



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Desenvolvimento do Enrolamento Estatórico de um Motor de Relutância Variável

Nuno Miguel Fernandes Pinto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Automação e Electrónica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca

Covilhã, Outubro de 2010

Dissertação realizada sob orientação de
Professor Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca

Professor Associado do
Departamento de Engenharia Electromecânica da
UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Dedico este trabalho à minha família e à Karolina.

Resumo

O motor de Relutância Variável (MRVC) é um accionamento eléctrico não usual, que pode apresentar vantagens relativamente a outros existentes no actual mercado, nomeadamente graças à sua simplicidade de construção, baixo custo de fabrico, e apto para aplicações tolerantes a falhas. Sendo por isso importante dedicar tempo ao estudo deste tipo de motor, para que no futuro, se opte por aqueles que apresentem maior benefício para o género de aplicação.

Cientes desta realidade, o grupo de docentes ligados ao Centro de Sistemas e Accionamentos Eléctricos da Universidade da Beira Interior, têm desde há vários anos, apresentado diversos trabalhos desenvolvidos com esta temática.

Palavras-chave

Máquina de relutância variável comutada.

Análise por elementos finitos.

Redimensionamento.

Ciclo histerético.

Enrolamentos.

Reengenharia.

Abstract

The Switched Reluctance Motor (MRV) is an unusual electrical drive, which can provide advantages over other existing in the current market, especially thanks to its simple construction, low manufacturing cost, and capable to fault-tolerant applications. Is therefore important to devote time to studying this type of engine, so that in future, is chosen by those with the greatest benefit.

Aware of this reality, the teachers attached to the Center of Systems and Electrical Drives of the University of Beira Interior, have for several years, presented several papers developed on this theme.

Keywords

Switched reluctance machine.

Finite Element Analysis

Hysteresis cycle.

Reengineering.

Redesign.

Winding

Agradecimentos

Aos meus pais, aos meus avós, pelo amor, pela confiança depositada em mim, pela paciência. Estando sempre do meu lado.

No posso deixar de agradecer e colocar num lugar de destaque, o meu orientador científico Prof. Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca, pela sua compreensão, preciosa contribuição na estruturação e redacção científica da tese.

Ao meu padrinho, Mestre António João Pinto Pires pela ajuda sempre prestada ao longo desta Dissertação, pelo amigo em que se tornou, e pela ajuda na redacção da tese.

Ao Prof. Doutor Carlos Cabrita pelo incentivo, pelas suas sábias palavras de vida, pela ajuda científica prestada ao longo deste trabalho.

Agradeço especialmente a Karolina Koszalska, por me ter feito acreditar, além do mais por ter sido uma verdadeira amiga. Obrigado pela atenção, pela inspiração, pela paciência.

Aos meus verdadeiros amigos, por me apoiarem em todos os momentos bons e menos bons da minha vida.

Por fim a todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização do presente trabalho.

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Retrospectiva Histórica.....	2
1.2 Enquadramento.....	5
1.3 Objectivos.....	6
1.4 Estrutura da tese.....	6
Capítulo 2 – Princípio de Funcionamento	7
2.1 Introdução	8
2.2 Princípio de Funcionamento.....	9
2.1 Relação entre a indutância e posição do rotor	13
2.2 O binário do MRVC	16
Capítulo 3 – Metodologia para o cálculo da Curva de Magnetização	20
3.1 Introdução	21
3.2 Curva de Histerese	21
3.3 Metodologia para obtenção da curva de magnetização média do material	23
3.3.1 Introdução.....	23
3.3.2 Traçado experimental da curva de magnetização média do material ferromagnético da máquina.....	24
Capítulo 4 – Cálculo do novo enrolamento estatorico	34
4.1 Introdução	35
4.2 Modelo matemático	36
4.3 Curvas de consulta	38
4.4 Modo de operação	41
4.5 Especificações	42
4.6 Dimensionamento geométrico do enrolamento	42
4.6.1 Especificações do protótipo.....	50
Capítulo 5 – Construção e Ensaio do Protótipo	52
5.1 Apresentação de construção do enrolamento.....	53
5.1.1 Montagem das bobinas.....	53
5.1.2 Avaliação da continuidade dos enrolamentos	54
5.2 Caracterização experimental	56
5.3 Conclusão:.....	61
Capítulo 6 – Considerações Finais	62

6.1	Considerações finais.....	63
6.2	Trabalhos futuros.....	63
	Bbliografia.....	64
	Anexo - A.1.....	66
	Anexo - A.2.....	68
	Anexo - A.3.....	70

CAPÍTULO

1

Introdução

Introdução histórica do aparecimento do primeiro Motor de Relutância Variável Comutado. Apresentação de algumas aplicações deste motor. Motivação e estrutura da dissertação.

1.1 Retrospectiva Histórica

Em 1820 *H. C. Oersted* descobriu a interacção entre um íman permanente e a corrente eléctrica, a partir deste momento começaram a surgir alguns instrumentos que possibilitaram o conhecimento dos vários fenómenos físicos pelos quais se regem as acções electromecânicas. Com a aplicação directa na tracção de veículos de caminho-de-ferro a “*locomotiva eléctrica de Davidson*”, além do interesse técnico, é o primeiro veículo ferroviário precursor dos veículos de tracção eléctrica [1].



Figura 1.1– Capa do Jornal com a Invenção de Davidson [1].

No final da década de trinta do século dezanove, já os caminhos-de-ferro de tracção a vapor tinham uma forte divulgação, verificando-se que, enquanto nos veículos de primeira classe a viagem podia ser relativamente cómoda, nos veículos descobertos de terceira e quarta classe a viagem tinha todos os incómodos provocados pelo fumo e pelo vapor da locomotiva. Era, pois necessário encontrar um sistema de tracção menos incomodativo. O desenvolvimento científico e tecnológico, entretanto alcançado no sector electrotécnico, permitiu avaliar a utilização de máquinas eléctricas nos veículos de tracção ferroviários, o que tornaria o transporte mais cómodo relativamente à máquina a vapor.

Foi no mês de Outubro de 1840 que *Robert Davidson* (1804–1899), um escocês residente em *Aberdeen* começou a construir um pequeno veículo eléctrico (capaz de transportar duas pessoas), que exibiu ao público numa exposição de Mecânica na mesma cidade.

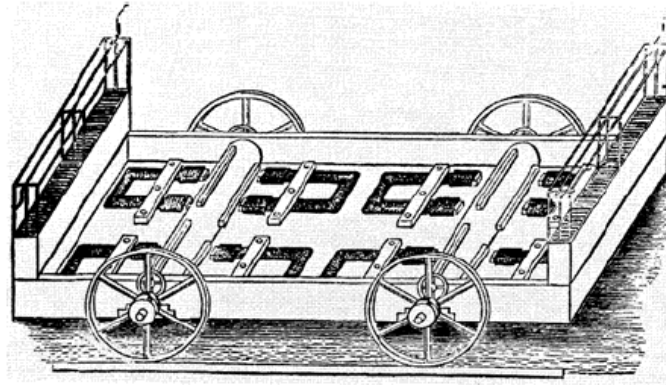


Figura 1.2 Pequeno veículo capaz de transportar duas pessoas [1].

Nos anos seguintes Davidson procurou o apoio da empresa *Edinburgh and Glasgow Railway*, que estava a completar a linha de caminho-de-ferro que iria fazer ligação entre duas cidades. Não tendo encontrado um apoio significativo, R. Davidson continuou a divulgar o seu veículo eléctrico por algumas salas de exposição. Em Setembro de 1842, Davidson apresentou uma locomotiva baptizada "*Galvani*", pesando cerca de seis toneladas, com 4,9 m de comprimento, transportando duas baterias nas extremidades, e sendo accionada por quatro motores eléctricos com dois electroímãs, e um cilindro rotórico em madeira com três barras de ferro encastradas na periferia.

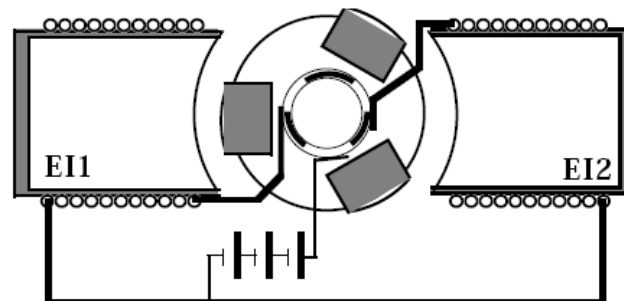


Figura 1.3 – Cilindro Rotórico com três barras de ferro encastradas [1].

No dia 22 de Setembro de 1842 a locomotiva eléctrica de *Davidson* atingiu uma velocidade de 6,4 km/h ao longo de uma distância de 2,4 km na linha de

Edimburgo–Glaskow. A fonte de alimentação era transportada pelo próprio veículo e composta por duas baterias constituídas, cada uma, por 20 elementos Zinco – Ferro mergulhadas num soluto de ácido. As placas podiam ser globalmente mergulhadas no electrólito com auxílio de um manípulo, variando dessa forma a tensão nos terminais da bateria.

Como se apresenta na Figura 1.3, o motor eléctrico utilizado era um motor de relutância (autocomutado) formado por um circuito magnético estatorico oco e por um circuito magnético rotórico constituído por três barras de ferro encastradas longitudinalmente num cilindro de madeira. O circuito eléctrico era formado por uma bobina de fio de cobre isolado com banda de algodão. A ligação dos electroímans à bateria era feita por intermédio de um comutador constituído por um cilindro de madeira montado no rotor e no qual estavam encastrados três segmentos de um anel de cobre, sobre esses segmentos estaria um condutor que fazia a ligação aos electroímans. Em cada rotação havia seis comutações entre os electroímans EI1 e EI2 — era um *motor de relutância autocomutado com seis passos*.

