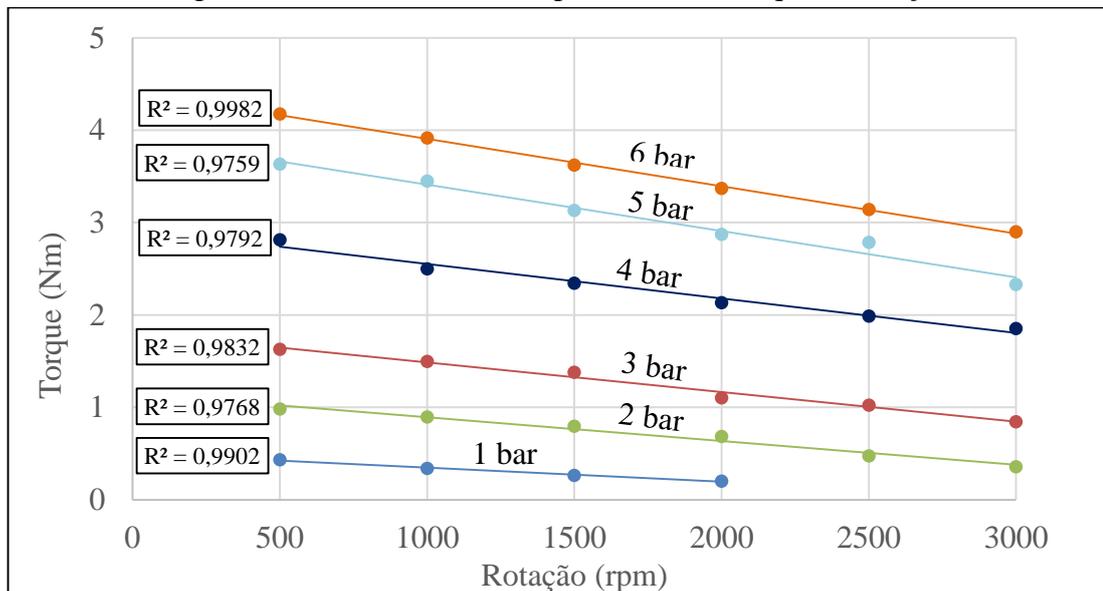
Fonte: Autor (2014)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes com o motor pneumático foram dispostos em forma de tabelas, que podem ser vista no Apêndice A. Através das tabelas criou-se os gráficos com as curvas características do motor pneumático de palhetas.

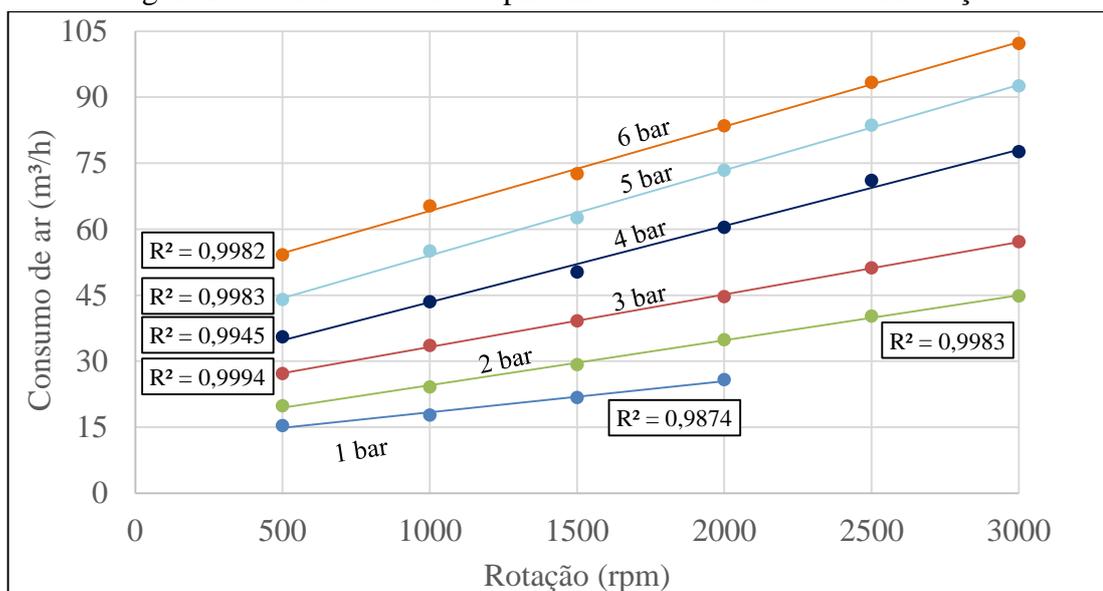
A figura 22 é referente a curva característica Torque x Rotação, já a figura 23 refere-se ao Consumo de ar x Rotação e a figura 24, Potência x Rotação. Conforme comentado no capítulo 3, foi utilizado a equação (27) para que fosse definida a potência de eixo do motor.

