

Otavio Wieczorek Pinto dos Santos

Comparação entre Motor de Indução e Motor de Ímãs Permanentes

Brasil

2015

Otavio Wieczorek Pinto dos Santos

Comparação entre Motor de Indução e Motor de Ímãs Permanentes

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Brasil

2015

Wieczorek Pinto dos Santos, Otavio

Comparação entre Motor de Indução e Motor de Ímãs Permanentes/ Otavio Wieczorek Pinto dos Santos. – Brasil, 2015-

51 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

1. Motores Ímãs Permanentes. 2. Motores Indução. 2. Comparação. I. Tiarajú Loureiro, Luiz.
II. Título

Otavio Wiczorek Pinto dos Santos

Comparação entre Motor de Indução e Motor de Ímãs Permanentes

Este trabalho de conclusão de curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis
Loureiro
Orientador

Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho
Chefe do Departamento da Engenharia
Elétrica

Aprovado em: 03/12/2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro - UFRGS _____

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich - UFRGS _____

Prof. Dr. Carlos Sonier Cardoso do Nascimento - UFRGS _____

*Dedico este trabalho à todos aqueles que me ajudaram nesta longa caminhada,
em especial aos meus pais pelo apoio incondicional.
À memória de meu avô (Nilton Wieczorek),
exemplo de superação e humildade.*

Agradecimentos

Aos colegas de curso pelo apoio e ajuda nos momentos difíceis. Em especial Braian Kaiser Zanini, Fábio Beck Wanderer, Bruno Nervis, Ramede Justo dos Santos, Micael Fischmann, Pedro Morais Paim Silva, Luciano Bracht Barros, Guilherme Wagner Eckert, Magno Vinicius Feijão Teixeira da Silva, Rafael Pasini Gonçalves, Ricardo Bigolin Lanfredi, Afonso Menegola e André Vieira Pigatto.

Aos colegas do Laboratório de Comunicações (LACOM) pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto. Em especial aos mestres Paulo Ilaga Serafini, Sérgio Luiz Schubert Severo e Alvaro Augusto Almeida de Salles.

Aos mestres Luís Gustavo Doninelli Mendes, Bardo Ernst Josef Bodmann, Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, Hamilton Duarte Klimach, Fábio Souto de Azevedo e Ricardo Rego Bordalo Correia por terem sido a inspiração para continuar.

À empresa WEG. Em especial Solon Brum Silveira, Sebastião Lauro Nau e Cristiano Flores da Silva pela atenção e materiais disponibilizados.

À Adriano Toniolo de Oliveira e Cleber Zanatta pela indicação de materias de consulta.

Ao meu orientador pela oportunidade e parceria inestimáveis.

À minha família, na figura dos meus pais, irmãos e avós, por ter sido a viga mestra desta obra.

*"We obey people we don't trust,
to buy things we don't need,
to impress people we don't like,
using money we don't have,
for gratifications that don't last,
killing animals we don't hate,
for pleasures that don't satisfy,
dreaming of a life we don't deserve,
and praying for an afterlife that doesn't exist,
we are a stupid species"
(Philip Wollen)*

Resumo

Este estudo visa comparar motores de indução com motores de ímãs permanentes. A comparação se dá com base em características como preço, massa, volume, densidade de potência, eficiência e curva conjugado/velocidade. Os dados utilizados para comparar os motores foram disponibilizados pelas empresas WEG e Baldor. Infelizmente, os dados dos motores de ímãs permanentes não eram tão completos quanto os dos motores de indução. WEG e Baldor disponibilizaram apenas algumas curvas, o que tornou a comparação uma tarefa mais difícil. Ao final, a comparação mostrou que os motores de ímãs permanentes estudados obtiveram como resultado uma maior eficiência, maior densidade de potência, menor massa, mas preços maiores que os motores de indução.

Palavras-chave: motores de ímãs permanentes. motores de indução. comparação.

Abstract

In this work a comparison between induction motors and permanent magnet motors is made. The comparison is based on characteristics such as price, mass, volume, power density, efficiency and torque/speed curve. The data used to compare the motors came from the companies WEG and Baldor. Unfortunately, the permanent magnet motors's data was not as complete as the induction motors's. WEG and Baldor made only some curves available, which made comparison a more difficult task. In the end, the comparison showed that the studied permanent magnet motors were more efficient, had more power density, were lighter, but were more expensive than the induction motors.

Keywords: permanent magnet motors. induction motors. comparison.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Estator Máquina de Indução | 14 |
| Figura 2 – Rotor Máquina de Indução | 14 |
| Figura 3 – Rotor em Gaiola | 15 |
| Figura 4 – Rotor Bobinado | 15 |
| Figura 5 – Laço de Histerese | 19 |
| Figura 6 – Detalhe Laço de Histerese | 19 |
| Figura 7 – Exemplo de curva B-H NdFeB | 20 |
| Figura 8 – Exemplo de curva B-H Ferro | 20 |
| Figura 9 – Preço Ímãs Mercado Mundial | 21 |
| Figura 10 – Rotor com ímãs fixados na superfície | 23 |
| Figura 11 – Rotor com ímãs fixados no interior | 23 |
| Figura 12 – Motor Ímãs Permanentes Baldor | 26 |
| Figura 13 – Motor Indução Baldor | 26 |
| Figura 14 – Motor Indução WEG | 27 |
| Figura 15 – Motor Ímãs Permanentes WEG | 27 |
| Figura 17 – Eficiência Motor Ímãs Permanentes Baldor | 31 |
| Figura 16 – Conjugado Motor Ímãs Permanentes Baldor | 31 |
| Figura 19 – Eficiência Motor Indução Baldor | 32 |
| Figura 18 – Conjugado Motor Indução Baldor | 32 |
| Figura 20 – Conjugado Motor Ímãs Permanentes WEG | 33 |
| Figura 21 – Potência Motor Ímãs Permanentes WEG | 34 |
| Figura 22 – Conjugado Motor Indução WEG | 35 |
| Figura 23 – Eficiência Motor Indução WEG | 35 |
| Figura 24 – Comparação Eficiência | 36 |
| Figura 25 – Comparação Eficiência - Detalhe | 36 |
| Figura 26 – Comparação Conjugado | 37 |
| Figura 27 – Comparação Conjugado | 38 |
| Figura 28 – Comparação Conjugado | 38 |
| Figura 29 – Comparação Corrente | 39 |
| Figura 30 – Comparação Fator de Potência | 39 |
| Figura 31 – Densidade Volumétrica de Potência Motores | 40 |
| Figura 32 – Densidades Mássica de Potência Motores | 40 |
| Figura 33 – Dimensões Motor de Ímãs Permanentes Baldor | 47 |
| Figura 34 – Dimensões Motor de Ímãs Permanentes Baldor | 47 |
| Figura 35 – Dimensões Motor de Indução Baldor | 47 |
| Figura 36 – Dimensões Motor de Indução Baldor | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 – Dimensões Motor de Indução WEG | 48 |
| Figura 38 – Dimensões Motor de Indução WEG | 49 |
| Figura 39 – Dimensões Motor de Indução WEG | 49 |
| Figura 40 – Dimensões Motor de Ímãs Permanentes WEG | 50 |
| Figura 41 – Dimensões Motor de Ímãs Permanentes WEG | 50 |
| Figura 42 – Dimensões Motor de Ímãs Permanentes WEG | 51 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados Nominais Máquinas | 27 |
| Tabela 2 – Dados Motores | 30 |
| Tabela 3 – Densidades de Potência Motores | 30 |
| Tabela 4 – Dados Motor Ímãs Permanentes Baldor | 31 |
| Tabela 5 – Dados Motor Indução Baldor | 32 |
| Tabela 6 – Dados Motor Ímãs Permanentes WEG | 33 |
| Tabela 7 – Dados Motor Indução WEG | 34 |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Introdução | 13 |
| 1 | MOTORES DE INDUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Funcionamento | 14 |
| 2 | MOTOR DE ÍMÃS PERMANENTES | 17 |
| 2.1 | Ímãs Permanentes | 18 |
| 2.2 | Funcionamento | 22 |
| 3 | ESCOLHA DOS MOTORES PARA COMPARAÇÃO | 25 |
| 4 | ANÁLISE DOS MOTORES | 29 |
| 4.1 | Massa | 29 |
| 4.2 | Preço | 29 |
| 4.3 | Dimensões | 29 |
| 4.4 | Curvas | 30 |
| 5 | CONCLUSÃO | 42 |
| 6 | TRABALHOS FUTUROS | 43 |
| | REFERÊNCIAS | 44 |
| | ANEXOS | 46 |
| | ANEXO A – DIMENSÕES MOTORES | 47 |

Introdução

É de suma importância fazer a escolha apropriada do motor para uma dada operação. Principalmente no cenário atual, onde o desenvolvimento das nações está atrelado a demanda por energia e onde, ao mesmo tempo, existe dificuldade para que a geração supra essa demanda. Nesse contexto, a escolha de um motor adequado permite um aumento da eficiência da operação e, conseqüentemente, diminuição das perdas. Segundo [WEG \(2015b\)](#) cerca de 40% da demanda energética global estaria relacionada à aplicações de motores elétricos.

A seleção do motor mais adequado para uma aplicação depende de requisitos específicos e disponibilidade financeira. Por exemplo, motores CC são os mais indicados para aplicações em que se deve partir com plena carga, como elevadores e guindastes, mas, em contrapartida, são mais caros.