Os motores eléctricos transmitiam o movimento a um dos rodados através de um sistema redutor formado por uma corrente e por duas rodas dentadas. Graças à sua longevidade, *Robert Davidson*, ainda vivo à data da inauguração do Metropolitano de Londres (1890), pôde assistir a mais uma concretização da sua ideia de aproveitar o electromagnetismo para accionar um veículo capaz de rebocar carruagens efectuando um transporte cómodo dos passageiros.



Figura 1.4 – A locomotiva “Galvani” [1].

Efectivamente o motor de relutância variável comutado encontra-se em desenvolvimento há pouco tempo. Com o aparecimento da electrónica de potência, a dificuldade de comutação das fases foi minimizada, conferindo a esta máquina aplicabilidade nas mais diversas áreas, como se depreende de algumas das suas aplicações:

1. Aplicação em alguns electrodomésticos, como máquinas de lavar, aquecedores, ventiladores.
2. Equipamento de automóveis e Navios.
3. Aplicações em Robótica e Automação Industrial que requerem o controlo de velocidade e posição.
4. Aplicações na indústria Aeronáutica e Aeroespacial.
5. Em equipamentos médicos e odontológicos.

Analisando todas estas gamas de aplicações, fica evidente que a utilização do Motor de Relutância Variável Comutado, a seguir designado MRVC é vantajosa e continua crescendo em quantidade e diversidade, levando muitos autores a indicar o MRVC como um dos motores do futuro.

1.2 Enquadramento

Como é sabido, o Laboratório de Máquina Eléctricas e Electrónica de Potência da Universidade da Beira Interior, desde há mais de uma década, que tem contribuído para o desenvolvimento e compreensão dos accionamentos de relutância. Pelo que, este trabalho se enquadra, naturalmente, no percurso técnico-científico deste grupo de investigação do qual fazem parte orientador e orientando.

O tema da tese tem por base uma necessidade específica do laboratório, que consiste em dispor de um accionamento de relutância variável comutado, sem necessidade de recurso à utilização de um pouco prático conjunto de baterias associado ao accionamento prévio, que requeria uma alimentação a 24V DC.

Por motivos não só pedagógicos mas também monetários, optou-se por redimensionar a máquina existente, de modo a que o accionamento possa ser alimentado a partir da rede trifásica comercial, com recurso a uma ponte rectificadora trifásica e uma bateria de condensadores.

Simultaneamente à realização deste trabalho, que aborda, essencialmente, o projecto dos novos enrolamentos, foi realizado um outro, tendo como objectivo o projecto e construção da unidade de controlo.

1.3 Objectivos

Tendo em vista a necessidade que se apresentava, Este trabalho tem com objectivo o dimensionamento de um enrolamento, para o MRVC existente em laboratório, economicamente viável, de fácil ligação aos equipamentos existentes, ou seja, com uma relação tensão - corrente do mesmo tipo das disponibilizadas pelas fontes existentes, e readaptação a diferentes necessidades do laboratório.

1.4 Estrutura da tese

Esta dissertação é composta por seis capítulos, numerados de 1 a 6, e quatro anexos, designados respectivamente por A1, A2, A3. Assim sendo, além deste primeiro capítulo, no Capítulo 2 abordam-se os seguintes assuntos:

- ✓ Princípio de funcionamento do Motor de Relutância Variável Comutado e a sua constituição.
- ✓ A expressão do binário do motor e a relação entre a indutância e a posição relativa entre o rotor e o estator.

No capítulo 3:

- ✓ Uma pequena introdução aos métodos de análises das curvas de magnetização.
- ✓ Curvas de histerese.
- ✓ Aplicação de métodos computacionais.
- ✓ Análise magnética da Máquina de Relutância Variável Comutada.

No capítulo 4:

- ✓ A introdução ao modelo matemático
- ✓ Modo de operação do MRVC.
- ✓ Cálculo do novo enrolamento ao MRVC e as suas novas características.

No capítulo 5:

- ✓ A construção do novo enrolamento.
- ✓ Ensaio do mesmo

No capítulo 6 trata-se de algumas considerações finais, e de trabalhos a realizar no futuro.

CAPÍTULO

2

Princípio de Funcionamento

Análise ao princípio de funcionamento do motor de relutância variável comutado, como a sua constituição, a expressão do binário do motor e a relação entre a indutância e a posição relativa entre o rotor e o estator.

2.1 Introdução

O Motor de Relutância Variável Comutado (MRVC) esteve adormecido durante vários anos devido a inexistência de tecnologia possível para o seu correcto controlo. A dita reinvenção foi datada em 1969, quando o MRVC foi proposto para aplicações de velocidade variável, isto devido à existência de energia de baixo custo e devido à grande capacidade de comutação dos dispositivos existentes [2]. Importa salientar que o aparecimento de accionamentos de velocidade variável se deve à existência de aplicações com as seguintes necessidades:

- 1 – Poupança de energia e redução dos custos de exploração.
- 2 – Controlo de velocidade ou de posição.
- 3 – Suavidade dos regimes transitórios.

Este tipo de máquina tem vantagens, nomeadamente sobre as máquinas de corrente alternada, devido à ausência de enrolamentos e de ímanes permanentes no rotor, o MRVC é um motor robusto, de construção fácil e económica, como se mostra na Figura 2.1 [3]. Assim sendo, pode funcionar bem a alta velocidade e é apropriado para aplicações em alta temperatura e ambientes perigosos. Além disso, devido a sua construção, pode ser bastante rentável se produzido em massa [4,5,6].

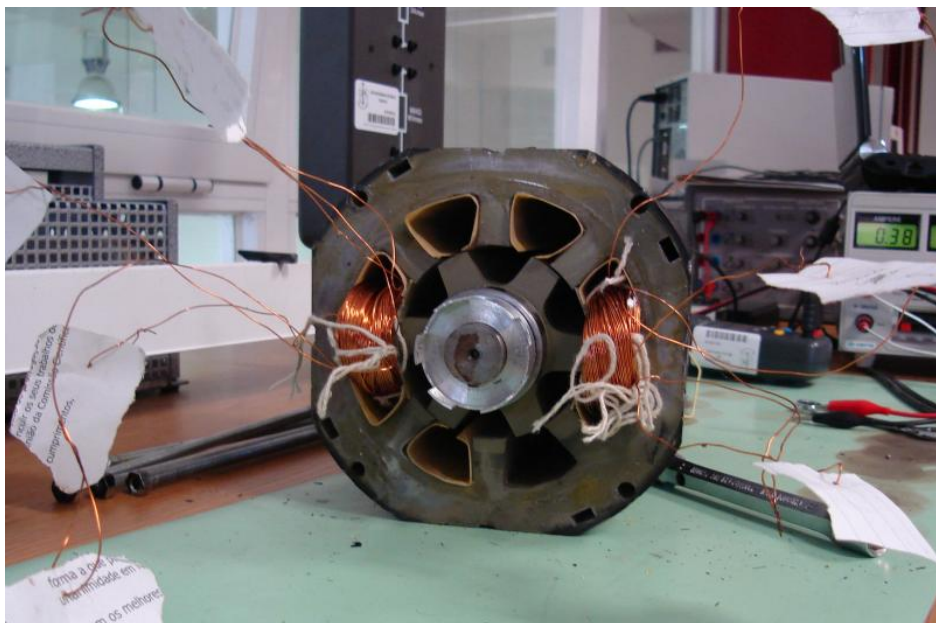


Figura 2.1 – Aspecto interior de um MRVC 8/6.

A sua constituição de pólos salientes duplos e a comutação entre fases, provocam uma ondulação considerável do binário electromagnético, principalmente a baixas velocidades. Este fenómeno pode ser mitigado através do aperfeiçoamento da sua própria construção, ou com recurso a estratégias de controlo de modulação de corrente. Paralelamente, o MRVC possui um momento de inércia bastante reduzido, apresentando, por isso, um binário de arranque elevado sem necessitar de correntes de arranque muito elevadas. Refira-se ainda que, um binário desenvolvido para cada uma das fases independente do sentido da corrente nos seus enrolamentos, resulta num circuito de controlo bastante simples [7].

Importa salientar que o MRVC se apresenta com solução de accionamento tolerante a falhas, uma vez que o controlo das diversas fases é feito de um modo independente. Assim, caso exista uma falha numa das fases, é possível manter o MRVC em funcionamento. [7].

O desenvolvimento da tecnologia de controlo no Motor de Relutância Variável Comutado tem conduzido ao incremento da investigação na análise e medição de parâmetros do motor, sendo estes usados para otimizar o controlador. Recentemente, o MRVC começa a ser encarado como alternativa séria às máquinas AC e DC, isto graças à simplicidade e robustez da sua construção, sem escovas e sem enrolamentos no rotor, à baixa inércia e binário elevado. O MRVC é utilizado, actualmente, em dois tipos de aplicação:

- 1) Aplicação em sistemas de velocidade variável, utilizados para fazer a variação do binário em motores de baixa e média potencia.
- 2) Aplicação em unidades de posicionamento, onde o movimento incremental, a velocidade e binário são geridos no controlo dos pequenos MRVC [8].

2.2 Princípio de Funcionamento

O motor de relutância variável possui, um elemento fixo, estator, onde estão “montados” os enrolamentos da máquina, e um elemento móvel, rotor, cuja geometria permite variar a indutância dos enrolamentos do estator. Essa indutância varia entre um valor mínimo e um valor máximo dependendo da posição do rotor. [9].

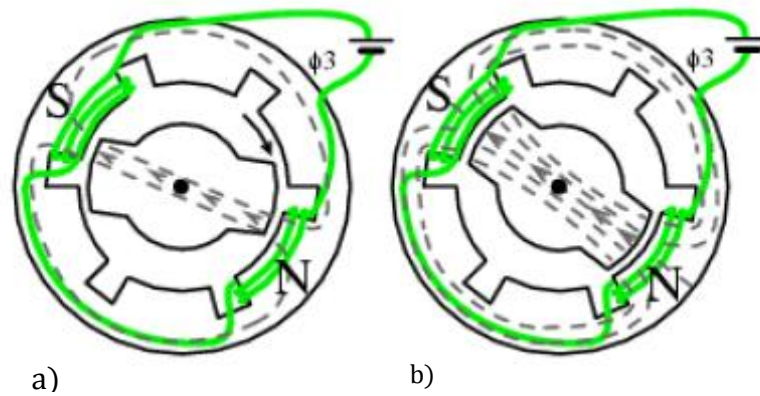


Figura 2.2 - a) Relutância máxima, b) Relutância mínima [10].

