

**Simone Leticia Cavallari da Costa Gois**

**A influência da intensidade da  
magnetização de ímãs de ferrite na  
eficiência de *Motores Brushless DC*.**

São Carlos  
2010

**Simone Leticia Cavallari da Costa Gois**

**A influência da intensidade da  
magnetização de ímãs de ferrite na  
eficiência de *Motores Brushless DC*.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

São Carlos  
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G616i Gois, Simone Letícia Cavallari da Costa  
Influência da intensidade da magnetização de ímãs de ferrite na eficiência de motores brushless DC / Simone Letícia Cavallari da Costa Gois ; orientador Diógenes Pereira Gonzaga. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Motores elétricos. 2. Motor Brushless DC - eficiência. 3. Ímãs de ferrite. 4. Materiais ferrimagnéticos. I. Título.

Dedico este trabalho à minha mãe.

## **Agradecimentos**

Agradeço ao professor Dr. Diógenes Pereira Gonzaga pela orientação.

Agradeço à Engenheira Dra. Claudia Andrea da Silva pela sugestão do tema, pelas idéias, pelas explicações por ter permitido que este trabalho fosse realizado junto com a Tecumseh do Brasil.

Agradeço a minha mãe e meus irmãos pelos sacrifícios feitos para que eu pudesse concluir o curso.

*“A abordagem mais básica do magnetismo é devida a Albert Einstein. Ele considerou o campo elétrico gerado por uma carga elétrica em movimento e a força que ela exerceria em outra carga movendo-se paralelamente com a mesma velocidade. Devido a efeitos relativísticos, o espaço na frente da carga em movimento fica ‘apinhado’ (crowded) e essa compressão do espaço no qual o campo elétrico opera produz uma força adicional na outra carga, maior do que a calculada pela lei coulombiana clássica. Esta força adicional acaba sendo idêntica à força magnética exercida entre dois fios paralelos por onde passam correntes elétricas. Assim, o magnetismo é um efeito eletrostático relativístico de segunda ordem, e não outro tipo de força.”*

*David Tabor, Universidade de Cambridge.*

## Resumo

Neste trabalho é estudada a eficiência de um motor Brushless DC trifásico devido à influência da intensidade de magnetização dos ímãs de ferrite nele utilizados. Para a realização dos testes utilizou-se um estator e cinco rotores montados na Tecumseh do Brasil. Os rotores foram magnetizados com intensidades de campos magnéticos diferentes, em uma magnetizadora constituída de um banco de capacitores acoplados a uma bobina. Este banco de capacitores acumula energia para gerar o pulso de corrente elétrica que gerará o campo no interior da bobina alinhando os dipolos magnéticos do ímã que é colado no rotor. Foram realizados testes com o dinamômetro tipo Magtrol . Usou-se o osciloscópio para visualizar as formas de corrente do motor enquanto este era testado. Nos testes foi possível analisar a eficiência e o comportamento de cada protótipo em resposta a uma curva de carga. O motor estudado é aplicado em compressores herméticos de refrigeração, possibilitando o controle da velocidade e a melhoria da eficiência quando comparada à tecnologia convencional (motor de indução) utilizada nesta aplicação.

Palavras-chaves: motor *Brushless DC*; ímãs de ferrite; materiais ferrimagnéticos; eficiência

## **Abstract**

This study intends to analyze the efficiency of a three phase motor Brushless DC influenced by the intensity of magnetization of ferrite magnets utilized in the rotor. A stator and five rotors assembled by Tecumseh of Brazil were used to perform the tests. In a magnetizer constituted of a capacitors bank connected to a coil, the rotors were magnetized with different magnetic field intensities. The capacitors bank accumulates the energy to generate a pulse of electrical current, which prompts the field in the coil's interior. The coil aligns the magnetic dipoles of the ferrimagnetic material (ferrite magnets) attached to the motor. The tests were performed with a dynamometer equipped type Magtrol. An oscilloscope was used to visualize the forms of current while the motor was tested. The tests also enabled the analysis of efficiency and performance for each prototype in response to a load curve. The studied motor is utilized in hermetic compressors of refrigeration, enabling the control of its speed and the increase in its efficiency, when compared to other motors with the same application.

Key words: Brushless DC motor; ferrite magnets; ferrimagnetic materials; efficiency



## Sumário

1.Introdução	11
1.1 Introdução	11
1.2 Objetivos	13
2.Motor Síncrono de Ímãs Permanentes, Brushless DC Motor.	14
2.1 Introdução	14
2.2 Princípios de Operação	15
2.3 Controle sem Sensor	22
2.4 Características de Torque e velocidade do motor síncrono de ímãs permanentes.	23
2.5 Circuito Elétrico equivalente do motor síncrono de ímãs permanentes	25
3. Ímãs Permanentes	27
3.1 Ímãs de Ferrites	27
3.2 Magnetismo	28
3.2.1 Dipolos magnéticos e Momento magnético	28
3.2.2 Campo Magnético e magnetização	28
3.2.3 Domínios Magnéticos	29
3.2.4 Curva de Desmagnetização	30
3.3 Magnetizadora	34
3.3.1 Gerador de pulso magnético	34
3.3.2 Unidade de controle do gerador de pulsos magnéticos	35
3.3.3 Dispositivo de magnetização	36
4. Equipamentos utilizados nos testes dos motores síncronos de ímãs permanentes.	38
4.1 Magtrol Histerese Dinamômetro	39
4.2 Three-Phase Power Analyzer Model 6530	41
4.3 Controlador Programável DPS 6001	43
4.4 Software M_TEST 4.0	44
5 Testes e Resultados	48
5.1 Rotor 1 - Magnetizado com tensão máxima (400 Volts)	50
5.2 Rotor 2 - Magnetizado com tensão 200V (50% da tensão máxima)	52
5.3 Rotor 3 - Magnetizado com tensão 100V (25% da tensão máxima)	54
5.4 Rotor 4 - Magnetizado com tensão 50V (12,5% da tensão máxima)	55
5.5 Rotor 5 - Magnetizado com tensão mínima do gerador de pulsos magnéticos	

(8% da tensão máxima)	56
6. Análise da eficiência com a magnetização	58
7. Conclusão	63
8. Referências Bibliográficas	64

# 1. Introdução

## 1.1. Introdução

A necessidade de induzir a sociedade a reduzir o consumo de energia elétrica tem levado os governos de todo o mundo a pressionar os fabricantes de eletrodomésticos na direção do aumento da eficiência de seus produtos. A eficiência energética é uma questão de grande importância, visto que as atuais fontes de energia se mostram insuficientes no médio prazo para atender os atuais padrões de consumo.

Diante desta situação, aliado ao incentivo do uso de energias renováveis e, com o objetivo de mitigar os problemas relacionados aos padrões atuais de uso de energia, surge o desafio de se desenvolver tecnologias capazes de contribuir na redução das perdas existentes, desde a geração, passando pela transmissão e distribuição de energia elétrica e chegando até seu uso final. Dentre os diversos equipamentos, vistos como cargas nos sistemas de energia, os motores elétricos têm expressiva participação consumindo 43% da eletricidade disponibilizada no Brasil (Garcia, 2003).

A necessidade de novos projetos em motores tornou-se imprescindível para que novos patamares de eficiência fossem atingidos na aplicação de compressores para refrigeração doméstica. Mesmo para uma pequena redução conseguida nesta aplicação, o impacto dentro do consumo total será de grande importância (Teixeira, 2006), já que a parcela total do consumo residencial corresponde a 23,6% do consumo total de energia do país, como mostra o gráfico da figura 1.1:

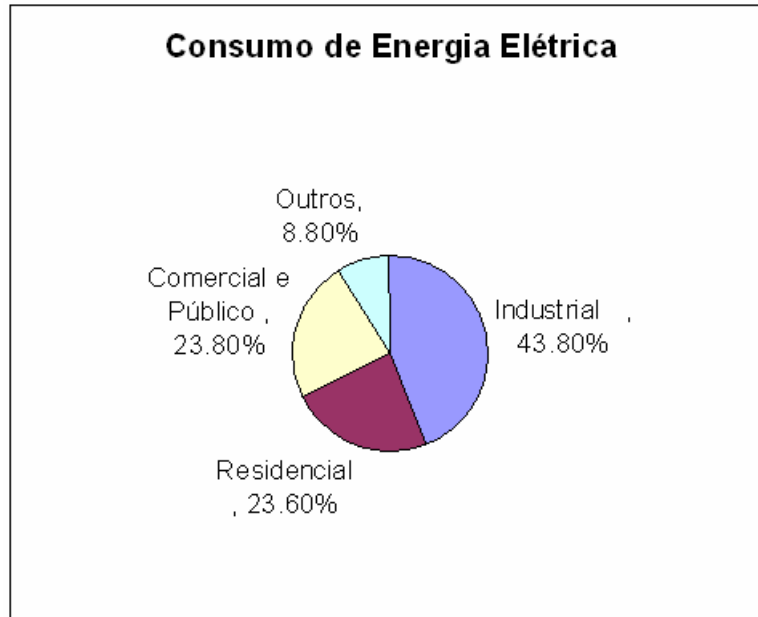


Figura 1.1- Divisão do consumo de energia elétrica (Ministério de Minas e Energia, 2010).

Em vista disso, o motor *brushless DC* é uma possível -solução , pois ele apresenta alta eficiência comparada aos de indução monofásicos que são os comumente utilizados na refrigeração doméstica. O *motor brushless DC* é composto de um estator com núcleo ferromagnético bobinado com cobre e um rotor com ímãs permanentes. No caso do protótipo analisado neste trabalho ainda tem-se a vantagem de alimentar o motor com bateria e utilizá-lo em aplicações móveis, como refrigeração em carros e etc.

Segundo (Juliani, 2007) além de as máquinas síncronas de ímãs permanentes apresentarem maior eficiência que os motores de indução monofásicos, elas possuem diversas vantagens em relação aos acionamentos convencionais de velocidade variável, que empregam motores de corrente contínua (CC): maior desempenho, ausência de escovas (*brushless*), o que propicia a eliminação de vários problemas relacionados a elas, como o centelhamento, a manutenção periódica mais espaçada, a restrição da utilização em áreas que possam conter gases explosivos entre outros.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo analisar como se faz a magnetização de ímãs de ferrite em rotores de motores brushless e avaliar como a magnetização deficiente afeta a eficiência energética desses motores. Esta análise será feita por meio de testes em dinamômetro, osciloscópio e fluxímetros.

Além disso, far-se-á uma breve explicação sobre os ímãs permanentes utilizados assim como sobre os motores propriamente ditos.

## **2. Motor Síncrono de Ímãs Permanentes, *Brushless DC Motor*.**

### **2.1 Introdução**

O motor síncrono de ímãs permanentes tem variadas aplicações. Ele tem sido utilizado em discos rígidos de computadores, em sistemas de refrigeração e até em aplicações especiais na aeronáutica (Juliani,2007).

As maiores vantagens para o desenvolvimento dos motores síncronos de ímãs permanentes são: o aumento da eficiência e o controle de velocidade (Teixeira,2006).

Vários fatores também têm contribuído para que se facilite o desenvolvimento dos motores síncronos de ímãs permanentes, como a produção de ímãs permanentes cerâmicos em larga escala, com altos valores de energia magnética e permeâncias a um custo reduzido, componentes eletrônicos para o *driver* de controle mais confiáveis a altas temperaturas, com alta velocidade de chaveamento e alta densidade de corrente a um custo menor, novos materiais com alta força de adesão e colagem utilizados na adesão do ímã na superfície do pacote do rotor, e a evolução de programas computacionais permitindo a completa modelagem e reduzindo os custos de prototipagem (Teixeira,2006).

Segundo (Teixeira,2006) , o motor síncrono é assim chamado porque, além de os campos magnéticos do estator e rotor estarem em sincronismo, o rotor também gira em sincronismo com eles. Complementando esta definição o motor síncrono de ímã permanente possui um rotor construído de tal maneira que contem pólos magnéticos pré-magnetizados.

O motor síncrono é constituído de um estator de núcleo de aço elétrico, bobinado com fio de cobre e um rotor com ímãs permanentes. Aplica-se uma tensão CC nas bobinas por meio de um circuito composto de chaves de estado sólido, sendo o chaveamento das mesmas controladas pela posição do rotor, a qual pode ser identificada por sensores ou através de uma lógica de posicionamento do conversor elétrico (Teixeira,2006).

## 2.2 Princípios de operação do Motor Síncrono de Ímãs Permanentes

Para a compreensão do Motor Síncrono de Ímãs Permanentes analisar-se-á o motor de corrente contínua convencional, segundo (Teixeira,2006) a maneira mais simples de visualizar este motor pode ser vista na figura 2.1:

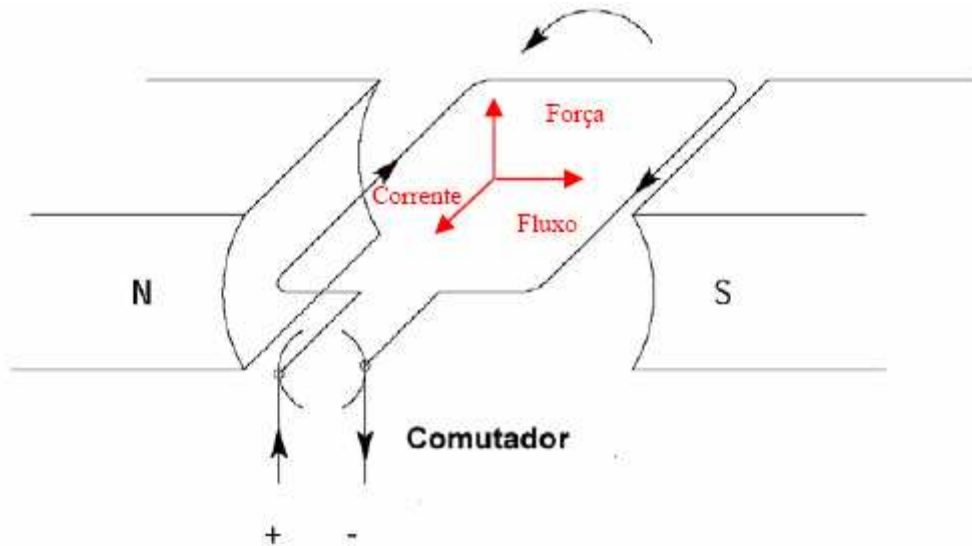


Figura 2.1 – Esquema do motor de corrente contínua (Teixeira,2006).

Sabe-se que o motor de corrente contínua convencional é composto de um rotor bobinado que está representado por uma bobina de apenas uma espira, inserido num fluxo constante gerado pelos ímãs permanentes como mostra a figura 2.1. Quando a bobina está na posição vertical inverte-se a corrente por meio do comutador, para assim manter o sentido de rotação.

Pode-se fazer uma equivalência com o motor CC com comutador onde a bobina estará imersa em um campo gerado pelo estator como mostra a figura 2.2 retirada de (Hendershor; Miller, 1994).

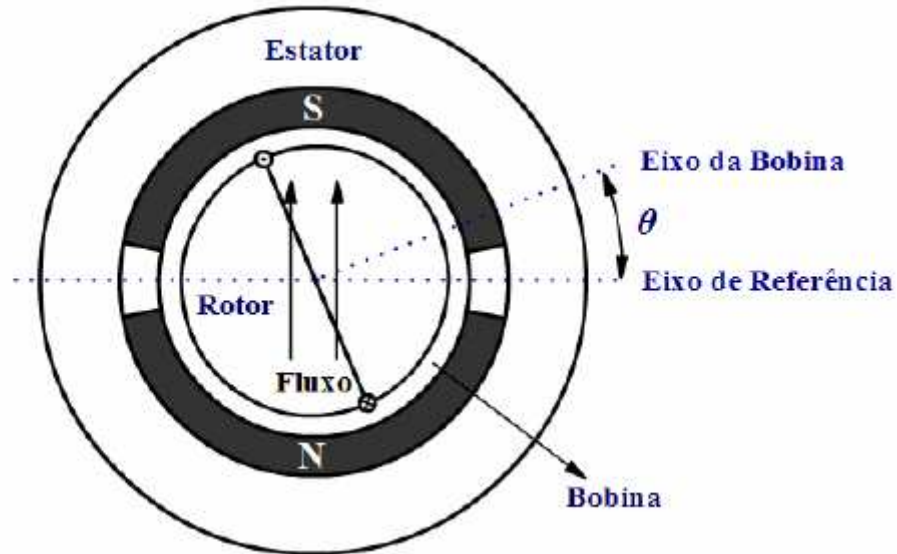


Figura 2.2 – Motor CC convencional mostrando a posição do eixo de referência e do eixo da bobina (Hendershot; Miller, 1994).