Neste trabalho, o foco será a comparação de um motor de ímãs permanentes CA com um motor de indução, não sendo analisado nenhum outro tipo de motor. Isso deve-se ao fato do motor de indução ser o mais utilizado na indústria e do motor de ímãs permanentes ser uma alternativa.

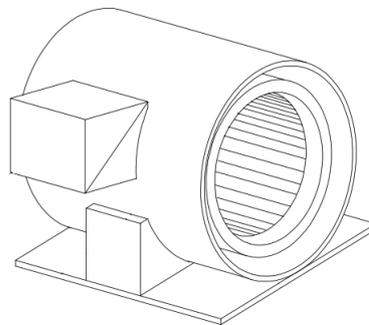
1 Motores de Indução

Atualmente, os motores de indução são as máquinas mais utilizadas na indústria (ELETROBRAS, 2015). Em geral, o motor de indução é mais barato e fácil de manter que as alternativas disponíveis no mercado, principalmente se comparado ao motor CC. Isso se deve ao fato de não possuir comutador o que o torna um motor de construção mais simples. Possui vantagens em aplicações de boa eficiência em uma estreita faixa de velocidades, podendo ser empregado numa grande quantidade de aplicações. Ainda assim, sua maior vantagem é o baixo custo, seu preço é o maior atrativo para a indústria em geral.

1.1 Funcionamento

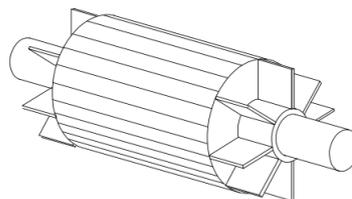
O motor de indução é composto de duas partes principais: estator e rotor (ver Figuras 1 e 2). O rotor (parte móvel) gira dentro do estator (parte fixa), entre eles existe um entreferro preenchido com ar. Seu nome deriva do fato das correntes alternadas serem induzidas no rotor pelo campo magnético girante produzido no estator.

Figura 1: Estator Máquina de Indução



Fonte: (BARNES, 2003)

Figura 2: Rotor Máquina de Indução



Fonte: (BARNES, 2003)

A aplicação de tensão alternada nos enrolamentos do estator produz campos magnéticos pulsantes que geram um campo magnético resultante girante com a frequência da rede. O fluxo magnético no estator induz tensão alternada no enrolamento trifásico do rotor que produz um fluxo magnético no rotor que tentará se alinhar com o campo magnético girante do estator.

Existem dois tipos de motores de indução e eles diferem na configuração do rotor: rotor em gaiola e rotor bobinado (ver Figuras 3 e 4, respectivamente). O motor com rotor em gaiola é o mais comum principalmente em virtude do menor preço.

Figura 3: Rotor em Gaiola



Fonte: <<https://www.pinterest.com/pin/218846863117305817/>>

Figura 4: Rotor Bobinado



Fonte: <<https://www.pinterest.com/pin/218846863117305817/>>

O motor de indução, diferente de outros motores, apresenta escorregamento, ou seja, o rotor gira com rotação levemente mais baixa que o campo girante do enrolamento de armadura. Se o rotor girasse com a mesma velocidade do campo girante não haveria tensão induzida no rotor e assim ele iria perder velocidade.

O motor de indução possui uma estreita faixa de velocidades junto com uma alta eficiência (comparativamente) em altas velocidades. Um ponto negativo é o fato da corrente de magnetização necessária e das perdas ôhmicas no rotor reduzirem a eficiência, que diminui na faixa nominal de velocidades em comparação com o motor de ímãs permanentes.

2 Motor de Ímãs Permanentes

Em geral, os motores de ímãs permanentes podem ser empregados em qualquer aplicação que utilize motores de indução. Além disso, o motor de ímãs permanentes apresenta uma alta eficiência para uma maior faixa de velocidades, diferentemente do motor de indução que possui alta eficiência para uma estreita faixa de velocidades.

Apesar da estrutura simples, baixo custo e menor manutenção do motor de indução, existem limitações em performance. Segundo [CHAPMAN \(2012\)](#) :

$$\tau_{carga} = \frac{P_{saída}}{\omega_m} \quad (2.1)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi}{60} n_m \quad (2.2)$$

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad (2.3)$$

$$n_{sinc} = \frac{120f_{sist}}{P_{saída}} \quad (2.4)$$

Substituindo as Equações 2.2, 2.3 e 2.4 na Equação 2.1:

$$\tau_{carga} = \frac{P_{saída}}{\frac{2\pi}{60}(1 - s)n_{sinc}} \quad (2.5)$$

Isolando o escorregamento:

$$s = 1 - \frac{P_{saída}}{\frac{2\pi}{60}\tau_{carga}n_{sinc}} \quad (2.6)$$

Dessa forma, um aumento na carga nominal faz com que a velocidade diminua, esse efeito é ainda pior em motores de indução uma vez que o escorregamento varia inversamente com o conjugado na carga diminuindo a velocidade ainda mais. Assim posto, aplicações de alta performance motivaram a busca por motores com maior eficiência.

As propriedades dos ímãs permanentes possibilitam reduzir perdas e, consequentemente, obter um maior rendimento ([WEG, 2015a](#)). Isso permite a construção de motores de ímãs permanentes menores e que entregam a mesma potência de motores de indução maiores. Essa característica ilustra uma vantagem em aplicações em que o espaço e a massa são fatores determinantes.

Entretanto, a utilização de ímãs também possui desvantagens. A principal seria o fato desses ímãs serem extraídos da natureza e serem limitados (SILVA S. A. ; LUCIANO, 1997). Esse ponto traduz-se em um alto custo para obtenção dos mesmos, elevando o custo total da máquina.

Assim, motores de ímãs permanentes fornecem uma solução simples e confiável para aplicações de alta eficiência, alto conjugado de partida e curva velocidade/conjugado linear.

2.1 Ímãs Permanentes

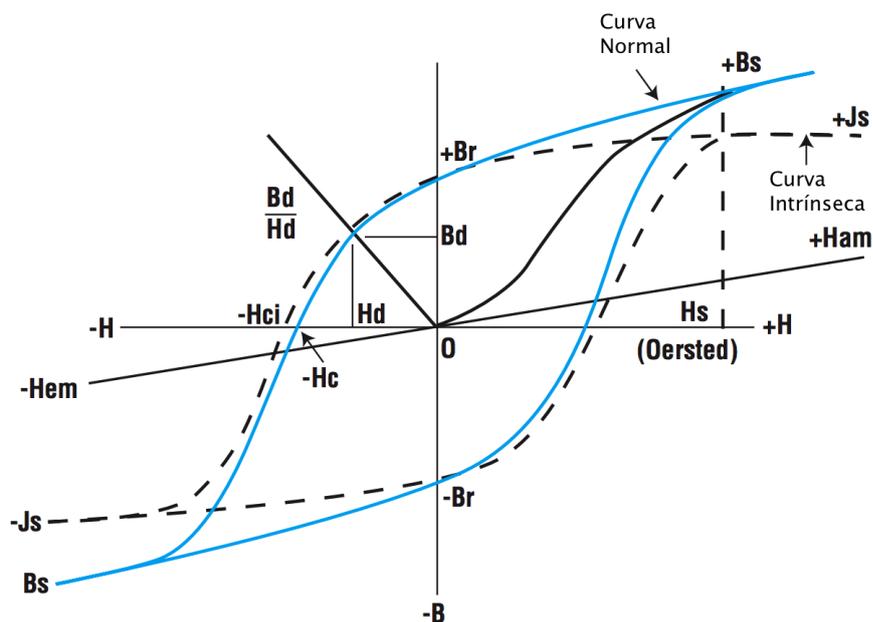
Ímãs permanentes são ímãs capazes de manter o fluxo magnético por um tempo elevado (FLORES, 1998). As pesquisas com materiais compostos de ímãs permanentes datam do século XX e encontram-se em desenvolvimento constante, sendo que apenas recentemente a tecnologia começou a ser empregada em grande escala.

Uma das tantas aplicações desses ímãs é a construção do rotor de máquinas síncronas. Através de pesquisas procura-se projetar um rotor com as melhores propriedades magnéticas. Para a escolha do ímã utiliza-se, entre outras, a curva B-H do material (ver Figuras 7 e 8), onde podem ser visualizadas características tais como:

- Indução residual;
- Força coercitiva;
- Produto energético máximo;

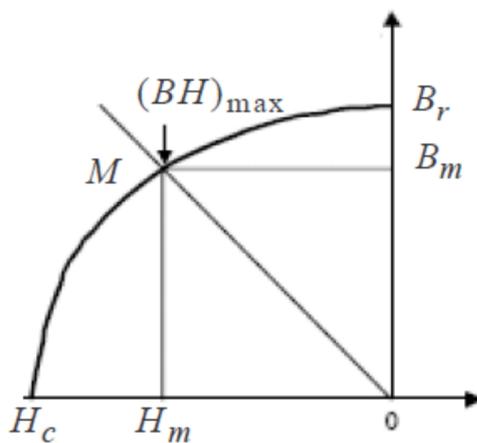
Segundo SILVA S. A. ; LUCIANO (1997) a indução residual (B_r das Figuras 5 e 6) é o valor da densidade de fluxo magnético correspondente à intensidade de campo magnético igual a zero e indica o quão forte o ímã é capaz de ser. A força coercitiva (H_c das Figuras 5 e 6) é o valor da intensidade de campo magnético desmagnetizante necessário para trazer a densidade de fluxo magnético a zero num material previamente magnetizado, aponta o quão difícil é para desmagnetizar o ímã. E o produto energético máximo (BH_{max} da Figura 6) é a densidade máxima de energia armazenada num ímã e indica qual volume de material magnético é necessário para projetar um determinado nível de fluxo magnético.

