

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Paulo Henrique Nicoletti**

**PROPOSTA PARA SUBSTITUIÇÃO DE MOTOR DE  
CORRENTE CONTÍNUA POR MOTOR SÍNCRONO  
COM IMÃS PERMANENTES**

**Taubaté – SP**

**2013**

**Paulo Henrique Nicoletti**

**PROPOSTA PARA SUBSTITUIÇÃO DE MOTOR DE  
CORRENTE CONTÍNUA POR MOTOR SÍNCRONO  
COM IMÃS PERMANENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação Stricto-Sensu em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

**Taubaté – SP**

**2013**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado  
de Bibliotecas – UNITAU - Biblioteca de Engenharia Mecânica**

N643p Nicoletti, Paulo Henrique  
Proposta para substituição de motor de corrente contínua  
por motor síncrono com ímãs permanentes. / Paulo Henrique  
Nicoletti - 2013.

59f. : il; 30 cm.

Dissertação(Mestrado Profissional em Engenharia  
Mecânica na área de Automação) – Universidade de Taubaté.  
Departamento de Engenharia Mecânica, 2013  
Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino,  
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Brushless. 2. Terras raras. 3. Manutenção preventiva.  
4. Retrofitting. 5. Motor elétrico. I. Título.

**Paulo Henrique Nicoletti**

**PROPOSTA PARA SUBSTITUIÇÃO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA POR  
MOTOR SÍNCRONO COM IMÃS PERMANENTES**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação Stricto-Sensu em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Automação

Data: 31/08/2013

Resultado: APROVADO

**BANCA EXAMINADORA:**

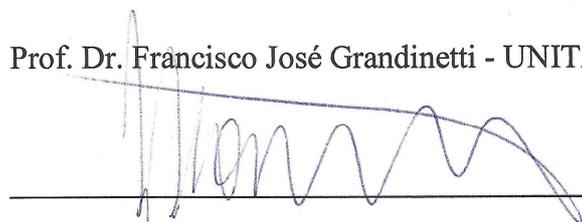
Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

Universidade de Taubaté - UNITAU

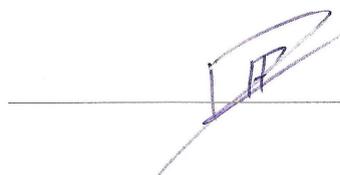
  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti - UNITAU

Universidade de Taubaté - UNITAU

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Paulo Henrique da Rocha - Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - CTMSP

  
\_\_\_\_\_

## **DEDICATÓRIA**

À minha Família, que participou de meus ideais e os alimentaram, incentivando-me a prosseguir nessa jornada, fossem quais fossem os obstáculos, propiciando as condições necessárias para a realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pois foi ele que me deu forças e coragem para transformar o sonho de ontem, na realidade de hoje.

Ao Professor Dr. Márcio Abud Marcelino pela orientação e apoio fornecido durante o desenvolvimento dos trabalhos.

Aos Professores, que com dedicação e carinho transmitiram-me seus conhecimentos de vida e experiências profissionais.

Aos Funcionários da secretaria, que sempre me ouviram com dedicação e carinho.

Portanto a todos, um grande abraço ao fim dessa jornada, com o profundo sentimento de gratidão.

## RESUMO

O trabalho tem como objetivo abordar e investigar a viabilidade técnica e econômica da proposta de substituição de um motor de corrente contínua, por um motor síncrono com ímãs permanentes. O passo inicial foi a análise de dados referentes à manutenção preventiva do motor em operação comparado ao motor de indução e o resultado foi que se teria grande vantagens. Foi observado que o mercado oferecia uma solução inovadora, que mudou a trajetória dos estudos. Esta solução é o motor síncrono de ímã permanentes, que é um motor *brushless* de corrente alternada, com dimensões reduzidas para a mesma potência de um motor indução trifásico. As perdas por efeito Joule no rotor que praticamente são as maiores, neste caso são desprezíveis, pois o rotor é equipado internamente com ímãs de Terras Raras, o Neodímio Ferro Boro de alta energia, que desta forma minimizam também a temperatura no motor aumentando sua vida útil. Além disso, para aplicações onde se tem a necessidade de controle de torque com velocidades baixas é a melhor solução. Estas e outras qualidades fizeram a diferença na escolha deste motor para a aplicação, onde é necessário o controle de torque com a velocidade baixa. Neste trabalho se descreve todas as etapas do *retrofitting*, incluindo as comparações do sistema atual com duas propostas, através de simulações no software *MATLAB*, que demonstraram que as expectativas iniciais foram alcançadas, identificando o motor síncrono de ímãs permanentes mais indicado nos dias de hoje para a substituição.

Palavras chave: *Brushless*. Terras raras. Preventiva. *Retrofitting*. Motor elétrico.

## ABSTRACT

The work had as objective approach and investigate the technical and economic viability of the proposed replacement of a DC motor, by a permanent magnets synchronous motor. The initial step was the analysis of data on preventive maintenance of the motor in operation compared to the induction motor and the result was that it would have great advantages. It was observed that the market offered an innovative solution, which changed the course of the studies. This solution is permanent magnet synchronous motor, which is a brushless AC motor with reduced dimensions at the same power of a three phase induction motor. The Joule losses in the rotor which practically are the biggest. this case are not important, because the rotor is fitted internally with Rare Earths Magnets Neodymium Iron Boron the high energy, which thus also minimize the temperature in the motor increasing its lifetime. Also, for application where there is the need to control torque at low speeds is the best solution. These and other qualities made the difference in the choice of this motor to the application, where it is necessary to control torque with low speed. We describe all stages of Retrofitting, including comparisons of the current system with two proposals, through simulations in *MATLAB*, which have shown that initial expectations were met, identifying the permanent magnet synchronous motor best suited these days for the replacement.

Keywords: Brushless. Rare earths. Preventive. Retrofitting. Electric motor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de corrente contínua em corte (INO, 2010).	16
Figura 2 - Motor assíncrono trifásico em corte (WEG, 2009).	17
Figura 3- Perdas no MIT(WEG, 2012).	18
Figura 4 - Universo tecnológico dos motores elétricos (WEG, 2009).	18
Figura 5 - Curva típica de desmagnetização de um ímã (MILLER, 2002).	19
Figura 6 - Distribuição de reservas de Terras-Raras no mundo(ABM, 2012).	21
Figura 7. – a) Ímãs superficiais, b) Ímãs internos (WEG, 2011b).	24
Figura 8 – Curva de torque x velocidade do motor com ímãs superficiais (WEG, 2011b).	24
Figura 9 – Curva de torque x velocidade do motor com ímãs internos (WEG, 2011b).	24
Figura 10 - Forma de onda da <i>f<sub>cem</sub></i> e corrente (WEG, 2011b).	25
Figura 11- Sequência de comutação <i>six-step</i> das fases no <i>MSIP</i> (Desenho Próprio).	26
Figura 12 - Geração da tensão senoidal nas fases <i>MSIP</i> (ZAMBADA, 2005).	27
Figura 13 - Posicionamento dos sensores de efeito <i>Hall</i> (Desenho Próprio).	28
Figura 14 - Demonstração do ponto de neutro virtual (FREESCALE, 2005).	29
Figura 15 - Diagrama em blocos do controle do <i>MSIP</i> (FREESCALE, 2005).	31
Figura 16 - Diagrama em blocos do circuito integrado MC33033 (MOTOROLA, 1996; ON SEMICONDUCTOR, 2013).	32
Figura 17 - Diagrama em blocos do MC33039 (ON SEMICONDUCTOR, 2003).	34
Figura 18 - Controle de velocidade em malha fechada (ON SEMICONDUCTOR, 2013).	35
Figura 19 - Diagrama em blocos de controle de <i>MSIP</i> (ST MICROELECTRONICS, 2009).	36
Figura 20 – Diagrama em blocos de controle de <i>MSIP</i> usando XMC 1300 (INFINEON, 2013).	38
Figura 21 – Gráfico comparativo de rendimento dos motores <i>Wmagnet</i> , Alto Rendimento e Standard (WEG, 2011a).	39
Figura 22 - <i>Wmagnet</i> em corte (WEG, 2011a).	40
Figura 23 – $\Delta T$ em °C para faixa de rotação 10:1 (WEG, 2011a).	40
Figura 24 - Comparativo entre MIT e <i>Wmagnet</i> (WEG, 2011a).	41
Figura 25 - Pressão sonora entre os motores (WEG, 2011b).	41
Figura 26 – Curva de torque x velocidade (WEG, 2011a).	42
Figura 27 - Valores acumulados de manutenções preventivas <i>MCC</i> x <i>MIT</i> x <i>MSIP</i> (Desenho Próprio).	44
Figura 28 – Medição de torque em um ciclo de operação (Desenho Próprio).	45
Figura 29 – Conversor trifásico quatro quadrantes.	46
Figura 30 - Valores coletados nas simulações do <i>MCC</i> .	47

Figura 31 - Inversor de tensão com controle de frequência para MIT.	48
Figura 32 - Valores coletados nas simulações do <i>MIT</i> .	49
Figura 33 - Inversor de tensão com controle de frequência para MSIP.	50
Figura 34 - Valores coletados nas simulações do MSIP.	51
Figura 35 - Corrente no estator para fluxo 0,2 T e torque 20 Nm.	52
Figura 36 - Corrente no estator para fluxo 0,9 T e torque 20 Nm.	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre imãs (MMPA, 2000; CORP., 2012).	20
Tabela 2 - Dados do <i>MCC</i> e taco gerador (Fonte Própria).	43
Tabela 3 - Vida útil do lubrificante para os diversos rolamentos (WEG, 2012).	44
Tabela 4 - Dados coletados em campo (Fonte Própria).	46
Tabela 5 - Comparativo entre carcaças <i>MIT</i> x <i>MSIP</i> (WEG, 2011a).	53
Tabela 6 - Características elétricas do motor de 4 pólos Wmagnet (WEG, 2011a).	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$A$	Corrente em Ampère
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
AlNiCo	Ímã de Alumínio Nikel e Cobalto
$A_{pico}$	Corrente de Pico em Ampère
$A_{rms}$	Corrente Eficaz em Ampère
BH	Produto energético
$BH_{max}$	Produto energético máximo
BLAC	Motores <i>brushless</i> de corrente alternada
$B_m$	Indução remanescente, efeito da ação de campo magnético externo
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
$B_r$	Indução residual
CA	Corrente alternada
CEI	Comunidade dos Estados Independentes
cv	Cavalo vapor
DSP	<i>Digital signal processing</i>
ETR	Elementos de Terras-Raras
$f$	Frequência
$f_{cem}$	Força contra eletromotriz
FOC	Controle com campo orientado
$H_c$	Força coercitiva
$H_{ci}$	Força coercitiva intrínseca
$H_m$	Valor de $H$ correspondente a indução remanescente $B_m$
hp	Horse power
$I_d$	Corrente direta
$I_q$	Corrente em quadratura
$L_d$	Indutâncias síncronas no eixo direto
$L_q$	Indutâncias síncronas no eixo em quadratura
MCC	Motor de Corrente Contínua
MIT	Motor de Indução Trifásico
MSIP	Motor síncrono com ímãs permanentes

<i>MTC</i>	Controlador de motor
<i>NdFeB</i>	Neodímio Ferro Boro
<i>Nm</i>	Newton metro
<i>Ns</i>	Velocidade síncrona
<i>p</i>	Pares de pólos
<i>PC</i>	Coeficiente de permeabilidade
<i>PI</i>	Proporcional e integral
<i>POSIF</i>	Interface de posicionamento
<i>PWM</i>	Modulação por largura de pulso
<i>rpm</i>	Rotações por minuto
<i>SmCo</i>	Imã de Samário Cobalto
<i>T</i>	Tesla
<i>T<sub>c</sub></i>	Temperatura de Curie
<i>T<sub>max</sub></i>	Temperatura máxima de trabalho

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1 Motivação	14
1.2 Objetivo	14
1.3 Delimitação do estudo	15
1.4 Descrição dos capítulos	15
<b>2 MOTORES ELÉTRICOS</b>	<b>16</b>
2.1 Motores tradicionalmente utilizados na indústria	16
2.2 Motor síncrono com ímãs permanentes	18
2.3 Ímã permanente	19
2.3.1 Terras raras	20
2.3.2 Principal técnica de obtenção de ímãs	22
2.3.3 Vantagens de geradores com ímãs permanentes	22
2.4 Motores <i>brushless</i>	23
2.4.1 Funcionamento do motor síncrono com ímãs permanentes	24
<b>3 TÉCNICAS DE CONTROLE DO <i>MSIP</i></b>	<b>28</b>
3.1 Sensores de efeito <i>Hall</i>	28
3.2 <i>Sensorless</i> usando a <i>fcem</i> do motor	29
3.3 Controle vetorial	30
3.4 Processamento digital de sinais	30
3.5 Controlador <i>PI</i> síncrono	31
3.6 Controladores comerciais	32
3.6.1 MOTOROLA, o MC33033	32
3.6.2 MOTOROLA, o MC33039	33
3.6.3 MOTOROLA, o MC33033 e MC33039 em malha fechada	34
3.6.4 ST Microelectronics, o ST7	35
3.6.5 Infineon Technologies, o XMC 1300	37
<b>4 MOTOR SÍNCRONO COM IMÃS PERMANENTES COMERCIAL</b>	<b>39</b>
<b>5 PROPOSTA DE UM <i>RETROFITTING</i></b>	<b>43</b>
5.1 Levantamento dos gastos com manutenção preventiva	43
5.2 Medições em campo	45
5.3 Simulações em ambiente <i>MATLAB / SIMULINK</i>	45
5.3.1 SIMULAÇÃO DO <i>MCC</i>	45

<b>5.3.2 Simulação do <i>MIT</i></b>	<b>48</b>
<b>5.3.3 Simulação do <i>MSIP</i></b>	<b>50</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>55</b>
<b>6.1 TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A – SUGESTÃO DE PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAR O MELHOR MOTOR PARA SUBSTITUIR O MOTOR DE CORRENTE CONTINUA</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O grande aumento no consumo de alumínio é uma prova do que este metal significa na indústria moderna. É o mais importante dos metais não ferrosos e está entre os mais consumidos anualmente. A variedade de aplicações do alumínio está relacionada com suas características físico-químicas, com destaque para seu baixo peso específico, comparado a outros metais. Tais propriedades são as matérias-primas da indústria para diversificar seus produtos e criar soluções para outros mercados, como o setor automotivo e de construção civil. (ABAL, 2009).

Caso a economia cresça a uma taxa média de 4,5% nos próximos anos, o consumo de alumínio tenderá a crescer a uma taxa média anual de 6,3% ao ano, de acordo com departamento de indústria de base da área de insumos básicos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (BNDES, 2011).

### 1.1 Motivação

Tendo em vista este panorama, as empresas de extrusão de alumínio, para atender esta demanda devem buscar aperfeiçoar seus métodos e processos. Minimizar as perdas, diminuindo as paradas de máquinas por quebras e paradas de manutenções preventivas, que no caso dos Motores de Corrente Contínua (*MCC*) são caros e necessitam de parada de máquina prolongada. Modernizar seus equipamentos, buscar a atualização tecnológica de seus acionamentos, aumentando a eficiência energética, aumentando a confiabilidade e reduzindo os custos com energia elétrica e com manutenção preventiva, assim aumentando a capacidade produtiva. Com a evolução da eletrônica de potência e da microeletrônica, por meio de microprocessadores e microcontroladores, tem contribuído para o acionamento de máquinas de corrente alternada, permitindo a implementação de funções complexas num tempo de resposta cada vez mais curto, podendo-se afirmar que os Motores de Indução Trifásico (*MIT*) controlados, alcançam mesmo desempenho de torque e velocidade que os *MCC*.

### 1.2 Objetivo

Estimulado por este cenário o presente trabalho trata de um conjunto de estudos, voltados para a área de engenharia elétrica e eletrônica. Com foco em acionamento de motores elétricos e tem como objetivo geral abordar e investigar a viabilidade técnica e econômica da proposta de substituição de *MCC* por *MIT*, utilizados nos equipamentos da

indústria de extrusão de alumínio. Neste trabalho investiga-se se o *MIT* pode ter o mesmo desempenho de velocidade e torque comparado a um *MCC*.

### **1.3 Delimitação do estudo**

O estudo objetiva os motores utilizados na indústria de extrusão de alumínio, no equipamento conhecido como *Puller*, que é um equipamento auxiliar que agarra e puxa o perfil desde o início da extrusão, direcionando e acompanhando-o durante o processo. Com isso evita-se a ocorrência de possíveis quedas do perfil fora da mesa de resfriamento, além de proporcionar melhor qualidade do perfil e maior agilidade ao processo de extrusão. A substituição dos *MCC* por *MIT* é hoje comum e leva à melhoria da qualidade do produto final, redução de custo de manutenção e aumento da confiabilidade do sistema, porém exige a substituição dos conversores *CHOPPER* por inversores, e um estudo profundo das etapas de substituição.

### **1.4 Descrição dos capítulos**

O capítulo 1 apresenta uma introdução buscando motivação do trabalho e delimitação dos estudos. O capítulo 2 aborda os motores tradicionalmente utilizados na indústria, como o motor de corrente contínua e o motor assíncrono trifásico, apresenta também uma abordagem sobre ímãs permanentes e o motor síncrono de ímãs permanentes bem como a descrição do funcionamento. O capítulo 3 aborda as técnicas de controle do motor síncrono com ímãs permanentes. O capítulo 4 apresenta o motor síncrono com ímãs permanentes, fabricado pela empresa WEG. O capítulo 5 aborda o procedimento para o *retrofitting*, os levantamentos dos custos de manutenção preventiva e medições em campo e as simulações no software *MATLAB*. No capítulo 6 aborda as conclusões finais e recomendações.