Figura 22 – Gráfico do motor pneumático: Torque x Rotação



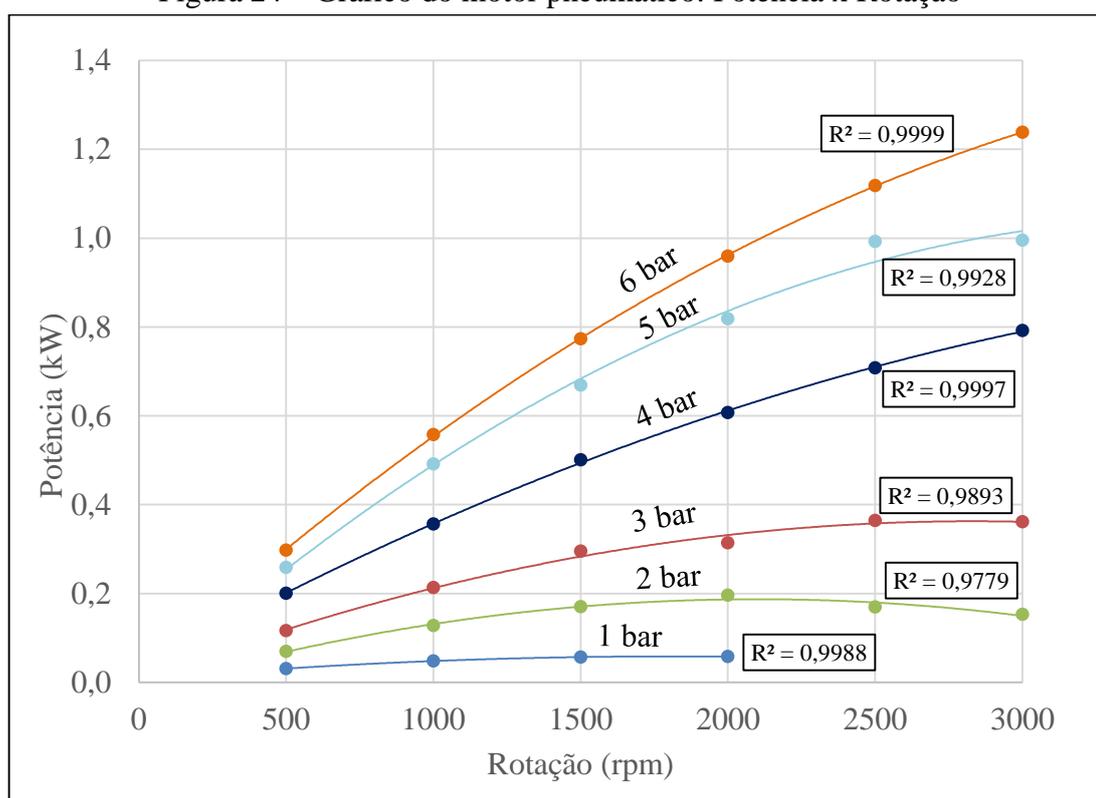
Fonte: Autor (2014)

Figura 23 – Gráfico do motor pneumático: Consumo de ar x Rotação



Fonte: Autor (2014)

Figura 24 – Gráfico do motor pneumático: Potência x Rotação



Fonte: Autor (2014)

Ao analisar as curvas características do motor pneumático de palhetas percebe-se que o mesmo teve o comportamento padrão conforme figura 10, ou seja, as curvas de torque e de consumo de ar tiveram um comportamento linear enquanto a potência teve o comportamento de um polinômio de segundo grau.

Para um dado valor de pressão, um fato percebido com as curvas de desempenho foi o de que quanto menor a rotação do motor, maior o torque, menor a potência e menor o consumo do motor, isto é, a rotação do motor é inversamente proporcional ao torque enquanto a potência e o consumo do motor são diretamente proporcionais à rotação.

Percebe-se que para valores de pressão mais elevados obtiveram-se maiores torques e maiores consumos e conseqüentemente maiores potências.

Os resultados dos testes com o motor de indução trifásico também foram dispostos em forma de tabelas, que podem ser vista no Apêndice B. Através das tabelas foram criados gráficos com as curvas características do motor de indução trifásico porém, devido ao mesmo ter um comportamento diferenciado ao do motor pneumático, foi necessário um gráfico para cada frequência de trabalho, que podem ser vistos nas figuras 25 até 29.