O motor da Figura 2.2 é um motor de 2 pólos com densidade de fluxo constante fornecida pelos ímãs permanentes do estator. O eixo da bobina do rotor está defasado do eixo de referência por um ângulo  $\theta$ . Quando  $\theta$  é igual a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  não há fluxo de campo magnético atravessando a bobina e portanto o fluxo concatenado é zero. À medida que o ângulo  $\theta$  aumenta e a bobina se movimenta o fluxo concatenado aumenta até que o ângulo  $\theta = 60^\circ$  em que o fluxo concatenado será máximo mantendo este valor até  $\theta = 120^\circ$ , então o fluxo concatenado diminui até  $\theta = 180^\circ$ , a partir deste instante há uma inversão do fluxo concatenado na bobina e o seu valor aumenta até um valor máximo negativo. Isso pode ser visualizado na figura 2.3 que representa a variação de fluxo em função da variação de posição do rotor (Teixeira,2006):

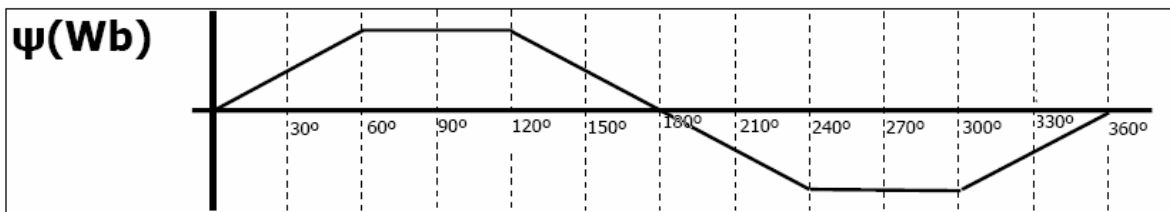


Figura 2.3 – Variação do Fluxo de Campo Magnético concatenado em função da posição do rotor. (Teixeira,2006).

Como tem-se uma bobina girando a uma determinada velocidade, imersa num campo constante e gerado pelos ímãs, pela lei de Faraday tem-se que a tensão induzida



na bobina é equivalente à taxa de variação do fluxo concatenado que é dada pela equação [1].

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega_m * \frac{d\varphi}{d\theta} \quad [1]$$

Sendo  $\omega_m$  é igual à velocidade angular, ou seja, a variação do ângulo  $\theta$  em função do tempo.

Calculando a derivada do fluxo pela posição angular, tem-se uma força eletromotriz constante quando há variação do fluxo e zero quando o fluxo é constante (Teixeira,2006). Pode-se observar isto na figura 2.4, onde a linha tracejada entre 60° e 120° e 240° e 300° representa a curva trapezoidal obtida.

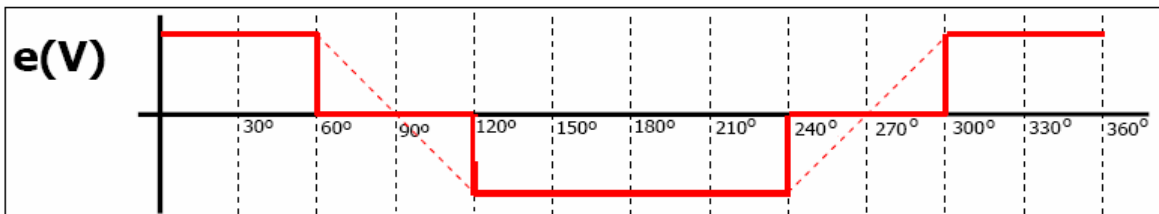


Figura 2.4 – Força eletromotriz induzida versus posição angular. (Teixeira,2006)

No motor CC o comutador tem a função de fornecer corrente nas mesmas polaridades da força eletromotriz obtida e nos mesmos instantes, como se observa na figura 2.5:

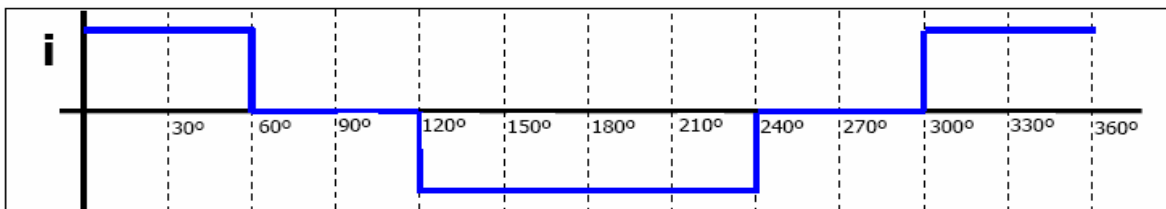


Figura 2.5 – Corrente fornecida pelo conversor na bobina em função de  $\theta$ . (Teixeira,2006)

A potência total fornecida,desprezando as perdas, é o produto da corrente pela tensão, sendo esta potência elétrica transformada em potência mecânica pelo produto do torque pela velocidade angular. O torque obtido é unidirecional e pode ser representado pela figura 2.6.

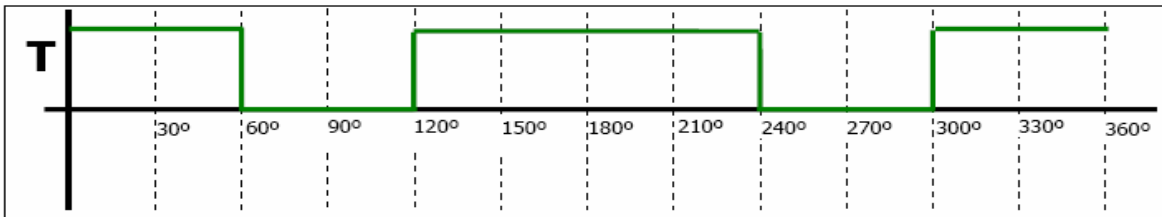


Figura 2.6 – Torque versus posição angular  $\theta$  (Teixeira,2006)

Como se pode observar, o torque obtido no motor representado anteriormente o qual é constituído de uma bobina somente, não é constante, isto é, apresenta regiões em que é nulo. Os valores de torque nulo ocorrem na posição da bobina onde não ocorre variação do fluxo concatenado. Para contornar este problema, o motor é constituído de 3 bobinas defasadas de  $120^\circ$  entre cada uma ( que pode ser visto na figura 2.7) o que fará que o torque seja defasado de  $120^\circ$  também. (Teixeira,2006).

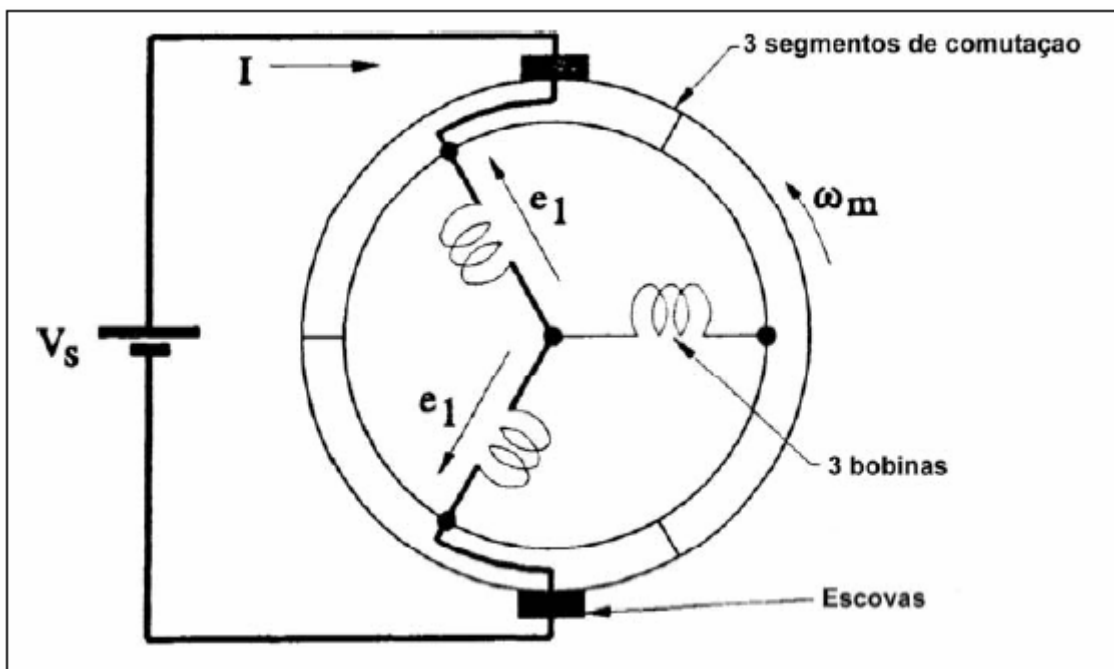


Figura 2.7 – Motor com 3 bobinas. [Miller e Hendershot, 1994)

Têm-se então as seguintes curvas de torque:

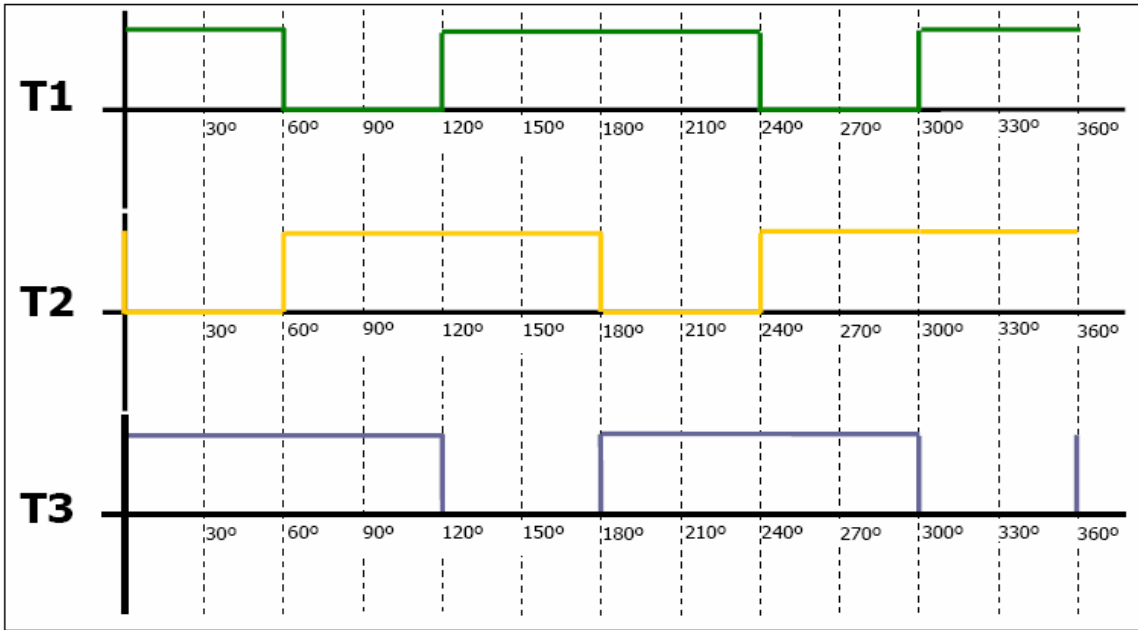


Figura 2.8 – Representação do torque produzido pelo fluxo concatenado de cada bobina do motor. (Teixeira,2006)

Considerando o torque de cada fase  $T_1=T_2=T_3=T$ , tem-se então que  $T_1+T_2+T_3=2T$ .

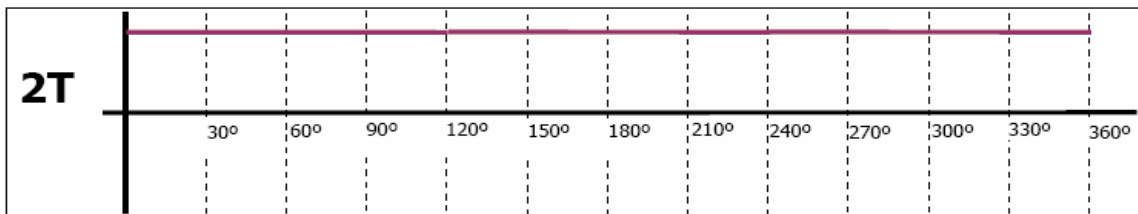


Figura 2.9 – Torque total do Motor CC . (Teixeira,2006)

O funcionamento do MSIPR (Motor Síncrono de ímã permanente no rotor) se assemelha muito a este tipo de motor. Ele difere deste pela substituição dos comutadores do motor por um circuito eletrônico, conversor elétrico, que realiza a operação de chaveamento baseado na informação do posicionamento do rotor e pela montagem dos ímãs que estão no rotor e a bobina no estator.

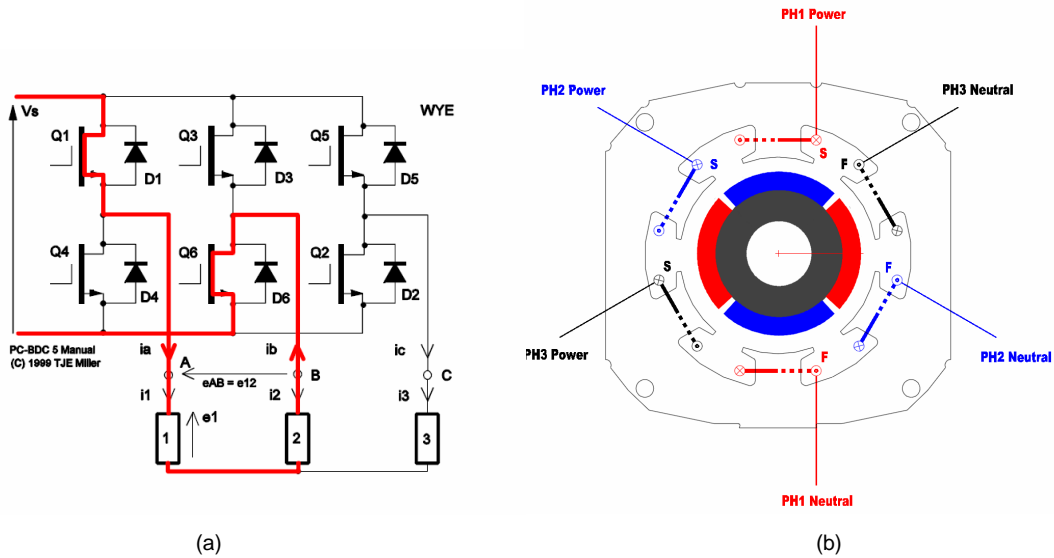


Figura 2.10 – (a) Circuito eletrônico . (b) Esquema do motor testado, mostrando bobinas e rotor. (Hendershot; Miller, 1994)

A corrente fornecida pelo conversor para cada bobina deve ter a sua polaridade invertida ao longo de sua operação (Teixeira,2006).

Uma das principais características do MSIPR é que somente duas bobinas são energizadas ao mesmo tempo, como se observa na figura 2.10, sendo que a outra permanece desligada, isso para que o torque tenha sempre o mesmo sentido. As bobinas são chaveadas/energizadas seqüencialmente, sendo aplicada em uma bobina tensão positiva, a segunda bobina com tensão negativa e a outra bobina permanecendo desenergizada. A figura 2.11 mostra o ciclo completo de chaveamento das bobinas.

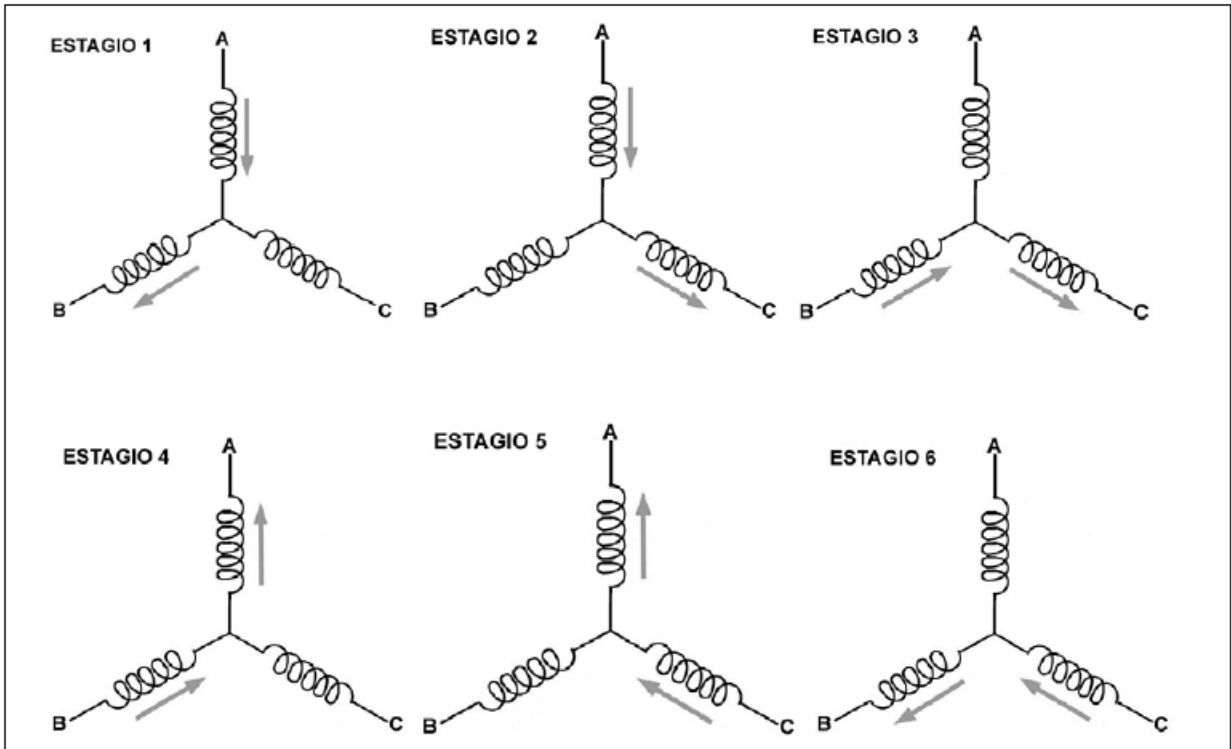


Figura 2.11 – Estágios de excitação das bobinas de um motor 3 $\phi$  [TEIXEIRA].