## 2 MOTORES ELÉTRICOS

### 2.1 Motores tradicionalmente utilizados na indústria

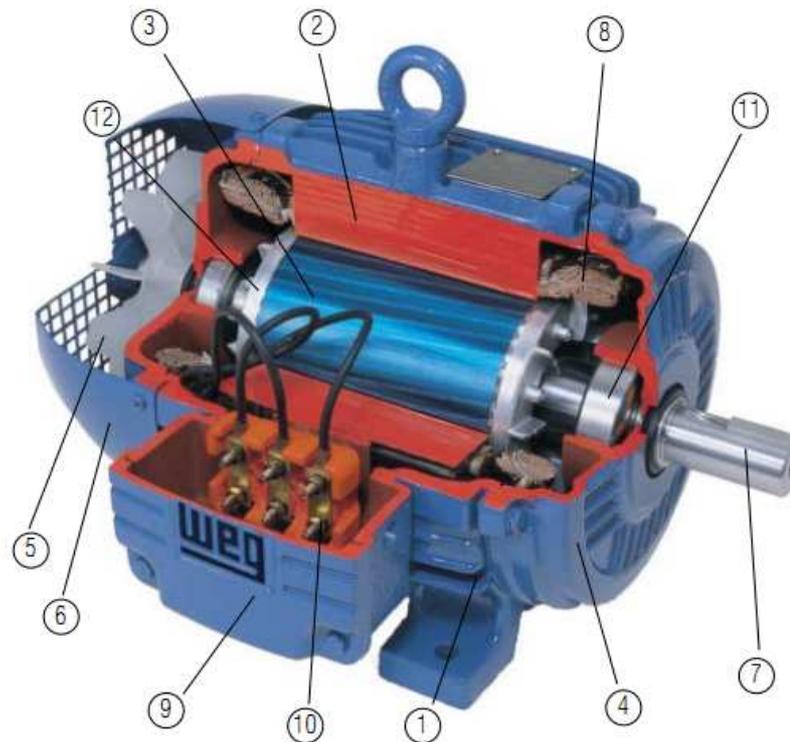
Historicamente os Motores de Corrente Contínua vem sendo utilizados para controle de inúmeras máquinas, onde se faz necessário o controle de velocidade e de torque. A facilidade de controle possibilita o ajuste preciso de velocidade e torque em toda a faixa de operação, porém tem partes móveis entre elas comutadores, escovas, porta escovas e necessidade de ventilação forçada. O elevado custo de manutenção e a limitação em aplicações em áreas classificadas são as principais limitações. A figura 1 apresenta um *MCC* em corte destacando as partes móveis, escovas, porta escovas, comutador, taco gerador e enrolamento de armadura.



Figura 1 - Motor de corrente contínua em corte (INO, 2010).

As desvantagens do *MCC* e a evolução da eletrônica de potência tem levado o motor de indução trifásico ser preferido na indústria, já há algum tempo, devido à sua robustez, simplicidade, associado ao baixo custo de instalação e manutenção. A figura 2 apresenta o *MIT* destacando suas partes em corte. Estator: Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio e possui aletas para dissipação térmica e também possui elevada resistência à corrosão. Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço silício tratadas termicamente para reduzir ao máximo as perdas por correntes parasitas.

Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico. Rotor: Eixo (7) - transmite à potência mecânica. Núcleo de chapas (3) - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator. Barras e anéis em curto-circuito (12) - são de alumínio injetado em uma única peça. Outras partes do motor de indução trifásico: Tampa (4), Ventilador (5), Tampa defletora (6), Caixa de ligação (9), Terminais (10) e Rolamentos (11)(WEG, 2009).



**Figura 2 - Motor assíncrono trifásico em corte (WEG, 2009).**

Em aplicações com velocidades fixas este tipo de motor é uma das melhores opções. Porém para aplicações que se faz necessário o controle de velocidade e torque, este motor apresenta algumas desvantagens traduzidas em perdas elétricas, por exemplo, a de efeito Joule no rotor, dificultando o controle em baixa velocidade devido ao aumento de temperatura nesta operação. A figura 3 descreve as perdas do *MIT*.

Tendo em vista este panorama dos motores tradicionais utilizados na indústria, neste trabalho buscaram-se outras soluções, e a mais vantajosa foi os motores com ímãs permanentes no rotor.

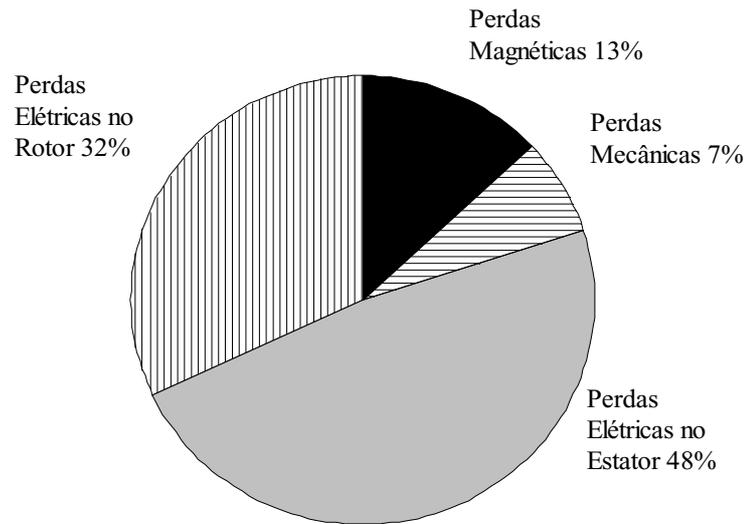


Figura 3– Perdas no MIT(WEG, 2012).

## 2.2 Motor síncrono com imãs permanentes

Neste tópico o motor síncrono com imãs permanentes (MSIP) é abordado, que é composto por um estator com três jogos de bobinas dispostas a 120° e seu rotor possui imãs permanente. Na figura 4 são apresentados os tipos de motores mais utilizados e o motor síncrono com imãs permanentes no rotor é apresentado no grupo de motor CA, subgrupo trifásico, classe síncrono e tipo imã permanente, que também são denominados como motores *brushless* por não possuir escovas e comutadores mecânicos.

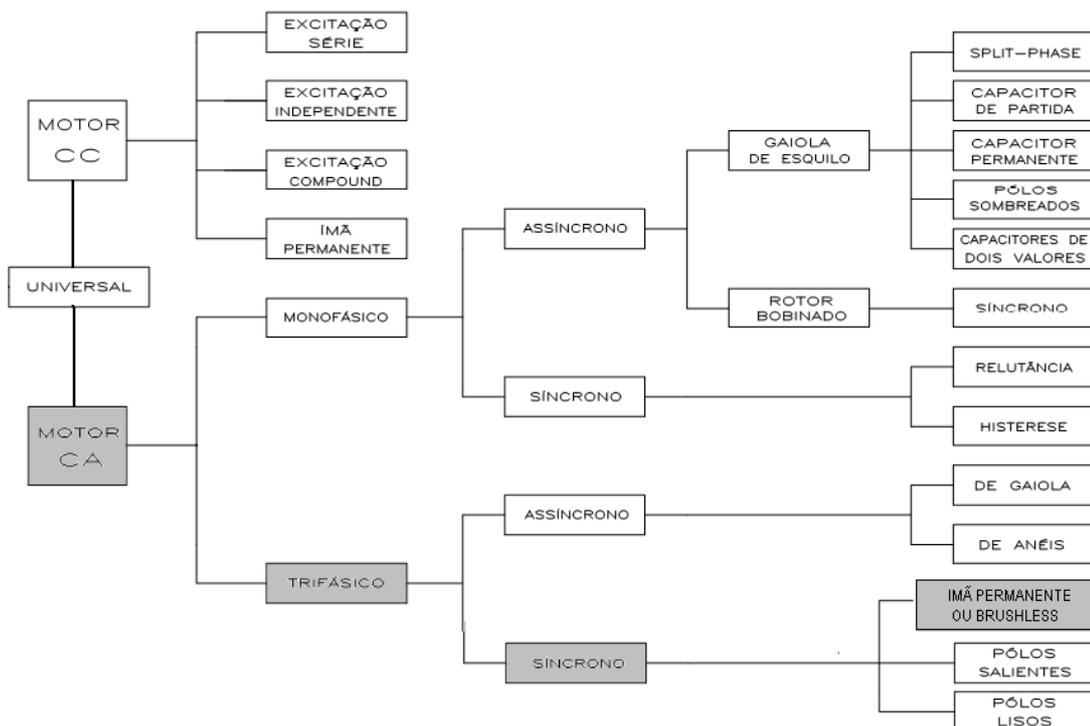


Figura 4 - Universo tecnológico dos motores elétricos (WEG, 2009).

### 2.3 Ímã permanente

De acordo com as tendências de mercado, o uso de motores síncronos de ímãs permanentes encontra-se em ampla expansão, pois o motor possui alto rendimento, baixo volume e peso, baixo nível de vibração e ruído, ampla faixa de rotação com torque constante. Isso se deve à evolução dos ímãs de Neodímio Ferro Boro (NdFeB), conhecidos como ímãs de terras raras, de elevada energia. Para motores elétricos de alto rendimento é de grande interesse que os ímãs permanentes apresentem uma elevada força coercitiva ( $H_c$ ) e elevada indução residual ( $B_r$ ). Um elevado  $H_c$  impede que o ímã seja facilmente desmagnetizado e um alto valor de  $B_r$  resulta em um fluxo magnético elevado (WEG, 2011b).

A parte mais importante do ciclo do produto energia  $BH$  está no segundo quadrante, como apresentado na Figura 5, que representa a curva típica de desmagnetização de um ímã e a tabela 1 apresenta os materiais e as principais características.

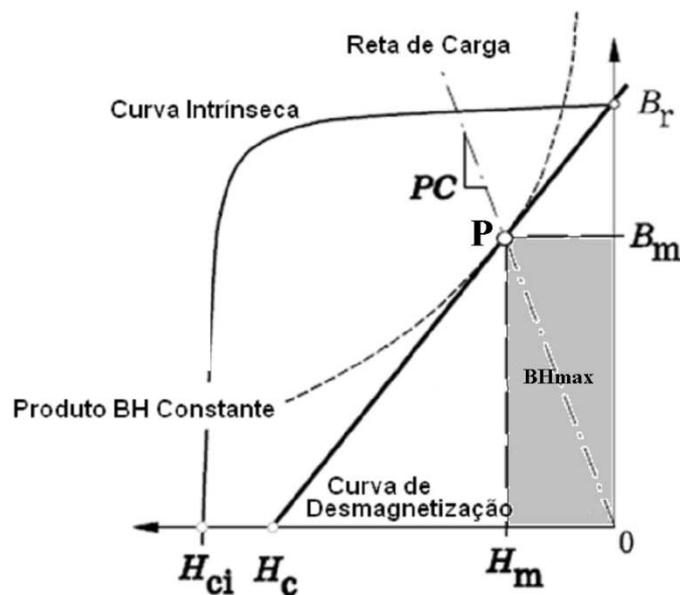


Figura 5 - Curva típica de desmagnetização de um ímã (MILLER, 2002).

Onde  $H_{ci}$  é a força coercitiva intrínseca que indica o quanto o material resiste à desmagnetização,  $PC$  é o coeficiente de permeabilidade,  $B_m$  é a indução remanescente, efeito da ação de campo magnético externo,  $H_m$  valor de  $H$  correspondente a indução remanescente  $B_m$  e  $BH_{max}$  produto energético máximo. O produto energético máximo ( $BH_{max}$ ) é também outra propriedade magnética importante, pois está diretamente relacionada com o bom desempenho de um ímã permanente. Esta grandeza é inversamente proporcional ao volume do material magnético necessário para se criar um determinado campo magnético numa certa região do espaço. Portanto, quanto maior for o valor de  $BH_{max}$  menor será o volume por ele

ocupado. Na figura 5, o  $BH_{max}$  é representado pelo ponto  $P$  e é proporcional à área do retângulo sombreado (GUILHERME, 1992). O ímã de Neodímio-Ferro-Boro ( $NdFeB$ ) possui indução residual e força coercitiva elevadas quando comparado ao ímã de ferrite (cerâmico), resultando em uma maior energia. Desta forma, motores projetados com  $NdFeB$  têm dimensões menores do que os motores com ímãs de Ferrite. Em contrapartida, os ímãs de Ferrite são consideravelmente mais baratos do que os de  $NdFeB$  (WEG, 2011a).

**Tabela 1 - Comparação entre ímãs (MMPA, 2000; CORP., 2012).**

Comparação entre Ímãs Permanentes							
Material	Propriedades Magnéticas				Propriedades Térmicas		Custo \$/kg
	$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	$H_{ci}$ (kA/m)	$T_c$ °C	$T_{max}$ °C	
<i>AlNiCo</i>	31,0	1,05	62	64	860	525	\$65,00
Ferrite	27,8	0,385	235	245	450	200	\$4,50
<i>SmCo</i>	160	0,9	700	2390	750	300	\$60,00
<i>NdFeB</i>	320	1,28	950	1190	310	150	\$55,00

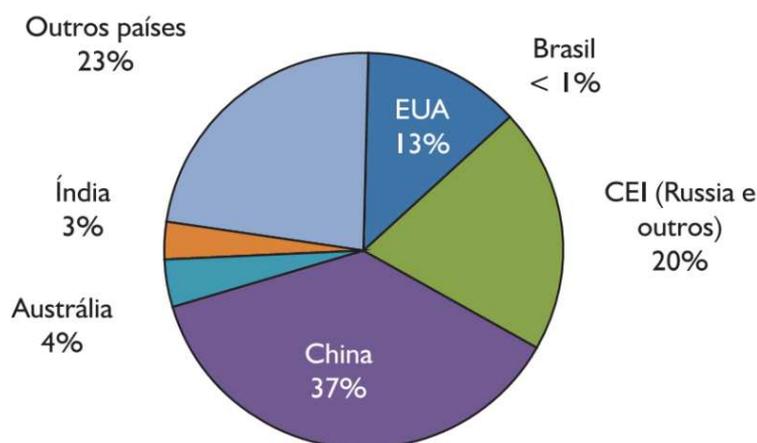
Onde:  $T_c$  temperatura de Curie é o ponto no qual um ímã permanente perde as suas características magnéticas,  $T_{max}$  é a temperatura máxima de trabalho, que no qual o ímã permanente poderá ser exposto sem alterações de suas propriedades.

Considerando a tabela 1, observa-se que, em geral, Samário Cobalto (*SmCo*) e Alumínio Níquel e Cobalto (*AlNiCo*) dos ímãs são os mais resistentes à temperatura, quando se trata de temperaturas extremas, mas os ímãs de *AlNiCo* são necessariamente maiores devido ao pequeno  $H_c$ . Os ímãs de *NdFeB* possuem um desempenho superior e custa menos que os de *SmCo*. Porém, são inferiores em dois tópicos: menor estabilidade com a temperatura e uma grande sensibilidade à corrosão. Tomadas às devidas precauções no que tangem à temperatura, eles podem receber tratamentos que os protejam da corrosão (por exemplo, deposição de uma camada superficial de níquel, zinco, estanho ou revestimento de resina epóxi), possibilitando seu uso em aplicações industriais (BOTELHO, 2008).

### 2.3.1 Terras raras

De acordo com relatório da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM, 2012, p. 310-312) que apresenta a SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES E RESERVAS DE TERRAS RARAS: BRASIL × MUNDO.

A produção de ímãs permanentes no Brasil ainda está em escala de estudos, necessitando de uma estratégia para implementação de cadeia produtiva. Os Elementos de Terras-Raras (*ETR*) estão contidos, principalmente, nos minerais dos grupos da bastnaesita, monazita e xenotímio. As maiores reservas de bastnaesita estão na China e nos EUA. No Brasil, Austrália, Índia, África do Sul, Tailândia e Sri Lanka, os *ETR* ocorrem na monazita e em areias com outros minerais pesados (ilmenita, zirconita e rutilo). No Brasil também se destaca a ocorrência de importantes depósitos de *ETR* em carbonatitos, como em Catalão (GO), Araxá (MG), Mato Preto (PR), Anitápolis (SC) e outros. A China possui 36,5% das reservas mundiais de Terras-Raras, seguida pela Comunidade dos Estados Independentes (*CEI*) e dos EUA. Mais detalhes das reservas mundiais estão expostos na Figura 6, em que se pode observar que as reservas brasileiras, mesmo grandes, são quase insignificantes quando comparadas às reservas mundiais. A China continua na liderança da produção mundial, com mais de 97%. A grande produção permite à China manter preços baixos para as *ETR* e seus produtos, ao mesmo tempo que desestimula a produção e a pesquisa das mesmas pelos demais países. As reservas brasileiras de Terras-Raras representam menos de 1% do total mundial. Prevê-se, para o período 2010-2015, que a demanda por Elementos de Terras-Raras (*ETR*) continuará alta.



**Figura 6 - Distribuição de reservas de Terras-Raras no mundo (ABM, 2012).**

Os aumentos mais significativos previstos na demanda são atribuídos à expansão da fabricação de carros elétricos híbridos, seguida por catalisadores para o refino do petróleo, fabricação e polimento de vidros. Nos últimos anos, a China está restringindo as exportações de Terras-Raras, dando preferência às fábricas que usem a matéria prima no próprio país e exportando produtos, como motores elétricos de alto desempenho. Devido

principalmente a este fato justificam-se os atuais estudos para a produção nacional de ímãs permanentes de Terras-Raras, visto que o país possui a matéria prima, mas não possui a tecnologia, em escala industrial, de produção.

### **2.3.2 Principal técnica de obtenção de ímãs**

No mundo, a técnica de fabricação mais utilizada para obtenção de ímãs é o processamento de materiais particulados, pelo processo da metalurgia do pó. Como a fase magnética é obrigatoriamente anisotrópica, que é a magnetização espontânea do material em numa única direção cristalina. Se o material for moído a ponto de que cada partícula contenha um só cristal e estas forem depositadas relativamente soltas em uma cavidade, quando submetidas a um campo magnético intenso elas sofrerão uma rotação, de maneira que tenham suas direções cristalinas de magnetização espontânea alinhadas na direção do campo externo aplicado. Esta técnica de orientação do material permite obter um altíssimo grau de paralelismo das direções cristalinas das partículas, maximizando a remanência.

### **2.3.3 Vantagens de geradores com ímãs permanentes**

Atualmente, o uso de ímãs permanentes com alto produto energético, em substituição aos enrolamentos de campo em máquinas elétricas, tem aumentado consideravelmente. Esta tendência deve-se à necessidade de sistemas de campo baratos e confiáveis produzidos a partir de ferritas que, dependendo da aplicação, são adequados. Entretanto, um desenvolvimento mais importante, ocorreu a partir da utilização de novos materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de Terras-Raras (super ímãs), que possuem um produto energético muito superior às ferritas. Nos geradores com ímãs permanentes não existem os enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. Não possuem igualmente escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo manutenções e aumentando o rendimento e com melhor relação torque/volume. Na maioria das vezes, os ímãs são fixados tangencialmente na superfície dos pólos do rotor ou axialmente internamente no rotor. A utilização dos super ímãs em novas configurações resultou em um alto rendimento dessas máquinas elétricas bem como em outras características que são difíceis de comparar

com máquinas sem ímãs permanentes. A utilização dos super ímãs diminui sensivelmente os riscos de desmagnetização, uma vez que esses ímãs possuem elevada coercitividade, além de possibilitar o desenvolvimento de máquinas com uma elevada relação torque/volume.