Figura 25 – Curvas para frequência de 17, 34 e 50 Hz

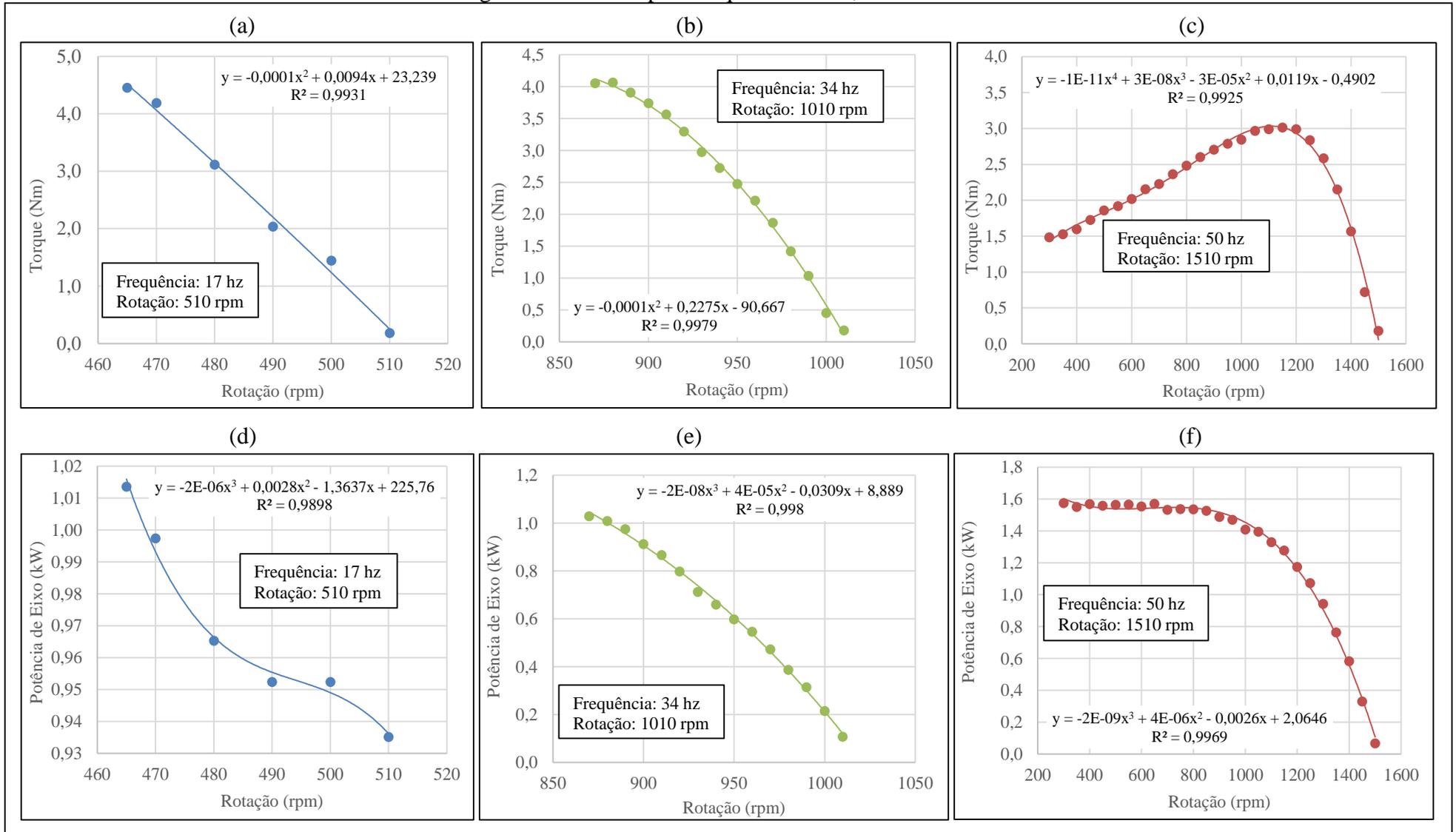
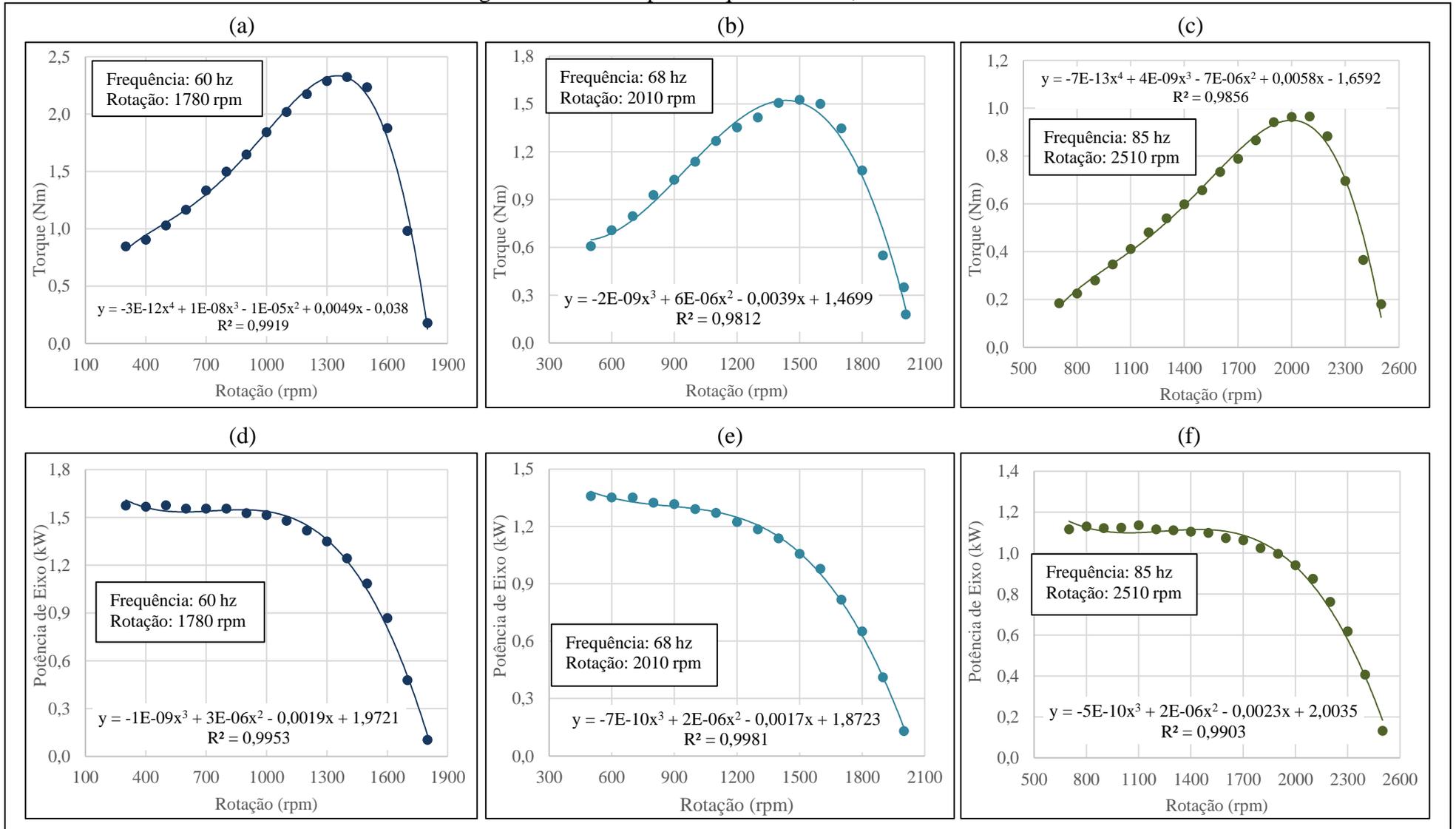
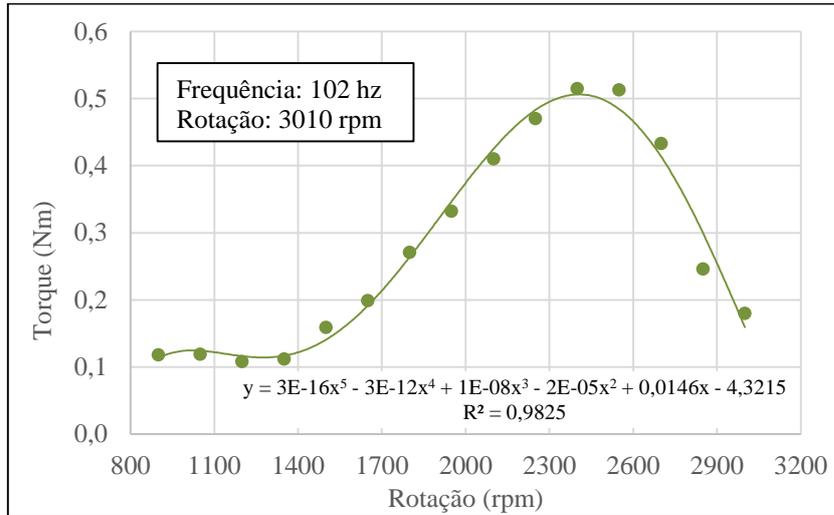