Figura 5: Laço de Histerese



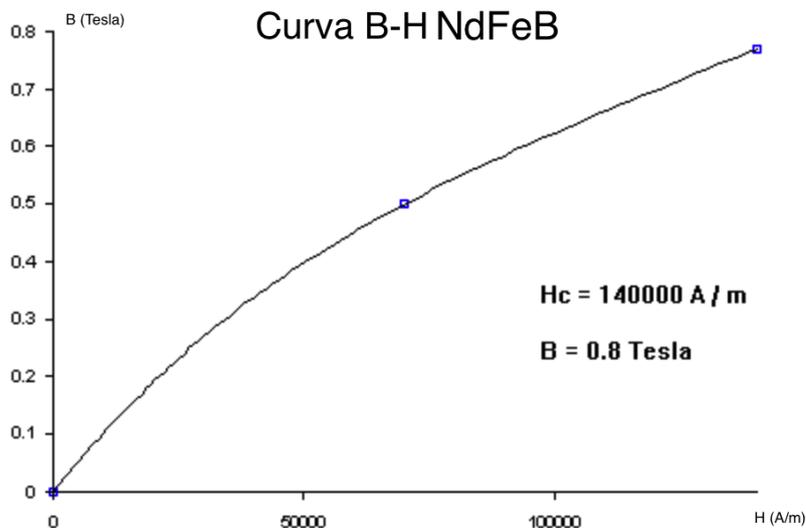
Fonte: (ANDREWS, 1998)

Figura 6: Detalhe Laço de Histerese



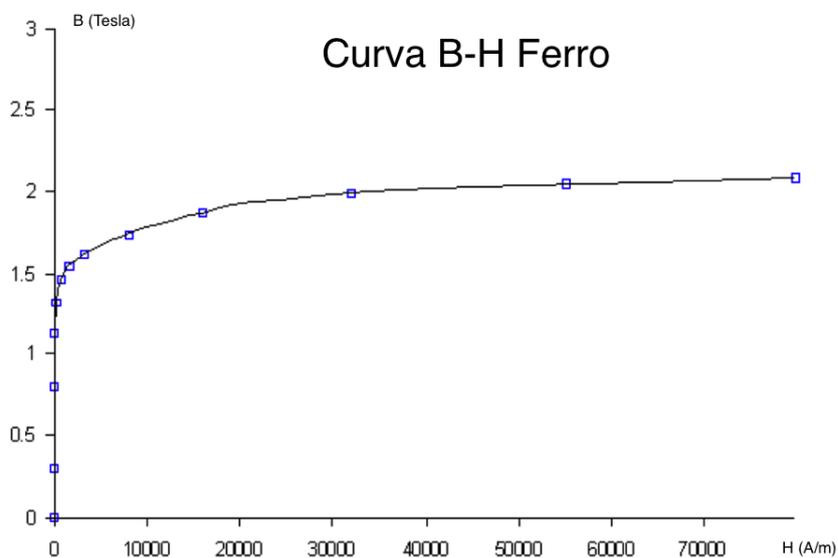
Fonte: (SANTOS, 2010)

Figura 7: Exemplo de curva B-H NdFeB



Fonte: (CHAITHONGSUK, 2006)

Figura 8: Exemplo de curva B-H Ferro



Fonte: (CHAITHONGSUK, 2006)

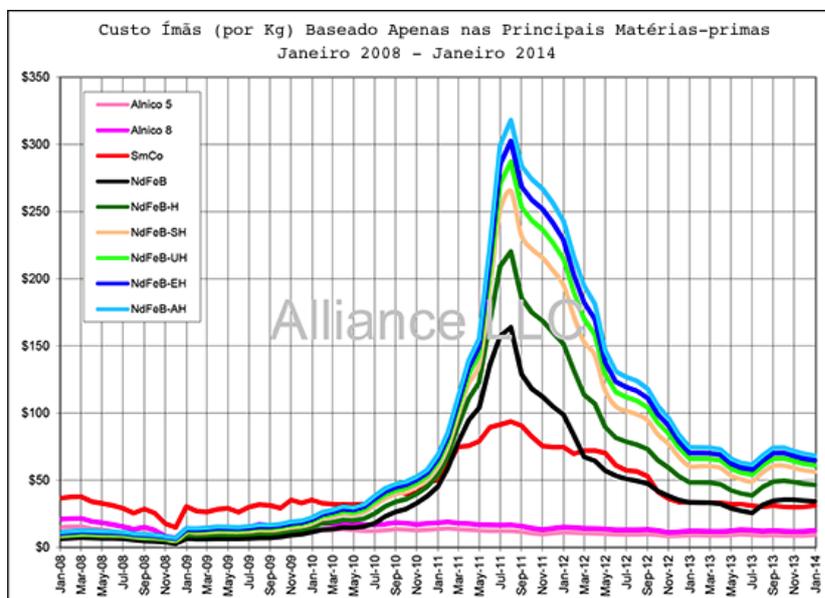
Os ímãs permanentes podem ser classificados em 3 grupos (SILVA S. A. ; LUCIANO, 1997):

- Alnicos;

- Possuem alta indução residual e baixos coeficientes de temperatura;
- Cerâmicos;
 - São de baixo custo e possuem alta resistência elétrica às correntes parasitas;
- Terras-raras;
 - SmCo e NdFeB;
 - Os ímãs NdFeB possuem maior produto energético, maior força coercitiva e maior indução remanente que os ímãs SmCo;
 - Os ímãs NdFeB apresentam as desvantagens de alta suscetibilidade à corrosão e grande limitação no que diz respeito à temperatura;
 - Alto custo;

O bom projeto de um rotor com ímãs permanentes considera tanto as características do ímã, bem como os custos envolvidos na operação. A seguir, uma relação de preços de ímãs no mercado mundial entre os anos de 2008 e 2014.

Figura 9: Preço Ímãs Mercado Mundial



Fonte: <http://www.allianceorg.com/images/commodity/magnet_cost_012008_012014.png>

2.2 Funcionamento

As máquinas trifásicas síncronas possuem dois conjuntos de enrolamentos: os enrolamentos do estator e os enrolamentos do rotor. Os enrolamentos do estator, ou enrolamentos de armadura, tem como função a produção um campo girante e são alimentados com corrente alternada. Os enrolamentos do rotor, ou enrolamentos de campo, tem como função a produção de um campo magnético contínuo e estático e são alimentados por corrente contínua.

As máquinas de ímãs permanentes apresentam ímãs no rotor para produzir excitação, ou seja, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes. Como nenhuma corrente de excitação é necessária, as máquinas de ímãs permanentes apresentam uma maior eficiência média na faixa de velocidades nominal.

Segundo FITZGERALD (2014) a relação das potências envolvidas numa máquina elétrica é dada por:

$$P_i = P_o + P_R + P_{mag} + P_M + P_d \quad (2.7)$$

onde:

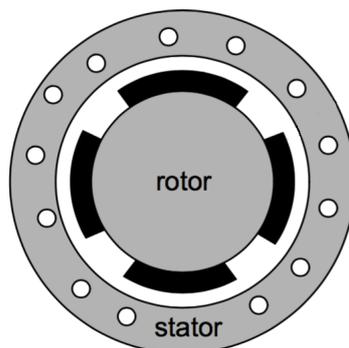
- P_i é a potência elétrica de entrada;
- P_o é a potência mecânica de saída;
- P_R é a potência dissipada nos enrolamentos de armadura;
- P_{mag} é a potência que representa as perdas magnéticas;
- P_M é a potência representando as perdas mecânicas;
- P_d é a potência representando outras perdas diversas;

As perdas nos enrolamentos de campo estão inseridas nas perdas elétricas. Em muitas análises, as perdas elétricas no rotor são desprezadas, uma vez que as perdas nos enrolamentos de armadura são consideravelmente maiores.

Ao substituir-se os enrolamentos de campo por ímãs permanentes, é possível observar duas consequências imediatas: menor volume do rotor, tendo em vista que, os ímãs ocupam uma área menor comparado aos enrolamentos de cobre além do fato de, não existindo enrolamentos no rotor, não se fazer necessária uma corrente para alimentá-los.

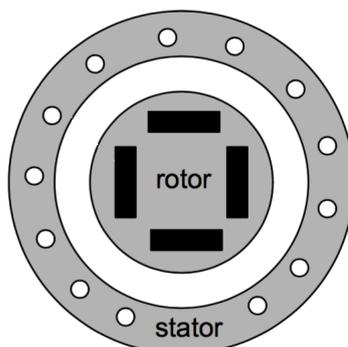
Essa substituição pode ser feita em duas configurações possíveis: os ímãs podem ser fixados na superfície do rotor ou no seu interior (ver Figuras 10 e 11).

Figura 10: Rotor com ímãs fixados na superfície



Fonte: (YASKAWA, 2009)

Figura 11: Rotor com ímãs fixados no interior



Fonte: (YASKAWA, 2009)

Diferentemente do motor de indução que é assíncrono, o motor de ímãs permanentes é síncrono, ou seja, a velocidade do rotor é igual a velocidade do campo magnético. Isso permite um aumento da performance da máquina, aumentando o rendimento e a relação conjugado/volume.

Uma desvantagem seria a corrente necessária para o enfraquecimento do campo, assim ocorre um aumento nas perdas do estator e diminuição da eficiência para altas velocidades.