Esta análise foi feita considerando que as bobinas são ligadas e desligadas exatamente em certas posições do rotor. Foram desconsiderados os efeitos de relutância, isto é, a característica de não linearidade do torque foi desconsiderada. (Teixeira,2006)

Na prática não se adquire torque constante, mas sim um *ripple* de torque em torno do valor máximo, como mostra a figura 2.12. Este efeito pode ser mais bem observado em baixas velocidades.

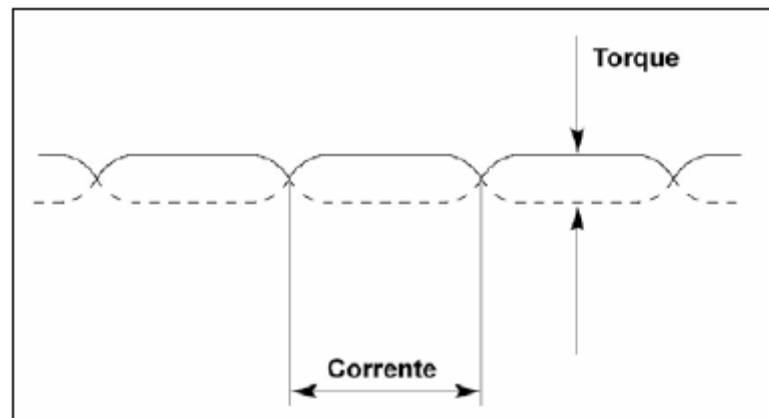


Figura 2.12 – Ripple de torque. [TEIXEIRA]

### **2.3 Controle sem sensores de velocidade e posição**

O motor utilizado nos testes não possui controle com sensor do tipo Hall. O controle funciona determinando a posição do rotor pela força eletromotriz gerada na bobina desenergizada.

Esta tensão gerada é função basicamente de três fatores:

- O número de espiras da bobina.
- O fluxo magnético dos ímãs.
- A velocidade angular do rotor.

Quando o sinal da força eletromotriz gerada na bobina desenergizada passa de um valor positivo para um negativo e vice-versa, ele passa pelo zero. Este ponto é detectado pelo controlador e a partir dele é determinada a posição do rotor.

Depois que o motor foi projetado e construído, essa tensão varia apenas em função da velocidade angular do rotor já que os outros dois fatores são constantes. Por isso em baixas velocidades este método de detecção não é confiável, pois a tensão gerada pode ser tão pequena a ponto de não ser percebida pelo controlador. Para a partida de motores que atuam em baixas velocidades, a verificação da tensão não é feita até uma determinada velocidade, na qual terá uma tensão suficiente para a detecção da passagem pelo zero, então o controlador passa a receber o sinal da força eletromotriz e assim detectar o posicionamento do rotor para o chaveamento das bobinas.

Fazer o controle sem o sensor tem duas vantagens essenciais, a primeira é a diminuição de custo e a segunda é que a aplicação do motor é em ambiente hostil com óleos e sujeiras que podem prejudicar a leitura do sensor, principalmente do tipo óptico.

## 2.4 Características de Torque e Velocidade do Motor Síncrono de ímãs permanentes no Rotor

O torque do motor síncrono de ímãs permanentes no rotor – MSIPR é definido pela equação [2].

$$T = (NB\ell r)I \quad [2]$$

Sendo  $N$  = número de espiras da bobina.

$B$  = densidade de fluxo magnético do ímã permanente (Tesla).

$\ell$  = comprimento do rotor (m).

$r$  = raio do rotor (m).

$I$  = corrente nas bobinas (A).

Assim, pela equação [2] tem-se que o torque é proporcional a corrente do motor já que os outros parâmetros são constantes do projeto. Agrupando os termos constantes podemos definir o torque pela equação [3]:

$$T = k_t I \quad [3]$$

A força eletromotriz induzida gerada pelo motor é proporcional à velocidade  $\omega_m$  e é dada pela equação [4] que é uma simplificação da equação [10].

$$e = k_e \omega_m \quad [4]$$

Analisando o sistema percebe-se que em uma bobina a tensão total aplicada a ela será a soma da força eletromotriz, a queda de tensão na bobina pelo efeito resistivo e a queda de tensão no transistor do conversor, pela equação [5].

$$V_{cc} = e + RI + V_b \quad [5]$$

Considera-se  $V_b$ , que é a tensão no transistor, como sendo zero, já que seu valor é muito menor que  $V_{cc}$ .

Para a velocidade na condição sem carga, tem-se que a corrente será zero. Substituindo  $e$  na equação anterior tem-se a equação [6].

$$\omega_{vazio} = \frac{V_{cc}}{k_e} \quad [6]$$

Para o instante em que a velocidade é zero, isto é, a corrente na condição de partida, tem-se que a tensão  $\varepsilon$  será igual a zero (não há fluxo induzido) e neste instante o torque é dado pela equação [7].

$$T_{partida} = k_t \frac{V_{cc}}{R} = k_t I \quad [7]$$

Quando se tem corrente de rotor travado, este valor de corrente deve-se manter por um tempo breve, pois como a corrente é limitada pelas resistências das bobinas haverá aquecimento no motor por efeito Joule e temperaturas altas podem causar a desmagnetização dos ímãs ou o derretimento da isolação do motor.

Para analisar o efeito da corrente e torque em função da resistência, isola-se a corrente na equação, considerando também a queda nos transistores do controlador igual a zero, pela equação [8].

$$I = \frac{V_{cc} - \varepsilon}{R} \quad [8]$$

Assim se o valor das resistências das bobinas for alterado, o valor da corrente será alterado proporcionalmente. Sabendo que o torque é proporcional às correntes, este também será alterado, modificando assim a inclinação da curva de torque por conjugado.



## 2.5 O Circuito elétrico equivalente do Motor Síncrono de Ímãs permanentes no Rotor.

Segundo (Teixeira,2006) o circuito elétrico equivalente do MSIPR trifásico pode ser representado figura 2.13.

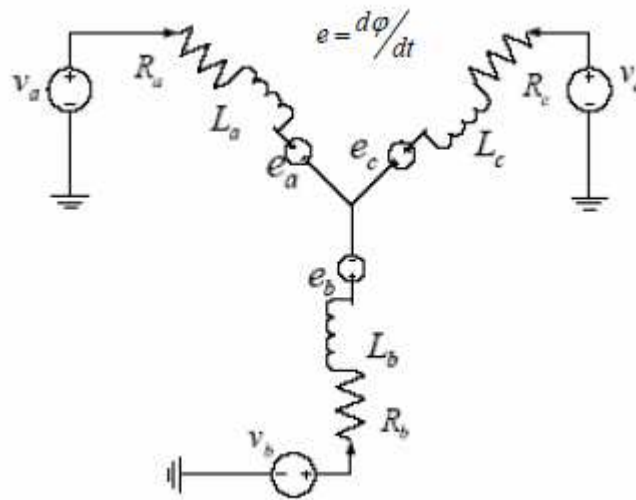


Figura 2.13- Circuito elétrico equivalente do MSIPR.

Para cada fase tem-se a força eletromotriz induzida, a resistência da bobina (no motor utilizado neste trabalho  $2\Omega$  na resistência de linha) e o valor da indutância representados.

Fazendo a análise do circuito para a fase neutro do ramo *a*, encontra-se a equação [9].

$$V_a = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + e_a \quad [9]$$

Basicamente, em um motor CC, a conversão de energia eletromecânica é dada pela equação [10].

$$ei = T \omega_m \quad [10]$$

Sendo que no caso do motor trifásico, o torque total será dado pelas somas dos torques das três bobinas, na equação [11].

$$T = \frac{e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3}{\omega_m} \quad [11]$$

Sendo  $\omega_m = \frac{2\pi \omega_{rpm}}{60}$  é a velocidade angular e  $\omega_{rpm}$  a velocidade em rotações por minuto.

### 3. Ímãs Permanentes

#### 3.1 Ímãs de Ferrite

Os ímãs do motor testado são de ferrite, que é um material cerâmico que surgiu no ano de 1950 (Ferreira,2008). Eles são chamados de permanentes porque depois de submetidos a um campo eletromagnético possuem um campo remanescente, isto é, se tornam ímãs permanentes.

Hoje em dia, os ímãs cerâmicos são os que possuem menor custo, são resistentes à corrosão, ácidos, sais lubrificantes e gases, o que os torna ideais para a aplicação objeto deste trabalho.

O processo de fabricação dos ímãs de ferrite consiste na pulverização das matérias primas até a formação de monocristais. Este composto é então prensado numa fôrma sob a influência de um campo magnético orientado. Após esta compactação, o material é sinterizado (processo metalúrgico) em fornos especiais e usinado até os formatos e dimensões desejados.

Na figura 3.1 é mostrado o formato do ímã utilizado nos motores deste trabalho. Eles não estão magnetizados. Primeiro monta-se o rotor e depois se magnetizam os ímãs já no rotor.

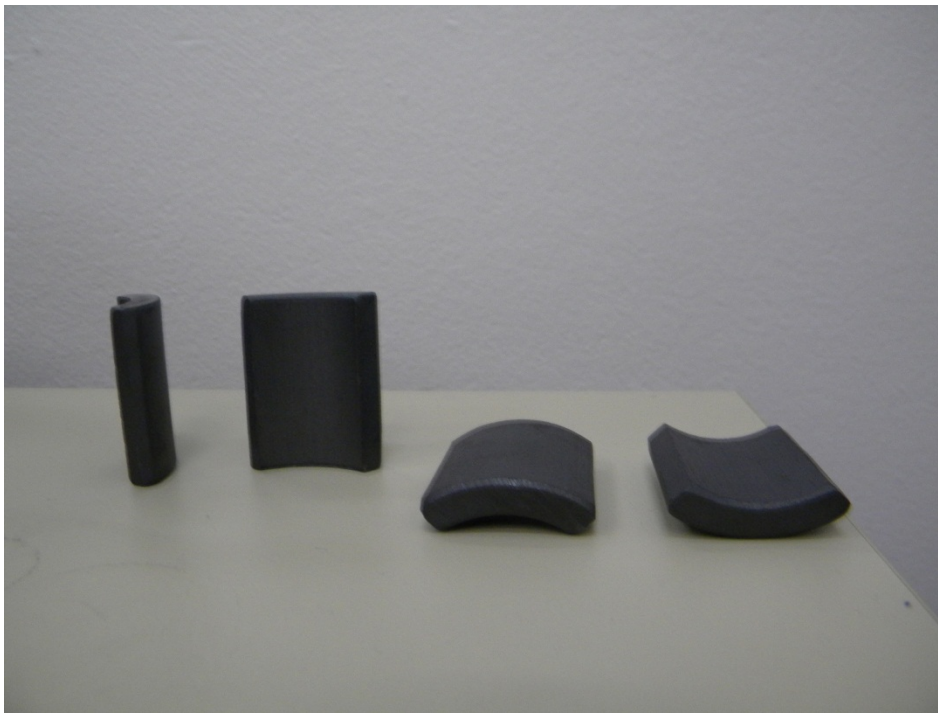


Figura 3.1 – Ímãs de ferrite utilizados no motor.

## 3.2 Magnetismo

### 3.2.1 Dipolos Magnéticos e Momento Magnético

Quando um ímã é dividido ao meio, cada uma das suas metades se transforma em um novo ímã com seu pólo norte e seu pólo sul nas extremidades. Dividindo-se em pedaços cada vez menores, ter-se-iam ímãs minúsculos que ainda assim não perderiam as características do ímã original. Cada um desses minúsculos pedaços ainda apresentaria dois pólos magnéticos (dipolo).

Estes ímãs elementares foram inicialmente denominados ímãs moleculares ou atômicos e posteriormente ,dipolos magnéticos. Não existe uma carga ou pólo magnético isolado, não se pode dividir o dipolo magnético em dois pólos separados, o dipolo magnético é a menor unidade fundamental do magnetismo (Faria e Lima, 2005).

Se uma espira tem área A e é percorrida por uma corrente i, seu dipolo magnético é dado escalarmente pela equação [12] (Ferreira,2008).

$$m = A i \quad [12]$$

### 3.2.2 – Campo magnético e magnetização

Um campo magnético pode ser gerado por uma carga elétrica em movimento ou ser produzido por um ímã permanente. Neste caso o campo magnético é gerado pelo movimento orbital e pelo spin dos elétrons nos átomos. (Faria e Lima, 2005).

A magnetização ocorre quando um campo magnético é aplicado ao material e há um alinhamento dos dipolos magnéticos gerando um campo magnético resultante considerável. (Faria e Lima, 2005).

A magnetização de um corpo é dada pela relação da equação [13].

$$M = m/V \quad [13]$$

Sendo M a magnetização de um corpo, m o momento magnético do corpo e V seu volume.

A magnetização de um certo material depende do campo magnético (H) externo aplicado a ele. A soma do campo externo mais o campo resultante da magnetização (M) é

definido como indução magnética ou densidade de fluxo (B) e é dado pela equação [14] (Ferreira,2008).

$$B=\mu(H+M) \quad [14]$$

No Sistema Internacional de medidas, B é dado em Weber por metro quadrado ou Tesla, já H e M são dados em A/m.

O fluxo magnético é dado em V.s ou Weber. No equipamento utilizado para magnetizar os ímãs de ferrite, a unidade medida é de fluxo magnético concatenado, representado por  $\lambda$ .

### 3.2.3 – Domínios Magnéticos

Os materiais ferromagnéticos e os ferrimagnéticos podem ser encontrados tanto no estado magnetizado como desmagnetizado, e isto se deve ao arranjo dos momentos magnéticos atômicos no material. Cada átomo se comporta como um minúsculo ímã permanente e, espontaneamente, se alinha paralelamente a seus vizinhos em regiões dentro do material. Essas regiões são chamadas de domínios magnéticos e são ilustradas na figura 3.2 (Faria e Lima,2005).

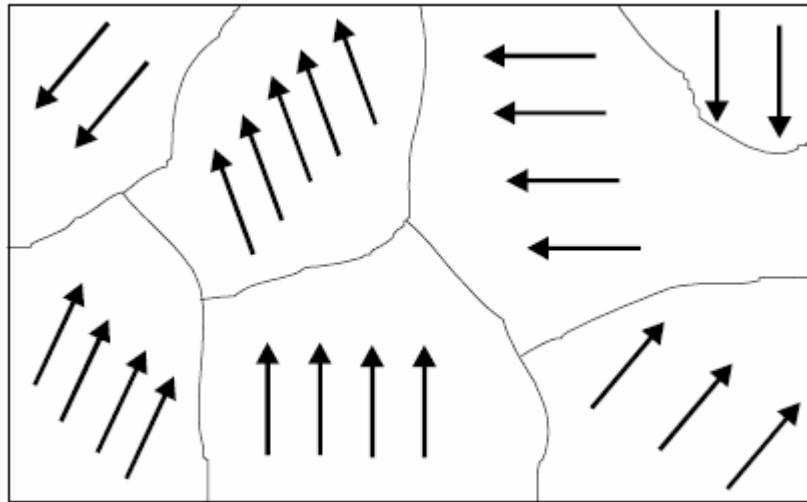


Figura 3.2 – Representação esquemática dos domínios magnéticos de um material ferromagnético (Faria e Lima,2005).