Figura 26 – Curvas para frequência de 60, 68 e 85 Hz



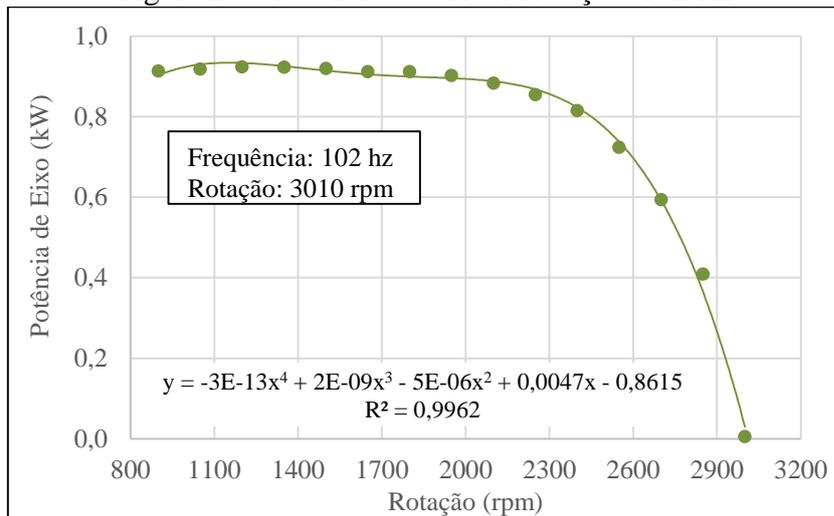
Fonte: Autor (2014)