## 2.4 Motores *brushless*

Com estas características surgem muitas aplicações como motores *brushless*, alimentados por inversor de tensão com controle de frequência. Isso permite a variação de velocidade com torque constante, baixo nível de vibrações e ruído e onde são requeridos confiabilidade e alto rendimento. Estas características são fundamentais em compressores, elevadores, esteiras transportadoras, etc. Além disso, são atrativos para aplicações com espaço reduzido e onde há necessidade de eliminação de redutores, já que possui tamanho e volume reduzidos e podem funcionar em uma ampla faixa de velocidades. Este motor não apresenta perdas no rotor por efeito Joule ( $RI^2$ ). Desta forma não necessita de ventilação e a dissipação é realizada por convecção natural. A sua carcaça necessariamente é blindada para proteger os ímãs contra impurezas metálicas. Os motores *brushless AC* são apresentados de duas formas: com ímãs superficiais figura 7a e ímãs internos ao rotor figura 7b. O motor com ímãs superficiais apresentado na figura 7a, também é conhecido como motor de pólos lisos, pois as indutâncias síncronas no eixo direto ( $L_d$ ) e indutâncias síncronas no eixo em quadratura ( $L_q$ ) são praticamente iguais e constantes. Esta configuração apresenta uma limitada capacidade para operar em velocidades acima da nominal, com potência constante, devido à baixa indutância e ao grande entreferro, conforme apresentado na figura 8. O motor de ímãs internos ou pólos salientes está apresentado na figura 7b. Devido à geometria do rotor, apresentam descontinuidade no entreferro ao longo da periferia do núcleo do rotor. Neste caso, existem as chamadas regiões interpolares, onde o entreferro é muito grande, tornando visível a saliência dos pólos. Este tende a produzir indutâncias  $L_d$  e  $L_q$  diferentes. As regiões interpolares produzem torque de relutância que, somado ao torque eletromagnético devido à distribuição de fluxo do rotor, produz um maior torque resultante. Os motores de ímãs internos são capazes de funcionar em uma grande faixa de velocidades acima da nominal, com potência constante, conforme apresentado na figura 9. Outra vantagem do motor com ímãs internos sobre os ímãs superficiais é que os ímãs são inseridos no interior do rotor, o que permite que o ímã fique protegido contra a força centrífuga (WEG, 2011b).

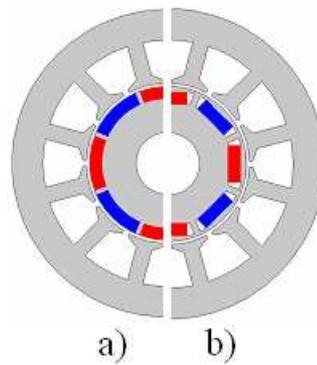


Figura 7. – a) Ímãs superficiais, b) Ímãs internos (WEG, 2011b).

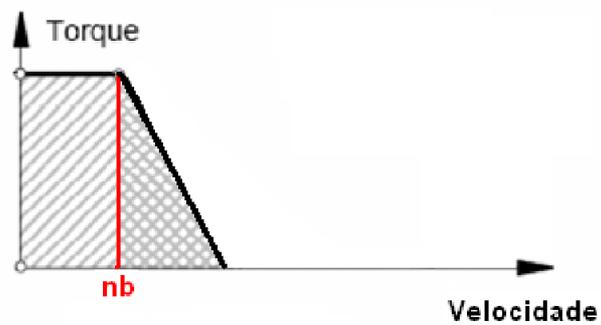


Figura 8 – Curva de torque x velocidade do motor com ímãs superficiais (WEG, 2011b).

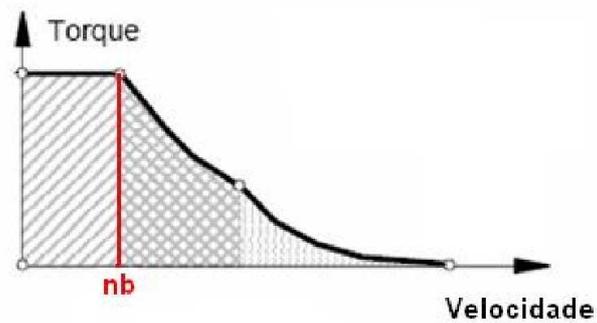
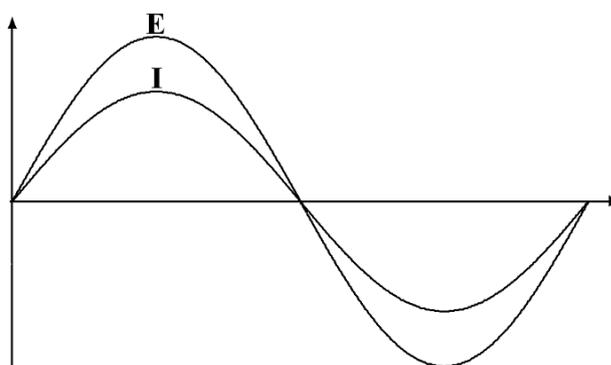


Figura 9 – Curva de torque x velocidade do motor com ímãs internos (WEG, 2011b).

#### 2.4.1 Funcionamento do motor síncrono com ímãs permanentes

Os motores com ímãs permanentes são síncronos e isto significa que o campo magnético gerado no estator e o campo gerado no rotor giram a mesma frequência, ou seja, não possuem o escorregamento visto em motores assíncronos. Estão na categoria de motores

*brushless AC (BLAC)*, e são construídos para que a corrente de alimentação seja senoidal e a força contra eletromotriz ( $f_{cem}$ ) induzida seja senoidal, conforme apresenta a figura 10.



**Figura 10 - Forma de onda da  $f_{cem}$  e corrente (WEG, 2011b).**

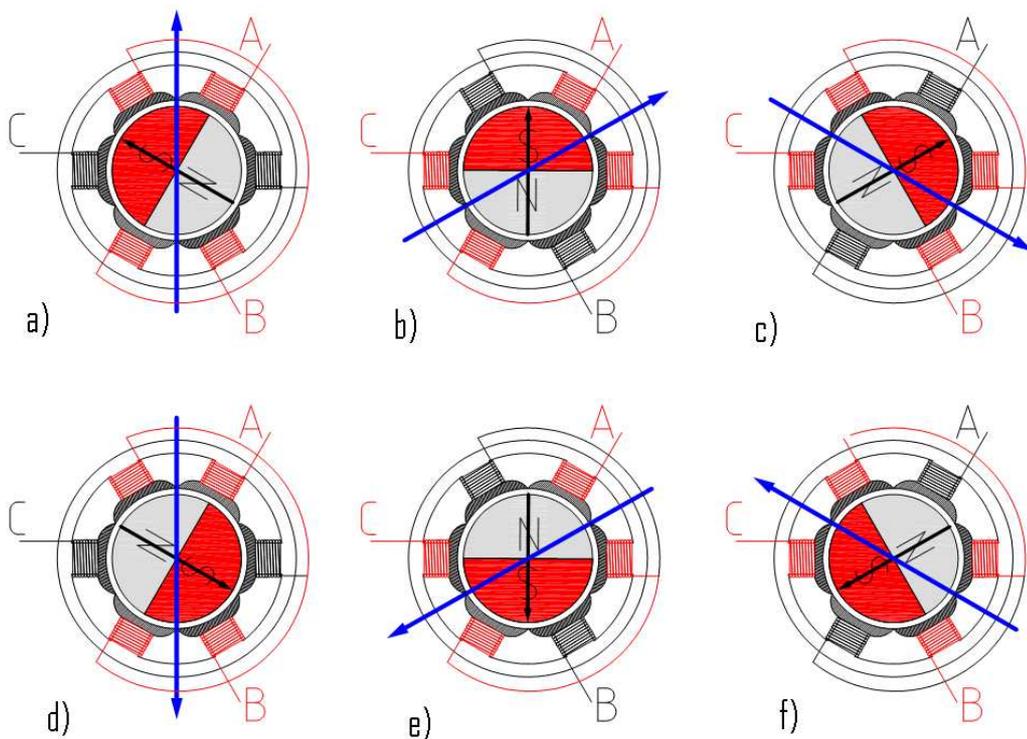
Estes motores são controlados por inversor de tensão com controle de frequência. A sequência de comutação deve ser determinada em função da posição angular do rotor para produzir torque constante e velocidade diretamente proporcional à frequência. Nestes motores são necessários sensores de posição angular para prover a sequência de controle de comutação do inversor. Os sensores de posição angular podem ser do tipo sensores de efeito *Hall*, *resolver*, ou sensores absolutos, que irão incrementar o custo e o tamanho do motor, e um arranjo mecânico especial para montagem do sensor é necessário. Estes sensores, em particular o sensor de efeito *Hall*, são sensíveis à temperatura, limitando a operação acima de 75 °C. Por outro lado reduz a confiabilidade do sistema, por causa de componentes e fiações, e em algumas aplicações não é possível montar qualquer tipo de sensor de posição angular no motor. Portanto o controle *sensorless* tem sido de grande interesse nos últimos anos (SHAO, 2003).

Nos motores assíncronos trifásicos, devido aos enrolamentos distribuídos a um ângulo de 120° no estator e a alimentação trifásica proveniente da rede elétrica e ou inversores de tensão controlados por frequência, produzem forças magneto motrizes girantes e que também são conhecidas por campo girante. Em semelhança os *MSIP* também possuem enrolamentos distribuídos a um ângulo de 120° no estator, tipicamente, e são controlados por inversores trifásicos de comutação de seis passos (*six-step*). O intervalo de comutação de cada fase é de 120°. As sequências de condução de corrente das fases são, AB-AC-BC-BA-CA-CB. Cada sequência de condução é chamada de passo (SHAO, 2003), a figura 11 demonstra a sequência de comutação das fases no *MSIP*.

A velocidade síncrona é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pólos do motor e da frequência da rede, conforme apresentado na equação 1.

$$N_s = \frac{60 \times f}{p} \text{ rpm} \quad (1)$$

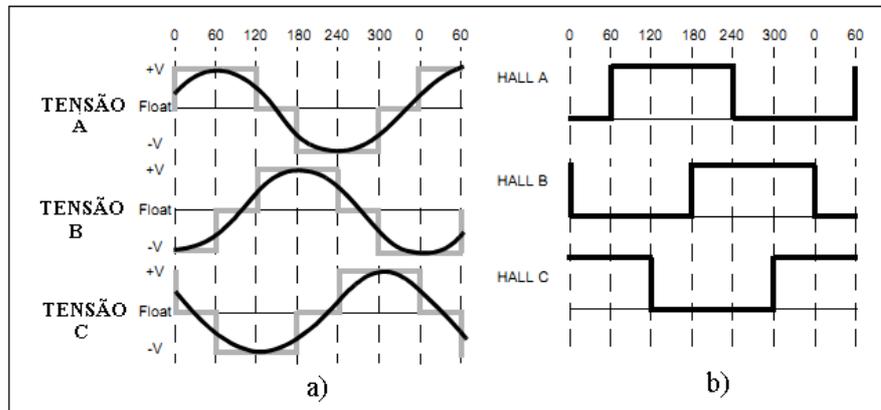
Onde:  $N_s$  é a velocidade síncrona;  $f$  é a frequência da corrente no estator,  $p$  é o número de pares de pólos do motor.



**Figura 11- Sequência de comutação six-step das fases no MSIP (Desenho Próprio).**

Desta forma somente duas fases conduzem a corrente elétrica, em qualquer posição angular do rotor, deixando a terceira fase flutuando. A fim de produzir torque máximo, o inversor deve ser comutado a cada  $60^\circ$  em que a corrente estará em fase com a  $f_{cem}$ . A figura 11 demonstra a sequência de comutação das fases, sendo 11-a) AB, 11-b) AC, 11-c) BC, 11-d) BA, 11-e) CA e 11-f) CB, onde o campo girante é representado pela seta maior, já a posição angular do rotor é representada pela seta menor. A figura 12 mostra o resultado da formação da tensão senoidal nas fases de acordo com o chaveamento da ponte trifásica. A relação é mostrada entre as tensões de fase e os três sensores de efeito Hall. O tempo de comutação é

determinado pela posição angular do rotor, que pode ser detectada pelos sensores de posição angular ou estimativa através dos parâmetros do motor (SHAO, 2003; ZAMBADA e DEB, 2010).



**Figura 12 - Geração da tensão senoidal nas fases MSIP (ZAMBADA, 2005).**

### 3 TÉCNICAS DE CONTROLE DO *MSIP*

Nestes motores é necessário o sensoriamento da posição angular do rotor para prover a sequência de controle de comutação do inversor, e algumas técnicas de controle são apresentadas a seguir e muitas outras podem ser encontradas nas literaturas.

#### 3.1 Sensores de efeito *Hall*

Em cada comutação realizada, uma das três fases é conectada à alimentação positiva da fonte, e outra a alimentação negativa, a terceira fase encontra-se em alta impedância, ou seja, desconectada. Ocorre a produção de torque devido à interação entre o campo magnético gerado no estator e o campo produzido pelos ímãs permanentes no rotor. O torque é máximo quando os dois campos estão a  $90^\circ$  um do outro, e diminui conforme os campos se alinham. Até tornarem-se nulos. Portanto para o motor continuar em movimento, o campo magnético produzido no estator deve mudar de posição. Os sensores de efeito *Hall* realimentam o sistema de comutação, que realiza a energização das bobinas na sequência correta para o funcionamento contínuo do motor (YEDAMALE, 2003). A cada  $60^\circ$  um dos sensores *Hall* muda de estado. Logo são necessários seis passos para completar um ciclo, a figura 13 apresenta a disposição dos sensores inseridos no motor e a atuação de acordo com a posição angular do rotor. Em sincronismo, a cada  $60^\circ$  as sequências das fases devem ser atualizadas, assim continuando o movimento.

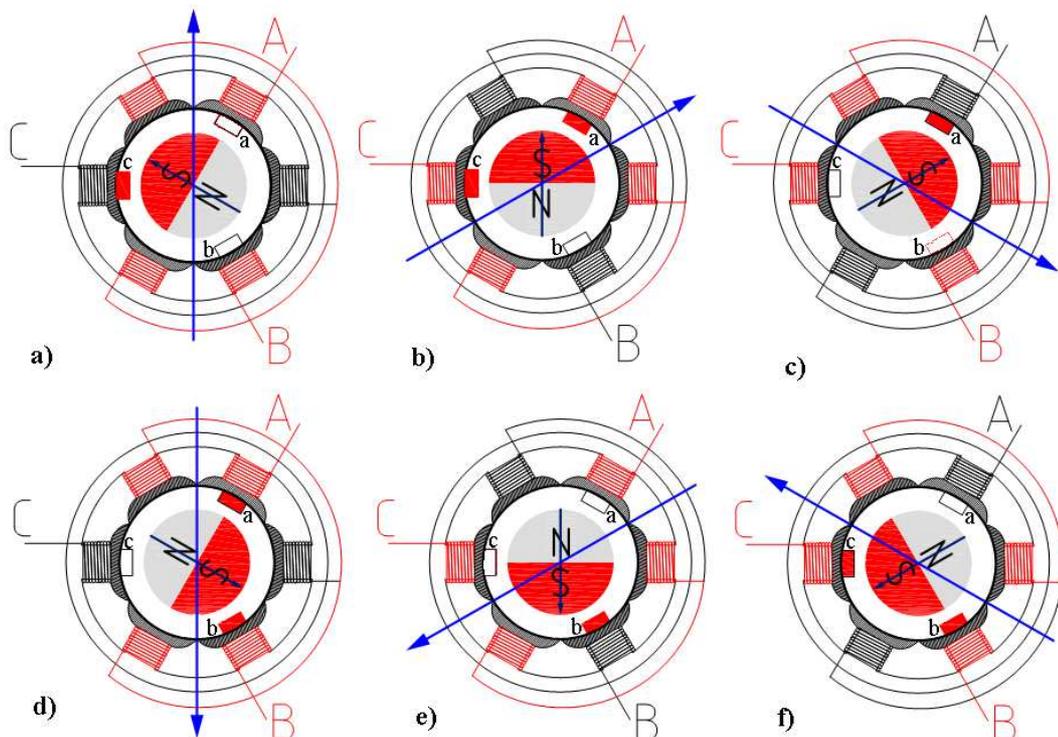


Figura 13 - Posicionamento dos sensores de efeito *Hall* (Desenho Próprio).

### 3.2 *Sensorless* usando a *fcem* do motor

É possível determinar o instante de comutação através das fases do motor monitorando a *fcem* da fase em que se encontra desconectada a cada ciclo. Este método de controle é chamado de *sensorless*, pois não utiliza sensores *Hall*, embora seja necessário fazer o sensoriamento da *fcem* na fase não alimentada. O controle *sensorless* possui uma vantagem no custo devido à eliminação dos sensores de posição angular (ZAMBADA, 2005).

Em qualquer instante duas das três fases conduzem corrente. Por exemplo, quando as fases A e B conduzem corrente a fase C estará fluando. Este intervalo de condução dura  $60^\circ$  que é chamado de passo. A transição de um passo para outro é chamado de comutação assim há seis passos em um ciclo. Como mostrado nas figuras 11-a até 11-f, o primeiro passo é AB, então AC, para BC, para BA, para CA, para CB e então repete este padrão. O tempo de comutação é determinado pela posição angular do rotor. Uma vez que a forma de onda da *fcem* indica a posição angular do rotor, é possível determinar o tempo de comutação, se a *fcem* for conhecida. Na figura 10, a corrente está em fase com a *fcem*. Se a passagem por zero (*zero-crossing*) pode ser medida, então, pode-se saber quando comutar a corrente. Com isto é possível efetuar medição da *fcem* em relação ao ponto de neutro do motor para a detecção de *zero-crossing*, sendo que na maioria dos motores o neutro não está disponível. Na prática, é mais comum usar o método da construção do ponto virtual de neutro que, em teoria, possui o mesmo potencial em relação ao fechamento estrela do motor. O ponto de neutro virtual é construído por resistores conforme apresentado na figura 14 (FREESCALE, 2005).