Materiais ferromagnéticos são aqueles que possuem campos magnéticos de origem atômica que se alinham paralelamente ao campo aplicado externamente, criando

um campo magnético total dentro do material muito maior que o aplicado. Acima de uma temperatura crítica conhecida como temperatura Curie o material se torna paramagnético. (Faria e Lima, 2005)

Materiais ferrimagnéticos são aqueles que possuem dois tipos diferentes de íons magnéticos que se orientam antiparalelamente, mas, como existem dois tipos de íons com momentos magnéticos bem distintos, a magnetização resultante não é nula. A resultante magnética é naturalmente inferior à do ferromagnetismo, mas ainda assim tem-se uma remanência. (Faria e Lima, 2005)

Materiais paramagnéticos são os que se tornam magnetizados na mesma direção do campo magnético aplicado e com intensidade proporcional ao campo. Os efeitos são difíceis de serem medidos exceto em temperaturas muito baixas ou campos magnéticos de alta intensidade. (Faria e Lima, 2005)

### **3.2.4 Curva de desmagnetização**

Para motores elétricos de alto rendimento é de grande interesse que os ímãs permanentes possuam um elevado campo coercitivo ou coercividade ( $H_c$ ) e elevada indução remanente ou remanência ( $B_r$ ). Um elevado  $H_c$  impede que o ímã seja facilmente desmagnetizado e um alto valor de  $B_r$  resulta num fluxo magnético elevado. A figura 3.3 apresenta uma curva de desmagnetização típica de um ímã:

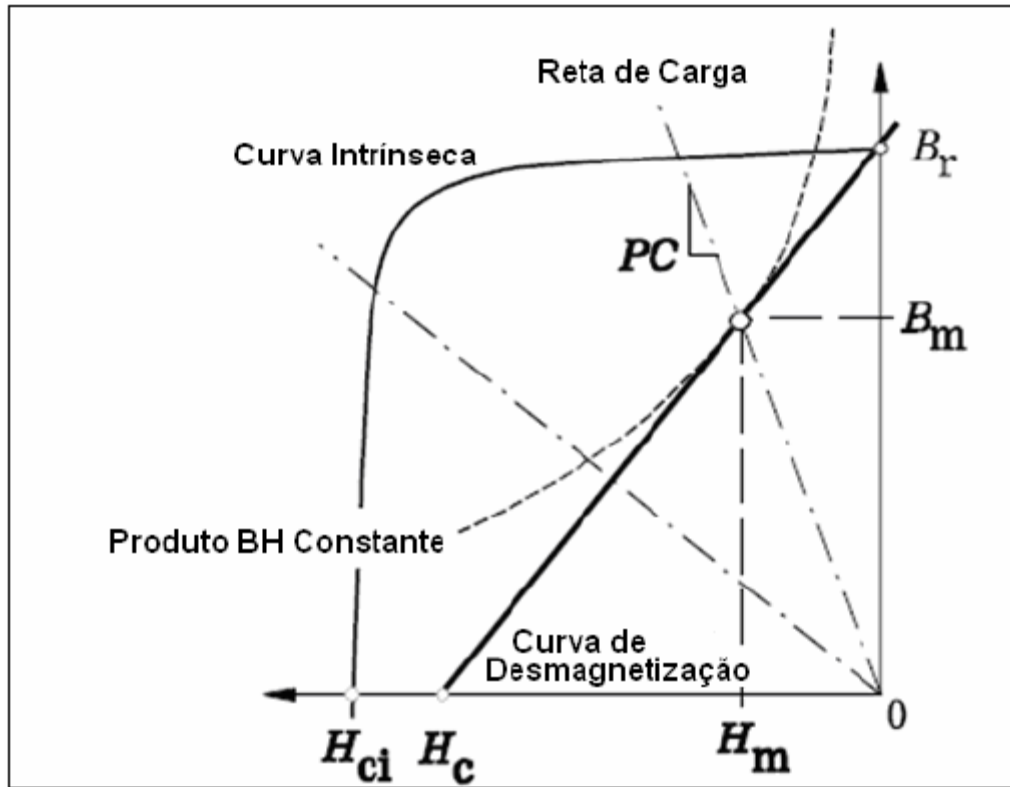


Figura 3.3 – Curva BxH do ímã (TJE Miller SPEED's Electric Machines).

Os ímãs utilizados nos motores testados possuem as seguintes características: remanência,  $B_r = 0,397 \text{ T}$ , e resistência a um campo desmagnetizante de  $H_c = 3,3 \text{ kOe}$ . A figura 3.4 apresenta a curva de desmagnetização que foi fornecida pelo fornecedor de ímãs para a Tecumseh.

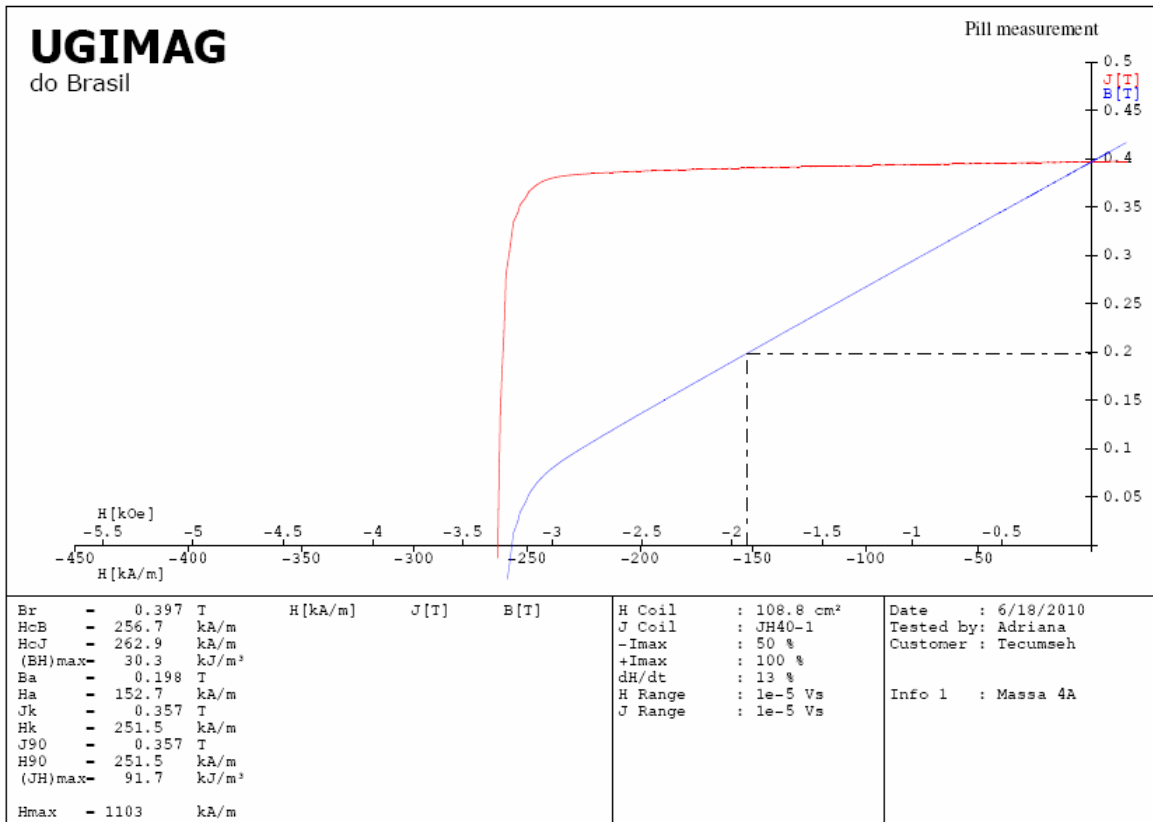


Figura 3.4 – Curva de magnetização do ímã utilizado (UGIMAG,2010).

A curva de desmagnetização da Fig. 3.4 nos fornece informações importantes. Inicialmente vejamos porque a curva está situada no segundo quadrante.

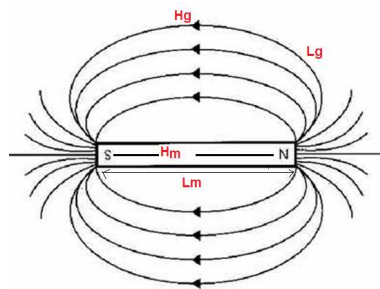


Figura 3.5 –Desenho de um ímã e os campos associados ao mesmo.

Na Fig. 3.5 acima vemos um ímã e os campos associados ao mesmo. Este ímã está magnetizado e exposto ao ar.

Temos um campo dentro do ímã e um campo externo que neste caso é devido ao próprio campo gerado pelo ímã.



Conforme Lei de Ampère que relaciona os caminhos percorridos por um campo magnético temos as equações [15] e [16] .

$$H_m L_m + H_g L_g = 0 \quad [15]$$

$$H_m = - H_g L_g / L_m \quad [16]$$

Sendo

$$B_{ímã} = \mu_0 H_m + B_r \quad [17]$$

$$H_m = (B_{ímã} - B_r) / \mu_0 \quad [18]$$

$$[(B_{ímã} - B_r) L_m / \mu_0] + H_g L_g = 0 \quad [19]$$

Logo

$$B_{ímã} = -\mu_0 (H_g L_g / L_m) + B_r \quad [20]$$

O campo externo gerado pelo ímã terá sentido inverso ao gerado dentro do ímã e tenderá a desmagnetizá-lo. Caso haja um campo externo adicional como por exemplo o gerado por uma corrente ou outro ímã, o mesmo deverá ser inserido no equacionamento e o seu sentido (em relação ao campo interno do ímã) deverá ser levado em conta para saber se será positivo ou negativo (magnetizante ou desmagnetizante).

Assim, um ímã, mesmo não exposto ao campo gerado por correntes terá sua densidade de fluxo interna reduzida quando exposto ao ar. Para que ele mantenha sua densidade de fluxo máximo deve ficar confinado num circuito magnético de alta permeabilidade onde o  $H_g$  será nulo.

A densidade de fluxo  $B$  dentro do ímã na Figura 3.4 será conforme a equação [20] e como vemos dependerá do campo externo aplicado. Sabendo o valor do campo externo aplicado é possível ir na curva de funcionamento do ímã (em azul) e saber a densidade de campo dentro do ímã.

Vê-se que quando o campo externo aplicado na Figura 3.4 for maior que 250KA/m o ímã desmagnetizará.

A curva em vermelho , chamada curva de polarização  $J$  significa que o campo residual do ímã não se modifica ou seja , depois que o ímã é magnetizado, o  $B_r$  residual permanece o mesmo e deixa de existir somente na desmagnetização.

### 3.3 Magnetizadora

A magnetizadora utilizada foi fabricada pela empresa GlobalMag™. Ela é composta basicamente por um gerador de pulso magnético, uma unidade de controle do gerador de pulso e um dispositivo de magnetização.

#### 3.3.1 Gerador de Pulso Magnético:

A função do Gerador de Pulso CP-2000, mostrado na figura 3.6 , é armazenar a energia em um banco de capacitores de capacitância elevada e produzir uma descarga de corrente elétrica de elevada intensidade no dispositivo de magnetização.

Características do Gerador de Pulso Magnético:

- Capacitância: 16,5 mF
- Energia máxima: 1670 Joules
- Ajuste de tensão de descarga: 30V a 450V
- Tempo do ciclo: 10s (típico)
- Dimensões: 300x600x900 mm
- Alimentação: 220 Vca –monofásico



Figura 3.6 – Gerador de pulso magnético da série CP2000.

### 3.3.2 Unidade de Controle do Gerador de Pulso CP2000

A unidade de controle CP 2000, mostrada na figura 3.7, monitora a temperatura e o campo de pico do dispositivo de magnetização. Fornece também sinais para a automação e realiza o diagnóstico de falhas.

Características da unidade de controle do gerador de pulso CP2000:

- Permite a interface com as linhas digitais de um CLP(24V).
- Dimensões : 160x160x90 mm.
- Alimentação 220 Vca
- Circuito microprocessado com LCD 16x2 dígitos.
- Possui software de auto-diagnóstico de falhas (potência desligada, fluxo magnetizante baixo, tempo de carga dos capacitores excessivo, temperatura excessiva no dispositivo).
- É configurado para medir o fluxo magnetizante e a temperatura do dispositivo de magnetização.
- Possui alarmes de temperatura máxima.
- Entrada/Saída digitais para CLP; uma entrada de dispara pulso magnético, uma saída de gerador de pulso PRONTO, uma saída de gerador de pulso FALHA.



Figura 3.7 – Controlador do magnetizador CP-2000.

### 3.3.3 Dispositivo de Magnetização

O dispositivo de magnetização é do modelo D60x100-1T e tem dimensões 250x250x350 mm com um campo estimado de 1T. É ligado junto com o gerador de pulsos magnéticos e a unidade controladora.

Este dispositivo, mostrado na figura 3.8, é uma bobina na qual passa uma corrente que gera um fluxo magnético que magnetiza o ímã do rotor que é introduzido no interior desta.



Figura 3.8 – Bobina magnetizadora.

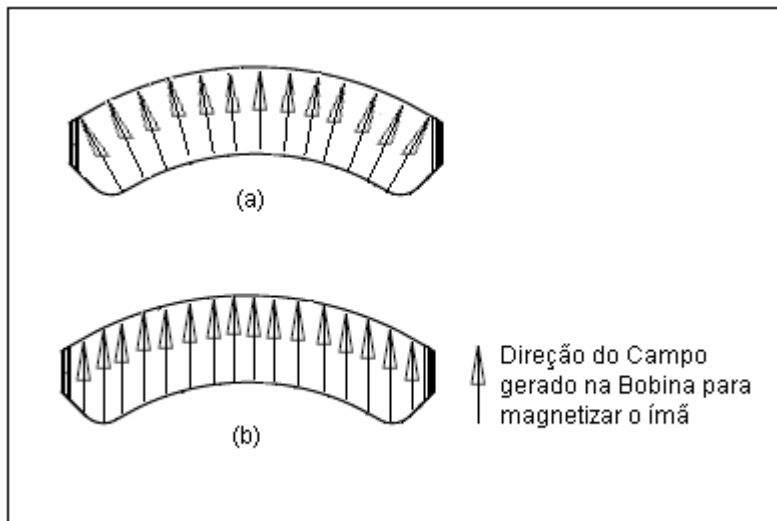


Figura 3.9 – Distribuição das linhas de fluxo magnético no ímã.

A figura 3.9 (b) mostra exatamente como fica a distribuição das linhas de fluxo do ímã depois de magnetizado. Esta distribuição acontece porque o ímã, apesar de ter uma forma de arco, tem sua orientação definida durante a fabricação no sentido mostrado na figura (b), chamada orientação paralela. Devido a essa característica da distribuição das

linhas de fluxo e devido à geometria do ímã, ao medir-se o fluxo pontualmente ver-se-á que em pontos diferentes encontrar-se-ão valores diferentes de fluxo, isto é, não se tem uma distribuição uniforme do fluxo em todo o ímã.

Para que a distribuição fosse uniforme, devido à geometria do ímã, ter-se-ia que ter a distribuição de linhas do fluxo magnético no ímã igual ao da figura 3.9(a). Isto é possível tendo os domínios magnéticos do ímã alinhados na direção radial durante a fabricação do mesmo.

## 4. Equipamentos utilizados nos testes do Motor Brushless DC

O dinamômetro da Tecumseh do Brasil é do modelo HD-705-8NA-0030, isto é, um Magtrol Histerese Dinamômetro. Para realizar os testes ele é utilizado juntamente com o Three-Phase Power Analyzer modelo 6530, e o Dynamometer Controller modelo DPS 6001, com o software M-TEST 4.0. Na Figura 4.1 é mostrado o módulo completo do sistema de testes. Este módulo de testes realizará uma curva de torque e medirá os parâmetros do motor em função da curva de torque aplicada.



Figura 4.1- De cima para baixo o Magtrol Histerese Dinamômetro , o Three-Phase Power Analyzer modelo 6530 e o Dynamometer Controller modelo DPS 60019 (Equipamento da Tecumseh do Brasil, 2010).

## 4.1. Magtrol Histerese Dinamômetro

Princípios de Operação :

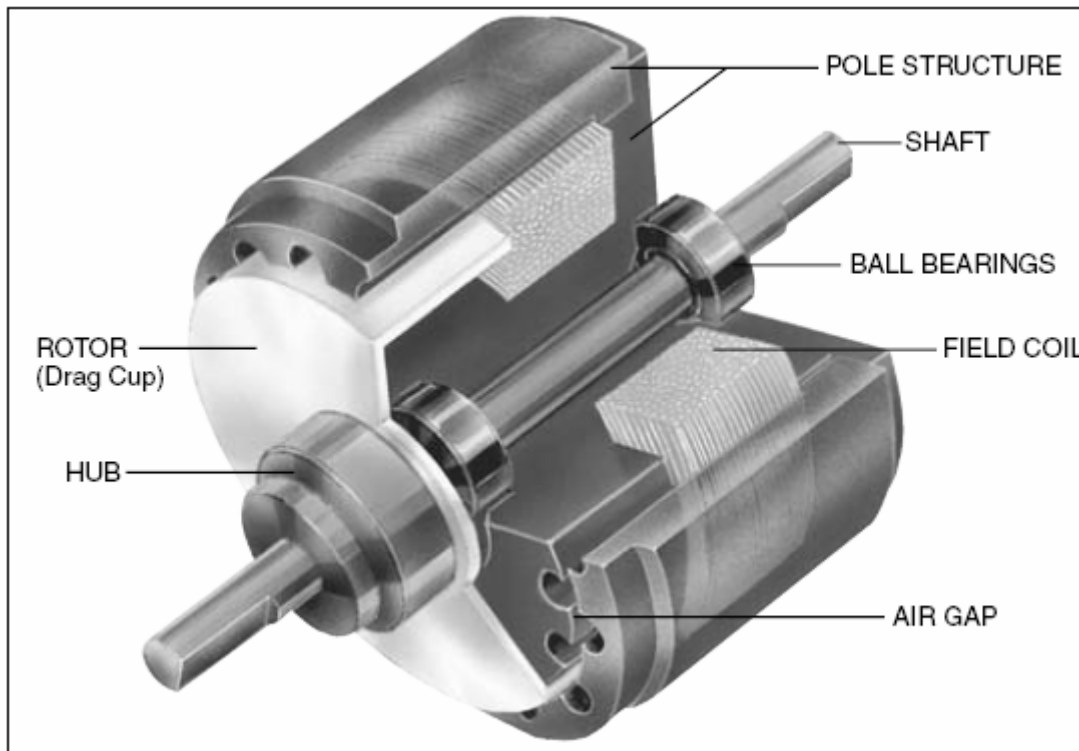


Figura 4.2 - Desenho esquemático do Magtrol Histerese Dinamômetro (Magtrol,2003).