Figura 27 – Torque x Rotação: 102 Hz



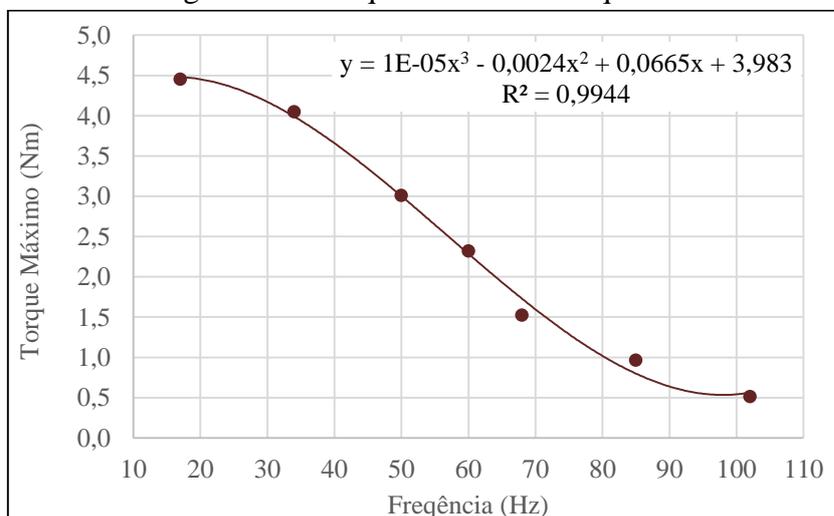
Fonte: Autor (2014)

Figura 28 – Potência de eixo x Rotação: 102 Hz



Fonte: Autor (2014)

Figura 29 – Torque máximo x Frequência



Fonte: Autor (2014)

Percebe-se que para valores de frequência abaixo da nominal, com exceção de 50 Hz, os gráficos torque x rotação não apresentaram o comportamento da curva padrão de um motor elétrico tipo N, conforme figura 16. Porém para todos os valores de frequência, o torque máximo foi atingido com valores abaixo da rotação nominal respectiva, mantendo a característica padrão. Outra característica observada nas curvas foi que o torque é inversamente proporcional à frequência, isto é, para valores menores de frequência obtiveram-se os maiores valores de torque, já que a frequência é diretamente proporcional à rotação.

A tabela 9 mostra os valores em cada frequência de trabalho no qual se obteve o valor com o torque máximo, este é o ponto escolhido para realizar a comparação com o motor pneumático, em virtude de ambos os motores trabalharem de forma diferenciada em relação aos seus valores nominais.

Tabela 9 – Valores para torque máximo do motor elétrico em cada frequência

Frequência Alimentação (Hz)	Rotação do Motor (rpm)	Torque Máximo (Nm)	Energia Elétrica Consumida (kWh)
17	465	4,453	24,29
34	870	4,051	24,51
50	1150	3,012	30,58
60	1400	2,324	29,62
68	1500	1,526	25,24
85	2100	0,965	20,85
102	2400	0,515	19,4

Fonte: Autor (2014)

Para comparação entre os motores foram selecionados, de acordo com a tabela 10, para o motor pneumático valores de pressão de alimentação que implicassem em rotações e torques similares aos do motor elétrico. Conforme anteriormente citado no capítulo 3 através da tabela 4, o motor elétrico que foi utilizado é da categoria N e, conforme WEG (2003) o mesmo atinge o torque máximo sempre abaixo da rotação nominal, no caso deste trabalho 60 Hz, o que é comprovado através da tabela 9.

Tabela 10 – Dados selecionados do motor pneumático para comparação

Rotação do Motor	Pressão (bar)	Torque (N/m)	Consumo (m ³ /h)
465	6	4,2	53,2
870	6	3,98	62,36
1150	5	3,35	57,3
1400	4	2,37	48,89
1500	3	1,38	39,14
2100	3	1,08	45,98
2400	2	0,52	39,18

Fonte: Autor (2014)

De acordo com Link Tecno (2014) para uma empresa de pequeno porte e somente com um compressor de ar a pistão, o custo médio do m³ do ar comprimido é em torno de R\$ 0,62, considerando impostos. Este valor foi obtido através de cálculo baseado em Link Tecno (2014) levando em consideração os dados do compressor utilizado (quantidade de compressores, potência do motor dos compressores somadas, vazão nominal total somadas, horas anuais de consumo, custo do kWh). Analisando o valor do kWh em RGE (2014) para cliente convencional, considerando impostos e taxas, o valor é em torno de R\$ 0,46. Baseado nestes valores, a tabela 11 demonstra o custo de operação dos motores para os testes realizados na bancada dinamométrica.