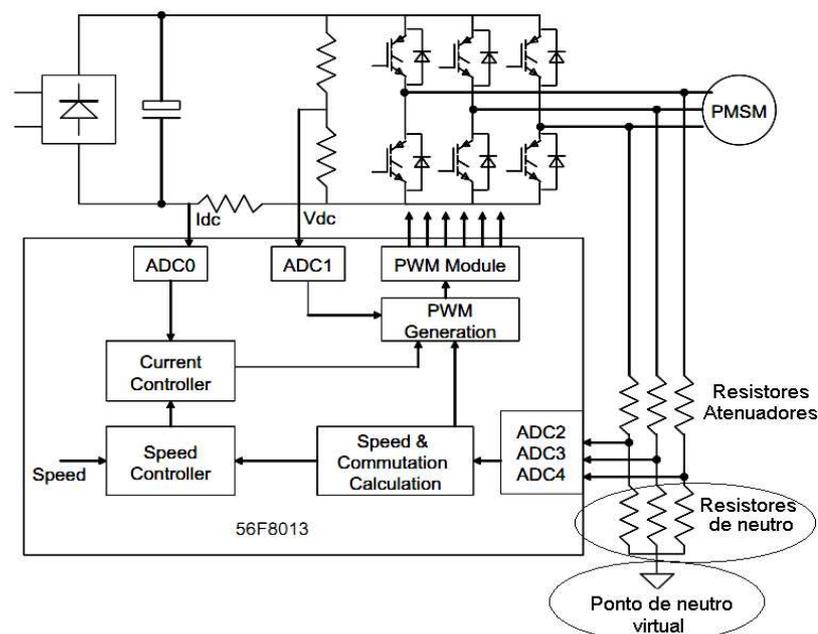


Figura 14 - Demonstração do ponto de neutro virtual (FREESCALE, 2005).

### 3.3 Controle vetorial

O controle de campo orientado é comumente chamado de controle vetorial. Este método de controle manterá o fluxo do estator e o fluxo do rotor quase perpendicular, mantendo a soma do fluxo do estator constante. Quando o eixo de controle é coincidente com o fluxo do estator, o ângulo de carga pode ser calculado a partir da corrente do estator e dos parâmetros do motor. Quando são feitas tentativas para controlar o fluxo do estator, calculado com a mesma magnitude dos ímãs permanentes, o erro no fluxo pode ser calculado a partir do fluxo do estator e do ângulo de carga. Isto faz com que seja possível a utilização de um sistema com realimentação de fluxo para calcular as tensões de estator para os diversos eixos do *MSIP*, com o eixo de controle coincidindo com o fluxo do estator, produzindo uma tensão de controle. Esta tensão de controle é aplicada ao *MSIP* na frequência solicitada. O método de controle vetorial pode obter um elevado desempenho e eficiência, que é baseado na precisão dos valores dos parâmetros do motor. A variação por temperatura da resistência interna e a indutância do motor podem diminuir o desempenho e a eficiência do sistema. Para compensar as variações de parâmetros, a observação de parâmetros e algoritmos complexos de controle, são necessários para corrigir esses erros. Por outro lado, o método de controle de campo orientado é frequentemente aplicado nos *MSIP* com uma forma de onda senoidal da *f<sub>cem</sub>*, para alcançar um desempenho de alto torque e eficiência. A Figura 15 apresenta um sistema de controle vetorial *sensorless* do *MSIP* (FREESCALE, 2005).

### 3.4 Processamento digital de sinais

O processador digital de sinais do inglês, *digital signal processing (DSP)*, são processadores que permitem o uso de técnicas de controle de sinais discretos, através de algoritmos aplicado ao controle e processamento. São componentes compostos por conversores analógicos digitais (*A/D*) e conversores digitais analógicos (*D/A*) com capacidade de converter os sinais com elevada resolução, além de processadores capazes de manipular esses dados com alta velocidade, incorporando ainda outros periféricos. Pode-se dizer que o *DSP* é um dispositivo que possui uma arquitetura desenvolvida para efetuar operações e manipulações matemáticas de dados de sinais digitais de forma rápida, sendo capaz de gerar saídas em tempo real. Estas características do *DSP* permitem a implantação de algoritmos de controle (clássico, robusto, adaptativo, *fuzzy*, entre outros) com a flexibilidade de alteração dos parâmetros de controle por software dispensando a interferência de parâmetros físicos dos



### 3.6 Controladores comerciais

A seguir serão apresentados alguns circuitos especializados em controle de motores *brushless*, controladores estes que estão disponíveis no mercado e oferecem seus *softwares* de programação e configuração, fabricados por empresas renomadas como MOTOROLA, STMicroelectronics e Infineon Technologies.

#### 3.6.1 MOTOROLA, o MC33033

O MC33033 é um controlador de alto desempenho para motores *brushless* produzido pela Motorola. Ele contém todas as funções necessárias para implementar circuito em malha aberta, para motores de três ou quatro enrolamentos. A figura 16 apresenta um diagrama em bloco representativo do MC33033.

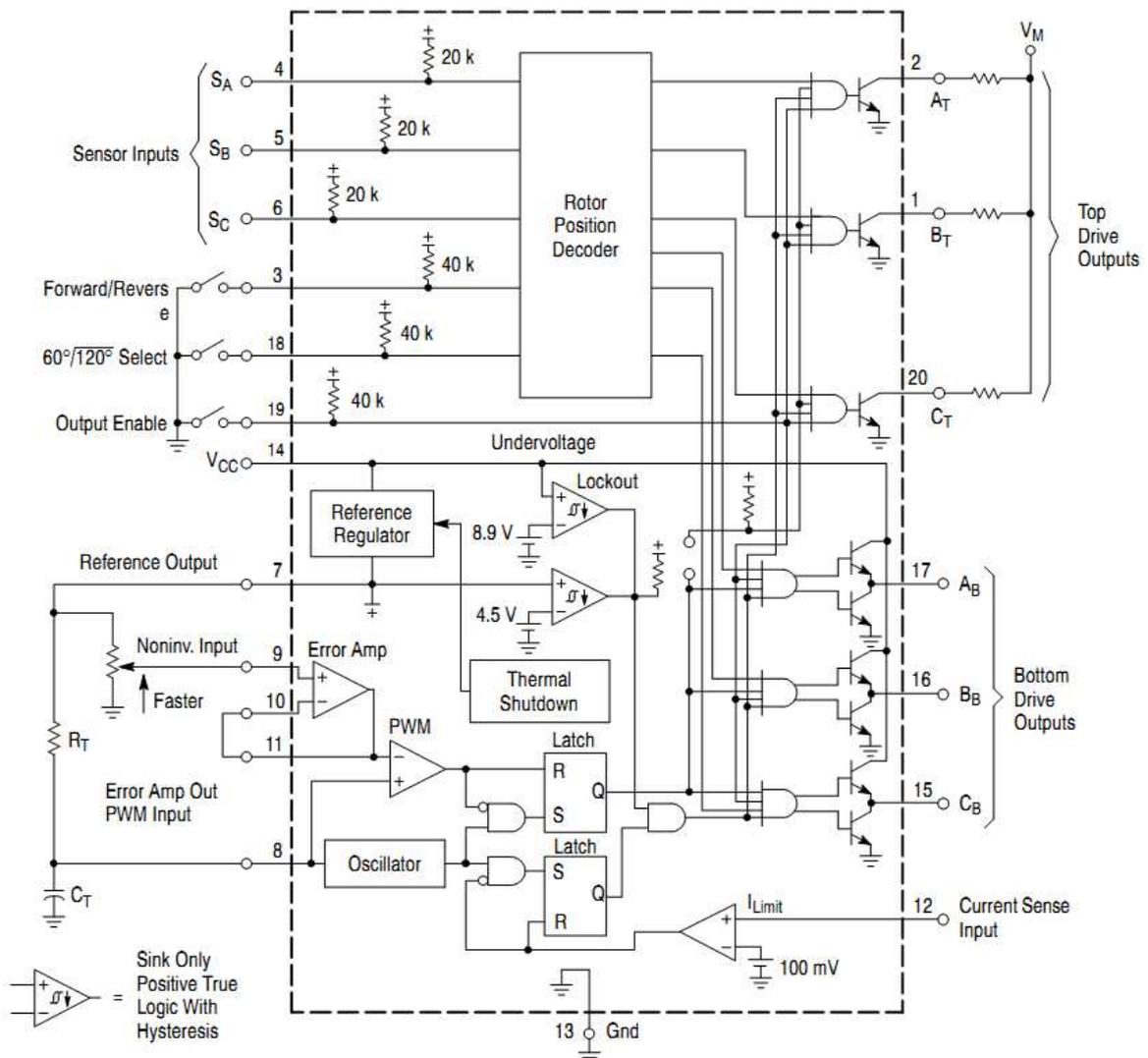


Figura 16 - Diagrama em blocos do circuito integrado MC33033 (MOTOROLA, 1996; ON SEMICONDUCTOR, 2013).

Construído com tecnologia analógica bipolar, oferece um alto grau de desempenho e robustez em ambientes industriais hostis. O MC33033 possui decodificador de posição angular do rotor, para o sequenciamento de comutação adequada, fonte de alimentação com compensação de temperatura capaz de alimentar sensores, oscilador dente de serra com frequência programável. Amplificador de erro totalmente acessível, três *drivers* de saídas superiores com coletor aberto, e três *drivers* de saídas inferiores na configuração *totem-pole* ideais para o chaveamento de *MOSFETs* de potência. Incluído no MC33033 estão recursos de proteção que consiste de bloqueio por subtensão, limitador de corrente operando ciclo-a-ciclo, e proteção térmica interna. Funções de controle típicas do motor incluem controle aberto da malha de velocidade, inversão do sentido de rotação horário e anti-horário e liga desliga. E um pino para configurar o decodificador de posição angular do rotor para 60° ou 120° da fase de entrada do sensor.

### 3.6.2 MOTOROLA, o MC33039

O MC33039 é um adaptador para controle de velocidade em malha fechada, projetado especificamente para uso em sistemas de controle de motores *brushless DC*. Sua implementação possibilita regulação precisa da velocidade, sem a necessidade de um tacômetro magnético ou ótico. Este dispositivo contém três *buffers* de entrada com histerese para imunidade a ruído, três detectores de borda, um monoestável programável e um regulador *shunt* interno. Também está incluída uma saída invertida para ser usada em sistemas que necessitem conversão do sensor de fase. Apesar de este dispositivo ser projetado principalmente para uso com o controlador de motor *brushless* MC33035 e MC33033, ele pode ser usado em várias outras aplicações de controle em malha fechada de velocidade, com boa relação de custo-benefício. A figura 17 mostra os blocos representativos que constituem o adaptador para controle de velocidade MC33039. As três entradas A, B, C (pinos 3, 2 e 1, respectivamente) com histerese passam por detectores de transição (representado pela porta lógica *XOR*, a qual compara o valor atual com um valor anterior do sinal de entrada). A saída dos detectores liga-se à entrada *Set* do *Latch*, cuja saída *Q* aciona o transistor responsável pela descarga do capacitor *CT*. O amplificador operacional inferior possui sua entrada inversora referenciada a 0,3V, e é usado para gerar o sinal *Reset* do *Latch*.

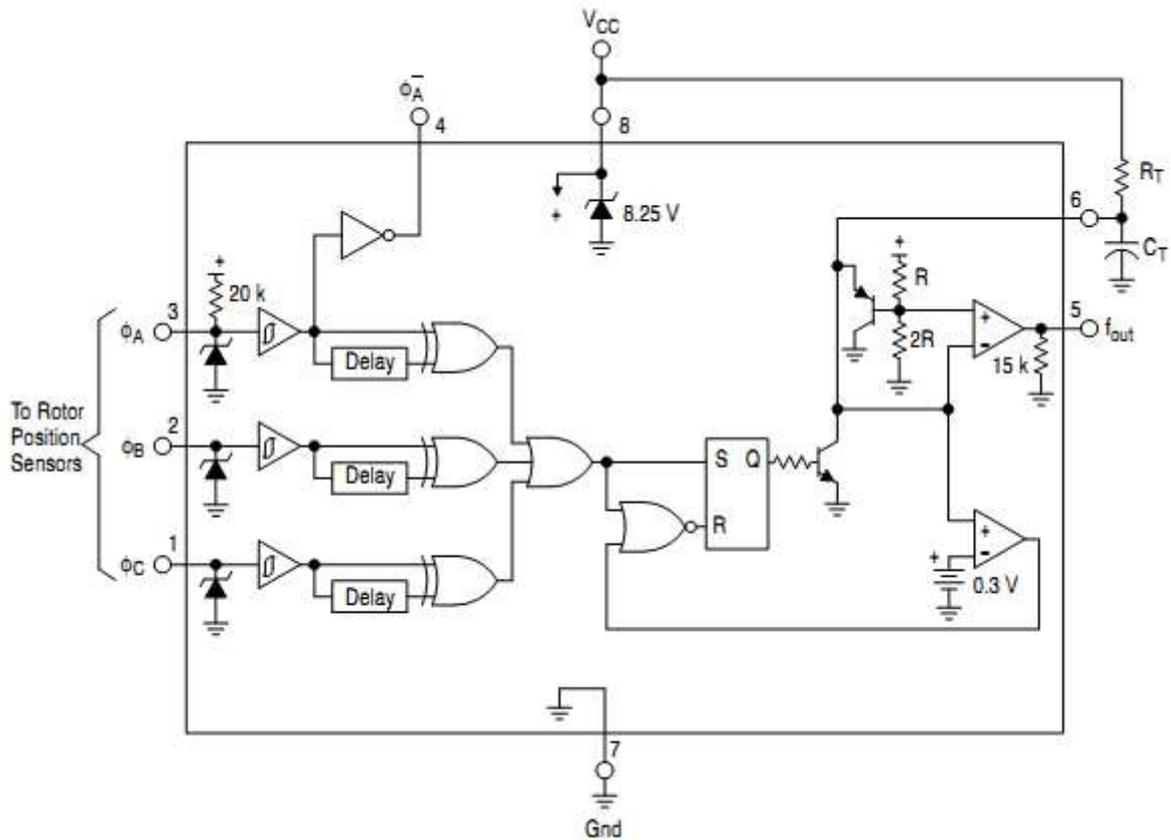


Figura 17 - Diagrama em blocos do MC33039 (ON SEMICONDUCTOR, 2003).

O outro amplificador operacional gera o sinal de saída do dispositivo ( $f_{out}$ , pino 5), comparando a tensão do capacitor (pino 6) com uma referência fixa de 67% de  $V_{CC}$ . O resistor  $R_T$  junto com o capacitor  $C_T$  determinam a rampa de carga deste último. O pino 4 apresenta uma saída que é a entrada  $\phi_A$  invertida, usada para fazer a conversão entre as convenções dos sensores de fase. A referência (terra) é feita no pino 7 e a alimentação  $V_{CC}$  no pino 8, onde se vê o regulador *shunt* feito com o diodo *Zener*.

### 3.6.3 MOTOROLA, o MC33033 e MC33039 em malha fechada

A figura 18 apresenta o diagrama em bloco do controlador em malha fechada usando o MC33033 e MC33039. O MC33033 para controle de velocidade em malha fechada requer uma entrada de tensão proporcional à velocidade do motor, isto é conseguido através do uso de um tacômetro para gerar uma tensão de realimentação da velocidade do motor. O MC33039 é usado para gerar a tensão de realimentação requerida sem o uso de um tacômetro. Os mesmos sinais do sensor *Hall* usado pelo MC33033 são utilizados pelo MC33039. Toda transição positiva ou negativa do sinal do sensor em qualquer um dos sinais faz com que o

MC33039 produza um pulso de duração e amplitude definido, determinados pelo resistor externo R1 e capacitor C1.

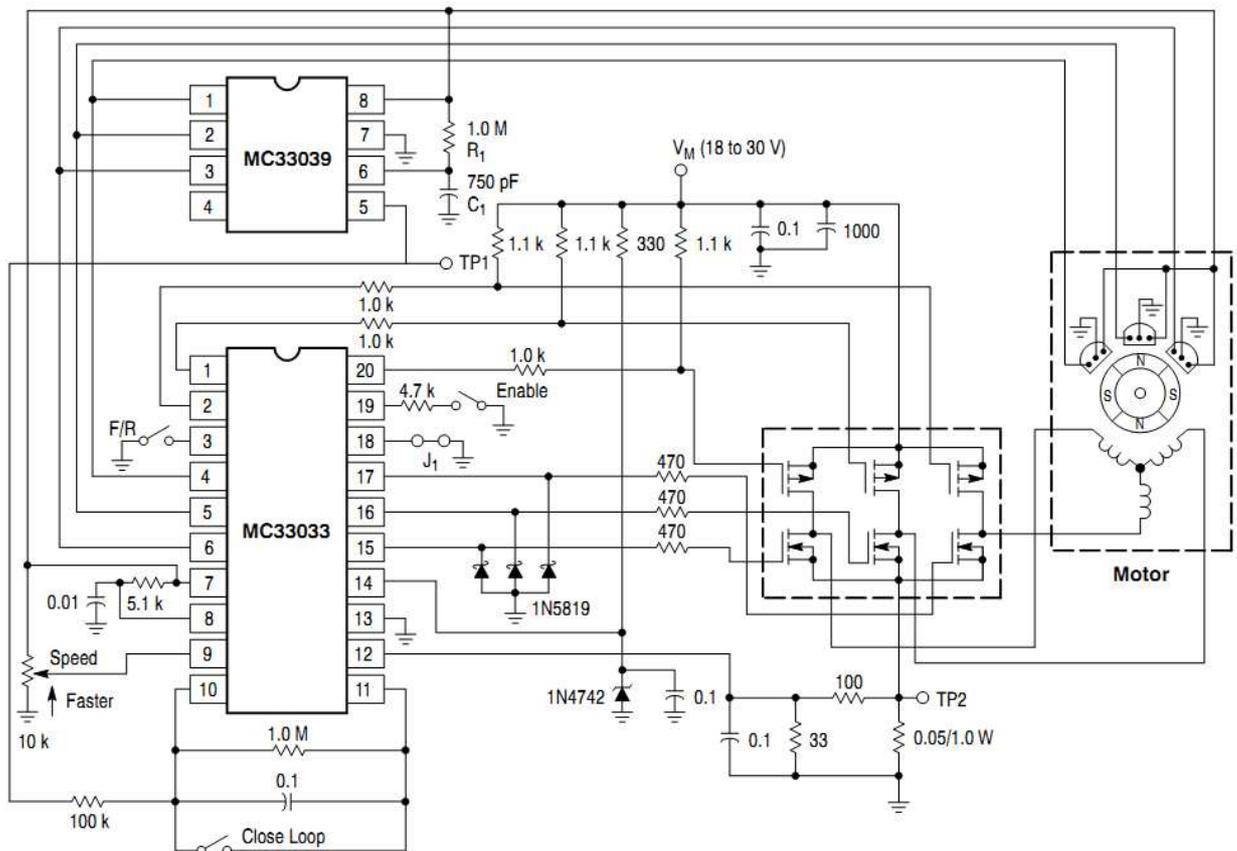


Figura 18 - Controle de velocidade em malha fechada (ON SEMICONDUCTOR, 2013).