O aumento do uso de motores de ímãs permanentes deu-se a partir da utilização dos ímãs permanentes de terras raras. Esses ímãs permitem uma alto rendimento nas máquinas elétricas, a construção de máquinas com uma elevada relação conjugado/volume e diminuição do risco de desmagnetização. Um aspecto importante desse tipo de motor é que a capacidade de sobrecarga é dada pela características do ímã e, portanto, depende do mesmo. Além disso, é necessário um controle de temperatura do motor, uma vez que existe

a possibilidade de desmagnetização irreversível dos ímãs em condições de alta temperatura e alta corrente no estator.

Os ímãs ocupam um espaço menor do que os enrolamentos, possibilitando máquinas menores. A diminuição do tamanho da máquina junto com a utilização de ímãs cerâmicos permite uma redução de custos, o que possibilita um preço mais competitivo.

Algumas das aplicações que se utilizam dessas vantagens são: veículos híbridos, sistemas de propulsão de jatos e navios, torres de resfriamento e etc.

3 Escolha dos Motores para Comparação

Para realizar a comparação foram escolhidos quatro motores: dois motores de indução e dois motores de ímãs permanentes. A escolha desses motores deu-se através de pesquisa em sites de fabricantes como: Weg, Baldor, Bodine, entre outros. Durante a pesquisa atentou-se para os sites que possuíssem a maior quantidade de dados e maior qualidade de gráficos e tabelas. Além disso, os motores precisam possuir valores de velocidade e conjugado muito próximos para que a comparação tenha sentido. Esse detalhe reduz o universo de motores disponíveis.

É importante ressaltar a escassez de dados para os motores de ímãs permanentes em todos os sites de fabricantes de motores. Dada a dificuldade, foi necessário entrar em contato com os fabricantes. Os fabricantes que responderam não foram capazes de disponibilizar a mesma quantidade de dados disponíveis para os motores de indução.

Através da realização da pesquisa obteve-se como principais candidatos os seguintes modelos: EHF3218T, ZDPM18015C-BV, WMagnet Drive System e o W22 IR2. Sendo que os dois primeiros modelos são fabricados pela Baldor e os dois últimos pela WEG.

O modelo EHF3218T é um motor de indução de 15HP e 1765RPM, ZDPM18015C-BV é um motor de ímãs permanentes de 15HP e 1800RPM, WMagnet Drive System é um conjunto composto de um inversor e um motor de ímãs permanentes de 15 HP e 1800RPM e o W22 IR2 é um motor de indução de 15HP e 1765RPM (ver Figuras 12, 13, 15 e 14).

Para facilitar a a visualização e entendimento dos dados dos motores durante a leitura do trabalho, adotou-se a seguinte nomenclatura:

- EHF3218T - Indução Baldor;
- ZDPM18015C-BV - Ímãs Permanentes Baldor;
- W22 IR2 - Indução WEG;
- WMagnet Drive System - Ímãs Permanentes WEG;

Figura 12: Motor Ímãs Permanentes Baldor



Fonte: <<http://www.baldor.com/catalog/ZDPM18015C-BV>>

Figura 13: Motor Indução Baldor



Fonte: <<http://www.baldor.com/catalog/EHM2333T>>

Figura 14: Motor Indução WEG



Fonte: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Motores-Eletricos/Industriais/W22-IR2>>

Figura 15: Motor Ímãs Permanentes WEG



Fonte: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-magnet-drive-system-50015189-catalogo-por-pdf>>

Na Tabela 1 encontram-se as características nominais para os motores.

Tabela 1: Dados Nominais Máquinas

| Tipo Código | Ímãs Perm. Baldor ZDPM18015C-BV | Indução Baldor EHM2333T | Indução WEG W22 IR2 | Ímãs Perm. WEG WMagnet |
|-----------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Potência (HP) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Tensão (V) | 460 | 460 | 440 | 380 |
| Corrente (A) | 15,6 | 18,1 | 19,4 | 19,2 |
| Rotação (RPM) | 1800 | 1765 | 1765 | 1800 |
| Conjugado (N.m) | 59,34 | 60,51 | 59,5 | 58,35 |
| Frame | FL1838 | 254T | 160L | 132S |
| Frequência (Hz) | 60 | 60 | 60 | 60 ¹ |
| Eficiência (%) | 94,6 | 92,4 | 91,7 | 94,1 |
| FP (%) | 96,4 | 83 | 81 | 98 |

¹ O motor Wmagnet funciona, obrigatoriamente, com um inversor de frequência próprio, o CFW-11 da WEG

Uma vez escolhidos os motores, o passo seguinte é fazer a análise de suas características. A comparação entre motores deve ressaltar os pontos positivos e negativos de cada máquina para uma dada aplicação.

4 Análise dos Motores

A análise será feita com base nos dados fornecidos pelo fabricante das máquinas através do seu website.

O método de análise será a comparação das características obtidas.

4.1 Massa

A massa do motor é um ponto importante dependendo da aplicação em questão. Motores pesados dificultam o transporte e manutenção.

A massa do motor Indução Baldor é de 113,398kg.

A massa do motor Ímãs Permanentes Baldor é de 99,79kg.

A massa do motor Indução WEG é de 102kg.

A massa do motor Ímãs Permanentes WEG é de 58kg.

4.2 Preço

O preço certamente é um fator importante. Em qualquer projeto de engenharia, trabalha-se com um orçamento finito, sendo necessário encontrar uma máquina que cumpra a função desejada e que, ao mesmo tempo, possua preço compatível com o orçamento disponível.

O preço do motor Indução Baldor é de US\$2332,00.

O preço do motor Ímãs Permanentes Baldor é de US\$7315,00.

O preço do motor Indução WEG é de R\$2635,64.

O preço do motor Ímãs Permanentes WEG é de R\$11047,48.

4.3 Dimensões

As dimensões do motor, mais especificamente o volume ocupado por ele, são de extrema importância. Algumas aplicações requerem motores que ocupem um pequeno volume.

É possível visualizar através das Figuras 33 e 34 (ver Anexo A) as dimensões do motor Ímãs Permanentes Baldor. As dimensões dos demais motores encontram-se também

no Anexo A. Com as dimensões, pode-se estimar o volume do motor. O valor obtido foi de $0,0189m^3$.

O volume do motor Indução Baldor é $0,0323m^3$ (ver Figuras 35 e 36 no ver Anexo A).

O volume do motor Indução WEG é $0,0345m^3$ (ver Figuras 37, 38 e 39 no Anexo A).

O volume do motor Ímãs Permanentes WEG é $0,0158m^3$ (ver Figuras 40, 41 e 42 no Anexo A).

Um resumo desses dados está contido na Tabela 2.

Tabela 2: Dados Motores

| Máquina | Massa (kg) | Preço (USD) | Preço (R\$) | Volume (m^3) |
|-------------------------|------------|-------------|-------------|------------------|
| Indução Baldor | 113,39 | 2332,00 | - | 0,0323 |
| Ímãs Permanentes Baldor | 99,79 | 7315,00 | - | 0,0189 |
| Indução WEG | 102 | - | 2635,64 | 0,0345 |
| Ímãs Permanentes WEG | 58 | - | 11047,48 | 0,0158 |

Com base nos dados das Tabelas 1 e 2, foram obtidos os valores de densidade volumétrica e mássica de potência para cada um dos motores. Tais valores podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Densidades de Potência Motores

| Máquina | Densidade Volumétrica de Potência (HP/m^3) | Densidade Mássica de Potência (HP/Kg) |
|-------------------|--|---|
| Indução Baldor | 464,40 | 0,132 |
| Ímãs Perm. Baldor | 793,65 | 0,150 |
| Indução WEG | 434,78 | 0,147 |
| Ímãs Perm. WEG | 949,37 | 0,259 |

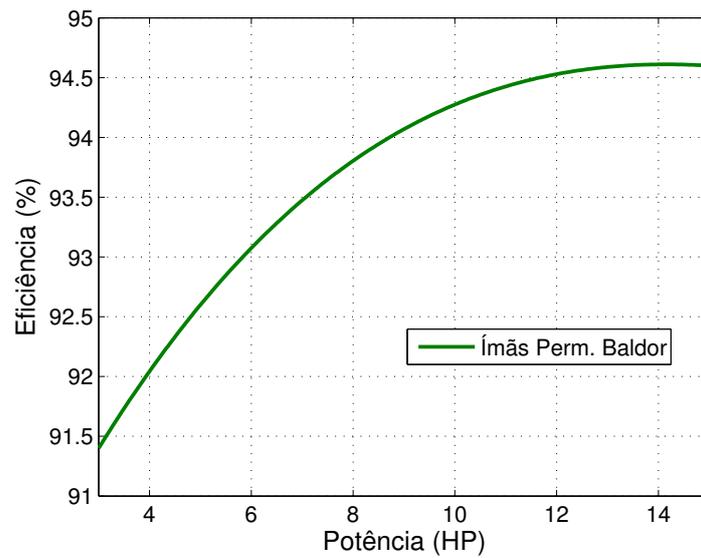
4.4 Curvas

As curvas foram obtidas com base nos dados disponíveis no website dos fabricantes. Os fabricantes em questão são WEG e Baldor. Os dados da Baldor encontram-se nos arquivos de apoio na página destinada a cada motor na forma de gráficos, já os dados da WEG foram obtidos pelo site e contatando a empresa. Para a utilização neste trabalho foram selecionados alguns valores desses gráficos para a reprodução das curvas. Com isso, foi possível obter os dados das Tabelas 4, 5, 6 e 7. Com esses dados e utilizando o software MATLAB reconstruiu-se as curvas a seguir.