Tabela 11 – Comparativo entre motores

Rotação do Motor	Custo de Operação Motor Pneumático (R\$/h)	Custo de Operação Motor Elétrico (R\$/h)
465	R\$ 24,47	R\$ 11,17
870	R\$ 28,69	R\$ 11,27
1150	R\$ 26,36	R\$ 14,07
1400	R\$ 22,49	R\$ 13,63
1500	R\$ 18,00	R\$ 11,61
2100	R\$ 21,15	R\$ 9,59
2400	R\$ 18,02	R\$ 8,92

Fonte: Autor (2014)

Analisando a tabela 11 percebe-se que o custo operacional do motor elétrico é mais vantajoso que o do motor pneumático para qualquer que seja a rotação escolhida.

Algo importante para ser analisado é o fato de o motor elétrico não trabalhar no ponto no qual o torque é máximo, devido ao desgaste elevado, o que acarretaria uma menor vida útil. O motor sofre perdas devido ao efeito Joule⁴ pela circulação de corrente no enrolamento do estator, que significam a maior parcela de perda em condição nominal: 25 a 40%.

Ao verificar os resultados do motor pneumático percebeu-se a característica do torque no eixo ser diretamente proporcional a pressão de entrada, isto é, com o aumento da pressão o torque aumenta. O que não acontece com o motor elétrico, que obteve o torque mais elevado com valores de frequência menores.

⁴ Efeito Joule: é o aquecimento do condutor devido à passagem da corrente: é igual a resistência do condutor vezes o quadrado da corrente. (KOSOW, p.461, 1998)

5 CONCLUSÃO

Em alguns países a busca por melhores índices energéticos e conseqüentemente o custo que este fato representa é um desafio constante, visto a preocupação global pela sustentabilidade das fontes de energia.

Os resultados obtidos verificam que para os testes realizados, o motor elétrico de indução trifásico obteve um menor custo de operação em comparação ao motor pneumático de palhetas. Porém levando em consideração os equipamentos necessários para o controle de velocidade utilizados na realização dos ensaios, e uma busca no valor de mercado destes equipamentos, percebe-se que a fonte trifásica (com inversor de frequência) utilizada com o motor elétrico possui um custo mais elevado em comparação ao conjunto lubrífil utilizado pelo motor pneumático.

Mesmo tendo desvantagem na questão custo operacional em comparação com o motor elétrico, o pneumático é utilizado em áreas classificadas, isto é, em ambientes com atmosfera agressiva e volátil. Além desta característica, mostrou ter outras vantagens, como:

- facilidade na variação do torque e velocidade no eixo do motor, bastando alterar a pressão de entrada;
- pode-se obter torques mais elevados para rotações maiores;
- por trabalhar com ar comprimido, o motor pneumático não apresentou aquecimento durante os testes;
- o motor pneumático não sofre danos devido a sobrecarga no eixo.

Porém, além da desvantagem na questão custo operacional do motor pneumático, durante os ensaios foi identificado outra desvantagem do motor. O ruído foi demasiado na saída do motor sem o uso de silenciadores.

O trabalho produzido pode ser utilizado como base de pesquisa para futuras análises envolvendo motores elétricos ou pneumáticos no que se refere a gerenciamento do custo operacional de motores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica**, 2 ed. 2007.

AUGUSTO JÚNIOR, N.; CHABU, I. E., Motores de Alto Rendimento Dimensionamento e Viabilidade Econômica. **Revista Eletricidade Moderna**, 8 p., 2002.

CABRAL, E. L. L.; HUNOLD, M. C., Modelo Matemático de um motor Pneumático de Palhetas. **XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**. São Paulo, 10p., 1999.

CARFAGNI, M.; FURFERI, R.; GOVERNI, L.; VOLPE, Y. A vane-motor automatic design procedure. **Int J Interact Des Manuf**, Volume 7, p. 147–157, 2013.

CHENG, C. -W.; LAN, C. -C., **Modeling and Design of Air Vane Motors for Minimal Torque Ripples**, IEEE/ASME, 6 p., 2010.

COELHO, W. A. T., **Eficiência energética na utilização de Acionamentos Eletromecânicos**. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/>>. Acesso em: 09 de abr. 2014.

DEPRAG Schulz Gmbh u Co. **Air motors**: Customized drive solutions. Technical report, 2008.