O Magtrol Histerese Dinamômetro mostrado na Figura 4.2 absorve a energia com um sistema único de travagem por histerese, que prevê o atrito do ponto de carga (torque) independente da velocidade do eixo. A histerese fornece torque de freio através da utilização de dois componentes básicos, uma estrutura reticulada do pólo e aços especiais rotor / eixo que ficam juntas, mas não em contato físico. Até a estrutura do pólo ficar energizada, o copo de arrastar pode girar livremente em rolamentos de seu eixo. Quando uma força magnetizante da bobina de campo é aplicada à estrutura do pólo, a caixa de ar torna-se um campo de fluxo e o rotor é magneticamente contido, fornecendo uma ação de frenagem entre a estrutura do pólo e do rotor.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram detalhes do motor acoplado ao Magtrol.



Figura 4.3 - Detalhe do Magtrol Histerese Dinamômetro com o motor acoplado para teste.

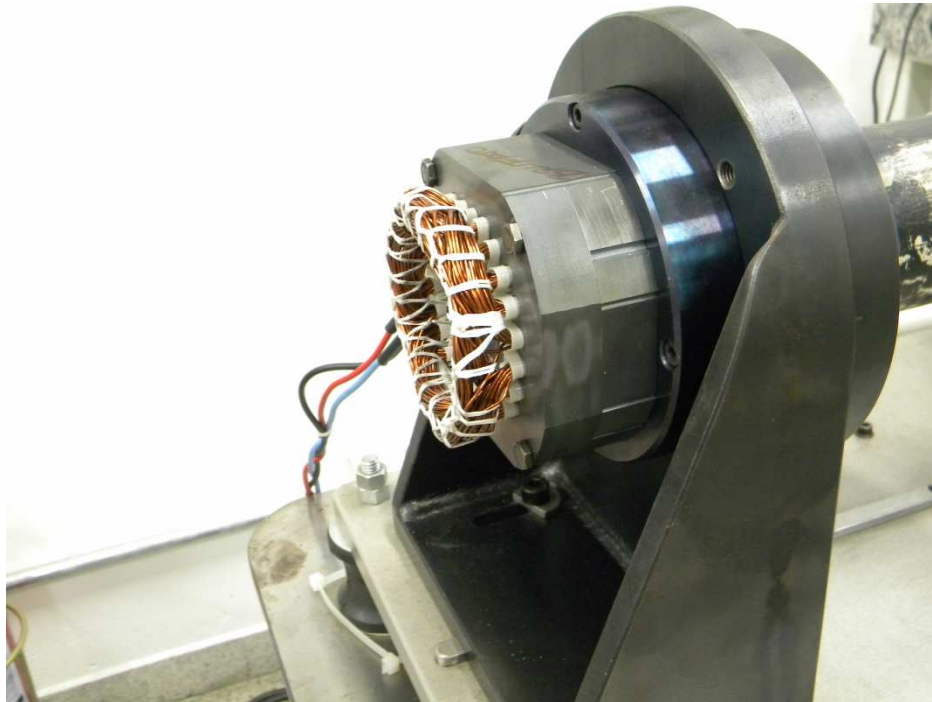


Figura 4.4 – Detalhe do Motor acoplado no Magtrol Histerese Dinamômetro para teste.



## 4.2. Three-Phase Power Analyzer Model 6530

A ligação feita no Power Analyzer é a 3-Volt 3-Amp, que mede as três fases e utiliza as três fases para adquirir os outros parâmetros. Na Figura 4.5 tem-se o painel frontal do Power Analyzer. Na Figura 4.6 temos a ligação do equipamento com o motor para medirem-se as grandezas que necessitamos. Na figura 4.7 temos um esquema onde se visualiza as ligações dos amperímetros e voltmímetros para as medições.

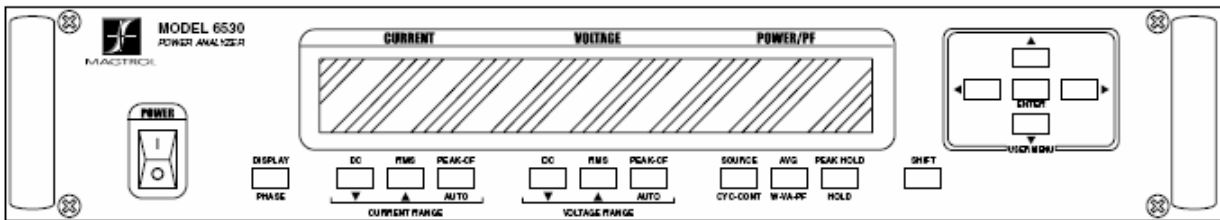


Figura 4.5 – Painel frontal do Three-Phase Power Analyzer Model 6530.

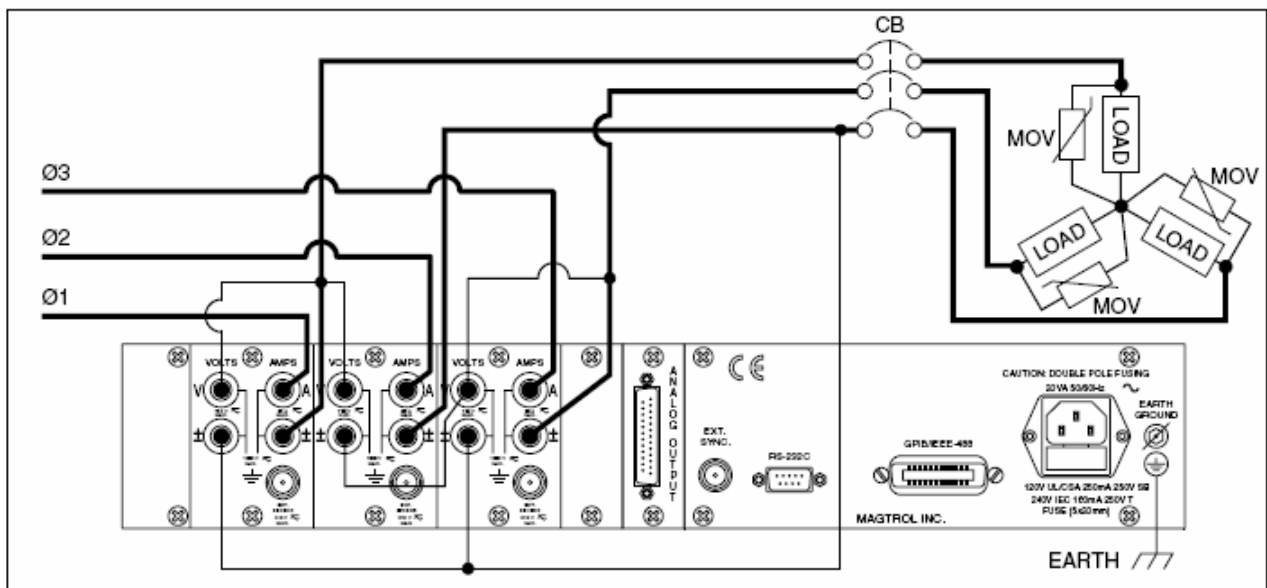


Figura 4.6 – Painel traseiro do Three-Phase Power Analyzer  
Esquema de ligação 3Volt- 3Amp

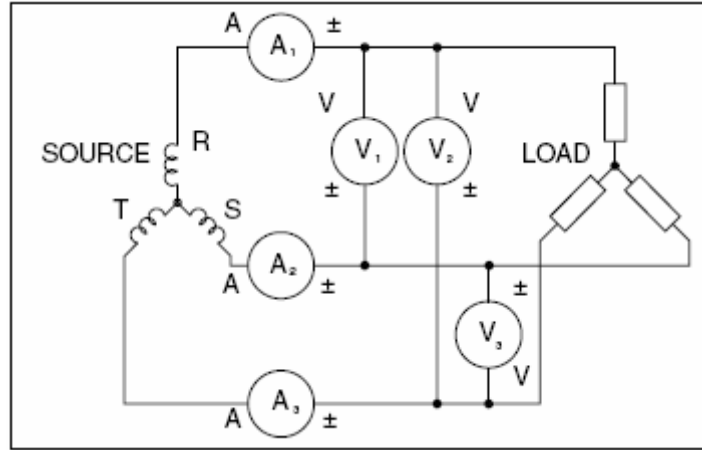


Figura 4.7 - Esquema de ligação dos amperímetros e voltmíetros no circuito.

### 4.3. Controlador Programável DPS 6001

Para realizar os testes programou-se, por meio do software M-TEST 4.0, o controlador que aplicará uma curva de torque enquanto o motor estiver alimentado. O power analyzer faz as medições elétricas, isto é, corrente e tensão e o controlador programável faz as medições mecânicas, isto é, o torque aplicado e a velocidade do motor. Na figura 4.8 temos o painel frontal do Controlador programável e na figura 4.9 temos uma foto do Power Analyzer junto com o Controlador programável na bancada de testes.

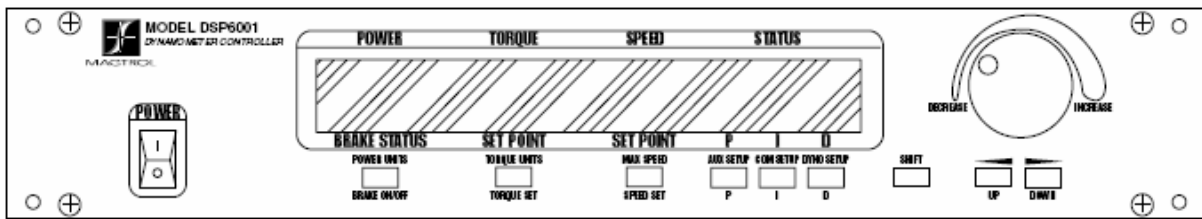


Figura 4.8- Painel Frontal do Controlador Programável DPS 6001.



Figura 4.9 – De cima para Baixo: Three-Phase Power Analyzer Model 6530 e o Controlador Programável DPS 6001 (Tecumseh).

#### 4.4. Software M-TEST 4.0

Para programar os testes e coletar os dados usou-se o programa M-TEST4.0.



Figura 4.10- Programa M-TEST 4.0

Primeiro foi necessário configurar o *hardware*, indicando assim quais os equipamentos envolvidos no teste. As janelas de configuração do *hardware* são as mostradas nas figuras 4.11 e 4.12. Na figura 4.10 temos a janela principal do software M-TEST 4.0.

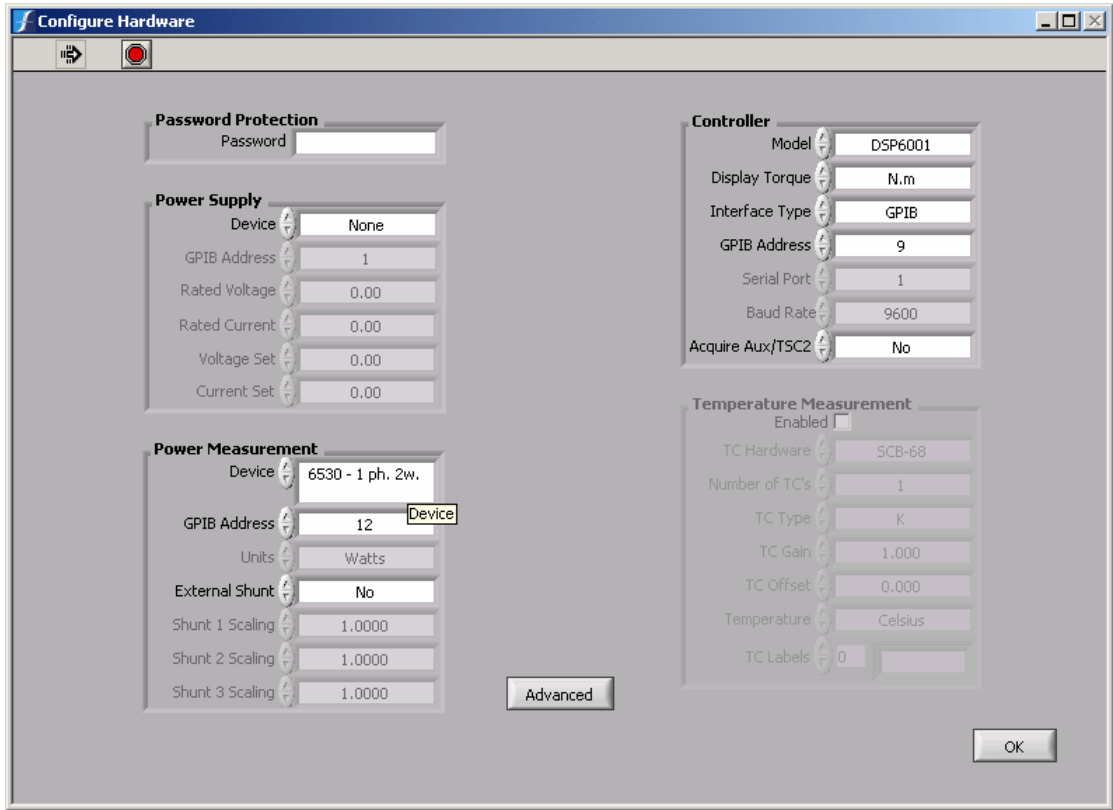


Figura 4.11 – Janela de configuração do Hardware.

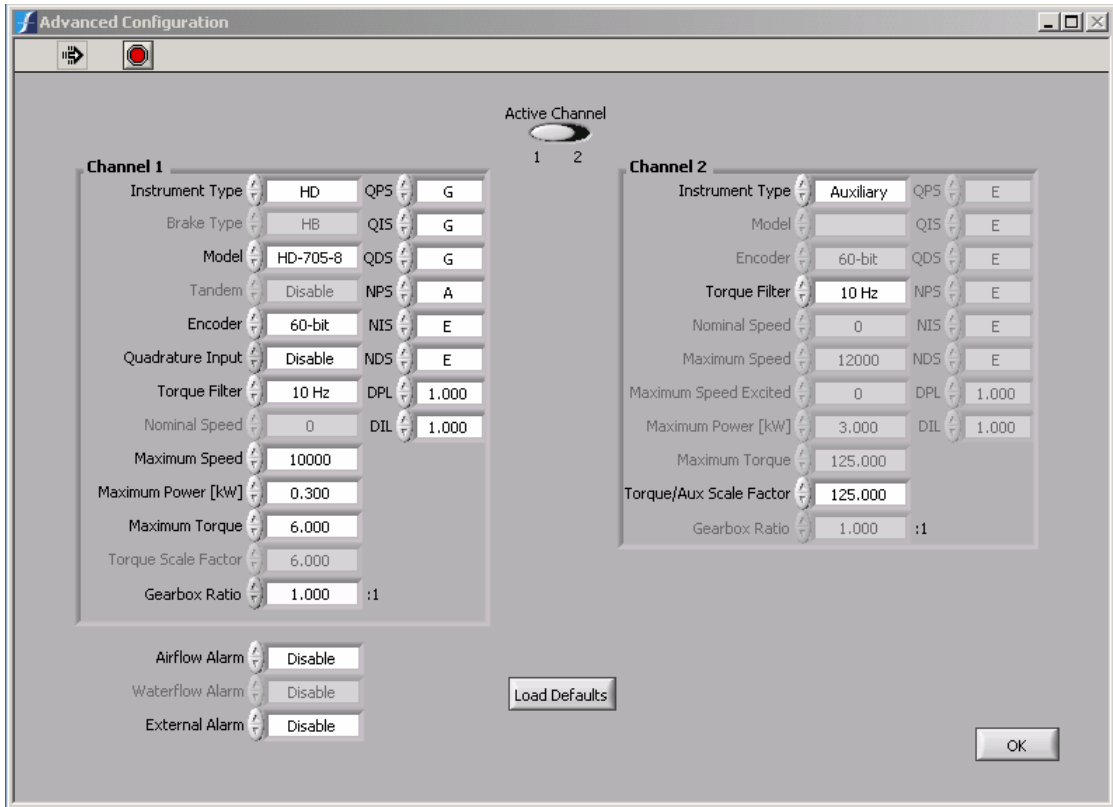


Figura 4.12– Configuração do software -> Advanced.