Tabela 4: Dados Motor Ímãs Permanentes Baldor

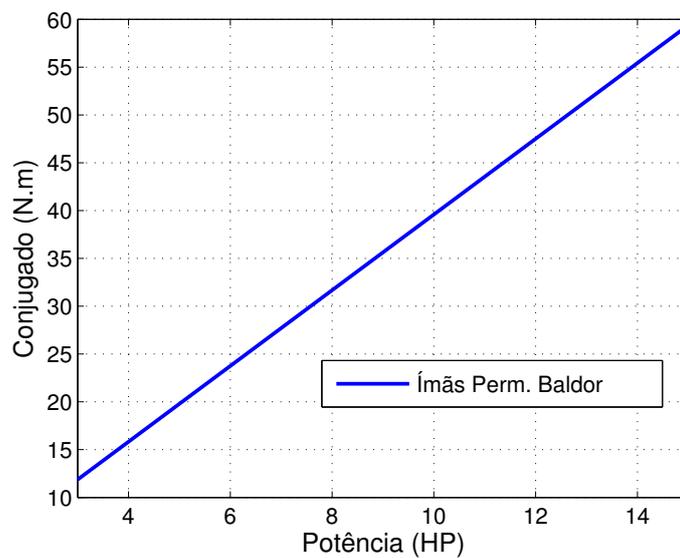
| Potência (HP) | Conjugado (N.m) | Rotação (RPM) | Eficiência (%) |
|---------------|-----------------|---------------|----------------|
| 3 | 11,87 | 1800 | 91,4 |
| 6,8 | 26,92 | 1800 | 93,4 |
| 10,8 | 42,75 | 1800 | 94,4 |
| 15 | 59,34 | 1800 | 94,6 |

Figura 17: Eficiência Motor Ímãs Permanentes Baldor



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 16: Conjugado Motor Ímãs Permanentes Baldor

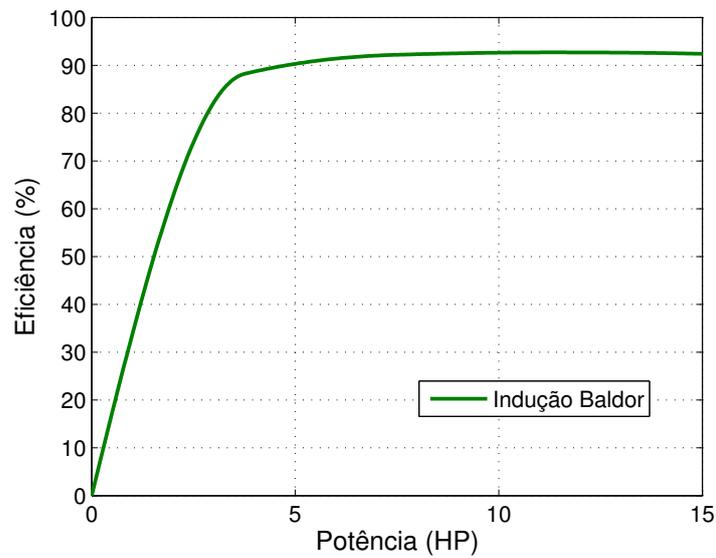


Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 5: Dados Motor Indução Baldor

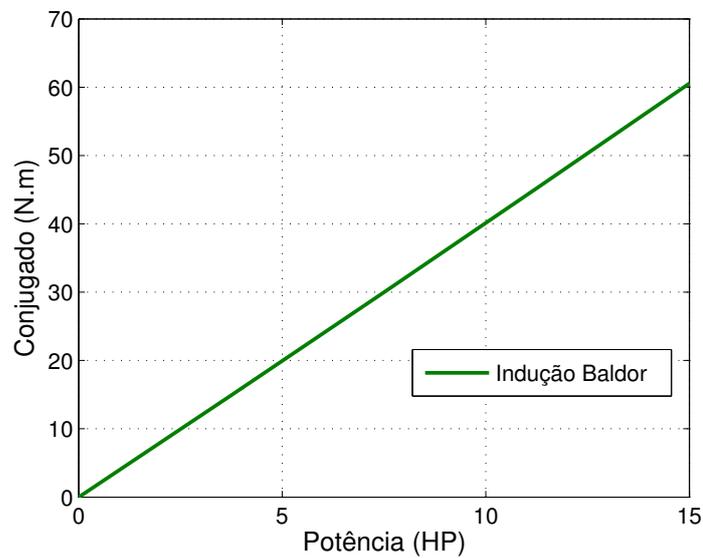
| Potência (HP) | Conjugado (N.m) | Rotação (RPM) | Eficiência (%) |
|---------------|-----------------|---------------|----------------|
| 0 | 8,13 | 1800 | 90,5 |
| 3,75 | 14,92 | 1791 | 88,2 |
| 7,5 | 29,97 | 1783 | 92,2 |
| 11,25 | 45,19 | 1774 | 92,7 |
| 15 | 60,51 | 1765 | 92,4 |

Figura 19: Eficiência Motor Indução Baldor



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 18: Conjugado Motor Indução Baldor

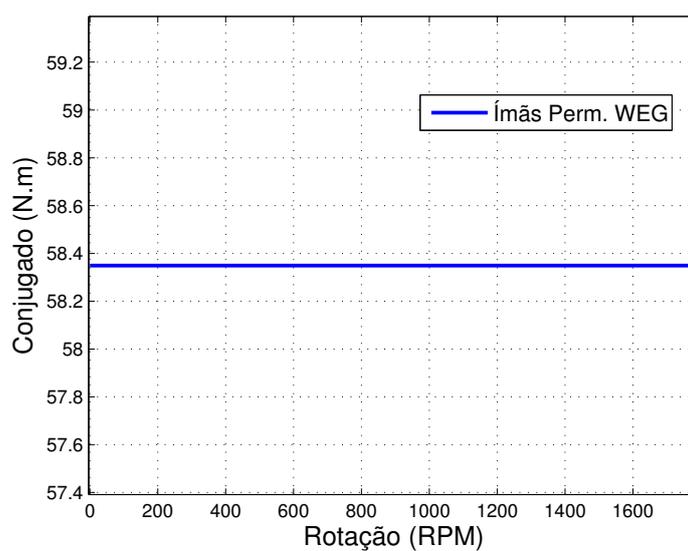


Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 6: Dados Motor Ímãs Permanentes WEG

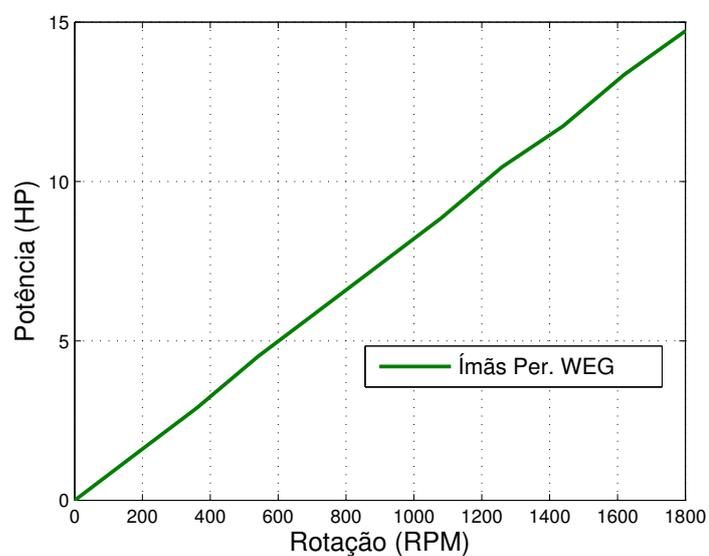
| Potência (HP) | Conjugado (N.m) | Rotação (RPM) |
|---------------|-----------------|---------------|
| 0 | 58,35 | 0 |
| 1,45 | 58,35 | 180 |
| 2,89 | 58,35 | 360 |
| 4,50 | 58,35 | 540 |
| 5,95 | 58,35 | 720 |
| 7,39 | 58,35 | 900 |
| 8,85 | 58,35 | 1080 |
| 10,45 | 58,35 | 1260 |
| 11,74 | 58,35 | 1440 |
| 13,35 | 58,35 | 1620 |
| 14,72 | 58,35 | 1800 |

Figura 20: Conjugado Motor Ímãs Permanentes WEG



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 21: Potência Motor Ímãs Permanentes WEG