No MRVC a alimentação das fases é comutada de forma sequencial, movendo-se o rotor de modo a maximizar a indutância da fase alimentada, como se pode verificar na Figura 2.3. O fluxo magnético procura o caminho de menor relutância, o análogo magnético da resistência eléctrica. É com base neste princípio que as máquinas de relutância, entre as quais se encontra o MRVC, funcionam.

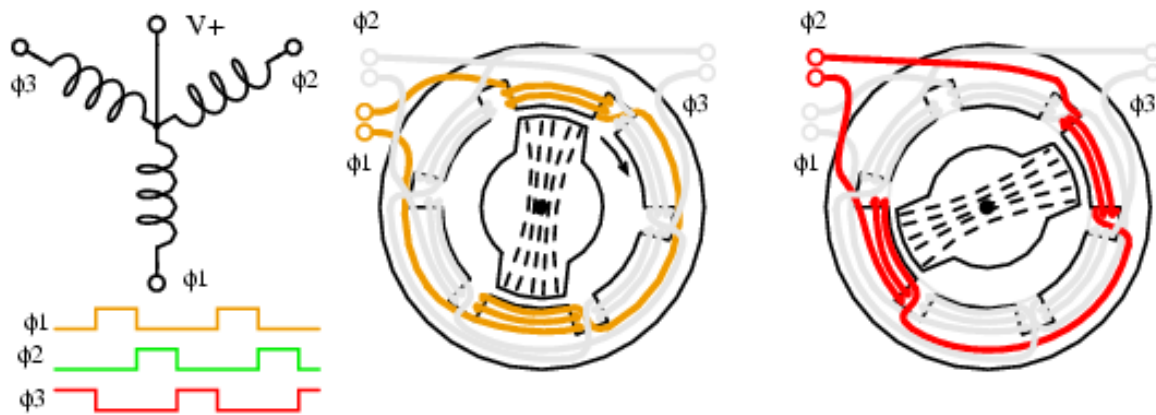


Figura 2.3 - Representação da mudança de fases [10].

Assim é necessário que, no dimensionamento do MRVC, seja assegurado que exista sempre uma fase do estator para a qual uma variação da posição do rotor implique uma variação da indutância [11,12]. Sendo a indutância máxima atingida quando é atingida a relutância mínima.

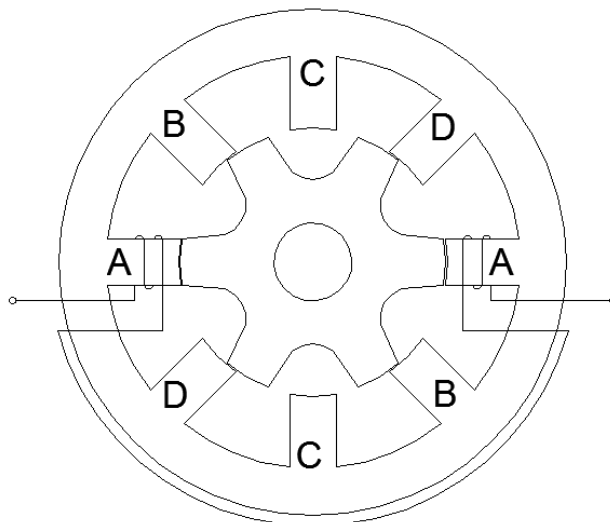


Figura 2.4 - MRV Comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor.

Para tal é necessário que o MRVC tenha um número de pólos no estator (N_s) diferente do número de pólos no rotor (N_r). Que o arco polar do estator seja aproximadamente igual ao arco polar do rotor, evitando-se desta forma a existência de zonas de indutância constantes, e dotando o MRVC de capacidade de auto arranque para qualquer posição e em qualquer sentido [9].

No MRVC mais comum, sobre cada pólo está colocado uma bobina. O enrolamento de uma fase é obtida através da interligação de duas bobinas colocadas em pólos diametralmente opostos, podendo a esta interligação agrupar as bobinas em série ou em paralelo depende do tipo que máquina que se pretende. A ligação da máquina deve ter o cuidado de garantir que os fluxos criados pelas bobinas sejam aditivos.

A produção de binário do MRVC depende da magnitude da corrente do estator, (independentemente da direcção). Um impulso de binário positivo é produzido quando a corrente flui na fase excitada e a indutância dessa mesma está a aumentar. A contribuição negativa do binário é evitada se a corrente se extinguir antes de a indutância começar a diminuir novamente. A velocidade do rotor pode ser alterada de vários modos, todos eles apresentando como consequência a variação da frequência de excitação das diferentes fases [13].

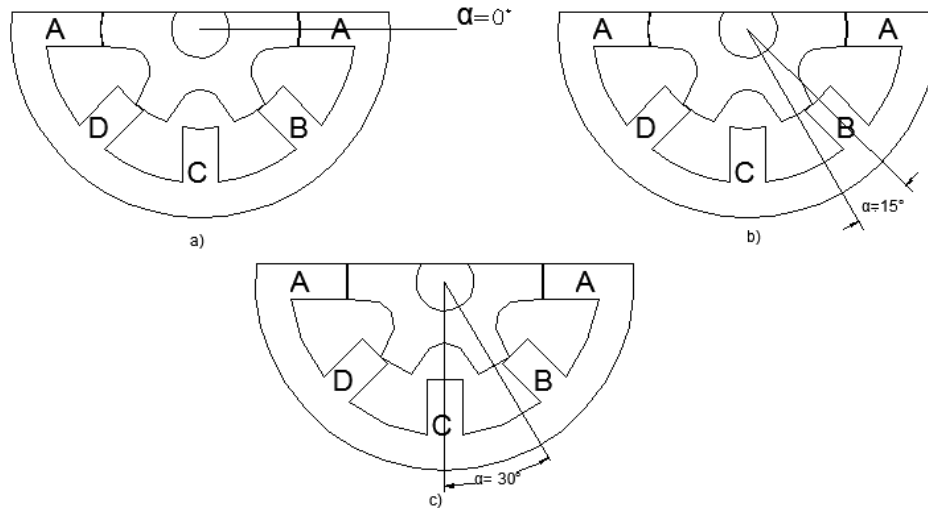


Figura 2.5 - (a) Fase A na posição alinhada, (b) Fase B e D na posição meio alinhada, (c) Fase C na posição desalinhada.

Na Figura 2.5, a máquina apresenta-se com a fase A alinhada, a posição do rotor é de 15° em relação à fase B e a fase B encontra-se a meio caminho entre a posição não alinhada e a posição alinhada. A posição do rotor em relação a fase C, que está em quadratura com a fase A, é de 30° . Assim, a fase C está em na posição não alinhada [14].

<i>Posição alinhada</i>	<i>Posição desalinhada</i>
$\theta = 0, 180^\circ$	$\theta = \pm 90^\circ$
Máxima Indutância	Mínima Indutância
Circuito magnético sujeito á saturação	Circuito magnético sem saturação
Estado de equilíbrio estável sem produção de binário	Estado de equilíbrio instável sem produção de binário

Quadro 2.1 - Propriedades das posições alinhada e desalinhada [14].

2.1 Relação entre a indutância e posição do rotor

Sendo, como referido, o MRVC composto por pólos salientes, a distância entre os pólos estatóricos e rotóricos pode ser alterada pelo movimento do rotor. Consequentemente, esse movimento de rotação provoca uma variação da relutância no caminho do fluxo magnético, logo, uma variação da indutância.

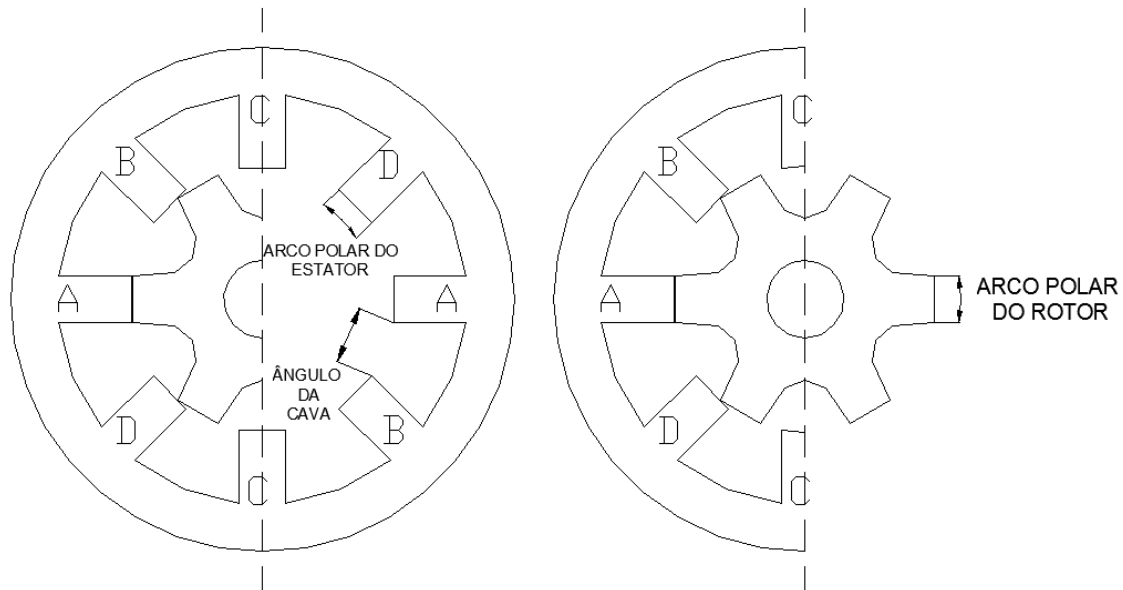


Figura 2.6 - Apresentação dos Arcos Polares do MRVC.