Depois de ser caracterizada a curva de teste, colocando os pontos de início e final de torques e o tempo que se deve levar para chegar de um valor ao outro, selecionou-se o intervalo de aquisição de dados e os parâmetros que se desejam serem adquiridos nas figuras 4.13 e 4.14.

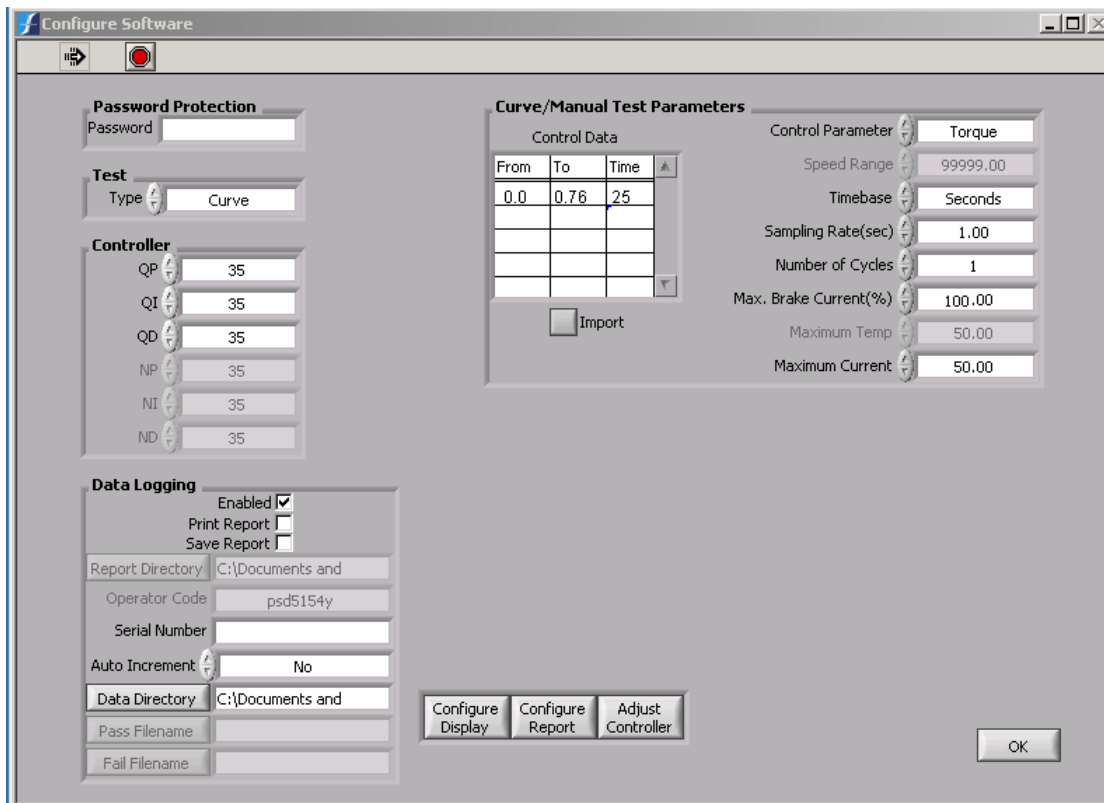


Figura 4.13 – Janela de Configuração do software

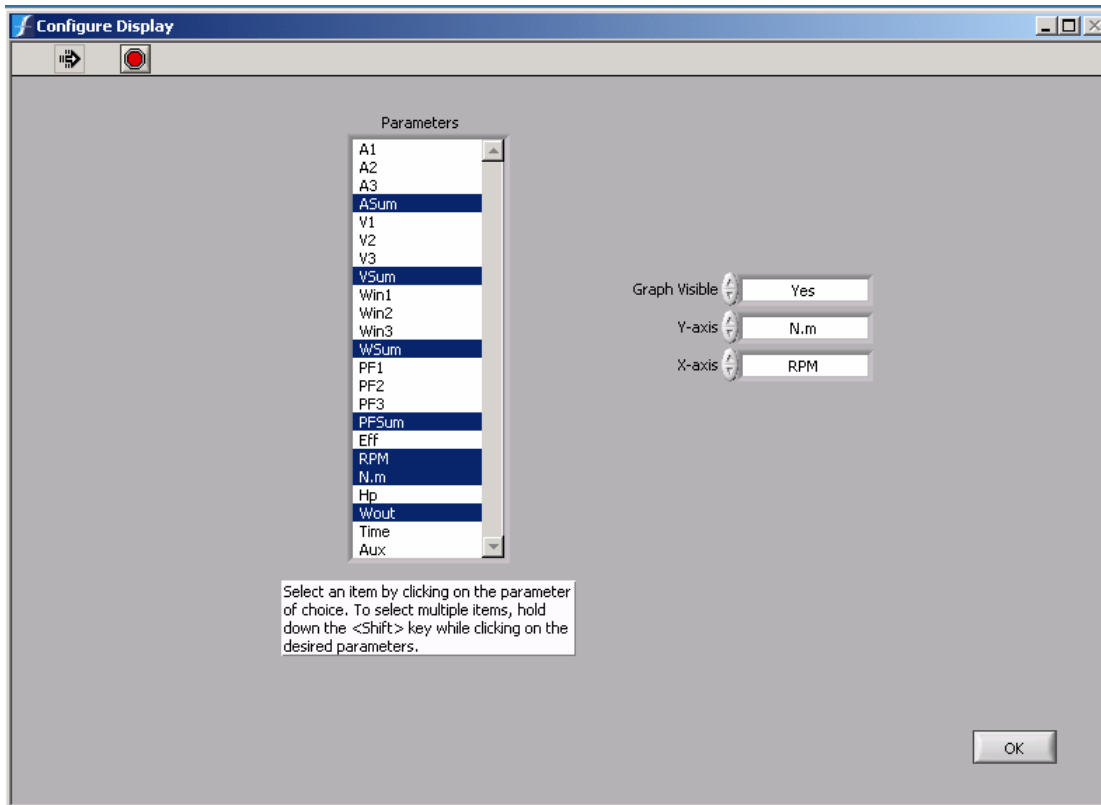


Figura 4.14 – Configure Display. Os parâmetros escolhidos aqui serão os adquiridos.

Depois de configurado o setup é só rodar o teste. Automaticamente é feita a aquisição de dados que é salva em uma tabela no Microsoft Excel, a partir desta tabela gerada foram traçadas as curvas características do Motor Síncrono de Ímãs Permanentes.

## 5 Avaliação da Magnetização na curva de Torque

O motor testado é um modelo VTH da empresa Tecumseh e sua aplicação é em compressores herméticos para refrigeração. Em função de ser um produto recém lançado no mercado não serão dados detalhes de projeto do motor.

O motor é constituído de um estator bobinado com enrolamento trifásico, com fio de cobre conforme Figura 5.1.

O rotor é formado por pacote de lâminas de aço onde são colados os ímãs de ferrite, como nas figuras 5.2 e 5.3. Depois de prontos os rotores são magnetizados no dispositivo descrito no capítulo 3.

Sua aplicação é para refrigeradores de automóveis, então seu controlador tem como entrada 12V-24V (tensão da bateria), porém o controlador alimenta o motor com 48V. O controlador detecta passagem pelo zero para identificar a posição do rotor e assim alimentar as bobinas de forma seqüencial e fazer o movimento na direção desejada.

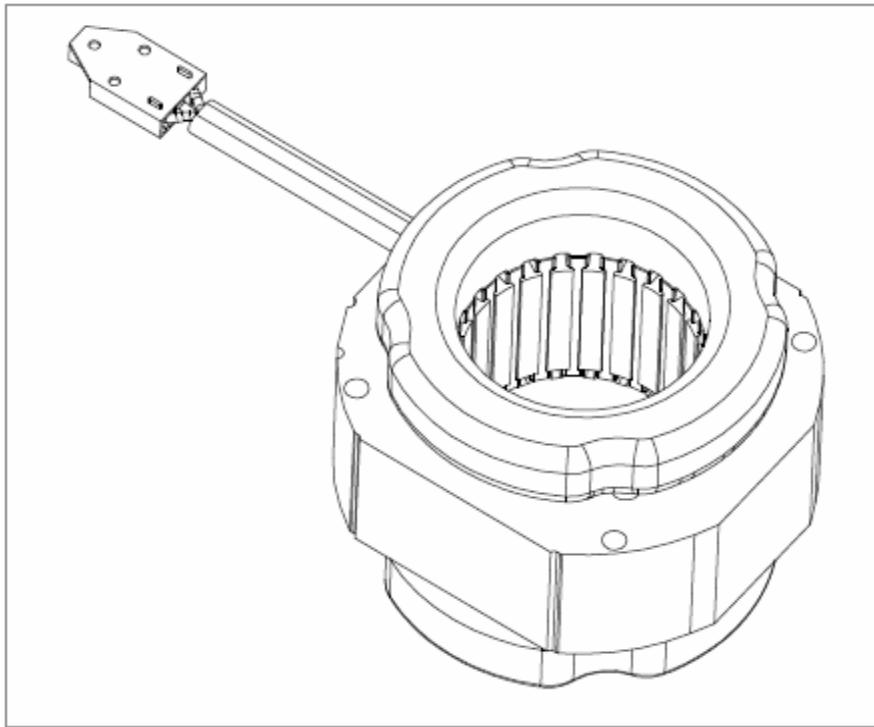


Figura 5.1 – Desenho do estator do modelo do motor testado.



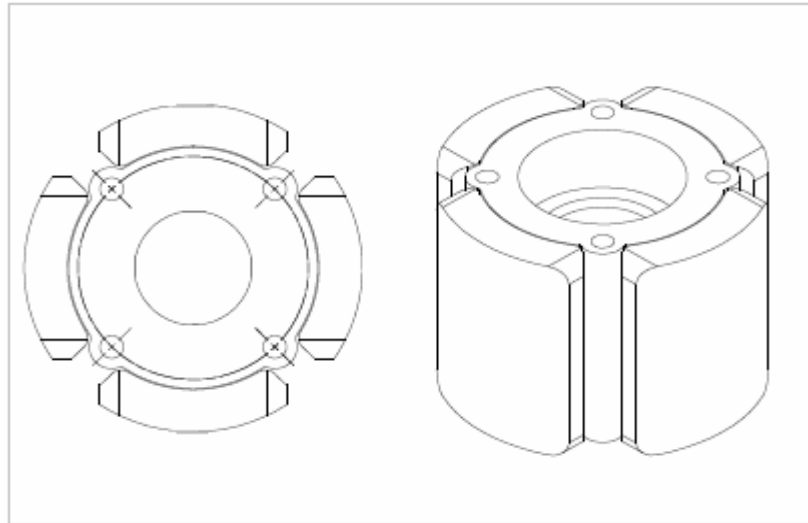


Figura 5.2 – Desenho do rotor do motor testado.



Figura 5.3 – Foto do rotor do motor utilizado nos testes.

Foram analisados 5 rotores diferentes, magnetizados em tensões diferentes na magnetizadora, resultando campos magnéticos diferentes.

## 5.1 Rotor 1 – Magnetizado com tensão máxima (400 Volts)

Este rotor foi magnetizado com tensão 400 V que gerou um fluxo de 25,11 mWb dentro da bobina magnetizadora. O fluxo magnético medido no ímã do rotor pelo fluxímetros foi de 4,44 mWb.

O teste para medir a força eletromotriz gerada é realizado rodando o motor à velocidade de 2000 rpm, sem que o estator esteja alimentado. Com o multímetro medem-se as tensões de linha nas saídas dos terminais do estator conforme mostrado na Tabela 5.1. A tensão gerada neste caso está sendo avaliada em função do fluxo magnético, já que os outros parâmetros que poderiam influenciar esta tensão gerada são mantidos constantes ao longo do teste.

Tabela 5.1- Força eletromotriz induzida (Back EMF)

Tensão de Linha	Tensão gerada devido ao fluxo magnético do ímã(V)
Fase 1 – Fase 2	13V
Fase 2 – Fase 3	13V
Fase 1 – Fase 3	13V

Testes realizados no dinamômetro:

Para avaliação de resultados os testes foram realizados em duas velocidades diferentes 2000 rpm e 3000 rpm. Os resultados estão nas tabelas 5.2 e 5.3. Sendo que RPM é a velocidade em rpm do motor, N.m é o torque aplicado em N.m ,  $\Sigma A$  é a média das correntes diferentes de zero de entrada do motor ,  $\Sigma V$  é a média das tensões induzidas nas fases, as potências de entrada são calculadas com base nas correntes e tensões das fases alimentadas sendo  $Win1$  a potência de uma fase ,  $Win2$  a potência da outra fase ,  $\Sigma W$  o somatório destas duas potências calculadas pelos equipamentos,  $Wout$  é a potência mecânica consumida no eixo do motor e  $Eff$  é a eficiência do motor.

Tabela 5.2 – Resultados dos testes no dinamômetro 2000 rpm, Rotor 1.

RPM	N.m	ΣA	ΣV	Win1	Win2	ΣW	Wout	Eff %
2091	0,027	0,574	19,393	4,677	7,471	12,146	5,912	48,7
2084	0,03	0,583	19,357	5,441	6,941	12,388	6,547	52,8
2060	0,032	0,664	19,238	6,038	8,572	14,61	6,903	47,3
2018	0,079	1,046	19,302	10,909	13,767	24,707	16,695	67,6
2001	0,115	1,36	19,451	14,617	18,396	33,014	24,098	73
1998	0,155	1,638	19,588	18,724	21,898	40,658	32,431	79,8
2000	0,186	1,925	19,783	22,693	26,075	48,782	38,956	79,9
1995	0,215	2,23	19,994	26,959	30,58	57,525	44,917	78,1
2000	0,241	2,462	20,148	31,285	33,296	64,584	50,475	78,2
2010	0,269	2,714	20,329	34,794	37,579	72,364	56,621	78,2
2005	0,3	2,967	20,45	38,726	41,576	80,316	62,989	78,4
2014	0,331	3,214	20,601	43,33	44,932	88,246	69,81	79,1
2005	0,36	3,477	20,739	47,414	49,32	96,746	75,587	78,1
2012	0,387	3,719	20,893	51,688	53,102	104,744	81,539	77,8
2007	0,413	3,998	21,027	55,951	58,025	114,027	86,801	76,1
2012	0,441	4,233	21,12	62,486	59,754	122,259	92,917	76
2006	0,474	4,473	21,22	66,635	64,029	130,733	99,572	76,2
2012	0,502	4,753	21,35	70,538	70,121	140,728	105,769	75,2
1952	0,527	4,795	21,177	70,781	68,712	139,371	107,726	77,3
1829	0,553	5,004	20,832	70,361	69,254	139,853	105,917	75,7
1691	0,584	5,193	20,352	70,138	67,759	138	103,415	74,9
1538	0,613	5,429	19,788	67,96	68,231	136,25	98,729	72,5
1330	0,641	5,571	18,914	62,809	64,464	127,244	89,277	70,2

Tabela 5.3 – Resultados dos testes do dinamômetro em 3000 rpm, Rotor 1.

RPM	N.m	ΣA	ΣV	Win1	Win2	ΣW	Wout	Eff%
3059	0,064	0,942	26,048	14,518	17,962	32,584	20,502	62,9
3061	0,064	0,955	26,075	15,423	17,729	33,162	20,515	61,9
3054	0,068	0,981	26,03	15,454	18,638	34,037	21,747	63,9
3038	0,079	1,024	26,05	16,282	19,451	35,761	25,133	70,3
3013	0,11	1,258	26,105	20,044	24,504	44,592	34,707	77,8
2979	0,153	1,675	26,198	27,443	32,84	60,379	47,73	79,1
2951	0,192	2,026	26,298	35,183	38,792	73,999	59,333	80,2
2948	0,231	2,374	26,486	42,472	45,429	87,95	71,313	81,1
2955	0,264	2,665	26,661	47,637	52,621	100,247	81,694	81,5
2961	0,295	2,958	26,854	55,194	57,27	112,513	91,472	81,3
2961	0,328	3,216	27,03	61,708	62,185	123,943	101,705	82,1
2963	0,36	3,496	27,159	68,345	67,886	136,246	111,702	82
2960	0,391	3,739	27,243	74,201	73,028	147,22	121,198	82,3
2963	0,422	4,03	27,389	81,678	78,69	160,481	130,94	81,6
2965	0,454	4,306	27,515	88,683	84,398	173,179	140,964	81,4
2910	0,481	4,412	27,379	90,961	84,562	175,491	146,577	83,5
2764	0,511	4,509	26,963	89,027	83,937	172,879	147,907	85,6

## 5.2 Rotor 2 – Magnetizado com tensão 200V (50% da tensão máxima).

Este rotor foi magnetizado com tensão 200 V que gerou um fluxo de 20,01 mWb na bobina magnetizadora. O fluxo magnético medido no ímã do rotor pelo fluxímetro foi de 4,40 mWb. Os valores de fluxo medidos neste teste são muito próximos aos valores obtidos com tensão máxima. Isto significa que a tensão gerada pelas bobinas deve ser próxima à medida no teste anterior. Na Tabela 5.4 são mostrados os valores de tensão medidos que confirmam o esperado.