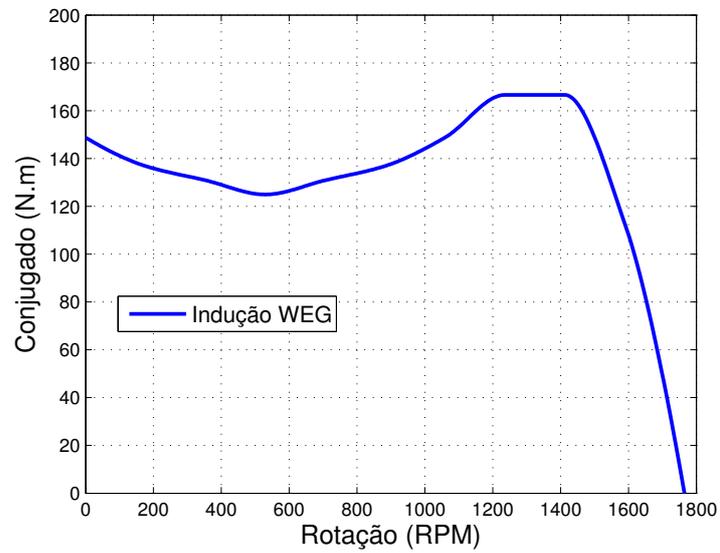


Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 7: Dados Motor Indução WEG

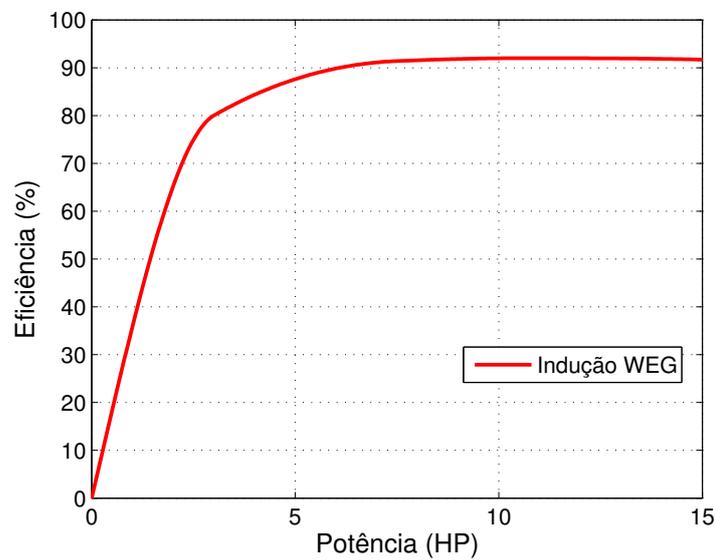
| Potência (HP) | Eficiência (%) | Rotação (RPM) | Conjugado (N.m) |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 148,75 |
| 3 | 80 | 176,5 | 136,85 |
| 7,5 | 91,4 | 353 | 130,9 |
| 10,5 | 92 | 529,5 | 124,95 |
| 15 | 91,7 | 706 | 130,9 |
| - | - | 882,5 | 136,85 |
| - | - | 1059 | 148,75 |
| - | - | 1235,5 | 166,6 |
| - | - | 1412 | 166,6 |
| - | - | 1588,5 | 113,05 |
| - | - | 1765 | 0 |

Figura 22: Conjugado Motor Indução WEG



Fonte: Produzido pelo autor

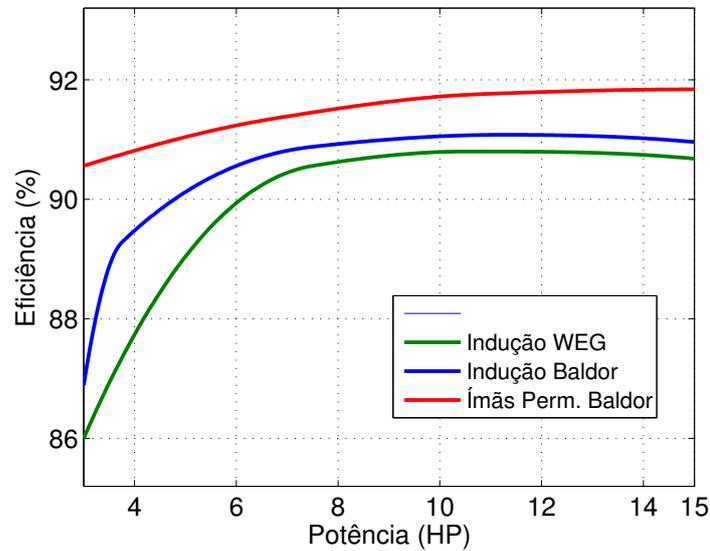
Figura 23: Eficiência Motor Indução WEG



Fonte: Produzido pelo autor

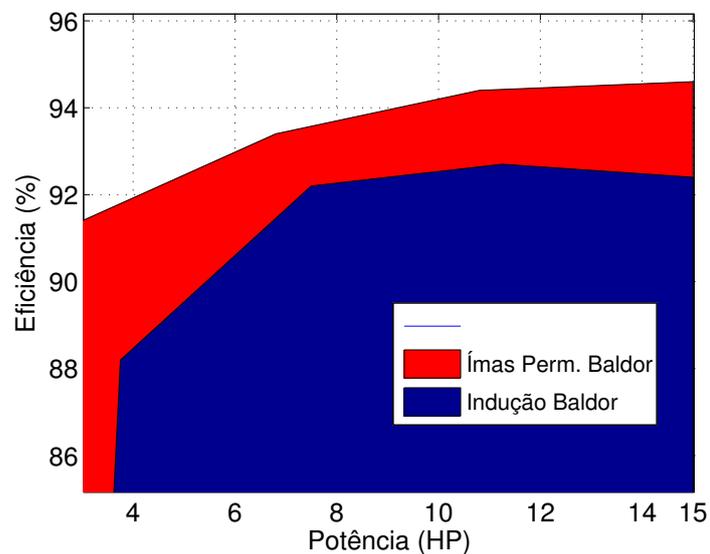
Na Figura 24 é possível ver um comparativo das curvas de eficiência, nota-se que apenas três dos quatro motores encontram-se no gráfico. Isso ocorre pela indisponibilidade da curva de eficiência do motor Ímãs Permanentes WEG.

Figura 24: Comparação Eficiência



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 25: Comparação Eficiência - Detalhe



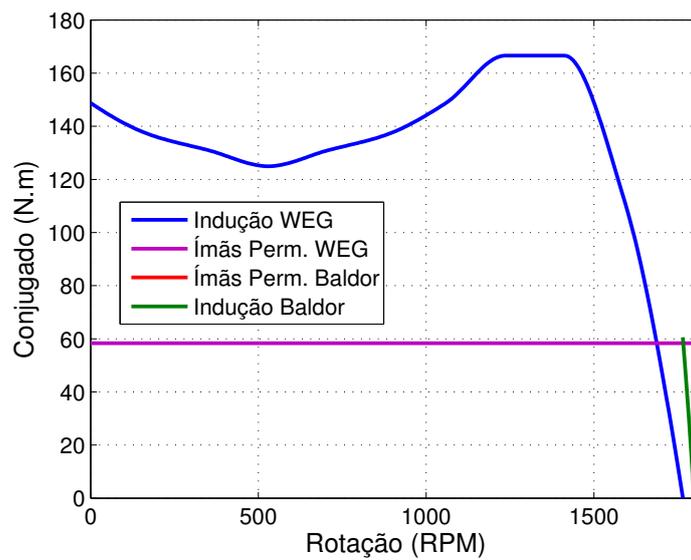
Fonte: Produzido pelo autor

Analisando a Figura 24 nota-se que o motor Ímãs Permanentes Baldor possui uma eficiência maior que os motores de indução. Segundo [Patel, Nagarsheth e Parnerkar \(2012\)](#) isso se deve ao fato de, no motor de indução, parte da corrente do estator ser requerida para induzir corrente no indutor. Essa corrente adicional gera um aquecimento no motor. A

diferença de eficiência sugere uma possível redução nas perdas energéticas com a utilização de motores de ímãs permanentes.

Na Figura 25 encontra-se um detalhe da curva de eficiência para os motores da Baldor. Nela, fica mais evidente a diferença de performance entre os tipos de motor.

Figura 26: Comparação Conjugado



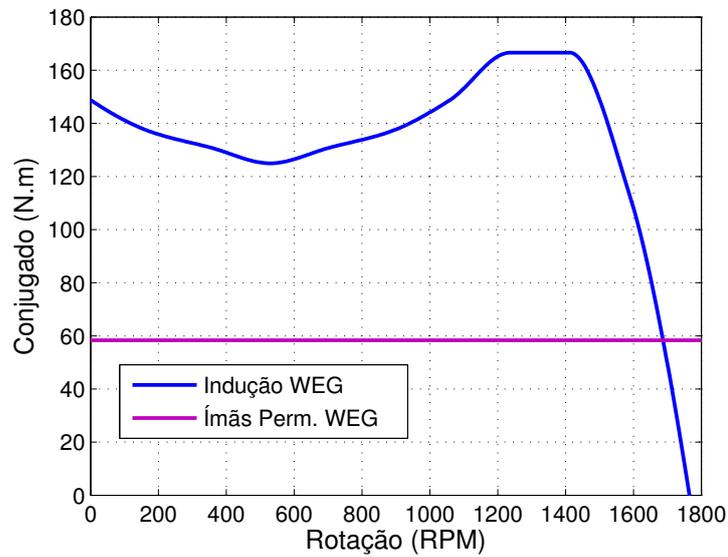
Fonte: Produzido pelo autor

Na Figura 26 é mostrado um comparativo das curvas de conjugado para os quatro motores. Ocorre que os dois motores da Baldor possuem curva de conjugado apenas para uma estreita faixa de velocidades, tornando difícil a visualização em um único gráfico. Sendo assim, analisou-se em duplas (ver Figuras 27 e 28).

Na Figura 27 é mostrado um detalhe comparativo das curvas de conjugado para a dupla de motores da WEG. Nela é possível notar que o conjugado do motor de indução é maior, mas o seu pico ocorre antes da velocidade nominal, devido ao escorregamento. Enquanto o motor de ímãs permanentes possui um conjugado constante, inclusive na velocidade nominal.