Simplificando, a curva da indutância em função da posição do rotor pode ser aproximada à forma representada na Figura 2.7, onde se demonstra que, para a posição relativa entre um pólo rotórico e um pólo estatorico de uma fase, θ , existem quatro zonas distintas de indutância de fase.

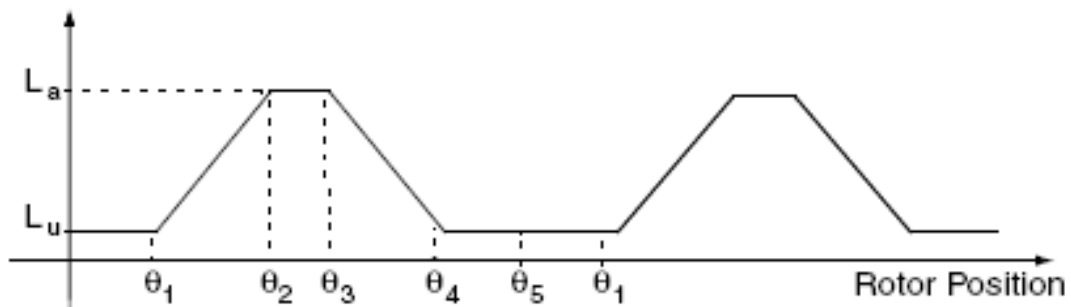


Figura 2.7 - Derivação de indutância vs posição do rotor através dos arcos do rotor e estator para um MRVC, perfil da indutância [11].

- Zona 1. De 0 a θ_1 ou de θ_4 a θ_5 . Esta zona determina o valor mínimo de indutância. Os pólos do estator e do rotor não se sobrepõem nesta região, o fluxo é basicamente determinado pelo caminho de ar, possibilitando assim a mínima indutância, e tornando-se esta quase constante. Assim nestas regiões não é possível a produção de binário (a indutância nesta região é conhecida como indutância desalinhada).
- Zona 2. De θ_1 a θ_2 . Inicialmente esta região tem uma indutância mínima. À medida que os pólos do estator e do rotor se vão sobrepondo, ocorre um acréscimo linear da indutância em função da posição angular do rotor, até que a sobreposição dos pólos seja total e a indutância máxima seja atingida. Neste intervalo de posições observa-se uma indutância crescente com a variação da posição e conseqüentemente a possibilidade da fase desenvolver binário motor.
- Zona 3. De θ_2 a θ_3 . Durante esta etapa, a circulação do rotor não altera a sobreposição total em relação ao estator, não alterando o caminho do fluxo existente. Assim sendo, a indutância é máxima e constante, esta indutância é conhecida como indutância alinhada. Como a indutância é constante, facilmente se conclui não ser possível a produção de binário nesta região.
- Zona 4. De θ_3 a θ_4 . Nesta zona a sobreposição dos pólos deixa de ser completa e começa a afastar-se tanto quanto a posição do rotor. Sendo o valor da indutância decrescente até que se atinja o mínimo, o que contribui para uma produção de binário contrário ao movimento do rotor.

Como é sabido, o movimento de rotação obtém-se pela excitação sucessiva das fases, estando associado à alimentação de uma fase um deslocamento angular, denominado por ângulo que passo, expresso por:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m N_r} \quad (2.1)$$

onde N_r é o número de fases do rotor e m o número de fases do estator, que normalmente é metade do número de pólos do estator N_s .

Para se obter uma variação máxima de indutância com a posição do rotor, deverá verificar-se a seguinte relação [15]:

$$\beta_s + \beta_r < \frac{2\pi}{N_r} \quad (2.2)$$

onde β_S e β_R representam, respectivamente, os arcos do estator e do rotor, sendo que o arco polar do rotor deve ser superior ao arco polar do estator. Na realidade os arcos polares do rotor e do estator são aproximadamente iguais devido a alguns factores que influenciam o bom funcionamento do MRVC, tais como:

1. Arcos polares de grande dimensão, maximizam a indutância e o fluxo encadeado, sendo a relutância neste alinhamento muito pequena.
2. Arcos polares de pequena dimensão, minimizam a indutância e o fluxo encadeado, sendo a relutância neste alinhamento muito pequena.

O cálculo óptimo da relação entre os arcos polares pode ser efectuado através do denominado triângulo de dimensionamento, como o que se apresenta na Figura 2.8, onde se sintetizam as seguintes condições que devem estar presentes no cálculo dos arcos polares, para um correcto funcionamento do MRVC [15].

- 1) A zona de binário efectivo é aproximadamente igual ao menor dos arcos polares [9].
- 2) O arco polar menor deve ser maior que o ângulo das cavas (zona da relutância máxima), para que se evitem zonas em que o motor não têm binário de arranque [9].

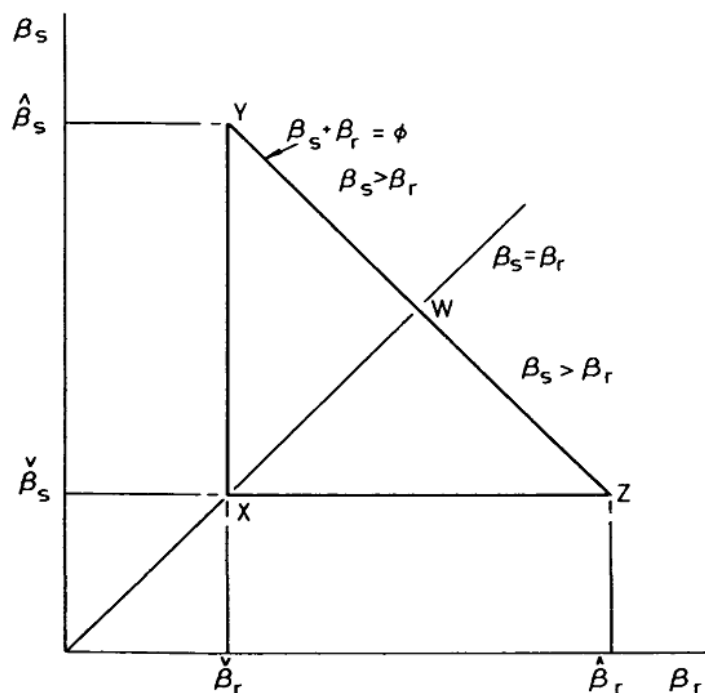


Figura 2.8 – Representação do triângulo de dimensionamento [15].

2.2 O binário do MRVC

O desenvolvimento da força/binário com base no princípio da minimização da relutância é facilmente perceptível analisando a conversão de energia numa dada bobina.

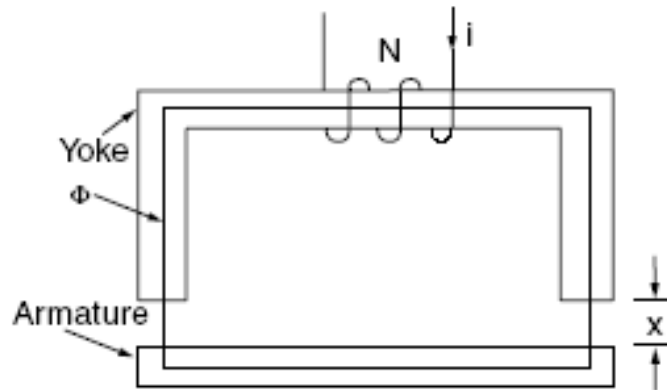


Figura 2.9 – Representação de uma bobina [11].

Assim, quando uma bobina de N espiras, como a que se apresenta na Figura 2.9, é percorrida por uma corrente de excitação i , estabelece-se, por indução, um fluxo Φ . A relação entre o fluxo e a força magnetomotriz, fmm, encontra-se representada no gráfico da Figura 2.10 para dois valores de entreferro, x_1 e x_2 , onde $x_1 > x_2$. O fluxo e a força magnetomotriz para x_1 é linear devido ao facto de a relutância do entreferro ser dominante, a que se associa um menor fluxo no circuito magnético.

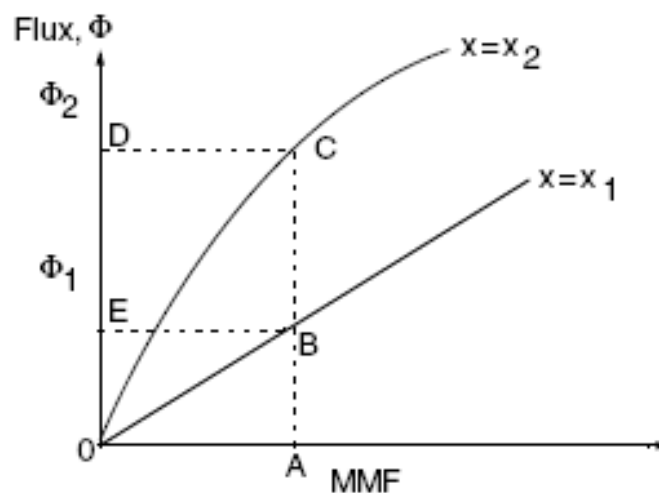


Figura 2.10 - Fluxo vs. f.m.m. e suas características [11].

Considerando a energia eléctrica entregue à bobina, obtém-se:

$$W_e = \int U i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int Ni d\Phi = \int FMM d\Phi \quad (2.3)$$

onde W_e é a energia eléctrica e U é a tensão aplicada à bobina, .

Do balanço energético, e desprezando as perdas por efeito de Joule no fio da bobina, resulta que a energia entregue à bobina, W_e é igual à soma da energia guardada na bobina, W_f , com a energia convertida em trabalho mecânico, W_m .