FILIPPO FILHO, G., **Motor de Indução**. São Paulo: Érica, 2000.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. JR; UMANS, S. D., **Máquinas Elétricas**. 6 ed. Tradução de Anatólio Laschuk. Porto Alegre: Bookman, 2006, 248 p.

GARCIA, A. G. P., **Impacto da Lei da Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**, 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

KOSOW, I. L., **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 13. ed. Tradução de Felipe Daiello e Percy Soares. São Paulo: Globo, 1998, 667 p.

LINK TECNO – Consultoria e Projetos – Tecnologia em Ar Comprimido. **Cálculo Análise da Eficiência Energética**. Disponível em :<<http://www.linktecono.com.br/calculo>>. Acesso em: 10 de nov. 2014.

MANUELLO, A. B.; MAZZA, L.; PASTORELLI, S.; RAPARELLI, T. A Model of Contact Forces in Pneumatic Motor Vanes. **Meccanica**, Volume 36, Issue 6, PP 691-700, 2001.

MARUMO, R.; TOKHI, M. O., Modelling, simulation and proportional integral control of a pneumatic motor. **Engineering Letters**, Volume 13, Issue 2, 10 p, 2006

NARANJO, J.; KUSSUL, E.; ASCANIO, G. A new pneumatic vanes motor. **Mechatronics** Volume 20, pp 424-427, 2010

OESTREICH, J. L., **Modelagem e Estudo de Sensibilidade de um Motor Pneumático Rotativo de Palhetas**. Monografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS, 19p, 2012.

RGE – Rio Grande Energia. **Tarifas de aplicação**. Disponível em: <<http://www.rge-rs.com.br/ServicecedilosOnline/Tarifas/tabid/75/Default.aspx>>. Acesso em: 09 de abr. 2014.

STARTECH ACIONAMENTOS PNEUMÁTICOS LTDA, Caxias do Sul, 2014.

TESSARO, I. P. B., **Caracterização da Geometria e do Funcionamento do Conceito de Motor Rotativo de Palhetas**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. 101 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, BR-RS, 2012.

VAN WYLEN, G. J.; SONNATAG, R.E.; BORGNAKKE, C., **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

WEG Equipamentos Elétricos S.A., **Motores Elétricos: Guia de Especificação**, Jaraguá do Sul, SC, 2013.

APÊNDICE A – TABELAS COM OS TESTES DO MOTOR PNEUMÁTICO

1 bar			
Rotação rpm	TORQUE Nm	CONSUMO m ³ /h	POTÊNCIA kW
500	0,43	15,34	0,03
1000	0,34	17,76	0,05
1500	0,26	21,72	0,06
2000	0,20	25,81	0,06

2 bar			
Rotação rpm	TORQUE Nm	CONSUMO m ³ /h	POTÊNCIA kW
500	0,98	19,89	0,07
1000	0,90	24,12	0,13
1500	0,80	29,23	0,17
2000	0,69	34,85	0,20
2500	0,48	40,26	0,17
3000	0,36	44,79	0,15

3 bar			
Rotação rpm	TORQUE Nm	CONSUMO m ³ /h	POTÊNCIA kW
500	1,63	27,17	0,12
1000	1,50	33,56	0,21
1500	1,38	39,14	0,30
2000	1,10	44,67	0,31
2500	1,02	51,22	0,36
3000	0,85	57,18	0,36

4 bar			
Rotação rpm	TORQUE Nm	CONSUMO m ³ /h	POTÊNCIA kW
500	2,81	35,53	0,20
1000	2,50	43,51	0,36
1500	2,34	50,24	0,50
2000	2,13	60,41	0,61
2500	1,99	71,12	0,71
3000	1,85	77,62	0,79

5 bar			
Rotação rpm	TORQUE Nm	CONSUMO m ³ /h	POTÊNCIA kW
500	3,63	44,01	0,26
1000	3,45	55,04	0,49
1500	3,13	62,58	0,67
2000	2,87	73,43	0,82
2500	2,79	83,67	0,99
3000	2,33	92,6	1,00

6 bar			
Rotação rpm	TORQUE Nm	CONSUMO m ³ /h	POTÊNCIA kW
500	4,18	54,16	0,30
1000	3,92	65,25	0,56
1500	3,62	72,61	0,77
2000	3,37	83,49	0,96
2500	3,14	93,39	1,12
3000	2,90	102,24	1,24

APÊNDICE B – TABELAS COM OS TESTES DO MOTOR ELÉTRICO

Dados do Motor	Freq: 17 Hz			Rotação: 510 rpm			
Velocidade	465	470	480	490	500	510	rpm
Torque	4,45	4,18	3,11	2,03	1,44	0,18	Nm
Corrente Média	5,13	5,12	5,39	5,68	5,82	6,18	A
Fator de Potência Geral	64	63	58	54	53	49	-
Potência de Eixo	1,01	1,00	0,97	0,95	0,95	0,94	kW
Energia Elétrica Consumida	24,29	23,77	23,03	22,79	22,69	22,35	kWh