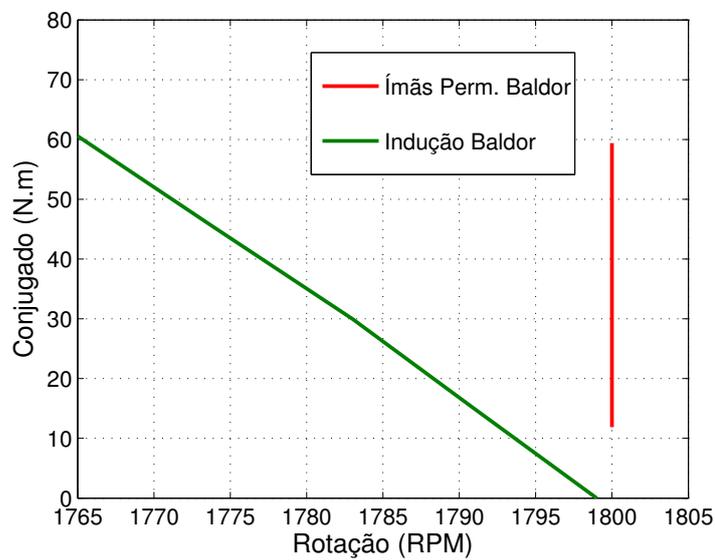
Já na Figura 28 é mostrado um detalhe comparativo das curvas de conjugado para a dupla de motores da Baldor. Infelizmente a empresa disponibilizou um teste feito com velocidade constante com o motor de ímãs permanentes, inviabilizando qualquer tipo de comparação com o motor de indução.

Figura 27: Comparação Conjugado



Fonte: Produzido pelo autor

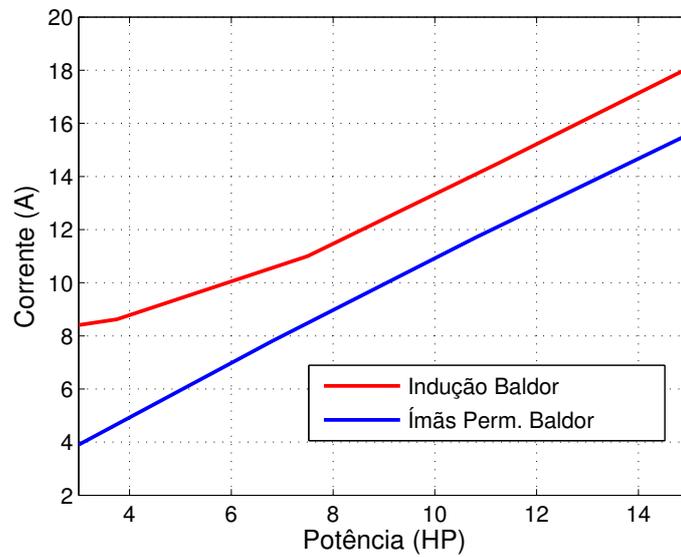
Figura 28: Comparação Conjugado



Fonte: Produzido pelo autor

A seguir, é mostrado um detalhe comparativo das curvas de corrente para a dupla de motores da Baldor (ver Figura 29). Esse gráfico confirma o fato do motor de ímãs permanentes ser mais eficiente que o motor de indução, possuindo assim uma menor corrente.

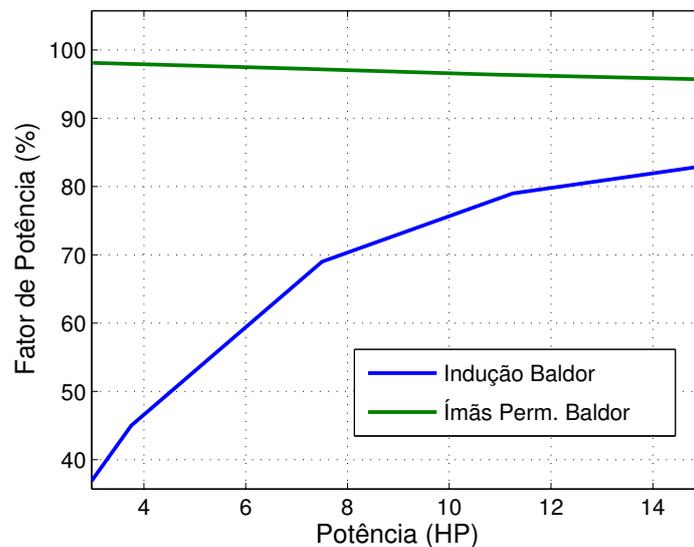
Figura 29: Comparação Corrente



Fonte: Produzido pelo autor

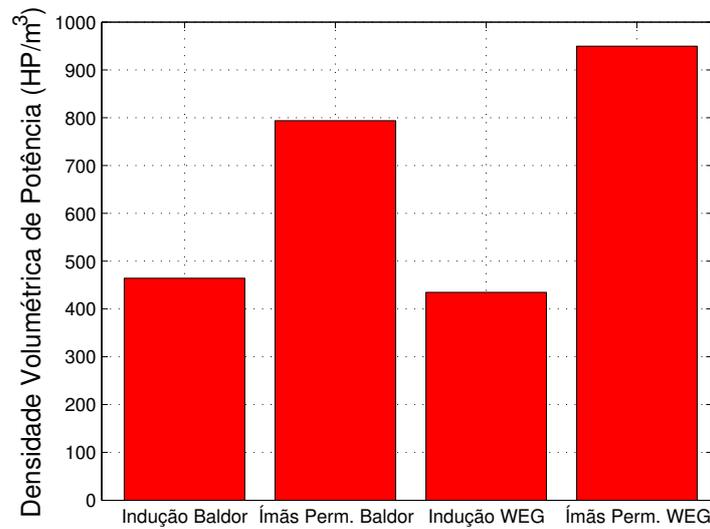
Outra característica importante é mostrada na Figura 30. Nela encontra-se a curva de fator de potência para os motores da Baldor. De onde conclui-se que o motor de ímãs permanentes é capaz de manter o fator de potência quase constante com a variação da carga, diferente do motor de indução. Segundo [Patel, Nagarsheth e Parnerkar \(2012\)](#) isso se deve ao fato de não existir corrente de magnetização.

Figura 30: Comparação Fator de Potência



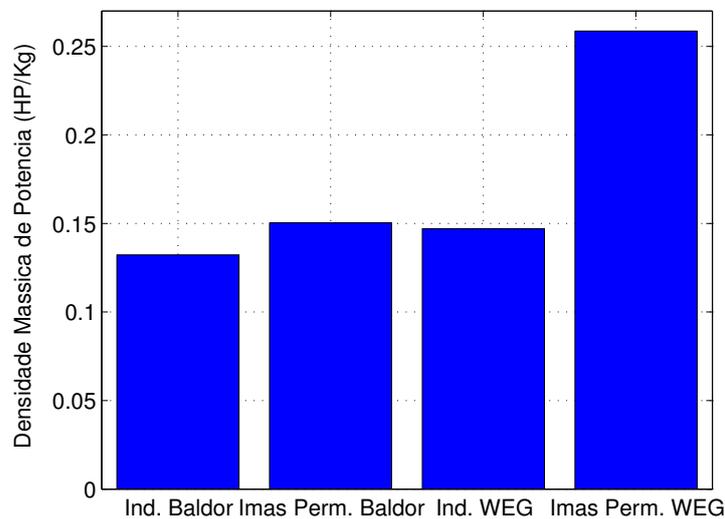
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 31: Densidade Volumétrica de Potência Motores



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 32: Densidades Mássica de Potência Motores



Fonte: Produzido pelo autor

Por último, foram traçados os gráficos (ver Figuras 31 e 32) das densidades volumétrica e mássica de potência com base nos dados da Tabela 3. Os gráficos, mostram que os motores de ímãs permanentes possuem densidades mássica e volumétrica maiores

que os motores de indução. Sendo que, o Motor de Ímãs Permanentes WEG possui os melhores resultados.

É interessante notar que os motores de ímãs permanentes mostraram uma performance melhor do que os motores de indução, mesmo possuindo volume e massa menores. O único ponto negativo seria o custo das máquinas, os motores de ímãs permanentes podem custar de duas a cinco vezes o preço de um motor de indução.

5 Conclusão

Os motores de ímãs permanentes obtiveram os melhores resultados em quase todas as comparações, exceto no preço. Sendo que os principais resultados são a eficiência, a densidade de potência e o fator de potência. Os resultados demonstraram a superioridade em termos de performance do motor de ímãs permanentes com relação ao motor de indução.

O preço já era uma vantagem conhecida dos motores de indução, o que confirmou-se na pesquisa realizada.

Tais resultados reforçam a indicação dos motores de ímãs permanentes para aplicações da indústria de ponta como: veículos híbridos, sistemas de propulsão de jatos e de navios.