O trem de pulsos de saída resultante presente no pino 5 do MC33039 é integrado pelo amplificador de erro do MC33033, configurado como um integrador, para produzir um nível de tensão *DC* proporcional à velocidade do motor. Esta tensão proporcional a velocidade estabelece nível de referência do *PWM* no pino 11 do MC33033 e fecha a malha de realimentação, permitindo excelente controle para o motor.

### 3.6.4 ST Microelectronics, o ST7

O microcontrolador ST7 foi desenvolvido para aplicações industriais, possui núcleo de 8 bits, conjunto de instruções aprimoradas e memórias de programa *FLASH*, *ROM* ou *FASTROM*. O conjunto de instruções aprimoradas e modos de endereçamento do ST7 oferecem tanto poder e flexibilidade para o desenvolvimento de software, permitindo que o projeto do código do aplicativo seja altamente eficiente e compacto. Além do padrão de gerenciamento de dados de 8 bits, todos os microcontroladores ST7 possuem manipulação de bits, multiplicação e modos de endereçamento indireto. O controlador de motor (*MTC*) pode

ser visto como um modulador de largura de pulso trifásico multiplexados em seis canais de saída e um detector de zero-crossing através de  $f_{cem}$  para controle *sensorless* de motor síncrono de ímãs permanentes na figura 19 é apresentado um diagrama em blocos do MTC.

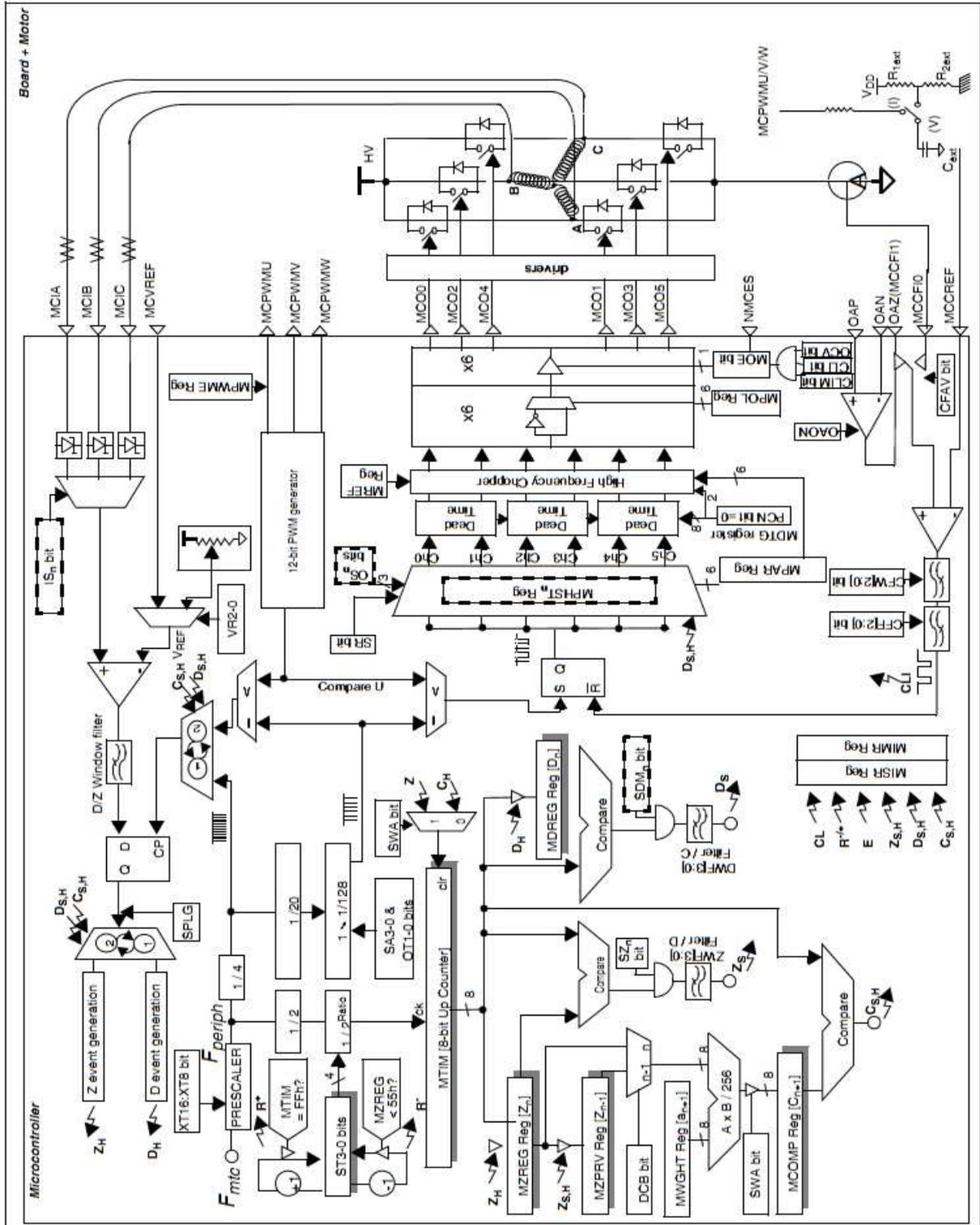


Figura 19 - Diagrama em blocos de controle de MSIP (ST MICROELECTRONICS, 2009).

O *MTC* é particularmente adequado para o controle de *MSIP* e suporta os modos de operação: controle de comutação de passo com regulagem de tensão e limitação de corrente do motor; controle de comutação de passo com regulagem da corrente do motor, ou seja, controle direto de torque; controle de comutação das fases do motor por sensor ou *sensorless*; detector de *zero-crossing* da *fcem* de alta sensibilidade. O comparador de tensão fase integrado está diretamente referido a tensão de *fcem* sem qualquer atenuação. A tensão de *fcem* de até 200 mV podem ser detectados, proporcionando alta imunidade a ruídos e com a auto comutação e pode operar em uma ampla faixa de velocidade; detecção de desmagnetização do enrolamento em tempo real detectado por ajuste fino do tempo de máscara de tensão de fase aplicado antes do monitoramento da *fcem*; atraso automático e programável entre o *zero-crossing* da *fcem* e a detecção de comutação da fase do motor; geração de *PWM* trifásico senoidal ou sinais de três canais independentes *PWM* (ST MICROELECTRONICS, 2009).

### 3.6.5 Infineon Technologies, o XMC 1300

O XMC 1300, desenvolvido pela empresa Infineon Technologies, é um microcontrolador especialmente dedicado para aplicações de controle de motor e controle digital para conversão de energia. Para este fim, além de excelentes unidades de captura e comparação, esta série dispõe de uma interface de posicionamento (*POSIF*). Para a detecção exata da posição angular do rotor, um poderoso coprocessador matemático que permite a implementação de controle com campo orientado (*FOC*) *sensorless*. A interface de posicionamento *POSIF*, combinada com as unidades de temporização proporcionam um meio simples de controle de posição angular e velocidade do rotor. O coprocessador matemático pode executar controle de rotação através de vetorização e transformadas de *PARK* e *CLARK* com resolução de 24 bits, o que por sua vez permite a implementação de poderosos algoritmos para controle por campo orientado. A figura 20 apresenta um diagrama em blocos do controle com campo orientado com os microcontrolador XMC 1300 (INFINEON, 2013). Com a aplicação do canal de comparação adicional, é possível definir diferentes tempos de atrasos de borda de subida e descida para gerar sinais de *PWM* assimétricos. As aplicações beneficiadas por este recursos são os inversores trifásicos e outras aplicações. O coprocessador matemático de 64 MHz possui alguns recursos internos que auxiliam os cálculos trigonométricos. A unidade matemática aumenta significativamente o poder de processamento em tempo real (INFINEON, 2013).

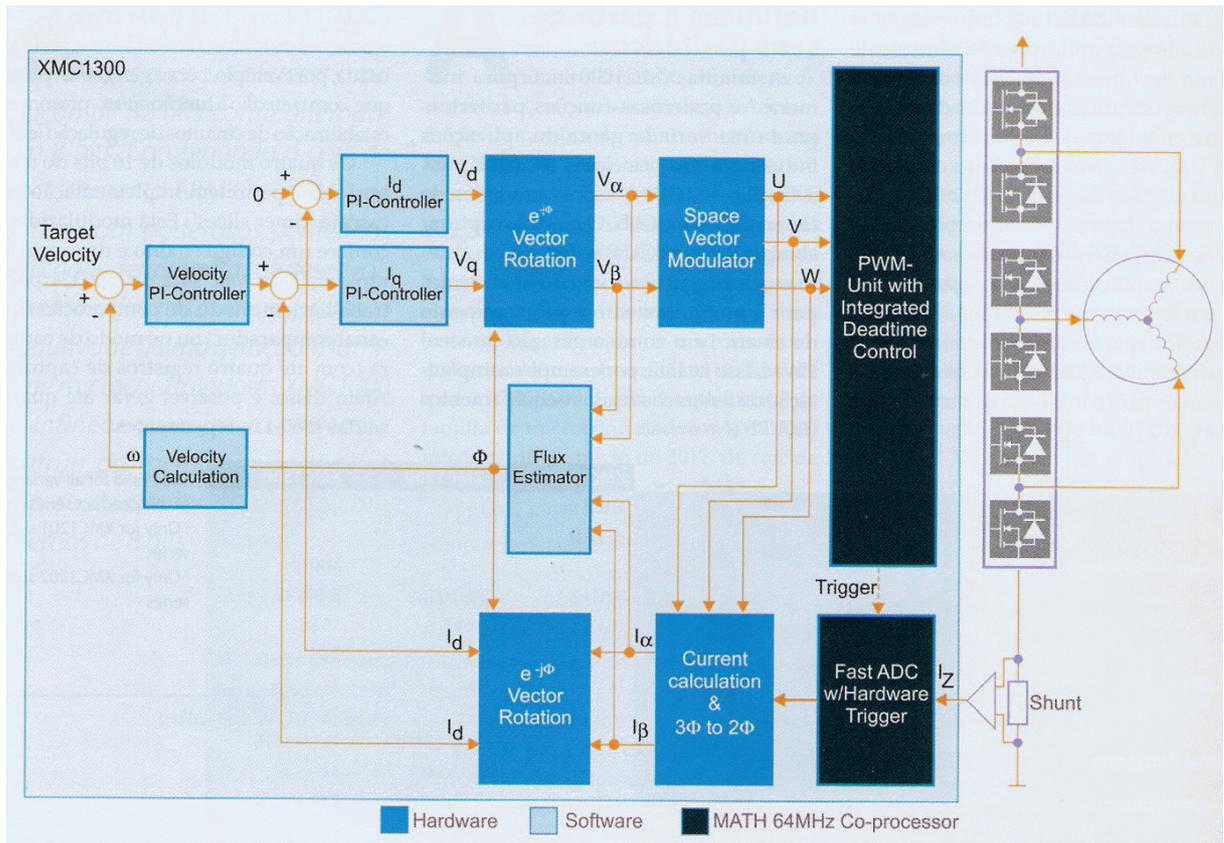
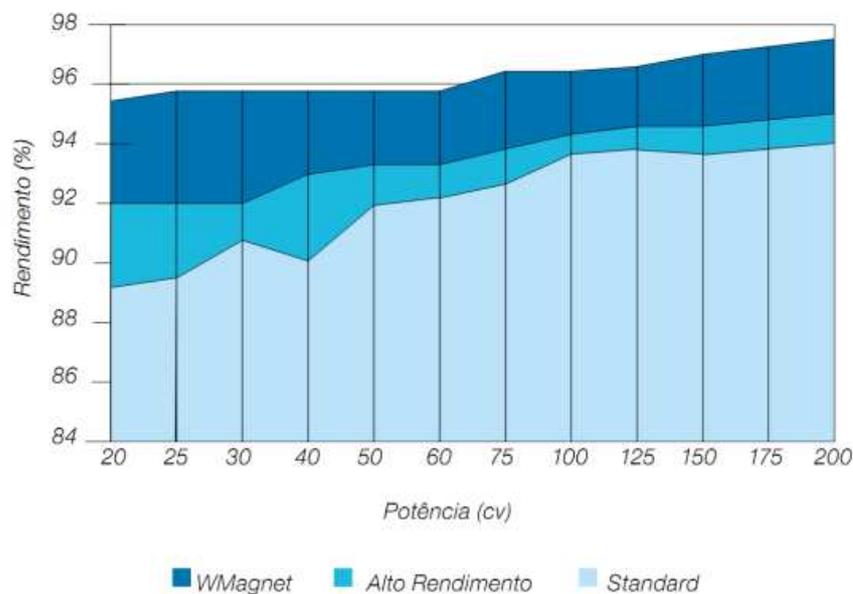


Figura 20 – Diagrama em blocos de controle de MSIP usando XMC 1300 (INFINEON, 2013).

Aliado às técnicas mencionadas, o inversor CFW11 fabricado pela WEG, possui um algoritmo de controle especialmente desenvolvido, para trabalhar com o motor síncrono com ímãs permanente, permitindo o controle de torque em velocidade muito baixa e também em altas rotações. Para isto utiliza-se do método de controle vetorial *sensorless*, que possui um avançado algoritmo que estima a posição angular e velocidade e elimina os sensores de posição angular, reduzindo a possibilidade de falhas do acionamento.

#### 4 MOTOR SÍNCRONO COM IMÃS PERMANENTES COMERCIAL

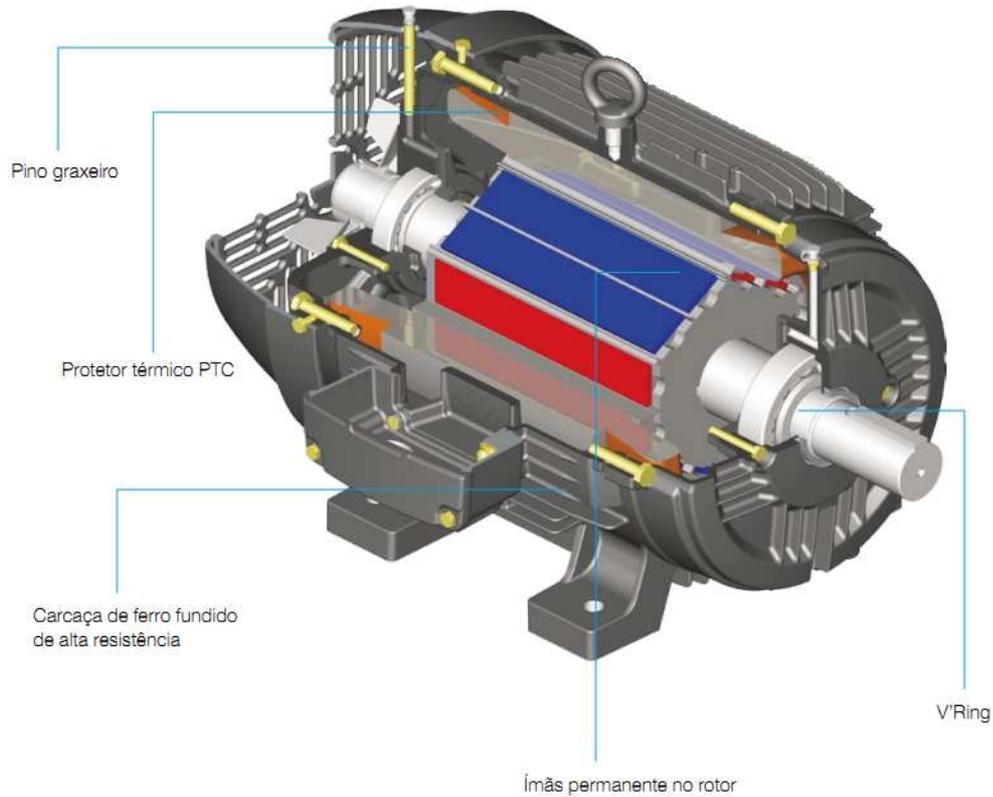
Os motores síncronos com imã permanente fabricado pela WEG são conhecidos como, Wmagnet, são construídos com ímãs de  $NdFeB$ , quase não possuem perdas Joules no rotor, ao contrário dos motores de indução com gaiola de esquilo convencional. Como as perdas Joule são uma parcela significativa das perdas totais nos motores de indução, conforme apresentado na figura 3, retirando a gaiola de esquilo e substituindo-a por ímãs, o Wmagnet com ímãs de  $NdFeB$ , fabricados pela WEG assegura um rendimento muito maior do que os encontrados nos motores de indução das linhas Standard e Alto Rendimento, conforme apresentado na figura 21 (WEG, 2011a).



**Figura 21 – Gráfico comparativo de rendimento dos motores Wmagnet, Alto Rendimento e Standard (WEG, 2011a).**

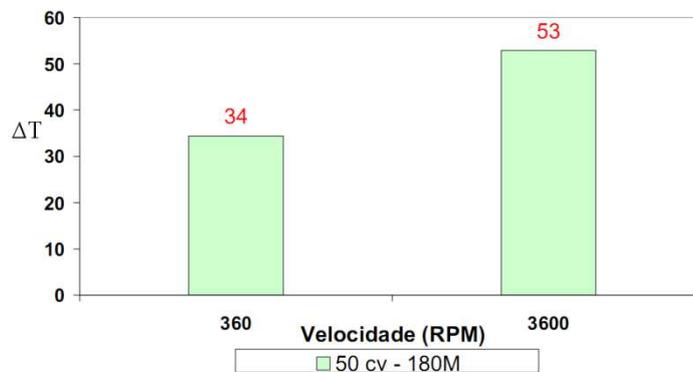
A figura 22 apresenta o Wmagnet em corte mostrando suas partes: Pino graxeiro, é o dispositivo que possibilita a relubrificação sem a parada do motor, e em condições normais de operação o tempo de vida útil dos rolamentos está em torno de 100.000h conforme recomendações do fabricante SKF (SKF, 2007; SIEMENS, 2010); Protetor térmico *PTC*, é responsável pela realimentação de temperatura do enrolamento do estator, para a eletrônica de controle; Carcaça de ferro fundido é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio com aletas para dissipação térmica, na carcaça também é alojado o núcleo de chapas de aço silício tratadas termicamente para reduzir ao máximo as perdas no ferro, o enrolamento trifásico possui três conjuntos iguais de bobinas defasadas de  $120^\circ$ , formando um sistema trifásico; Imãs permanentes, são construídos em  $NdFeB$  instalados internamente no rotor em pares, que garantem a redução das perdas elétricas por

efeito Joule e, conseqüentemente, asseguram uma menor temperatura ao motor; V´ring, responsável em garantir a vedação das partes internas do motor, não permitindo a penetração de impurezas dentro do motor protegendo principalmente os imãs.