Tabela 5.4- Força eletromotriz induzida (Back EMF)

Tensão de Linha	Tensão gerada devido ao fluxo magnético do ímã(V)
Fase 1 – Fase 2	12V
Fase 2 – Fase 3	12V
Fase 1 – Fase 3	12V

Do mesmo modo que no teste com tensão máxima foram feitos testes de dinamômetro em velocidade de 2000 rpm e 3000 rpm.

Tabela 5.5 – Resultados dos testes no dinamômetro 2000 rpm, Rotor 2.

RPM	N.m	$\Sigma A$	$\Sigma V$	Win1	Win2	$\Sigma W$	Wout	Eff %
2095	0,031	0,593	19,399	5,603	7,183	12,794	6,801	53,2
2096	0,031	0,609	19,392	5,522	7,649	13,179	6,804	51,6
2074	0,031	0,705	19,34	6,723	8,995	15,732	6,733	42,8
2035	0,079	0,997	19,401	10,188	13,377	23,576	16,835	71,4
2009	0,113	1,319	19,53	14,245	17,878	32,142	23,773	74
2002	0,153	1,644	19,635	18,662	22,175	40,86	32,076	78,5
1998	0,185	1,955	19,854	23,253	26,405	49,645	38,708	78
2004	0,216	2,239	20,059	27,321	30,554	57,865	45,329	78,3
2006	0,24	2,462	20,203	31,403	33,169	64,601	50,416	78
2004	0,269	2,724	20,363	35,259	37,305	72,572	56,452	77,8
2008	0,3	2,956	20,471	38,728	41,125	79,903	63,083	79
2005	0,331	3,215	20,605	43,429	44,768	88,194	69,498	78,8
2012	0,36	3,503	20,792	47,722	49,769	97,496	75,851	77,8
2007	0,388	3,74	20,931	51,605	53,865	105,441	81,547	77,3
2012	0,413	3,969	21,063	56,666	56,638	113,313	87,017	76,8
2009	0,443	4,244	21,186	60,962	61,714	122,675	93,199	76
2013	0,474	4,471	21,284	66,425	64,524	130,904	99,92	76,3
2008	0,501	4,722	21,399	69,996	69,931	139,739	105,349	75,4
1958	0,528	4,809	21,255	70,524	69,76	140,213	108,262	77,2
1838	0,554	4,988	20,906	70,168	69,625	139,844	106,631	76,3

Tabela 5.6 – Resultados dos testes no dinamômetro 3000 rpm, Rotor 2.

RPM	N.m	$\Sigma A$	$\Sigma V$	Win1	Win2	$\Sigma W$	Wout	Eff %
3058	0,068	0,997	26,084	14,874	19,81	34,691	21,776	62,8
3060	0,068	0,981	26,085	15,254	18,878	34,098	21,79	63,9
3053	0,073	0,985	26,081	15,268	19,231	34,416	23,339	67,8
3041	0,079	1,066	26,074	16,58	20,784	37,343	25,158	67,4
3017	0,108	1,275	26,109	20,517	24,682	45,236	34,121	75,4
2977	0,148	1,629	26,174	27,064	31,554	58,589	46,139	78,8
2947	0,191	2,02	26,282	35,307	38,366	73,697	58,944	80
2947	0,232	2,371	26,481	41,847	46,02	87,852	71,597	81,5
2953	0,265	2,674	26,665	48,87	51,622	100,553	81,948	81,5
2957	0,296	2,949	26,824	54,77	57,396	112,129	91,658	81,7
2959	0,328	3,251	27,022	61,672	63,628	125,263	101,636	81,1
2959	0,36	3,494	27,151	69,21	67,07	136,23	111,552	81,9
2960	0,391	3,769	27,251	74,524	73,878	148,472	121,198	81,6
2961	0,422	4,044	27,378	81,583	79,49	161,046	130,852	81,3
2965	0,454	4,323	27,517	88,406	85,454	173,92	140,964	81,1

### 5.3 Rotor 3 – Magnetizado com tensão 100V (25% da tensão máxima).

Este rotor foi magnetizado com tensão 100 V que gerou um fluxo de 12,09 mWb. O fluxo magnético medido no ímã do rotor pelo fluxímetro foi de 3,33 mV.s. Teoricamente é possível estimar a tensão gerada pelas bobinas pela relação de fluxo medido neste teste e o primeiro. Assim a tensão gerada neste teste seria  $V = (3,33/4,44) * 13 \text{ Volts} = 9,7 \text{ Volts}$ . Na Tabela 5.7 são mostrados os valores de tensão gerada medida e observa-se que são muito próximas ao estimado. Os erros de medida associados à precisão dos aparelhos e possível dispersões de fluxo devido à não linearidade do circuito magnético acarretam a diferença nos valores na casa decimal.

Tabela 5.7- Força eletromotriz induzida (Back EMF)

Medidas de Linha	Tensão gerada devido ao fluxo magnético do ímã
Fase 1 – Fase 2	09V
Fase 2 – Fase 3	09V
Fase 1 – Fase 3	09V

Tabela 5.8 – Resultados dos testes no dinamômetro 2000 rpm, Rotor 3.

Rpm	N.m	$\Sigma A$	$\Sigma V$	Win1	Win2	$\Sigma W$	Wout	Eff %
2032	0,03	0,643	16,7	4,6	6,1	10,7	6,5	60
2032	0,07	1,181	17,1	10,1	12,1	22,2	15,9	71
2032	0,1	1,5	17,4	13,8	16,9	30,7	21,2	69
2032	0,15	2,1	17,9	20,1	21,6	43	31,9	74
2032	0,2	2,6	18,3	27,4	28,6	56,3	42,683	75
2032	0,25	3,2	18,7	35,8	35,8	71,6	53,2	74
2032	0,3	3,8	19,1	45	42,8	88,4	63,8	72
2034	0,35	4,4	19,8	55,8	52,8	108,6	74,4	68
2027	0,4	5,01	19,9	64,3	60,55	125,5	85,1	67
0	0,45	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 5.9 – Resultados dos testes no dinamômetro 3000 rpm, Rotor 3.

Rpm	N.m	$\Sigma A$	$\Sigma V$	Win1	Win2	$\Sigma W$	Wout	Eff %
3056	0,064	1,11	23,4	14,7	16,1	30,8	20,39	66
3057	0,1	1,52	23,8	20,6	22,3	42,9	32,9	76
3056	0,15	2,09	24,3	29,6	30,9	60,5	47,8	79
3053	0,2	2,6	24,4	40,2	39,6	79,8	63,9	80
3054	0,25	3,2	24,8	51,1	48,6	99,7	79,09	79
3056	0,3	3,8	25,2	64,25	57,09	122,15	96,006	78
3054	0,35	4,4	25,6	78,8	69,9	148,7	112,12	75
3022	0,4	5	25,9	92,2	76,27	168,47	120,29	71
0	0,45	0	0	0	0	0	0	0

#### 5.4 Rotor 4 – Magnetizado com tensão 50V (12,5% da tensão máxima).

Este rotor foi magnetizado com tensão 50 V que gerou um fluxo de 6,54 mWb. O fluxo magnético medido no ímã do rotor pelo fluxímetro foi de 1,16 mV.s.

Tabela 5.10- Força eletromotriz induzida (Back EMF)

Medidas de Linha	Tensão gerada devido ao fluxo magnético do ímã
Fase 1 – Fase 2	4,3V
Fase 2 – Fase 3	4,3V
Fase 1 – Fase 3	4,3V

Tabela 5.11 – Resultados dos testes no dinamômetro 2000 rpm, Rotor 4

Rpm	N.m	$\Sigma A$	$\Sigma V$	Win1	Win2	$\Sigma W$	Wout	Eff %
2100	0,028	1,3	12,8	6,2	6,3	12,5	5,9	47
2109	0,07	3	14,84	17,7	14,848	33,1	15,2	45
2072	0,09	3,2	15,4	22,1	18,1	40,5	19,5	48
2072	0,1	4	23,01	26,3	19,8	48,8	21,6	44
2086	0,12	4,6	16,5	32,8	27	60	26,01	25
0	0,17	0	0	0	0	0	0	0

Como o fluxo foi reduzido ainda mais a corrente cresceu novamente e atingiu valor máximo de 5 A antes de 0,15 N.m.

Tabela 5.12 – Resultados dos testes no dinamômetro 3000 rpm, Rotor 4

Rpm	N.m	$\Sigma A$	$\Sigma V$	Win1	Win2	$\Sigma W$	Wout	Eff %
3044	0.029	1.7	17.3	11.7	10.7	21.7	8	36
3044	0.07	3	19.1	22.2	21.7	44.9	18.5	41
3054	0.1	3.09	20.4	33.4	28.6	62	26.7	43
2998	0.14	5.06	21.6	50.1	37.2	87.3	38.9	44
0	0.15	0	0	0	0	0	0	0

## 5.5 Rotor 5 – Magnetizado com tensão mínima do magnetizador (8% da tensão máxima)

Este rotor foi magnetizado com a tensão mínima possível de ser usada no magnetizador. A tensão usada foi de 32 V e o fluxo magnético ao qual o rotor foi submetido foi de 4,5 mWb.

O fluxo magnético remanescente no ímã foi tão pequeno que não se detectou no fluxímetro. Adicionalmente, o motor não partiu no dinamômetro da Magtrol, pois a tensão induzida foi muito pequena e conseqüentemente a corrente máxima foi atingida em valores de torque muito pequenos, não sendo suficientes para vencer a inércia do Magtrol.

Tabela 5.13- Força eletromotriz induzida (Back EMF)

Medidas de Linha	Tensão gerada devido ao fluxo magnético do ímã
Fase 1 – Fase 2	3V
Fase 2 – Fase 3	3V
Fase 1 – Fase 3	3V

Este motor é completamente inutilizável a não ser que se faça uma remagnetização.

Aqui se pode fazer uma primeira análise quantitativa de valores de correntes medidas. Da equação [2] temos que o torque é calculado em função do fluxo gerado pelos ímãs, corrente, número de espiras da bobina, comprimento e raio do rotor. Nos nossos testes somente a corrente e o fluxo podem ser modificados, pois os outros parâmetros são fixos.

Avaliando-se os valores de corrente para o caso de 0,15 N.m na velocidade de 2000 rpm.

Para os testes com os Rotores 1 e 2 os valores de corrente para este valor e velocidade são praticamente os mesmos de 1,64 A, uma vez que o fluxo gerado é também muito próximo nos dois casos.

Para o Rotor 3 contudo, o fluxo gerado pelo ímã foi menor. Para que o mesmo torque de 0,15 N.m seja obtido no motor é necessário aumentar a corrente. É possível também fazer uma estimativa do aumento da corrente através da equação  $I = (4,44/3,33)*1,64 \text{ A} = 2,19 \text{ A}$ . Na Tabela 5.8 observa-se que o valor medido de 2,1 A. A



diferença observada aqui entre o valor estimado e medido deve-se também a precisão dos equipamentos e possível não linearidade do circuito magnético.

Concluiu-se então que conforme o fluxo vai sendo reduzido a corrente aumenta.

Das tabelas 5.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.8, 5.9, 5.11 e 5.12 verifica-se que o valor máximo de corrente que se pode obter em velocidade fixa é em torno de 5 A. A partir deste valor de corrente a velocidade começa a cair. No capítulo 6 será feito uma análise deste fenômeno considerando o circuito simplificado do motor.

## 6. Análise da eficiência com a magnetização

Nos gráficos das figuras 6.1, 6.2, nos quais são representadas as eficiências em função do torque, pode ser verificado o comportamento da eficiência dos motores analisados no item 5.

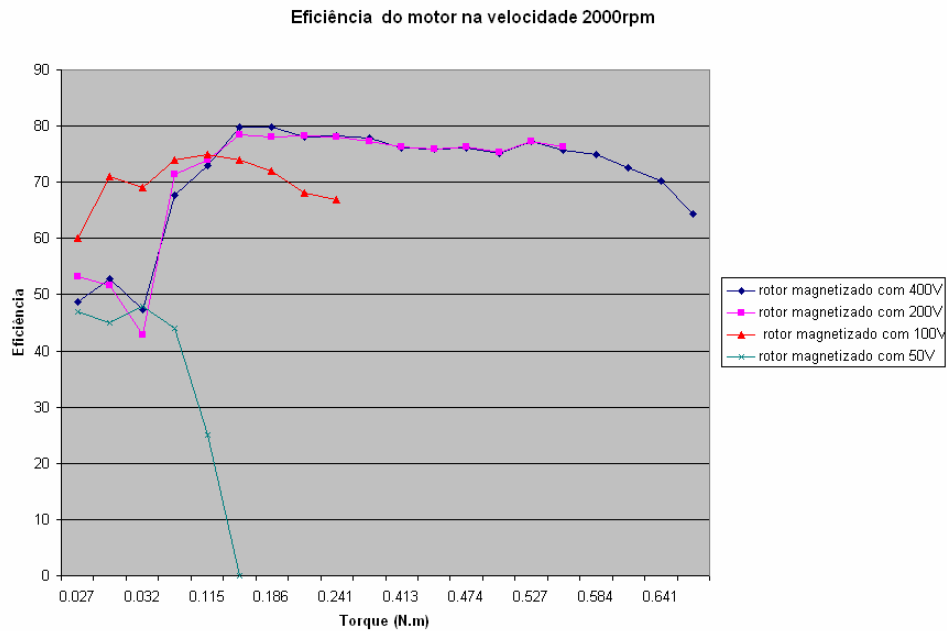


Figura 6.1 – Eficiência x Torque em 2000 rpm

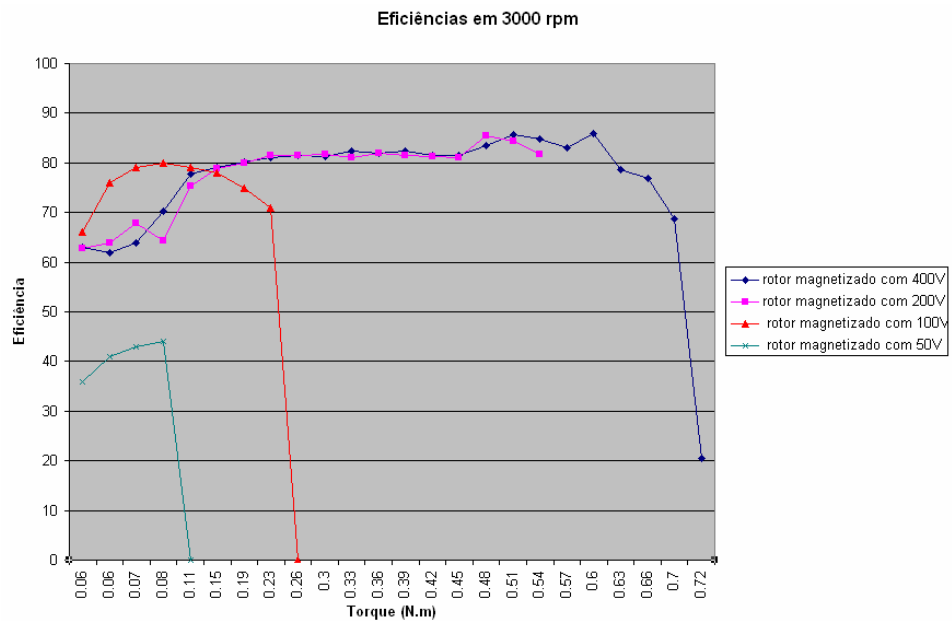


Figura 6.2 – Eficiência x Torque 3000 rpm.

O ponto de operação nominal deste motor é 0.3 N.m. Neste ponto, pelos resultados apresentados nos testes, quanto melhor a magnetização melhor é a eficiência do motor.

Observa-se pelos gráficos que o motor magnetizado com 12,5% da tensão da magnetizadora é muito ruim, além da baixa eficiência ele não chega nem a alcançar o ponto de operação. Como já explicado anteriormente, sua corrente aumenta muito devido à baixa tensão induzida pelo fluxo magnético do ímã, isto é, para um mesmo torque ele necessita de uma corrente bem maior que os outros rotores ,até que quando é alcançado o valor máximo permitido para o funcionamento do motor este pára de funcionar .

Nas figuras 6.3 a 6.6 vêem-se as formas de onda das correntes de entrada do motor no osciloscópio,com o rotor magnetizado com os diferentes níveis de tensão da magnetizadora apresentados no Capítulo 5. Todas as figuras dos osciloscópios são dos motores rodando em vazio a 3000 rpm.