Assim:

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.4)$$

Quando não existe trabalho mecânico, no caso de a armadura partir da posição x_1 , a energia armazenada é igual à energia eléctrica de entrada dada pela equação (2.3), correspondendo à área $OBEO$ na Figura 2.10. O complemento da energia armazenada no campo magnético, expressa por coenergia, é dada pela área $OBAO$ na Figura 2.10, matematicamente expresso como $\int \Phi \partial F$ da mesma forma, para a posição x_2 da armadura, a energia de campo corresponde à área $OCDO$ e a coenergia é dada pela área $OCAO$. Para mudanças incrementais pode-se escrever da seguinte forma:

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W_m \quad (2.5)$$

Considerando uma excitação constante F_1 , representada pelo ponto de operação A na Figura 2.10, as várias energias são derivadas como:

$$\delta W_f = \int U i dt|_{x=x_2} - \int U i dt|_{x=x_1} \quad (2.6)$$

$$\delta W_f = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} F_1 \partial \Phi = F_1(\Phi_2 - \Phi_1) = \text{area}(BCDEB) \quad (2.7)$$

$$\delta W_f = W_f|_{x=x_2} - W_f|_{x=x_1} = \text{area}(OCDO) - \text{area}(OBEO) \quad (2.8)$$

Usando as equações (2.5) e (2.8), a energia mecânica incremental é a derivada de:

$$\delta W_m = \delta W_e - \delta W_f = \text{area}(OBCO) \quad (2.9)$$

Esta é a área entre as duas curvas de uma determinada força magnetomotriz. No caso da máquina rotativa, a energia mecânica elementar em termos de binário electromagnético e mudança de posição do rotor é escrito como:

$$W_m = T_e \delta \theta \quad (2.10)$$

Onde T_e é o binário electromagnético e $\delta \theta$ é o deslocamento angular do rotor.

Por isso o binário electromagnético é dado pela expressão:

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} \quad (2.11)$$

No caso de excitação constante (quando a FMM é constante), o trabalho mecânico incremental realizado é igual à taxa de variação da coenergia, W'_f . Assim, obtém-se:

$$\delta W_m = \delta W'_f \quad (2.12)$$

sendo,

$$W'_f = \int \Phi \partial F = \int \Phi \partial (Ni) = \int (N\Phi) \partial i = \int \Psi(\theta, i) \partial i = \int L(\theta, i) i \partial i \quad (2.13)$$

Onde L , a indutância, e Ψ , o fluxo encadeado, são funções da posição do rotor e da corrente. Esta variação da coenergia ocorre entre duas posições do rotor, θ_2 e θ_1 . Então o binário no entreferro, em termos da coenergia, apresenta-se como uma função da posição e da corrente:

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} = \frac{\delta W'_f}{\delta \theta} = \frac{\delta W'_f(i, \theta)}{\delta \theta} \Big|_{i=\text{constante}} \quad (2.14)$$

Se a taxa de variação da indutância for linear, relativamente à posição do rotor, para um determinado valor constante de corrente, o binário pode ser obtido como:

$$T_e = \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{i^2}{2} \quad (2.15)$$

Onde

$$\frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \Big|_{i=\text{constante}} \quad (2.16)$$

A indutância diferencial pode ser considerada uma constante de binário expressa em N. m/A². É importante realçar que a indutância diferencial não é uma constante de facto, variando continuamente. Resultando que, para o MRVC não é possível definir um circuito equivalente, contrariamente ao que acontece para as máquinas DC e AC clássicas [11].

CAPÍTULO

3

Metodologia para o cálculo da curva de magnetização

Neste capítulo é realizada uma breve introdução aos métodos de análises das curvas de magnetização, curvas de histerese, aplicação de métodos computacionais. Análise magnética da Máquina de Relutância Variável Comutada.

3.1 Introdução

A análise do MRVC é bastante complicada, quando comparada com a análise dos motores AC/DC, devido à não linearidade da região de operação. A não linearidade resulta dos seguintes factores:

- a) A característica de magnetização (B-H) do material magnético é não linear [13].
- b) A dependência do fluxo encadeado na fase relativamente à posição do rotor e à corrente magnetizante, enquanto em outras máquinas depende somente da corrente magnetizante [13].

Assim, a análise do funcionamento do MRVC baseia-se numa caracterização pormenorizada da relação existente entre o fluxo ligado por uma fase, a respectiva corrente de fase, e a posição rotórica. As curvas caracterizadoras desta interdependência são denominadas de curvas de magnetização. Podendo ser calculadas com base em programas de elementos finitos, desde que se conheça a característica de magnetização do material ferromagnético, ou de forma experimental para máquinas já construídas [16].

3.2 Curva de Histerese

Sabendo que a permeabilidade magnética (μ) dos materiais magnéticos não é constante, mas sim uma função de H (campo magnético), a expressão $B = \mu H$, não pode ser calculada, devendo, para cada tipo de material, ser obtida experimentalmente.

Todo o material ferro magnético, após ter sido submetido a um processo de magnetização, quando retirado da influência do campo magnético externo, não retorna ao seu estado original. Considere-se uma qualquer amostra submetida ao efeito de um campo magnético de intensidade suficiente para que a amostra se encontre saturada (ponto 1 da Figura 3.1), quando o campo magnético é removido, o caminho de 1 a 2 representa o que irá ocorrer com a curva BH . A ordenada no ponto 2 é denominada de magnetismo residual (M_r). Se a amostra for, novamente, sujeita à influência campo magnético positivo crescente, a relação entre B e H segue a trajectória 2-3-1. Para que o fluxo magnético no material seja tornado nulo

é necessário submeter a amostra a uma intensidade de campo magnético de sentido contrário, denominado de campo coercivo – H_c (ponto 4). Um campo magnético de intensidade elevada, mas com sentido oposto “negativo” produz saturação na direcção oposta (ponto 5). Invertendo-se a força magnetizante tem-se a trajectória 5-1.

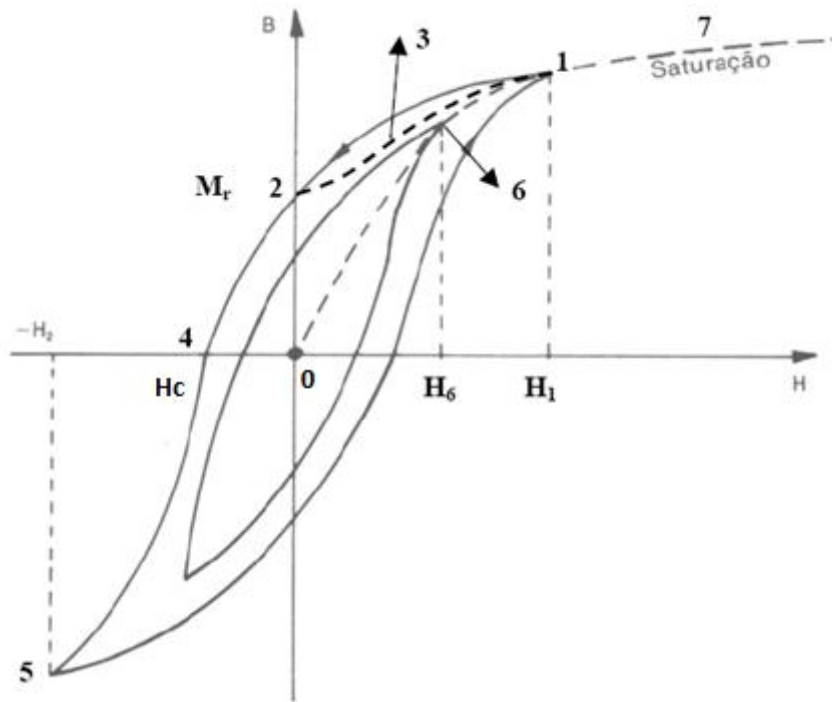


Figura 3.1 – Laço de Histerese.

3.3 Metodologia para obtenção da curva de magnetização média do material

3.3.1 Introdução

Desde que J.C. Maxwell anunciou as suas equações em 1873, uma enorme quantidade de trabalho tem sido realizada na obtenção de soluções de problemas de campo electromagnético. Antes da década de 1970, a solução dos problemas do campo electromagnético tem sido geralmente baseada em técnicas analíticas e seguindo algumas analogias. É necessário fazer algumas simplificações á geometria para determinados problemas electromagnéticos. A evolução dos computadores, deu origem a uma nova revolução no cálculo de campos eléctricos e magnéticos, possibilitando uma análise computacional de referidos campos.

Este método de análise, denominado por Análise por Elementos Finitos (FEA), complementa a mistura da teoria electromagnética, com a matemática e análise numérica, as quais fornecem os meios que permitem resolver problemas práticos do campo magnético com precisão e flexibilidade que não poderia ser obtido por meio de métodos analíticos.

Para uma perfeita análise ao problema podíamos utilizar um modelo 3D para representar a geometria do MRVC a ser analisado, sendo este o caminho mais natural para representar qualquer tipo de motor. No entanto, geralmente os modelos 3D são mais difíceis de produzir do que os modelos 2D e requerem muito mais tempo de processamento computacional. Uma vez que o MRVC apresenta uma simetria electromagnética ao longo do eixo, os parâmetros magnéticos de um MRVC podem ser obtidos através de uma análise em 2D sem perda considerável de precisão. Portanto, na dissertação a análise computacional é analisada à secção transversal do MRVC para a obtenção dos parâmetros magnéticos.

No entanto, a grande maioria das soluções computacionais existentes para análise de problemas electromagnéticos com base em elementos finitos não utiliza a curva de histerese, mas sim a denominada curva de magnetização média, representada na Figura 3.1 pelo troço 0-6-1.