6 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, podem-se indicar:

- A obtenção de mais dados para os motores de ímãs permanentes, para obter resultados mais consistentes;
- O levantamento do tempo de vida útil dos motores de ímãs permanentes, para calcular o retorno do investimento;
- Fazer um estudo de caso, obtendo resultados e fazendo comparação para uma dada aplicação;

Referências

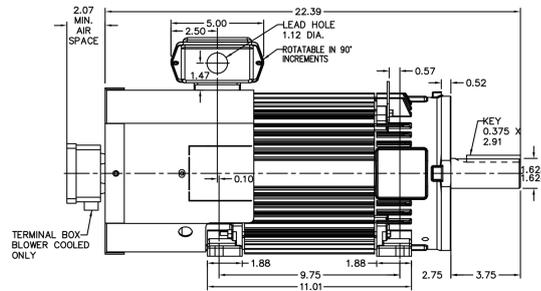
- ANDREWS, C. *Understanding Permanent Magnets*. [S.l.], 1998. Disponível em: <[http://ocw.nthu.edu.tw/ocw/upload/124/news/\[%E9%9B%BB%E5%8B%95%E6%A9%9F%E6%A2%B0L6c%E8%A3%9C%E5%85%85%E6%95%99%E6%9D%90\]C.M.%20Andrews_Understanding%20Permanent%20Magnets.pdf](http://ocw.nthu.edu.tw/ocw/upload/124/news/[%E9%9B%BB%E5%8B%95%E6%A9%9F%E6%A2%B0L6c%E8%A3%9C%E5%85%85%E6%95%99%E6%9D%90]C.M.%20Andrews_Understanding%20Permanent%20Magnets.pdf)>. Citado na página 19.
- BARNES, M. *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. London: Elsevier, 2003. Citado na página 14.
- CHAITHONGSUK, M. S. *Design and Construction of a Permanent Magnet Synchronous Motor*. [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://www.gits.kmutnb.ac.th/ethesis/data/isbn9741908873.pdf>>. Citado na página 20.
- CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. New York, NY, USA: Mcgraw-Hill, 2012. Citado na página 17.
- ELETROBRAS. *Guia Básico Motor Elétrico*. [S.l.], 2015. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_eletrico.pdf>. Acesso em: 17 out. 2015. Citado na página 14.
- FITZGERALD, A. E. e. a. *Máquinas Elétricas*. New York, NY, USA: Mcgraw-Hill, 2014. Citado na página 22.
- FLORES, A. F. *Apostila Ímãs Permanentes*. [S.l.], 1998. Citado na página 18.
- PATEL, H.; NAGARSHETH, R.; PARNERKAR, S. Performance comparison of permanent magnet synchronous motor and induction motor for cooling tower application. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Citeseer, v. 2, n. 8, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 39.
- SANTOS, D. D. P. D. *Efeito da Segmentação dos Ímãs Sobre o Desempenho das Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes e Cálculo das Perdas Resistivas nos Ímãs*. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://www.electronenergy.com/media/USMMA%20Presentation%20General%2012-07.pdf>>. Citado na página 19.
- SILVA S. A. ; LUCIANO, B. A. *Sobre os Ímãs Permanentes e suas Aplicações na Eletroeletrônica*. [S.l.], 1997. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/nogueira/materiais/Sobre_IMAS_Permanentes_Artigo.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- WEG. *Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Citado na página 17.
- WEG. *W22 Motor Elétrico Trifásico*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-three-phase-motor-technical-nema-market-50029265-brochure-english.pdf>>. Citado na página 13.

YASKAWA. *AC Permanent Magnet Motor Control*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://www.yaskawa.com/pycprd/products/industrial-ac-drives/microdrives/v1000-drive/tab4/link41>>. Citado na página 23.

Anexos

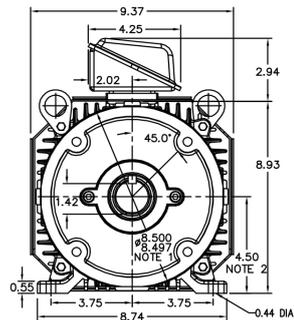
ANEXO A – Dimensões Motores

Figura 33: Dimensões Motor de Ímãs Permanentes Baldor



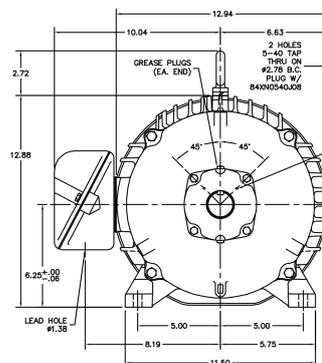
Fonte: <http://www.baldor.com/catalog/ZDPM18015C-BV>

Figura 34: Dimensões Motor de Ímãs Permanentes Baldor



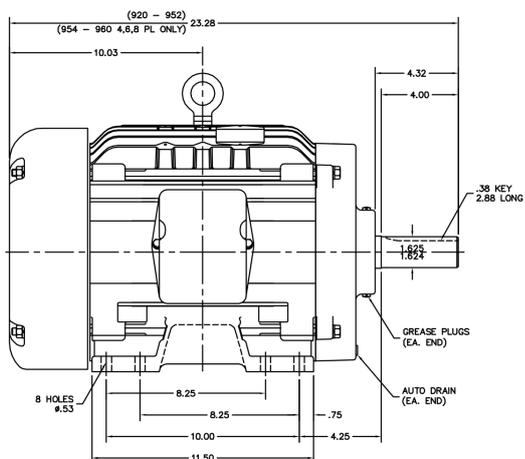
Fonte: <http://www.baldor.com/catalog/ZDPM18015C-BV>

Figura 35: Dimensões Motor de Indução Baldor



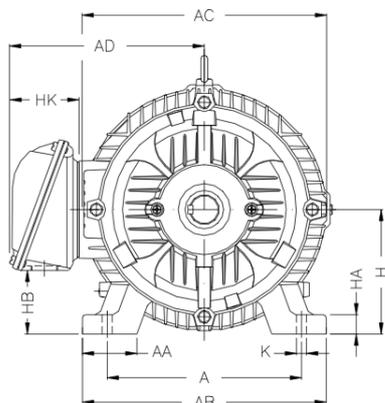
Fonte: <http://www.baldor.com/catalog/EHM2333T>

Figura 36: Dimensões Motor de Indução Baldor



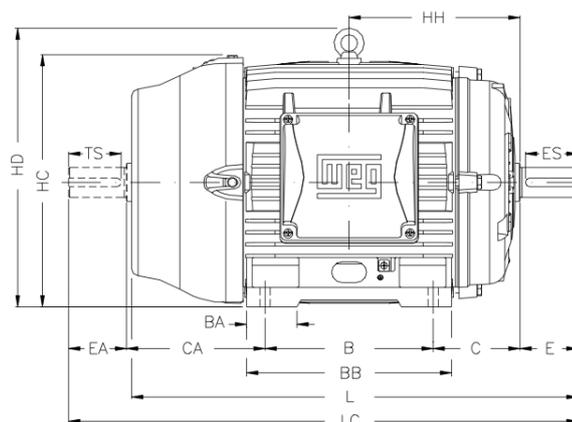
Fonte: <http://www.baldor.com/catalog/EHM2333T>

Figura 37: Dimensões Motor de Indução WEG



Fonte: <http://ecatalog.weg.net/>

Figura 38: Dimensões Motor de Indução WEG



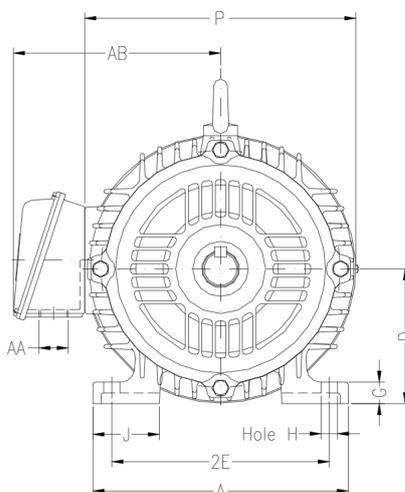
Fonte: <http://ecatalog.weg.net/>

Figura 39: Dimensões Motor de Indução WEG

| | | | | |
|------------------|------------|-----------|-------------|-----------|
| A 254 | AA 64 | AB 308 | AC 329 | AD 266 |
| B 254 | BA 63 | BB 298 | C 108 | CA 174 |
| D 42k6 | E 110 | ES 80 | F 12 | G 37 |
| GD 8 | DA 42k6 | EA 110 | TS 80 | FA 12 |
| GB 37 | GF 8 | H 160 | HA 22 | HB 79 |
| HC 331 | HD 374 | HF 168 | HH 235 | HK 101 |
| K 14.5 | L 642 | LC 756 | LL 198.5 | LM 190 |
| S1 RWG 1 1/2" | d1 A 4 | d2 A 4 | | |

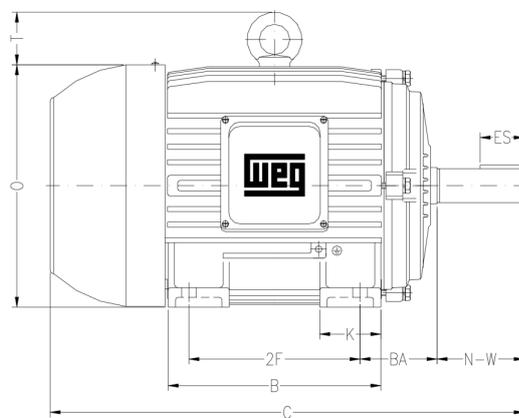
Fonte: <http://ecatalog.weg.net/>

Figura 40: Dimensões Motor de Ímãs Permanentes WEG



Fonte: <http://ecatalog.weg.net/>

Figura 41: Dimensões Motor de Ímãs Permanentes WEG



Fonte: <http://ecatalog.weg.net/>

Figura 42: Dimensões Motor de Ímãs Permanentes WEG

| | | | | |
|--------------|--------------|-------------|-------------|----------------|
| 2E 8.500 | J 2.008 | A 9.764 | P 10.630 | AB 8.149 |
| 2F 5.500 | K 2.165 | B 7.362 | BA 3.500 | U 1.375 |
| N-W 3.375 | ES 2.480 | S 0.313 | R 1.203 | depth 0.313 |
| D 5.250 | G 0.827 | O 10.841 | T 1.772 | H 0.406 |
| C 18.021 | AA NPT 1" | d1 A 4 | d2 A 4 | |

Fonte: <http://ecatalog.weg.net/>