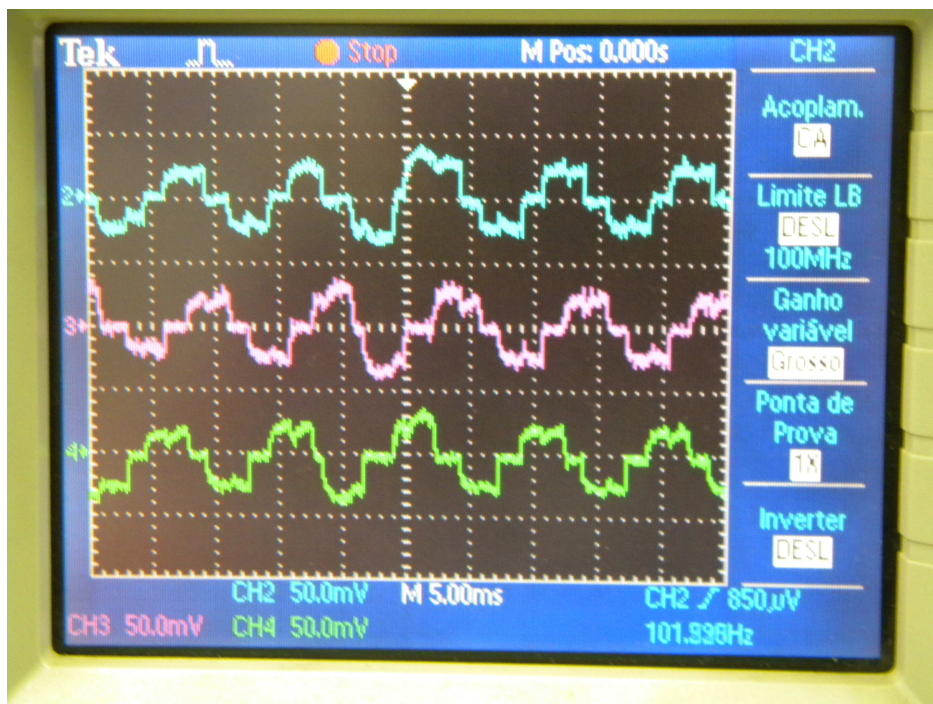


Figura 6.3 -Corrente do motor com rotor magnetizado com 50V

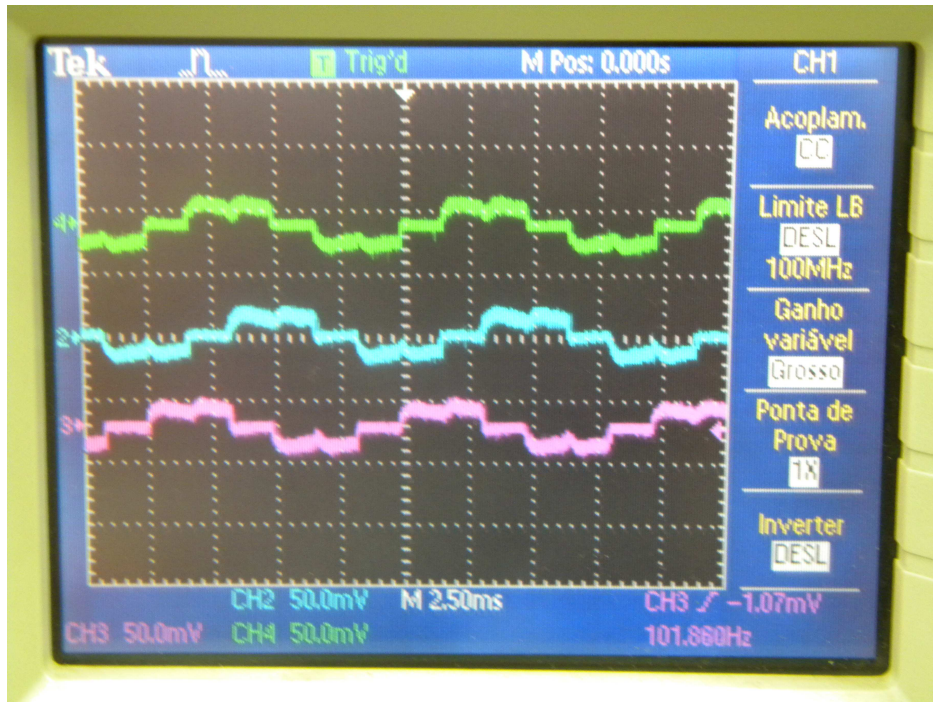


Figura 6.4 -Corrente do motor com rotor magnetizado com 100V.

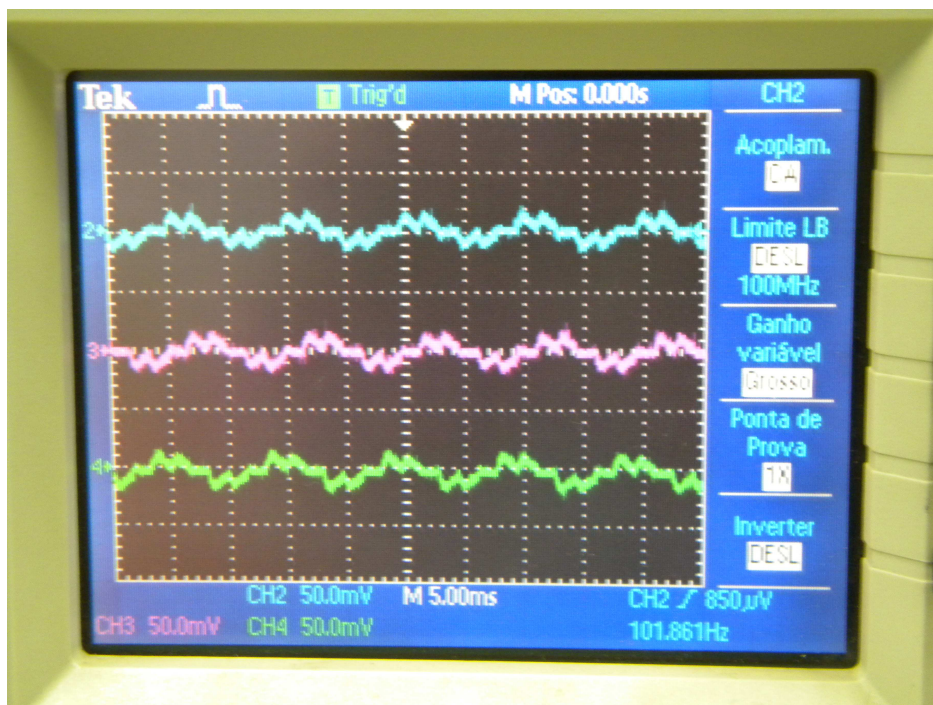


Figura 6.5 -Corrente do motor com rotor magnetizado com 200V.

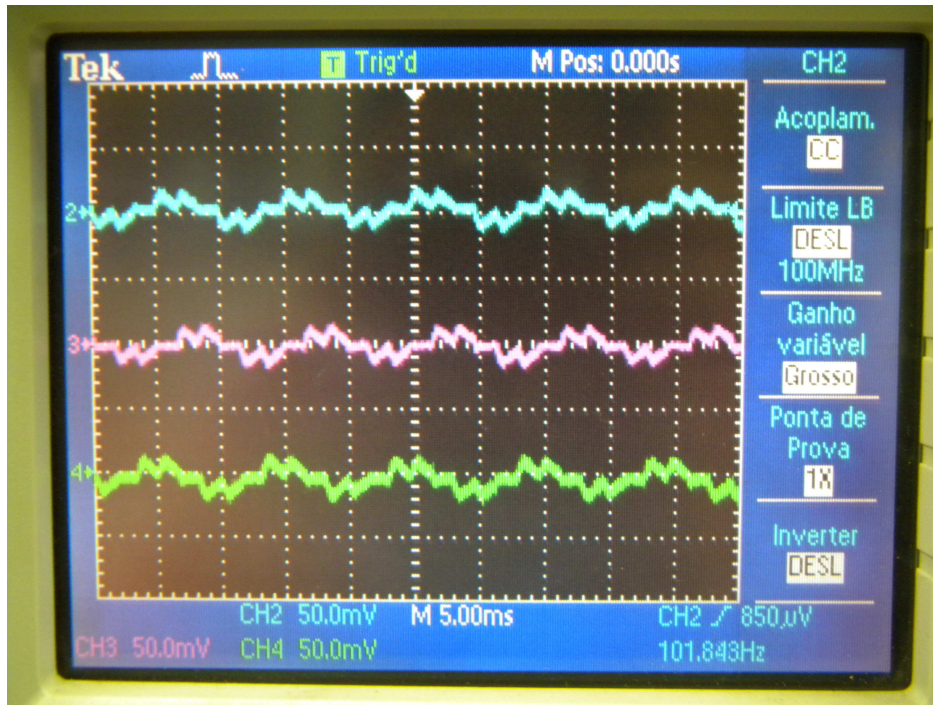


Figura 6.6 -Corrente do motor com rotor magnetizado com 400V.

O valor numérico das correntes na velocidade 3000 rpm na curva de torque medidas nos testes podem ser visualizadas nos gráficos da figura 6.7.

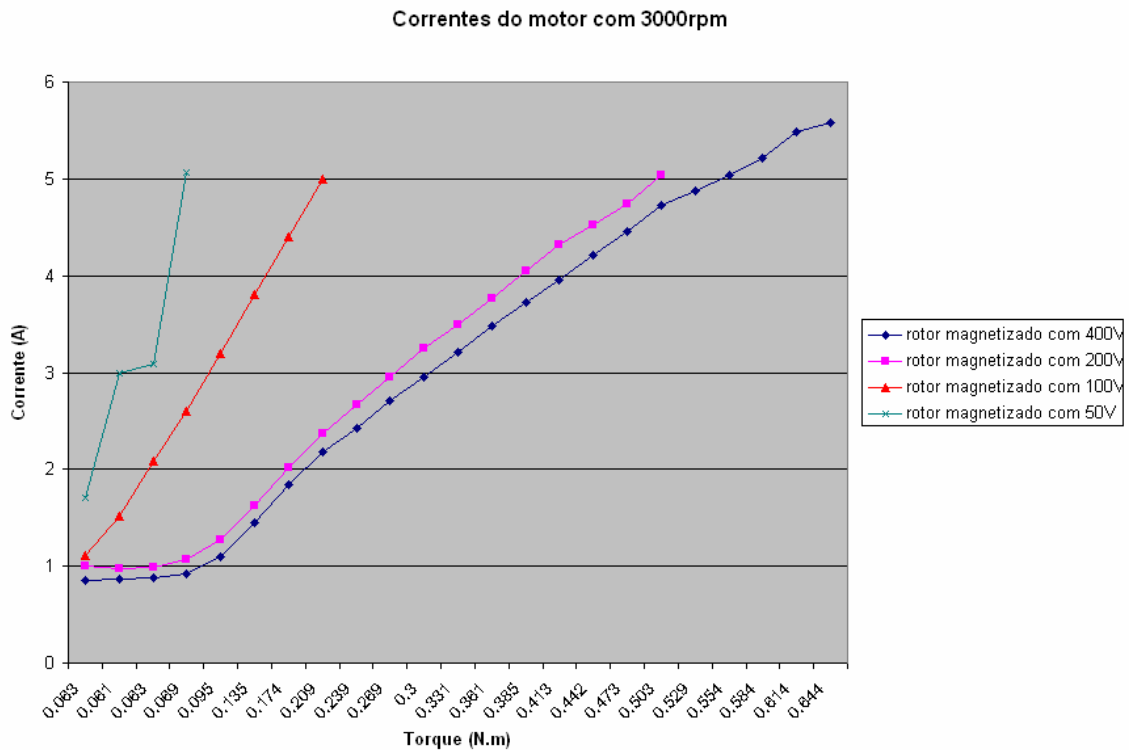


Figura 6.7 – Gráfico das Correntes x Torque na velocidade 3000 rpm.

Mostra-se pelos resultados que a magnetização influencia sobremaneira na eficiência, principalmente pela variação na corrente. Quanto maior a corrente maiores as perdas por efeito Joule. Os motores mal magnetizados não atendem aos requisitos do projeto.

Pode-se considerar que o circuito simplificado por fase do motor é o dado na figura 6.10.

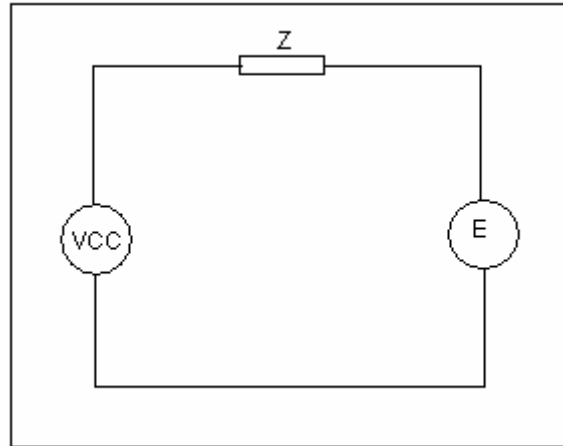


Figura 6.10 – Circuito equivalente simplificado.

Pode-se analisar os efeitos da corrente considerando o torque igual a  $T = (Ei)/\omega$ , equação [10], conforme seja diminuído o fluxo magnético do rotor, diminuí-se a tensão  $E$  que é a tensão induzida pelo fluxo magnético do rotor, assim, para um mesmo torque à velocidade constante, a corrente aumenta. Consegue-se notar isso pela Figura 6.7, que é o gráfico das correntes em função do torque.

Analisando o circuito equivalente tem-se que  $VCC - E = Z \cdot i$ , assim tem-se que  $VCC = Z \cdot i + E$ , quando se aumenta a corrente ao ponto que  $Z \cdot i + E$  fique maior que  $VCC$  o motor pára de funcionar, pois neste caso, tem-se um “gerador”, porém a corrente não volta para a fonte do controlador, sendo que isto desabilita o funcionamento do motor. Este é o ponto de corrente máxima, pode-se percebê-lo na Figura 6.7 também, o último valor de corrente de cada curva é o último valor adquirido pelo teste antes que o motor parasse de funcionar. Este valor é o valor máximo de corrente para o funcionamento do motor, no caso do presente trabalho, como já citado anteriormente, nota-se é próximo de 5 A.

## **7. Conclusão**

Diante dos resultados analisados nos capítulos 5 e 6 concluí-se então que a má magnetização implica uma menor eficiência associada a um aumento de corrente que prejudica completamente o funcionamento do motor.

Quanto mais bem magnetizado, maior a eficiência e menor a corrente associada. O rotor que melhor trabalha no ponto de operação, isto é, na carga nominal, foi o magnetizado com a máxima tensão e portanto o mais bem magnetizado.

Pode-se dizer que um rotor mal magnetizado não cumprirá os requisitos de funcionamento e não estará apto a operar no compressor para atingir as aplicações necessárias, sendo assim é necessário, no processo de produção garantir que a magnetização seja corretamente feita.

## 8. Referências Bibliográficas:

FARIA , R. N.; LIMA , L. F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais.** São Paulo, S.P., Editora Livraria da Física, 2005.

FERREIRA, E. A. F. **Estudo das Propriedades magnéticas e da microestrutura em ímãs permanentes à base de Pr-Fe-B-Co-Nb obtidos pelos processos HD e HDBR.** 2008. 140 f. Dissertação – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, SP.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria.** 2003.127 f. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GIERAS, J. F.; WING, M. **Permanent Magnet Motor Technology.** First Edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. 589p.

GONELLA, M. C. **Acionamento e Controle Sensorless para Motores Brushless DC Aplicados a Compressores Herméticos para Refrigeração Doméstica.** 2006. 115f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HENDERSHOT JUNIOR, J. R.; MILLER , T. J. E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors.** First Edition. New York. Oxford University Press, 1994.

JULIANI, A. D. P. **Análise do campo magnético de um motor de ímã permanente no rotor utilizando o método dos elementos finitos.** 2007. 136 f . Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KENJO, T; NAGAMORI, S. **Permanent-Magnet and Brushless DC Motors.** First Edition. New York:Oxford University Press, 1984, 194p.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent –Magnet and Reluctance Motor Drives.** First Edition . London : Oxford University Press, 1989. 207p.

MONTEIRO, J. R. B. A. **Estratégias de Acionamento e Controle em Máquinas CA de ímã Permanente com Fluxo Não Senoidal.** 1997. 120 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos.



MONTEIRO, J. R. B. A. **Transformação DQ Não Senoidal para Máquinas Síncronas com Ímã Permanente no Rotor**. 2002 .108 f. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

“ **Publicações – Balanço Energético Nacional**” disponível em [http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item.do?channelId=1432&pageId=4123](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=4123), site do Ministério das Minas e Energia, Acesso em Outubro de 2010.

TEIXEIRA, F. H. P. **Metodologia para Projeto, Construção e Ensaio em Máquinas Síncrona de Ímã Permanente – MSIP**. 2006. 103 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.