3.3.2 Traçado experimental da curva de magnetização média do material ferromagnético da máquina

Analisando o circuito de uma fase do motor em estudo, sendo esta composta por dois pólos, diametralmente opostos, ligados entre si em série, tal como se pode observar na Figura 2.4, obtêm-se a seguinte equação de malha:

$$U = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.1)$$

O traçado experimental da curva de magnetização média requereu a construção de enrolamentos de ensaio. Visto que estes enrolamentos apenas serviram para encontrar a curva de magnetização do material, estes foram dimensionados de forma pouco cuidada, partindo da análise ao enrolamento original do MRVC. Assim, o enrolamento original apresentava as seguintes características:

Cada bobina, constituída por condutor de 3mm de diâmetro, possuía 14 espiras, e um valor de pico, para a corrente, estimado em 110 A. Uma vez que:

$$J = \frac{I_1}{S_1} \quad (3.2)$$

$$S_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \quad (3.3)$$

$$S_1 = \frac{\pi(3)^2}{4} = 7,068 \times 10^{-6} mm^2 \quad (3.4)$$

$$J = \frac{110}{7,068 \times 10^{-6}} = 15,563 \times 10^6 A/m^2 \quad (3.5)$$

$$ST_1 = espiras \times S_1 = 14 \times 7,068 \times 10^{-6} = 98,96 \times 10^{-6} mm^2 \quad (3.6)$$

Sendo ST_1 a área ocupada pelo enrolamento original do motor em estudo.

O enrolamento de ensaio foi concebido para ser facilmente alimentado, ou seja, um enrolamento que necessite de uma intensidade de corrente reduzida, ainda que para tal seja necessário um valor de tensão superior. Assim, dimensionou-se um

enrolamento com base num condutor de 0,5mm de diâmetro, existente em laboratório. Assim, considerando a nova secção obtém-se:

$$S_2 = \frac{\pi(0,5)^2}{4} = 0,1963 \times 10^{-6} mm^2 \quad (3.7)$$

$$I_2 = J \times S_2 = 15,563 \times 0,1963 \times 10^{-6} = 3,056 A \quad (3.8)$$

$$ST_2 = N_2 \times S_2 < ST_1 \quad (3.9)$$

$$98,96 \times 10^{-6} = N_2 \times 0,1963 \times 10^{-6} \Leftrightarrow N_2 = 504 \text{ espiras} \quad (3.10)$$

Uma vez que no ensaio, para obtenção da curvas de histerese, e posteriormente, da curva de magnetização, se alimentará um enrolamento com uma tensão alternada sinusoidal, obtendo-se o fluxo no núcleo com base na tensão induzida num segundo enrolamento bobinado nas mesmas saliências polares estatóricas, optou-se por bobinar duas saliências polares, diametralmente opostas, com dois enrolamentos com 200 espiras. Com os quatro enrolamentos construíram-se duas bobinas de 400 espiras cada.

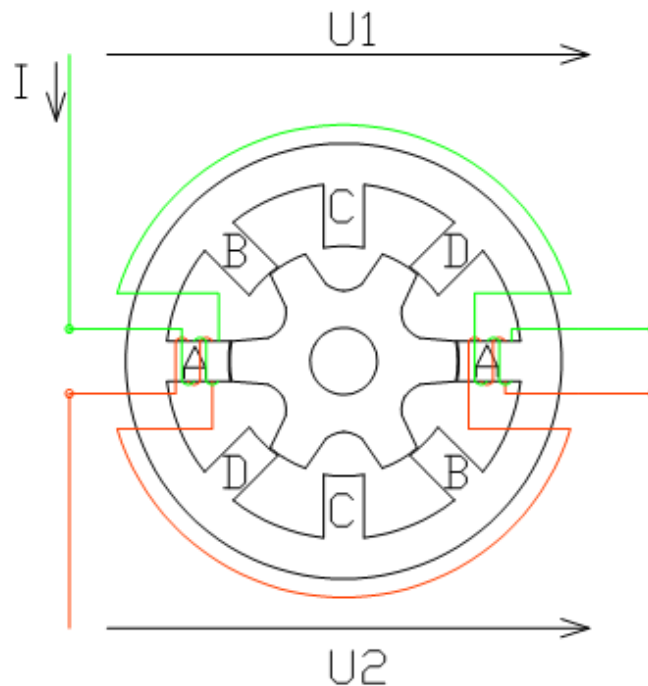


Figura 3.2- Representação da ligação de ensaio.

3.3.2.1 Rotor bloqueado teste AC

Com o rotor bloqueado de forma a garantir o alinhamento das saliências polares onde se colocaram as bobinas de teste, alimentou-se uma das bobinas de 400 espiras com uma tensão alternada sinusoidal, de valor eficaz ajustável e 50 Hz de frequência. Desta forma foram efectuados ensaios considerando diferentes valores eficazes de corrente no enrolamento 1, para garantir diferentes níveis de saturação magnética.

Para cada situação, as formas de onda de corrente no enrolamento 1 e tensão induzida no enrolamento 2, registadas através de um sistema de aquisição de dados, permitem traçar a curva de histerese, sendo que o valor do fluxo encadeado é obtido por integração uma vez que:

$$\Psi = \int U_2 dt \quad (3.11)$$

Importa salientar que as curvas de histerese obtidas são do tipo $\Psi = f(I)$, diferente do exposto em §3.2, no entanto convém salientar que:

$$\Psi = \alpha \Phi \quad (3.12)$$

$$H = \alpha I \quad (3.13)$$

Nas figuras seguintes apresentam-se algumas das formas de onda obtidas, representativas de diferentes níveis de saturação magnética do núcleo.

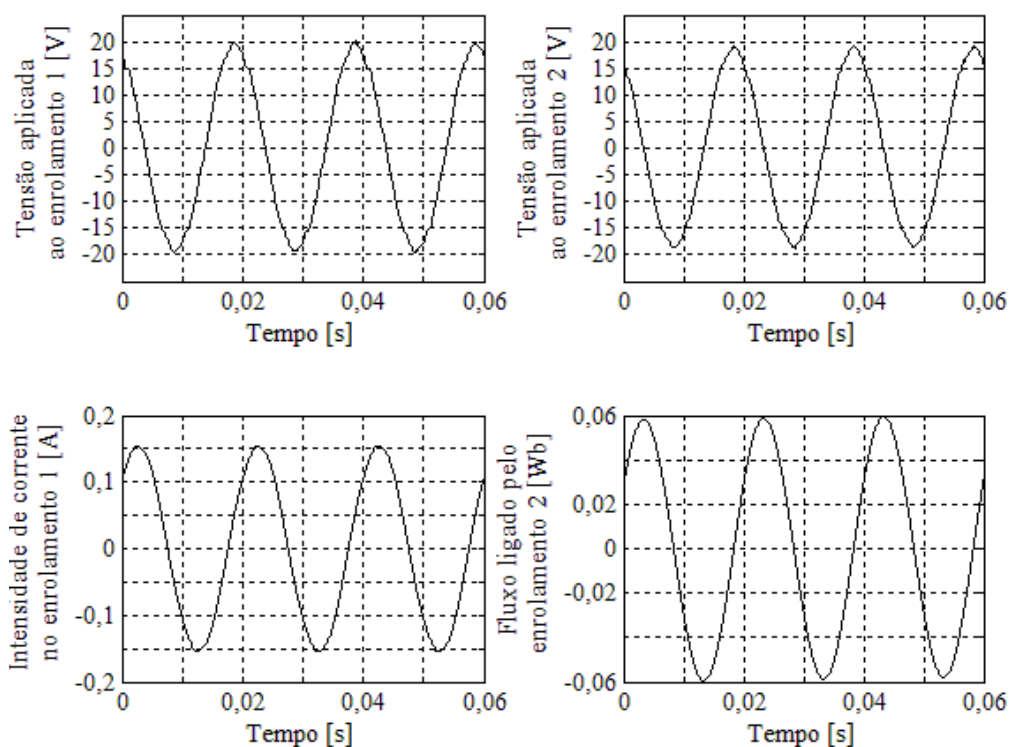


Figura 3.3 – Representação dos vários valores de entrada e do fluxo encadeado. para o ensaio de $I=0,15$ A.

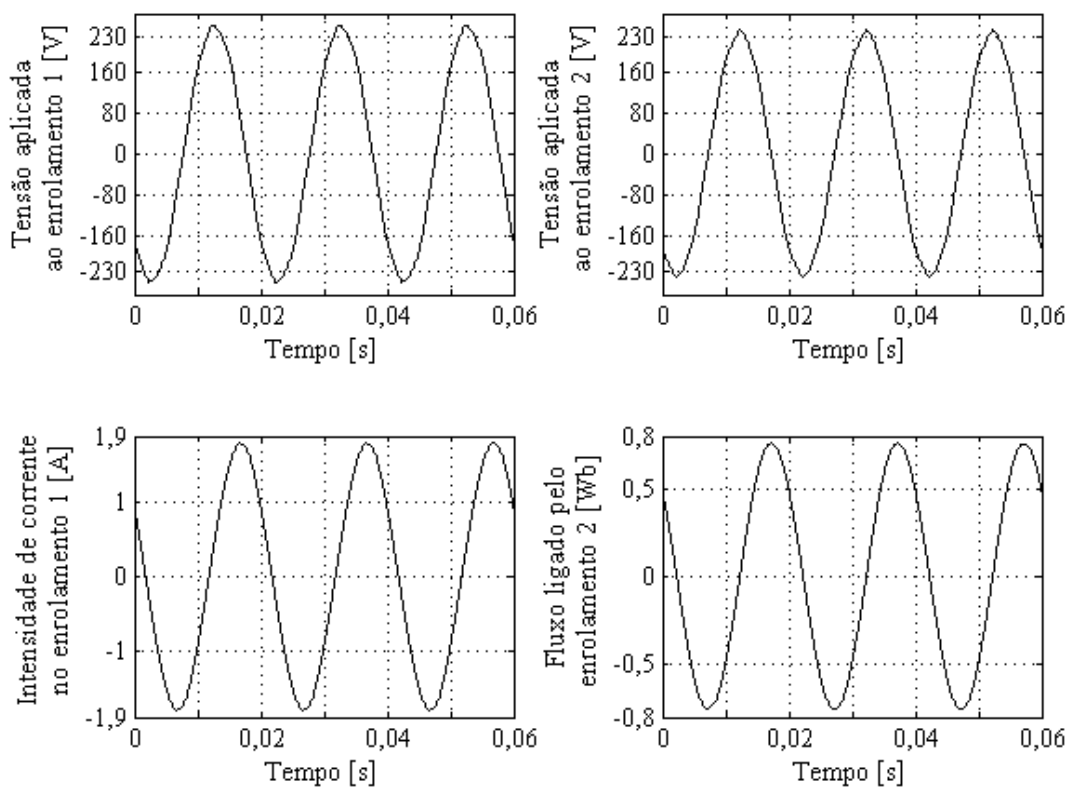


Figura 3.4 – Representação dos vários valores de entrada e do fluxo encadeado para o ensaio de $I=1,85$ A.