Dados do Motor	Freq: 34 Hz			Rotação: 1010 rpm						
Velocidade	870	880	900	920	940	960	980	1000	1010	rpm
Torque	4,05	4,06	3,73	3,294	2,72	2,21	1,41	0,45	0,18	Nm
Corrente Média	3,70	3,63	3,32	2,97	2,54	2,21	1,71	1,38	1,20	A
Fator de Potência Geral	90	90	89	87	84	80	73	50	29	-
Potência de Eixo	1,03	1,01	0,91	0,80	0,66	0,55	0,39	0,21	0,11	kW
Potência Elétrica Consumida	24,5	24,1	21,7	19	15,7	13	9,25	5,13	2,57	kWh

Dados do Motor	Freq: 50 Hz				Rotação: 1510 rpm							
Velocidade	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1300	1510	rpm
Torque	1,48	1,60	1,86	2,02	2,23	2,48	2,71	2,84	2,99	2,59	0,18	Nm
Corrente Média	5,93	5,84	5,83	5,78	5,71	5,72	5,54	5,19	4,84	3,40	0,71	A
Fator de Potência Geral	86	87	87	87	87	87	87	88	89	90	31	-
Potência de Eixo	1,57	1,57	1,56	1,55	1,53	1,54	1,49	1,41	1,33	0,94	0,07	kW
Potência Elétrica Consumida	37,47	37,38	37,23	37,11	36,51	36,64	35,49	33,59	31,60	22,54	1,63	kWh

Dados do Motor	Freq: 60 Hz			Rotação: 1780 rpm									
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1780	rpm
Torque	0,85	0,91	1,03	1,17	1,34	1,50	1,65	1,84	2,17	2,32	1,88	0,18	Nm
Corrente Média	6,54	6,51	6,47	6,38	6,30	6,30	6,18	6,06	5,53	4,69	3,16	0,64	A
Fator de Potência Geral	78	78	79	79	80	80	80	81	83	86	89	53	-
Potência de Eixo	1,57	1,57	1,58	1,56	1,56	1,55	1,53	1,51	1,42	1,24	0,87	0,1	kW
Potência Elétrica Consumida	37,41	37,35	37,50	37,06	37,06	37,01	36,31	36,03	33,70	29,62	20,70	2,50	kWh

Dados do Motor	Freq: 68 Hz			Rotação: 2010 rpm									
	500	600	700	800	900	1000	1100	1300	1500	1700	1900	2010	rpm
Torque	0,61	0,71	0,80	0,93	1,02	1,14	1,27	1,42	1,53	1,35	0,55	0,18	Nm
Corrente Média	5,58	5,55	5,48	5,37	5,27	5,17	5,02	4,57	3,98	2,98	1,53	0,54	A
Fator de Potência Geral	79	79	80	80	81	81	82	84	86	89	87	48	-
Potência de Eixo	1,36	1,35	1,35	1,32	1,32	1,29	1,27	1,19	1,06	0,82	0,41	0,08	kW
Potência Elétrica Consumida	32,45	32,17	32,21	31,62	31,35	30,73	30,31	28,25	25,24	19,48	9,80	1,89	kWh

Dados do Motor	Freq: 85 Hz			Rotação: 2510 rpm										
	700	900	1100	1300	1500	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2510	rpm
Torque	0,18	0,28	0,41	0,54	0,66	0,79	0,87	0,94	0,96	0,97	0,88	0,70	0,18	Nm
Corrente Média	5,24	5,20	5,11	4,93	4,75	4,41	4,25	3,98	3,67	3,33	2,87	2,25	0,59	A
Fator de Potência Geral	69	70	72	73	75	78	78	81	83	85	86	89	73	-
Potência de Eixo	1,12	1,12	1,14	1,11	1,10	1,06	1,02	1,00	0,94	0,87	0,76	0,62	0,13	kW
Potência Elétrica Consumida	26,59	26,77	27,09	26,48	26,20	25,29	24,40	23,71	22,38	20,85	18,14	14,74	3,16	kWh

Dados do Motor	Freq: 102 Hz			Rotação: 3010 rpm										
	900	1200	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3010	rpm
Velocidade	900	1200	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3010	rpm
Torque	0,12	0,11	0,16	0,20	0,27	0,33	0,41	0,47	0,52	0,51	0,43	0,25	0,18	Nm
Corrente Média	4,55	4,47	4,32	4,22	4,10	3,95	3,77	3,51	3,22	2,76	2,19	1,47	0,55	A
Fator de Potência Geral	65	67	69	70	72	74	76	79	82	85	88	90	78	-
Potência de Eixo	0,91	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,85	0,81	0,72	0,59	0,41	0,01	kW
Potência Elétrica Consumida	21,67	21,93	21,84	21,66	21,66	21,45	21,03	20,35	19,40	17,24	14,17	9,75	3,17	kWh