**Figura 22 - Wmagnet em corte (WEG, 2011a).**

Devido às vantagens apresentadas, o volume e peso do Wmagnet comparado a um motor de indução de mesma potência é menor e o tempo de vida é significativamente aumentado. A figura 23 apresenta a pequena diferença de temperatura no Wmagnet para uma rotação dez vezes maior.



**Figura 23 –  $\Delta T$  em  $^{\circ}\text{C}$  para faixa de rotação 10:1 (WEG, 2011a).**

Comparado a um motor de indução equivalente, o volume do Wmagnet é reduzido em aproximadamente 47%, resultando em uma alta relação de torque/volume e uma redução de

36% no peso. Para uma mesma relação de torque/potência, diminuindo-se o tamanho da carcaça. A figura 24 apresenta uma comparação entre dois motores de mesma potência, mostrando que o Wmagnet possui sua carcaça menor em relação ao de indução.

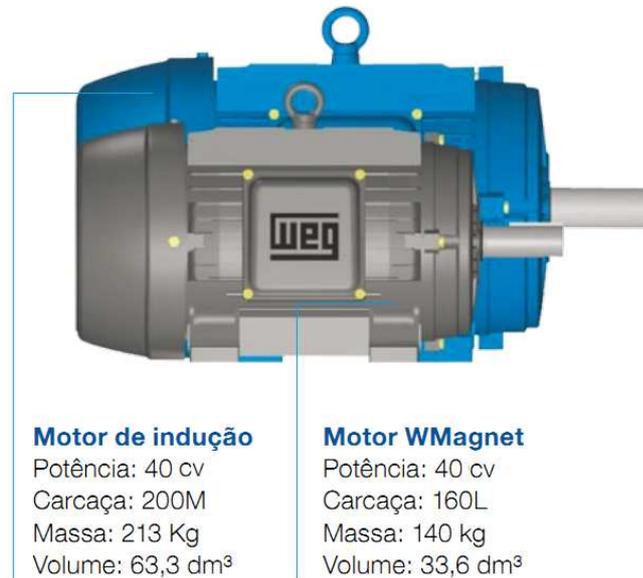


Figura 24 - Comparativo entre MIT e Wmagnet (WEG, 2011a).

O sistema de resfriamento não é necessário no Wmagnet, porém para garantir às características dos ímãs a ventilação é reduzida. Desta forma, é verificado um significativo decréscimo no nível médio da pressão sonora de 75 dB(A) para 72 dB(A) devido ao ventilador acoplado ao eixo do motor. A figura 25 apresenta a comparação do nível médio de pressão sonora dB(A) da ventilação, referência motor de 20 cv à 3600 rpm, das linhas standard, alto rendimento e Wmagnet.

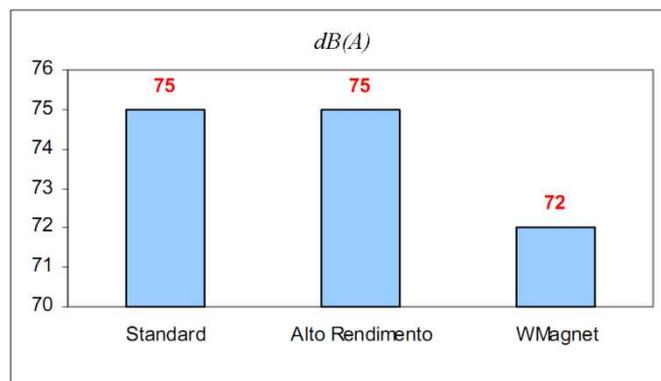
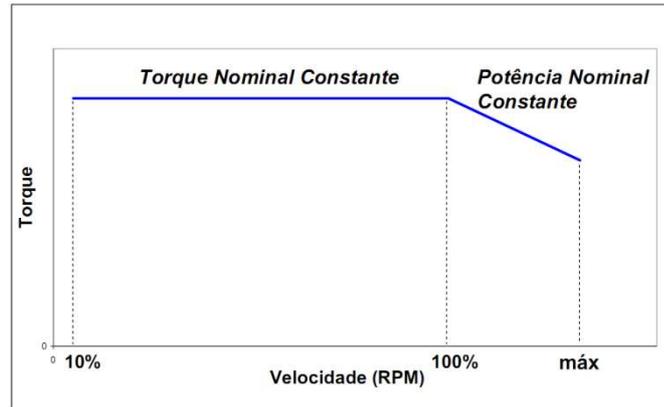


Figura 25 - Pressão sonora entre os motores (WEG, 2011b).

Outra grande vantagem do Wmagnet é que este pode operar com torque constante em uma ampla faixa de velocidade, conforme mostrado na figura 26.



**Figura 26 – Curva de torque x velocidade (WEG, 2011a).**

Os *MSIP* fornecem uma excelente densidade de potência, uma alta eficiência energética e um alto torque. Nos últimos anos, o preço dos ímãs de terras-raras diminuiu significativamente. Por esta razão as máquinas com ímãs permanentes estão disponíveis para potências de até 300 kW (BENJAK e GERLING, 2010).

## 5 PROPOSTA DE UM *RETROFITTING*

### 5.1 Levantamento dos gastos com manutenção preventiva

Em busca de solução para a otimização de seus processos para atender a demanda crescente do mercado do alumínio, fez-se necessário à modernização de seus equipamentos. Tendo em vista esta afirmação, verificou-se a necessidade de efetuar um *retrofitting* no acionamento de um equipamento chamado de *puller* que está em operação contínua há mais de 15 anos na empresa Exall Alumínio S/A, localizada em Pindamonhangaba-SP. O acionamento é realizado por um *MCC*, e a tabela 2 apresenta os dados de placa do motor e da realimentação.

**Tabela 2 - Dados do *MCC* e taco gerador (Fonte Própria).**

Dados do motor		Dados do taco gerador	
Modelo	MGL112 M	Modelo	2R 60
Fabricante	CEAR	Fabricante	DEBU
Potência	18,4 kW	Nº Serie	6002068
Tensão de armadura	400 V	Tensão mínima	0,06 V
Tensão de campo	220 V	Rotação máxima	10000 min <sup>-1</sup>
Corrente de armadura	52 A	Corrente máxima	0,25A
Corrente de campo	2,3 A	Grau de proteção	55
Rotação nominal	2555 rpm	Sentido	Reversível
Momento de Inércia J	0,047 kgm <sup>2</sup>		
Regime de trabalho	S1		
Torque nominal	69Nm		

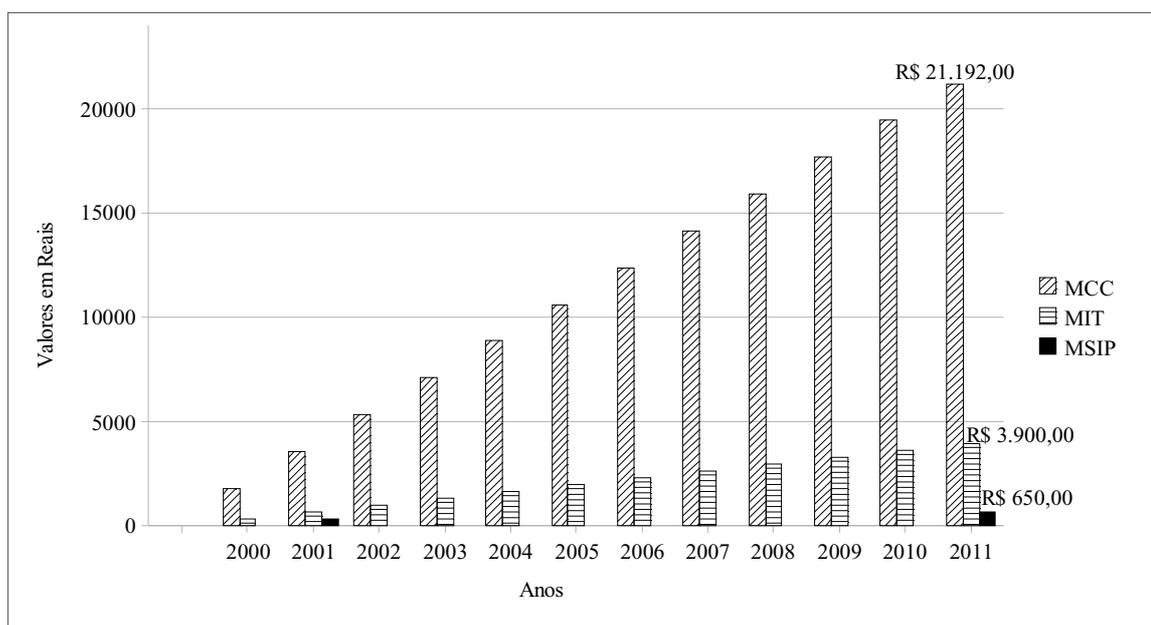
Considerando a periodicidade da manutenção preventiva de acordo com o fabricante, que recomenda a substituição dos rolamentos, por fim da vida útil do lubrificante, ajustado a periodicidade para 12 meses, para uma rotação do motor a 2555 rpm e rolamentos 6306-ZZ e 6308-ZZ respectivamente conforme tabela 3.

Desde a instalação por recomendação do fabricante, sempre se seguiu essa periodicidade, e as devidas manutenções preventivas foram realizadas na *MCC*. Os custos de manutenções preventivas durante o período do ano 2000 até 2011, última manutenção preventiva, estão apresentados na figura 27, com as equivalentes estimativas para *MIT* e para *MSIP*.

Tabela 3 - Vida útil do lubrificante para os diversos rolamentos (WEG, 2012).

ROLAMENTOS DAS CARÇAÇAS 90 ATÉ 132 - MÁQUINAS ABERTAS						
VIDA ÚTIL DA GRAXA DE LUBRIFICAÇÃO EM HORAS						
Rolamento	ROTAÇÃO (rpm)					
	1.000	1.200	1.500	1.800	2.400	3.000
EIXO NA HORIZONTAL						
6205-2RS	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	17.000
6305-2RS	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	17.000
6306-2RS	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	15.000
6307-2RS	20.000	20.000	20.000	20.000	18.000	13.500
6308-2RS	20.000	20.000	20.000	20.000	16.000	12.000

Os valores acumulados em manutenção preventiva no *MCC*, durante o período atingiram valores de R\$ 21192,00. Em contra partida, comparando a um *MIT*, a previsão é de que os valores seriam da ordem de R\$ 3900,00 ou 18% do valor gasto com a manutenção preventiva no *MCC* durante o mesmo período medido, com uma redução nos gastos 82%. Por outro lado, comparando a um *MSIP*, a previsão é de que os gastos seriam da ordem de R\$ 650,00 ou 3% do valor gasto com manutenção preventiva no *MCC* durante o mesmo período medido perfazendo uma redução nos gastos da ordem de 97%. No entanto o *MSIP* é beneficiado pelas vantagens descritas anteriormente, menor aquecimento aumentando a vida útil do lubrificante, pino graxeiro permitindo relubrificação sem a parada do motor, com isso permite-se que os rolamentos sejam substituídos de acordo com a recomendação do fabricante 95000 horas ou 10 anos de operação. Com isso a periodicidade de manutenção preventiva no *MSIP* descrito anteriormente é de 10 anos.

Figura 27 - Valores acumulados de manutenções preventivas *MCC* x *MIT* x *MSIP* (Desenho Próprio).

Observando estes números verificou que se poderia investir em uma nova tecnologia de controle, em que o retorno do investimento é garantido.

## 5.2 Medições em campo

Durante as análises verificou-se que o motor, em operação, deve trabalhar com baixa velocidade e torque elevado e efetuaram-se algumas medições em campo com o *MCC*, usando um equipamento analisador de grandezas elétricas. O resultado chegou à curva de torque da máquina em operação apresentada na figura 28. Observou-se que o ponto crítico é a região de maior potência e velocidade chegando próximo a valores nominais do motor.

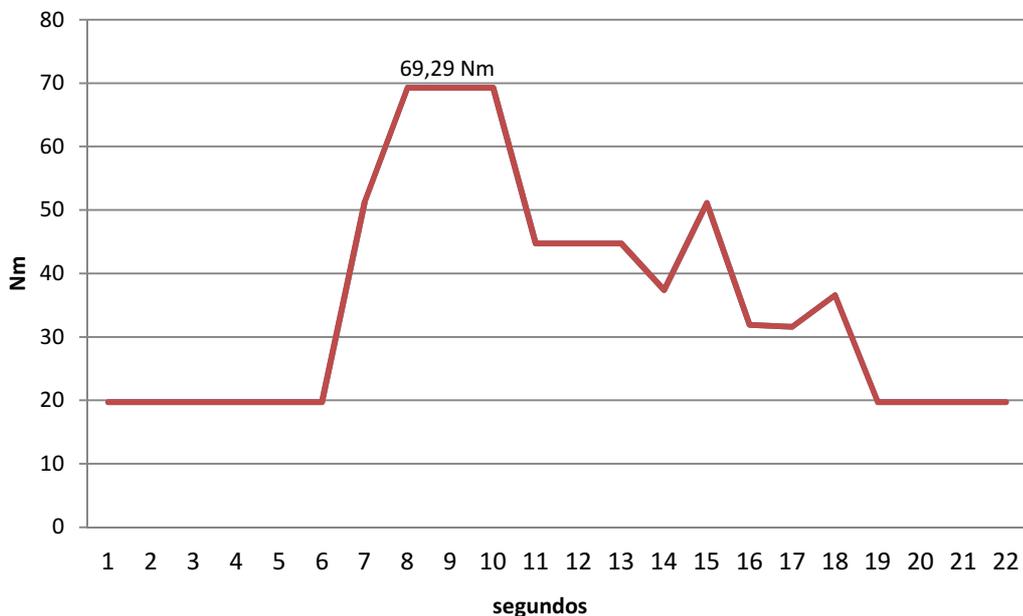


Figura 28 – Medição de torque em um ciclo de operação (Desenho Próprio).

Após conhecer o perfil de torque do *MCC*, antes da definição de qual máquina seria a melhor para a substituição decidiu-se que seria importante usar uma ferramenta de simulação para ajudar nesta definição, e decidiu-se utilizar o *SIMULINK*, módulo de simulação do software *MATLAB*, para tal atividade.

## 5.3 Simulações em ambiente *MATLAB* / *SIMULINK*

A versão do software *MATLAB* / *SIMULINK* utilizado para as simulações é a R2010a.

### 5.3.1 SIMULAÇÃO DO *MCC*

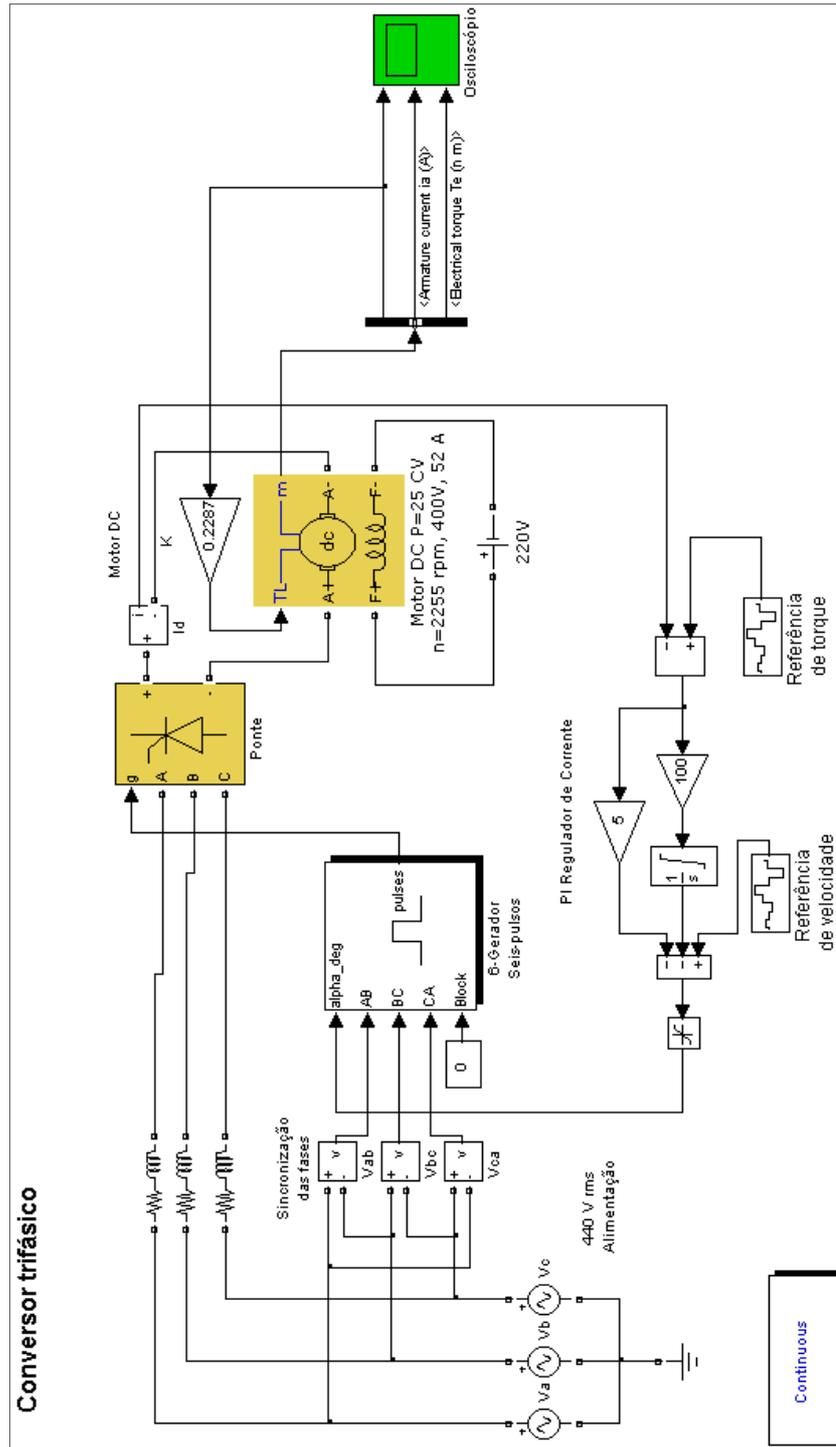
No ambiente *SIMULINK*, a simulação é ajustada com os parâmetros da coleta de dados em campo descritos na tabela 4, onde  $t$  é o tempo em segundos,  $T$  é o torque solicitado em *Nm*

e  $n$  é velocidade em *rpm* solicitado.