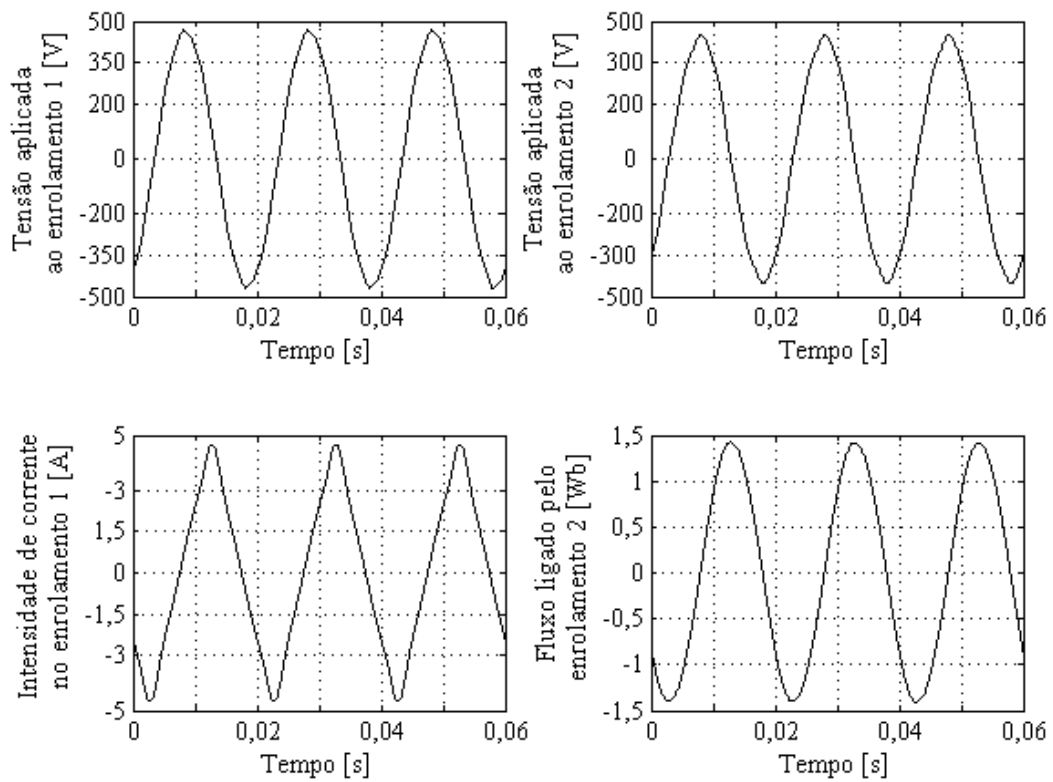


Figura 3.5 – Representação dos vários valores de entrada e do fluxo encadeado para o ensaio de $I=4,8$ A.

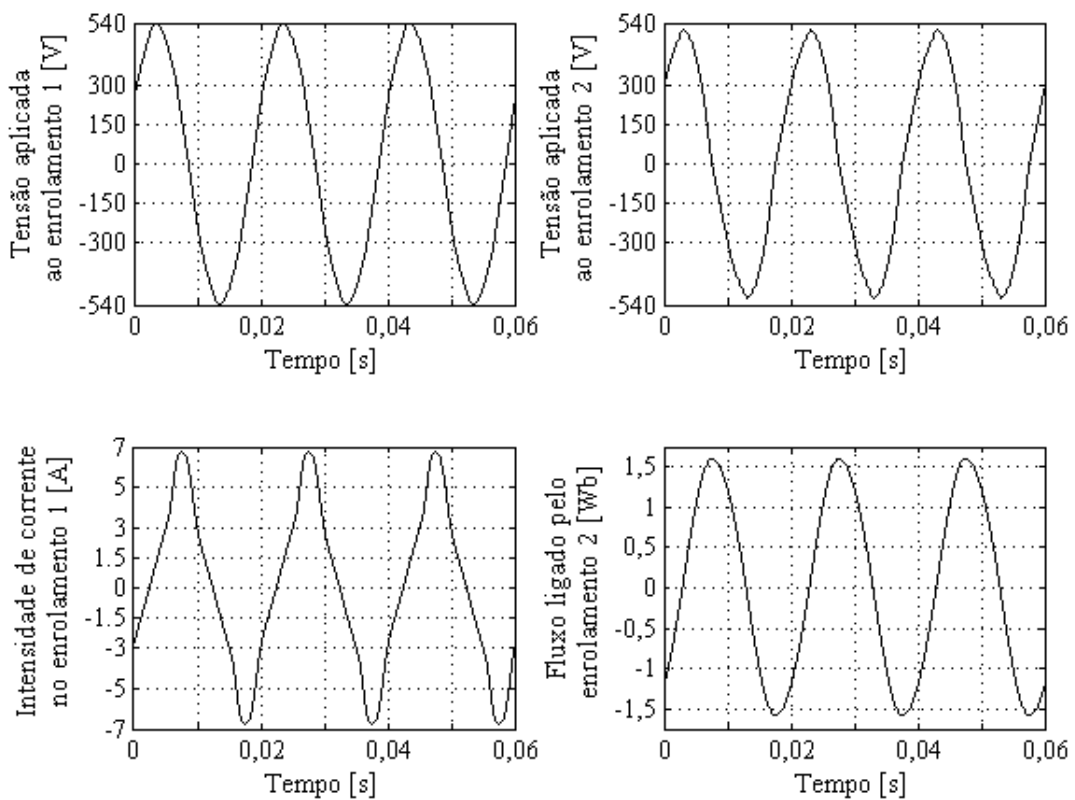


Figura 3.6 – Representação dos vários valores de entrada e do fluxo encadeado para o ensaio de $I=6,5$ A.

Com base nos valores de pico da corrente e nos respectivos valores do fluxo ligado, que se apresentam no Quadro 3.1, foi possível traçar uma curva de magnetização média, apresentada na Figura 3.7 e na Figura 3.8, do circuito magnético apresentado pela máquina na posição de alinhamento. Note-se que a opção pela posição alinhada esteve directamente relacionada com o facto de ser, para este caso, a posição onde o núcleo satura com mais facilidade.

I_1 (A)	Ψ (Wb)	I_1 (A)	Ψ (Wb)
0,152	0,058	2,94	1,137
0,361	0,141	3,429	1,262
0,71	0,286	4,025	1,345
1,069	0,443	4,638	1,409
1,428	0,599	5,272	1,464
1,798	0,754	5,801	1,5
2,142	0,89	6,198	1,536
2,525	1,031	6,528	1,561

Quadro 3.1 – Os valores de corrente e fluxo encadeado médios para a curva de magnetização.

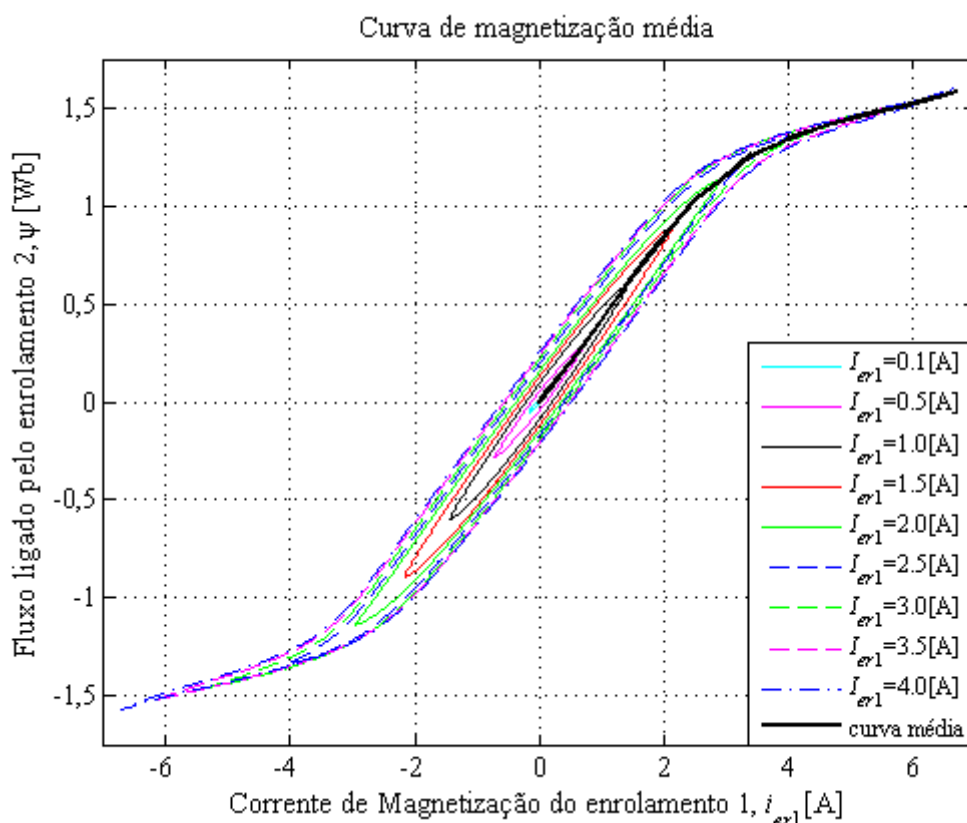


Figura 3.7 – Curvas de magnetização do MRVC.