**Tabela 4 - Dados coletados em campo (Fonte Própria).**

<b>T, Nm</b>	0	15	0	-15	30	69	0	-69	10	20
<b>n, rpm</b>	0	375	0	-375	750	1725	0	-1725	250	500
<b>t, s</b>	0	0.2	1	2	3	4	5	6	7	8

Na figura 29 é apresentado o circuito do modelo usado na simulação do *MCC*.



**Figura 29 – Conversor trifásico quatro quadrantes.**

Buscou-se ajustar nas simulações o perfil de torque coletado nos ensaios em campo, e utilizou-se alguns blocos do *SIMULINK* para controle de motores, objetivando o conhecimento e comparação do comportamento de cada um dos motores a ser ensaiado. Para o ensaio do *MCC*, usa-se um modelo de conversor trifásico de quatro quadrantes para 25 cv, alimentação independente, tensão de armadura de 400 V, corrente de armadura de 52 A, rotação de 2555 rpm, tensão de campo de 220 V e corrente de campo de 2,3 A.

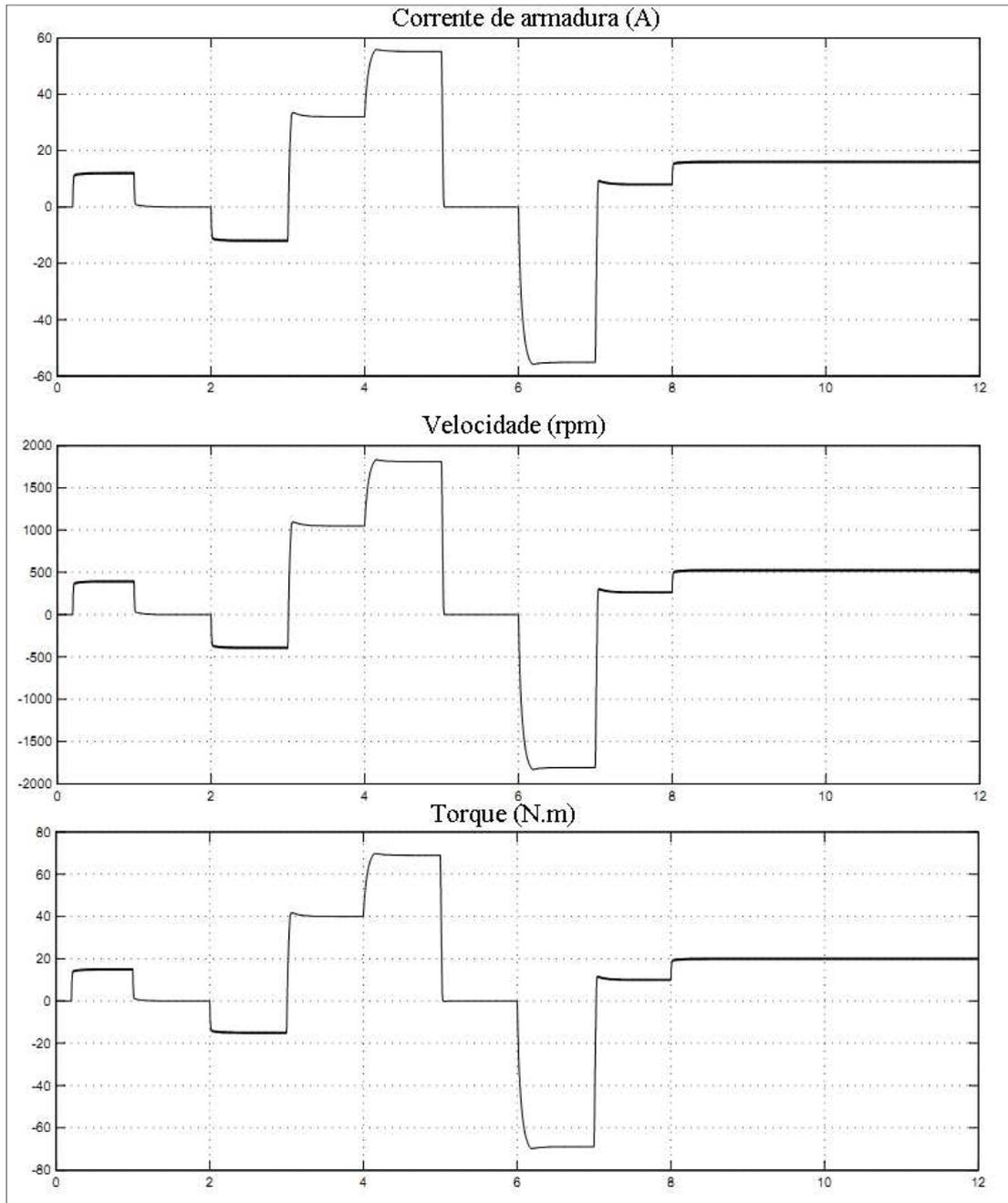


Figura 30 - Valores coletados nas simulações do *MCC*.

O torque é proporcional à velocidade. Esta demonstração ilustra o uso do *MCC* em controle de malha fechada. O conversor é construído inteiramente com blocos padrão do



tensão com controle de frequência, usado na simulação é construído com blocos padrão do *SIMULINK*, cujos parâmetros do motor são: potência 25 cv, tensão de alimentação 440V, corrente nominal 32,3 A e 4 pólos. O modelo de controle proposto possui realimentação de corrente e tensão, o torque é proporcional à velocidade. Como mostrado na figura 32, a simulação foi realizada durante 12 seg., onde são coletados os valores de corrente do estator, torque e velocidade.

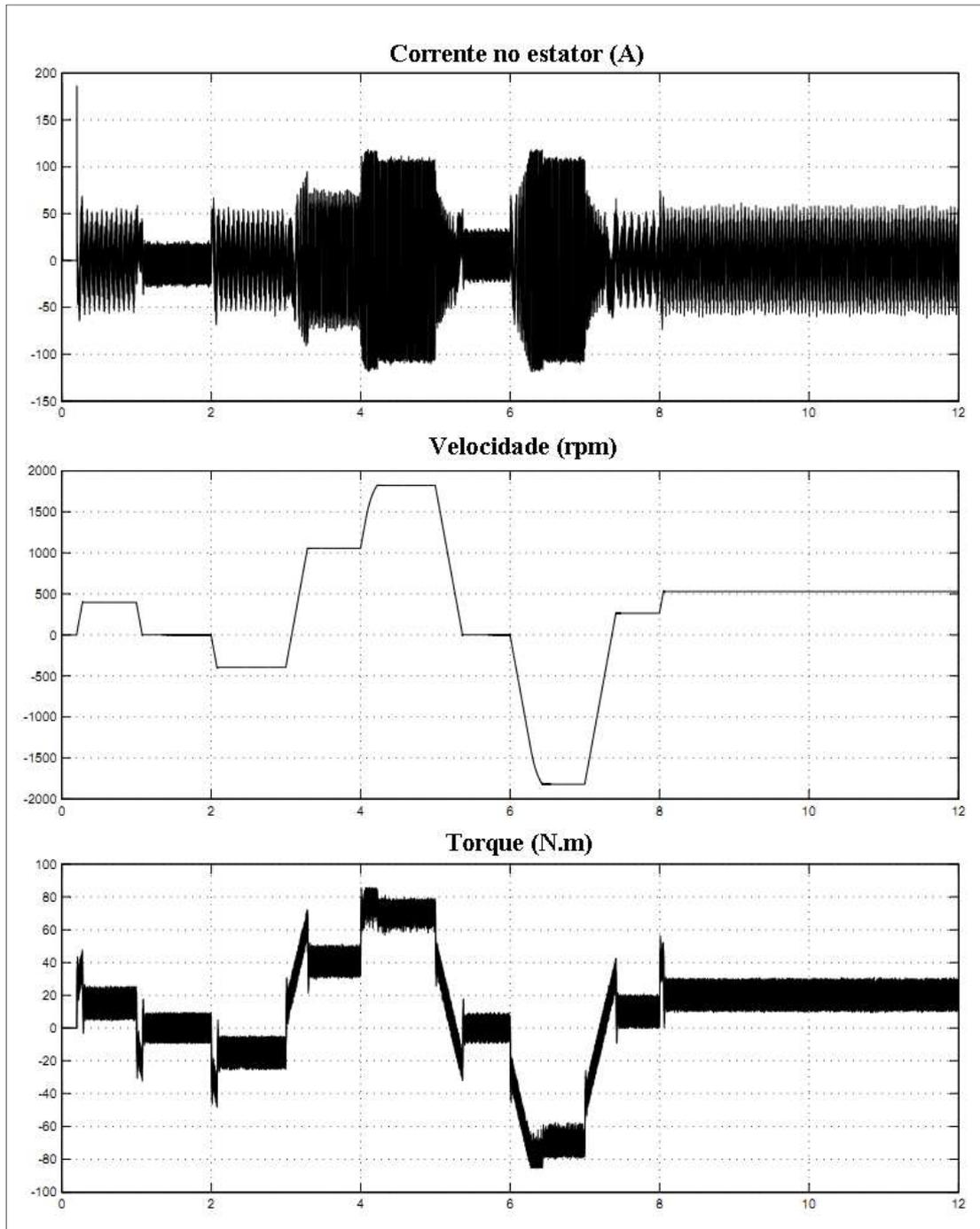


Figura 32 - Valores coletados nas simulações do MIT.

Pode-se observar a resposta do *MIT* para os valores de velocidade permaneceu próximo aos valores da coleta em campo. Porém a velocidade do rotor na região de  $t > 9$  seg. é baixa, e a corrente do estator atingiu valores próximos à nominal, em consequência, provoca uma deficiência na ventilação, dificultando a refrigeração e provocando uma elevação de temperatura no rotor e estator, podendo até comprometer a isolamento do motor. Comparando o *MCC* com *MIT* verificou-se que o *MCC* tem resposta mais rápida na velocidade e torque. A velocidade se manteve estável, porém o torque descreveu uma faixa no qual não demonstrou precisão, sugerindo que o rotor trabalhe de forma pulsante não sendo desejado para os processos onde serão aplicados. Durante as simulações buscaram-se os melhores ajustes dos parâmetros do *MIT* para que se tivesse a melhor representação da realidade nas simulações.

### 5.3.3 Simulação do *MSIP*

Esta demonstração ilustra o uso do *MSIP* em controle de malha fechada de tensão e corrente com um motor para aplicações industriais de 25 HP, tensão de alimentação de 380 V, corrente nominal de 32,7 A e rotação de 1800 rpm. O inversor PWM é construído inteiramente com blocos padrão do *SIMULINK*. Na figura 33 é apresentado o modelo usado na simulação do *MSIP*. O torque aplicado ao eixo da máquina é definido de acordo com a tabela 4.

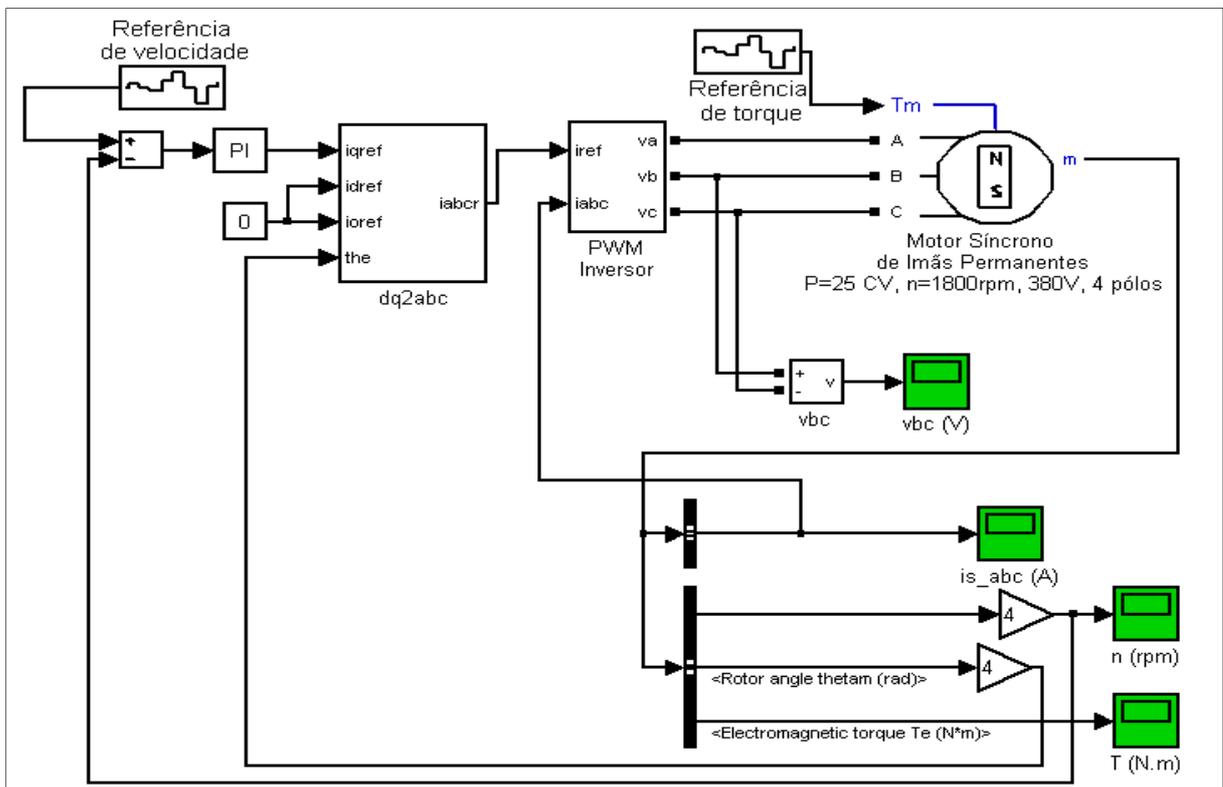


Figura 33 - Inversor de tensão com controle de frequência para MSIP.

Com os resultados apresentados na figura 34, pode-se observar que as curvas de velocidade e torque se mantiveram com pequena instabilidade e foram corrigidas rapidamente, demonstrando boa estabilidade e resposta do sistema, tendo o comportamento semelhante ao *MCC*. A região em  $t > 9$  seg. o torque solicitado é de 20 Nm, a corrente do estator permaneceu próximo a 41% da corrente nominal e a velocidade do rotor é baixa em torno de 500 rpm que, neste tipo de motor, não representa problemas pois não há perdas por efeito Joule no rotor.

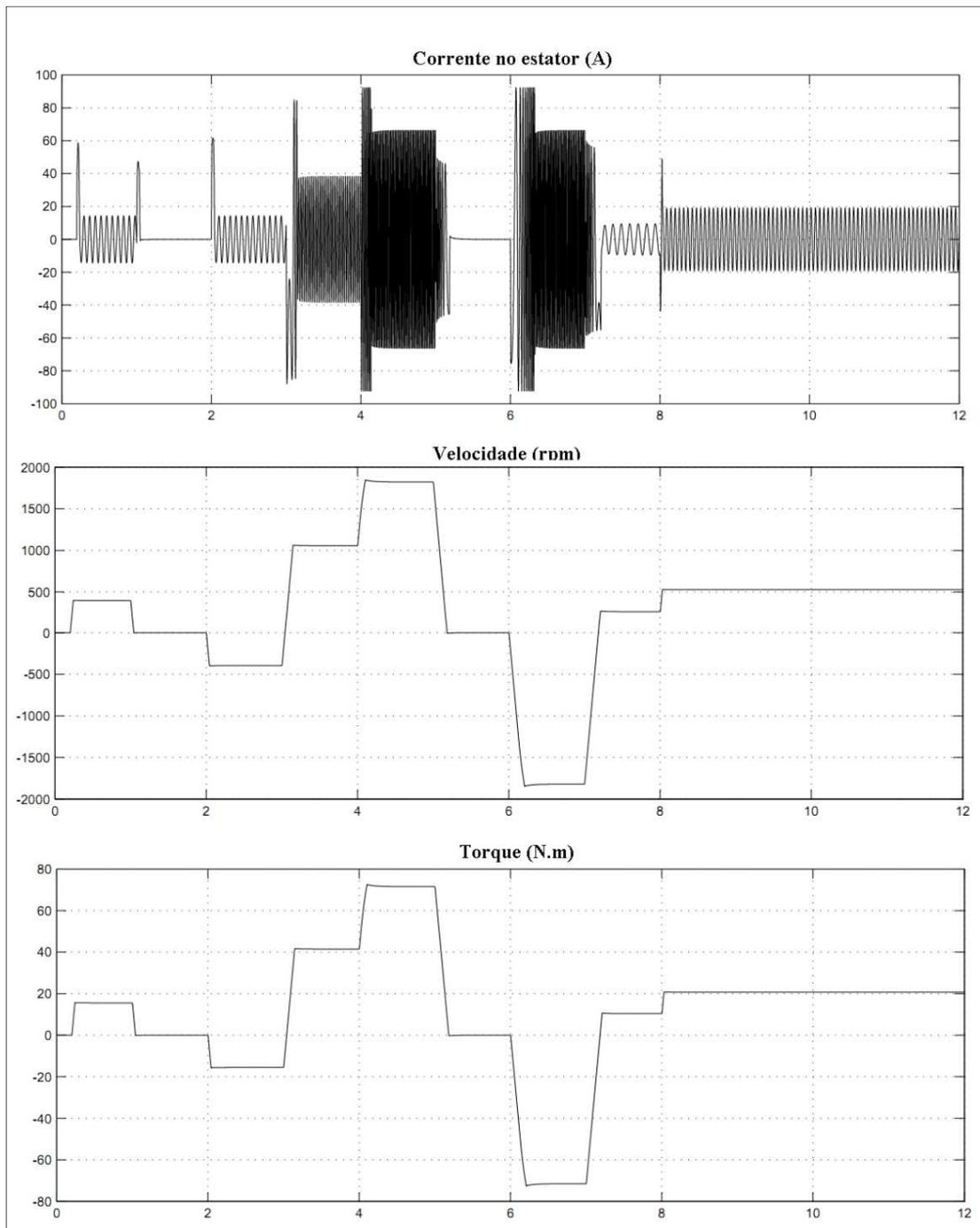
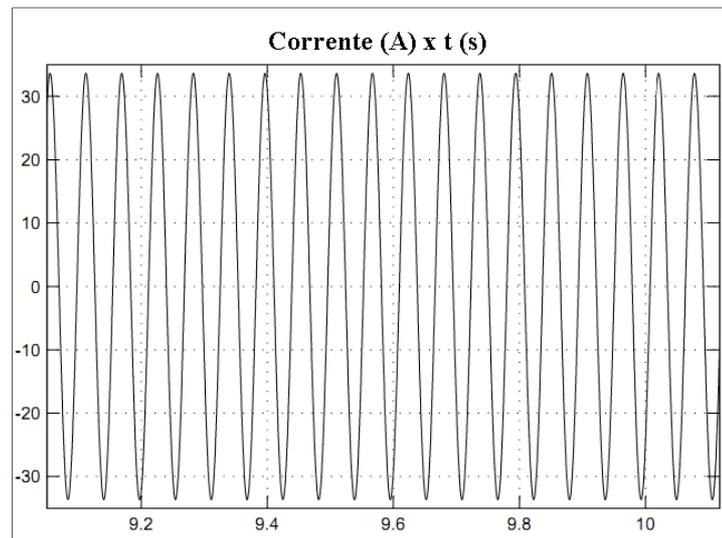
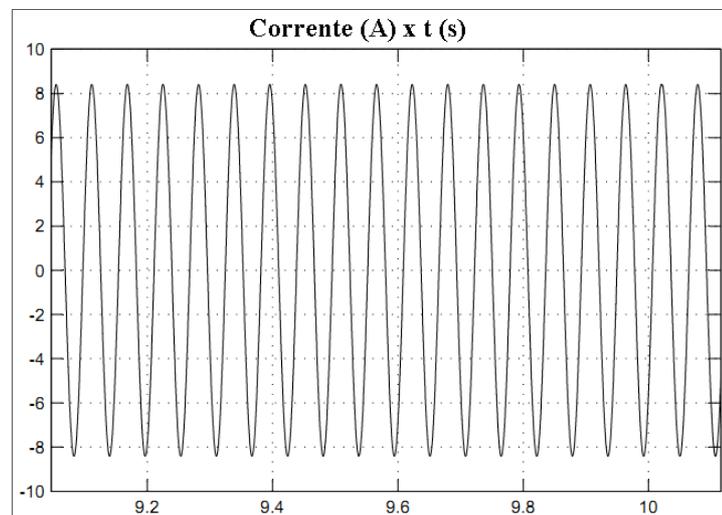


Figura 34 - Valores coletados nas simulações do MSIP.

Durante as simulações foi observado que, variando o fluxo concatenado produzido pelos imãs do rotor, ou seja, por exemplo, substituindo os imãs de ferrite por terras raras, a corrente do estator se altera sensivelmente. Conforme se pode verificar na figura 35, em que a corrente no estator é de  $35 A_{pico}$  ou  $24,75 A_{rms}$ , para um fluxo de  $0,2 T$  e torque de  $20 Nm$ , com o aumento do fluxo concatenado para  $0,9 T$ , mantido o torque de  $20 Nm$  e de acordo com a figura 36, tem-se uma corrente de  $8,2 A_{pico}$  ou  $5,8 A_{rms}$ . Uma redução sensível quando se busca redução no consumo de energia com a máxima eficiência energética. Portanto para motores com imã permanentes é de grande importância que o valor de  $BH_{Max}$  seja o maior possível, assim as dimensões dos motores possam ser as menores possíveis e o rendimento o máximo possível, tornando assim um grande atrativo para substituição de motores de corrente contínua.



**Figura 35 - Corrente no estator para fluxo 0,2 T e torque 20 Nm.**



**Figura 36 - Corrente no estator para fluxo 0,9 T e torque 20 Nm.**

Após as simulações, verificou-se que a tecnologia dos *MSIP* oferece um ganho superior em relação aos *MIT*. Onde a tabela 5 apresenta uma comparação entre os motores de indução trifásicos e os motores com ímãs permanentes. Verificou-se que para mesma potência e mesmo torque o motor síncrono com ímãs permanentes possui seu tamanho reduzido. Por exemplo, para uma potência de 25 cv, fornece um torque de 49,1 Nm, o *MIT* oferece a carcaça 160 já o *Wmagnet* carcaça 132. Isto se tornou um grande atrativo para a aplicação.

**Tabela 5 – Comparativo entre carcaças *MIT* x *MSIP* (WEG, 2011a).**

Potência (cv)	Torque (Nm)	Carcaça	
		Motor Indução	WMagnet
20	39,8	160M	132s
25	49,1	160M	132S
30	58,4	160L	132M
40	79,6	200M	160L
50	98,1	200L	180M
60	119	225S/M	200M
75	145	225S/M	200L
100	198	250S/M	225S/M

Entre tantas outras vantagens e devido aos ímãs permanentes, tem-se um ganho adicional em rendimento de 92,8% no *MIT* e 94,6% para o *MSIP* na potência de 25 cv, conforme apresentado na tabela 6. O motor síncrono com ímãs permanentes o *Wmagnet* do fornecedor WEG, foi o usado para o *retrofitting* objetivo deste trabalho. De acordo com a potência e rotação solicitada verificou-se no catálogo, conforme tabela 6, que o motor indicado para a aplicação é o motor de 25 cv, 380 V, 4 pólos, carcaça 132M, torque 98,1 Nm e rendimento de 94,6%. Para o controle do motor, o fabricante recomenda o uso do Inversor CFW11, possui corrente nominal de 38 A, tensão de saída de 380 V, alimentação de 440 V, entradas e saídas de controle compatíveis com controle existente.

CFW11 é um acionamento de velocidade variável para motores de indução trifásicos e motores de ímã permanentes. Apresenta excelente desempenho, controle preciso de torque, velocidade, posicionamento e alta capacidade de sobrecarga, possibilitando um aumento de produtividade, qualidade e economia de energia elétrica.

Vectrue Technology®, Tecnologia de Controle dos Inversores de Frequência WEG:

- Escalar V/F linear ou ajustável: controle da velocidade do motor com compensação de escorregamento;

- VVW - Voltage Vector WEG - controle vetorial de tensão: controle da velocidade do motor com ajuste automático as variações de carga e rede;
- Vetorial *sensorless* (sem encoder) - motores de indução: controle vetorial de torque e velocidade com alta resposta dinâmica, mesmo em baixas velocidades;
- Vetorial com encoder: controle vetorial de torque e velocidade com alta resposta dinâmica em toda a faixa de velocidade (até motor parado);
- Vetorial WMagnet *sensorless* (sem encoder) e com encoder: controle vetorial com alta resposta dinâmica para motores WMagnet WEG em toda a faixa de velocidade (WEG, 2013).

**Tabela 6 – Características elétricas do motor de 4 pólos Wmagnet (WEG, 2011a).**

Motor							
Potência		Carcaça	Torque [Nm]	Corrente nominal em 380V [A]	Rendimento [%]	Nível médio de pressão sonora [dB(A)]	Peso do motor aprox. [kg]
cv	kW						
15	11	132S	58,4	19,2	94,1	61	58
20	15	132M	79,6	28,5	94,6	61	63
25	18,5	132M	98,1	32,7	94,6	61	74
30	22	160L	117	37,5	94,7	69	144
40	30	180M	159	50,2	95,2	68	202
50	37	180L	196	62,2	95,2	68	219

No apêndice A é apresentado uma sugestão de procedimento para auxiliar na definição do melhor motor para substituir o motor de corrente contínua.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou o estudo para a substituição do motor de corrente contínua por motor síncrono com imãs permanentes. Verificou-se que, pelo fato de não possuir perdas por efeito Joule no rotor, o motor trabalha com temperatura reduzida, minimizando a fadiga da parte ativa, também aumentando a vida útil dos mancais e lubrificantes neles contidos. Outra vantagem é que estes motores possuem pontos para relubrificação, possibilitando a substituição do lubrificante sem a parada do equipamento e, desta forma, aumentando o tempo entre as paradas de manutenção preventiva. Com esta combinação o intervalo de manutenção preventiva é de 95000 horas, ou seja, em torno de 10 anos, que é um número expressivo mesmo para quem trabalha no seguimento. Associado ao motor, o inversor vetorial *sensorless*, reduz as conexões mecânicas dos sensores de posição angular, minimizando assim as falhas mecânicas, tornando-o um motor seguro e confiável para as aplicações onde se necessite de torque e velocidade variável. Verificou-se que os gastos com manutenção preventiva seria da ordem de 3% nos motores síncronos com imãs permanentes, e 18% no motor de indução trifásico, comparados ao motor de corrente contínua.

Com as simulações realizadas pode-se afirmar que o melhor motor para a substituição do motor de corrente contínua é o motor síncrono com imãs permanentes, que além de atender as solicitações técnicas, os gastos com manutenção preventiva são menores e garante o retorno do investimento.

Este estudo permite que casos equivalentes, em que se pretende utilizar um motor de indução trifásico em substituição a um motor de corrente contínua, também considerem outra alternativa, com dados reais e procedimento confirmado.

### 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Um estudo do inversor sugerido (CFW11), detalhando seu método de controle, a parametrização e a sua programação;
- Um estudo dos circuitos controladores de baixo custo apresentados neste trabalho, para que o uso do motor não esteja amarrado ao controlador do fabricante do motor, podendo se utilizar em aplicações cujo torque e velocidade não necessitem de tanta variação de programação;
- A validação do modelo do *MATLAB / SIMULINK* com um motor experimental.

## REFERÊNCIAS

- ABAL. **Alumínio para uma vida melhor**, São Paulo, 2009. Disponível em: <[www.abal.org.br/servicos/biblioteca/alu\\_vida\\_melhor](http://www.abal.org.br/servicos/biblioteca/alu_vida_melhor)>. Acesso em: 15 jul. 2012. Associação Brasileira do Alumínio.
- ABM. **SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES E RESERVAS DE TERRAS RARAS, BRASIL × MUNDO**, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, p. 310-312, dez. 2012. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/tmm.2012.037>>. Acesso em: mar. 2013. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.
- ALTUNA, J. A. T. **ANÁLISE DINÂMICA DE CONTROLADORES DE CORRENTE PARA MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS ALIMENTADAS POR INVERSOR PWM**, Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000289989>>. Acesso em: 2013.
- BENJAK, O.; GERLING, D. **Review of Position Estimation Methods for IPMSM Drives Without a Position Sensor Part I Nonadaptive Methods**, p. 1-2, 2010. Disponível em: <<https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/5392203>>. Acesso em: 2012. XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- BNDES. **A indústria do alumínio estrutura e tendências**, 2011. Disponível em: <[www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/./set3302.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/./set3302.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2012.
- BOTELHO, I. J. **Modelagem e controle linear de um sistema de levitação de imã permanente**, São Paulo, p. 39-40, 2008. Disponível em: <[www.teses.usp.br/2Fteses%2Fdisponiveis%2F3%2F3139%2Ftde-31032008-160753%2Fpublico%2FDissertaoIzaiasOK.pdf](http://www.teses.usp.br/2Fteses%2Fdisponiveis%2F3%2F3139%2Ftde-31032008-160753%2Fpublico%2FDissertaoIzaiasOK.pdf)>. Acesso em: mar. 2013.
- CORP., A. M. T. **Arnold Magnetic Technologies**, 2012. Disponível em: <<http://www.arnoldmagnetics.com/>>. Acesso em: 27 set. 2012.
- FREESCALE. **PMSM and BLDC Sensorless Motor Control using the 56F8013 Device**, 2005. Disponível em: <<http://www.freescale.com>>. Acesso em: mar. 2013. Freescale Semiconductor.
- GUILHERME, E. D. G. **ESTUDO DO PROCESSO DE OBTENÇÃO D A LIGA MAGNÉTICA Nd15Fe77B8 POR REDUÇÃO-DIFUSÃO (R/D) CALCIOTÉRMICA**, 1992. Disponível em: <[http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Eneida%20da%20Graca%20Guilherme\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Eneida%20da%20Graca%20Guilherme_M.pdf)>. Acesso em: fev. 2013, pág 4-7. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES.

INFINEON. **XMC1300 Microcontroller Series for Industrial Applications**, mar. 2013.

Disponível em:

<[http://www.infineon.com/dgdl/xmc1300\\_rm\\_v1+0\\_2013\\_03.pdf?folderId=db3a30433580b3710135a47f3eb76c98&fileId=db3a30433cfb5caa013d1604360f3406&sId=db3a30443dd58b4c013dda3587a80741](http://www.infineon.com/dgdl/xmc1300_rm_v1+0_2013_03.pdf?folderId=db3a30433580b3710135a47f3eb76c98&fileId=db3a30433cfb5caa013d1604360f3406&sId=db3a30443dd58b4c013dda3587a80741)>. Acesso em: mar. 2013. Infineon Technologies AG.

INO, T. E. M. Manual INO de Manutenção de Motores Elétricos de Corrente Contínua.

**Manual INO de Manutenção de Motores Elétricos de Corrente Contínua**, 2010.

Disponível em: <[www.ino.com.br](http://www.ino.com.br)>. Acesso em: 2012.

MILLER, T. J. E. SPPED's Electric Motors. In: MILLER, T. J. E. **An outline of some of the theory in the SPEED software for electric machine design**. Glasgow: [s.n.], 2002. p. 1.30 - 1.35.

MMPA. **Standard Specification for Permanent Magnet Materials**, 2000. Disponível em:

<[http://www.magnetsim.com/mmpa\\_standards.php?menu\\_id=30](http://www.magnetsim.com/mmpa_standards.php?menu_id=30)>. Acesso em: 27 set. 2012. STANDARD SPECIFICATIONS FOR PERMANENT MAGNET MATERIALS.

MOTOROLA. **Brushless DC Motor Controller, MC33033**, 1996. Disponível em:

<<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MC33033P.pdf>>. Acesso em: mar. 2013.

ON SEMICONDUCTOR. **Closed Loop Brushless, MC33039 Rev. 3**, 2003. Disponível em:

<[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/MC33039-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33039-D.PDF)>. Acesso em: 2013. Literature Distribution Center for ON Semiconductor.

\_\_\_\_\_. **Brushless DC Motor Controller, MC33033, Rev. 11**, fev. 2013. Disponível em:

<[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/MC33033-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33033-D.PDF)>. Acesso em: mar. 2013.

SHAO, J. **Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC**, Blacksburg,

set. 2003. Disponível em: <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09152003-171904/unrestricted/T.pdf>>. Acesso em: mar. 2013.

SIEMENS. **Motores Trifásicos de Baixa Tensão**, p. 07, maio 2010. Disponível em:

<[http://www.industry.siemens.com.br/drives/br/pt/motores-eletricos/motores-baixa-tensao/motores-abnt-ate-3151/Documents/Catalogo\\_de\\_Motores\\_ABNT\\_ind1\\_dt.pdf](http://www.industry.siemens.com.br/drives/br/pt/motores-eletricos/motores-baixa-tensao/motores-abnt-ate-3151/Documents/Catalogo_de_Motores_ABNT_ind1_dt.pdf)>. Acesso em: mar. 2013.

SKF. **Setting the standard for performance and reliability**, 2007. Disponível em:

<[http://www.skf.com/binary/12-29536/6100\\_EN.pdf](http://www.skf.com/binary/12-29536/6100_EN.pdf)>. Acesso em: ago. 2012. SKF spherical roller bearings.

ST MICROELECTRONICS. **8-bit MCU with nested interrupts, flash, 10-bit ADC, brushless motor control, five timers, SPI, LINSICI™, Rev 11**, 2009. Disponível em:

<<http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00005147.pdf>>. Acesso em: mar. 2013.

WEG. **WEG Equipamentos Elétricos S.A.**, 2009. Disponível em: <[www.weg.net](http://www.weg.net)>. Acesso em: 2012.

\_\_\_\_\_. **WMagnet Drive System**, maio 2011a. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-wmagnet-drive-system-sistema-de-acionamento-com-motor-de-imas-permanentes-50015189-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: ago. 2012.

\_\_\_\_\_. **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência**, set. 2011b. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: jul. 2012.

\_\_\_\_\_. **Manual Geral de Instalação, Operação e Manutenção de Motores Elétricos**, jun. 2012. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEGhttp://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-iom-general-manual-of-electric-motors-manual-general-de-iom-de-motores-electricos-manual-general-de-iom-de-motores-electricos-50033244-manual-english.pdf>>. Acesso em: ago. 2012.

\_\_\_\_\_. **CFW11 Inversor de Frequência**, 2013. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-completo-10510201-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 2013.

YEDAMALE, P. **Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals**, 2003. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>. Acesso em: mar. 2013. Microchip Technology Inc.

ZAMBADA, J. **Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC**, 2005. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01017a.pdf>>. Acesso em: mar. 2013. Microchip Technology Inc.

\_\_\_\_\_.; DEB, D. **Sensorless Field Oriented Control of a PMSM**, maio 2010. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/01078b.pdf>>. Acesso em: mar. 2013. Microchip Technology Inc.

## **APÊNDICE A – SUGESTÃO DE PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAR O MELHOR MOTOR PARA SUBSTITUIR O MOTOR DE CORRENTE CONTINUA**

- A.1. Efetue o levantamento dos gastos com manutenções preventivas do motor em operação durante um período por ex. 10 anos;
- A.2. Compare com os gastos com manutenção preventiva do motor atual, com um motor de indução trifásico durante o mesmo período;
- A.3. Compare com os gastos com manutenção preventiva com um motor síncrono com imãs permanentes durante o mesmo período;
- A.4. Verifique qual apresenta os menores gastos com manutenção preventiva;
- A.5. Efetue a coleta de dados do motor em operação se possível, para fornecer dados para simulações, se não defina valores de velocidade e torque para as simulações;
- A.6. Efetue simulações dos motores medindo velocidade e torque, utilize-se de software como por ex. (MATLAB);
- A.7. Compare os resultados entre das simulações dos motores ensaiados e verifique qual atende a aplicação com maior eficiência;
- A.8. Após testar nas simulações, identificar qual motor atende a aplicação e identificar qual apresenta menores gastos com manutenção preventiva, certamente terá identificado o melhor motor para a substituição do motor de corrente continua;
- A.9. Recorra a catálogos de fabricantes para a seleção do motor e do controle.