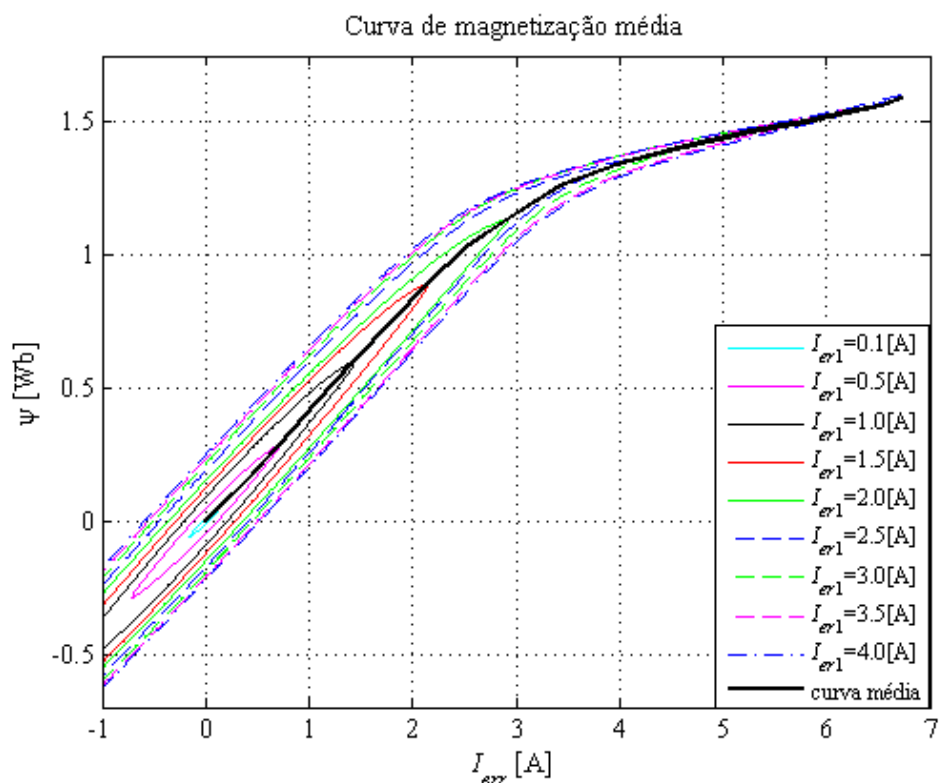


Figura 3.8 – Zoom das curvas de magnetização para se verificar o máximo de cada ensaio

Uma vez que o circuito magnético apresenta uma geometria complexa não é possível determinar de forma directa a curva de magnetização média do material ferromagnético do MRVC. Assim, a curva de magnetização média foi determinada utilizando uma abordagem comparativa com os resultados obtidos da análise por elementos finitos da geometria, considerando os diferentes materiais definidos na biblioteca de matérias ferromagnéticas da ferramenta computacional FEMM. Importa salientar que a escolha desta ferramenta computacional foi realizada tendo em conta os seguintes aspectos:

1. O FEMM é um programa de utilização livre, estando à disposição da comunidade científica.
2. O FEMM pode ser comandado a partir de outros programas, de que são exemplo o Matlab e o Mathematica, permitindo definir um conjunto exhaustivo de análises sequenciais sem intervenção do utilizador.
3. É possível aceder ao código fonte do FEMM para desenvolvimento de soluções futuras.

3.3.2.2 *Análise baseada em elementos finitos*

Para um exacta avaliação das características do MRVC é necessário um modelo fiável no cálculo do circuito magnético, isto devido á grande saturação do circuito

magnético e á complexidade geométrica. Para o estudo pretendido a análise de elementos finitos apresenta-se como a abordagem mais indicada [17].

Na Figura 3.9 apresenta-se um exemplo do modelo do MRVC desenvolvido no FEMM. Para a análise do desempenho perante diferentes valores de corrente foi necessário fazer um pequeno programa em Matlab, que se apresenta em anexo, onde se calcula o fluxo encadeado destes materiais em ordem á corrente. Uma vez que não é possível alterar o tipo de material com base em instruções escritas em Matlab houve necessidade de construir um conjunto vasto de modelos e programas, em tudo semelhantes, cada qual para um dos diferentes materiais definidos em biblioteca.

3.3.2.3 Análise comparativa e determinação do curva de magnetização média do material.

Dos materiais apresentados na biblioteca do FEMM muitos deles apresentam uma curva de magnetização bastante diferente da obtida laboratorialmente, sendo que, o objectivo passava por encontrar um material com uma curva a mais próxima possível da que se obteve em laboratório.

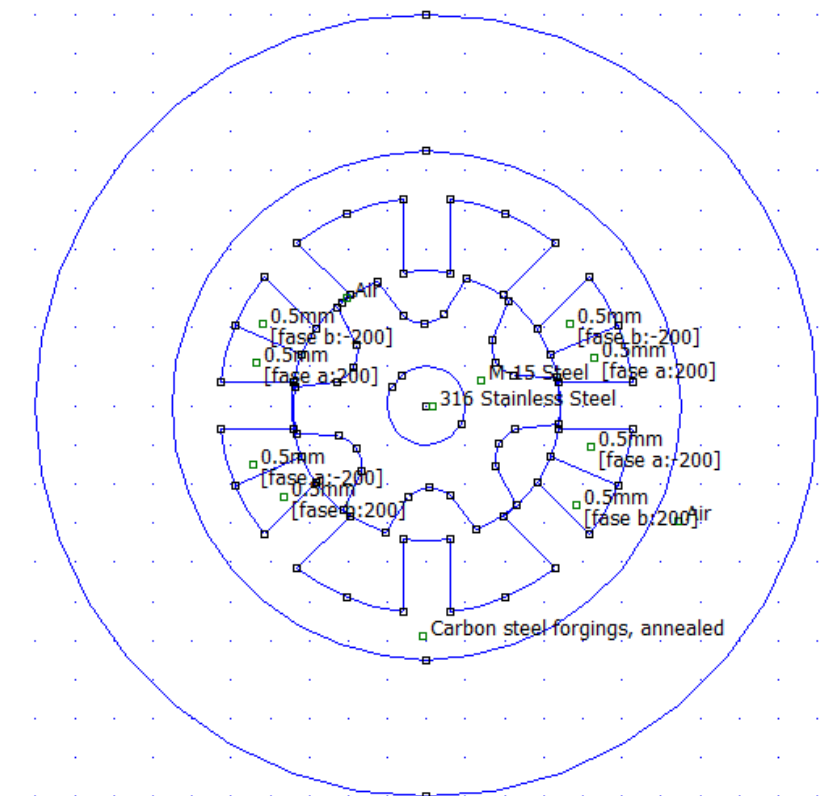


Figura 3.9 – Modelo, desenvolvido para o FEMM, da geometria considerada na determinação da curva de magnetização média.

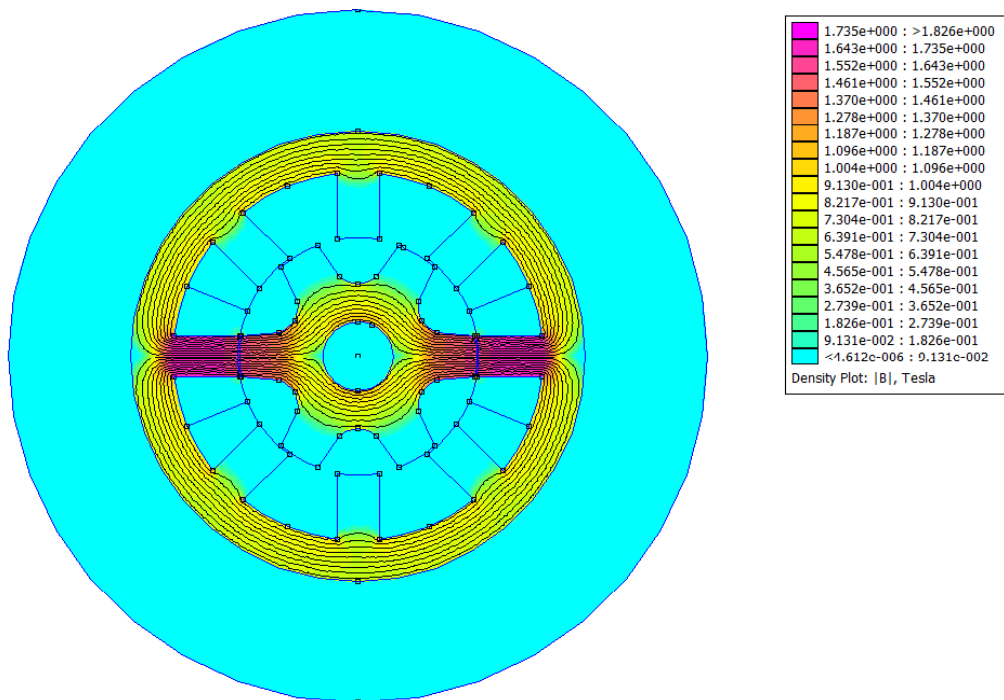


Figura 3.10 – Solução obtida, da simulação do modelo da figura anterior, para a densidade de fluxo magnético considerando $I_1=6,7$ A

Da análise feita anteriormente podemos afirmar que os materiais com a curva mais próxima da pretendida são:

- Aço carbónico
- Aço 1018
- Liga de aço

Por observação Figura 3.11 é possível constatar que as curvas dos materiais seleccionados anteriormente são bastante parecidas, apesar de uma ligeira divergência na região mais fortemente saturada. Este facto pode indiciar possíveis erros na obtenção da curva média do laboratório, ou pode estar relacionada com a possibilidade de o tipo de material do motor não estar incluído na biblioteca do FEMM. Todavia, e tendo em conta os objectivos deste trabalho, considerou-se como boa a assunção de que o MRVC emprega Aço Carbónico, com a curva de magnetização da Figura 3.11, no seu circuito magnético.

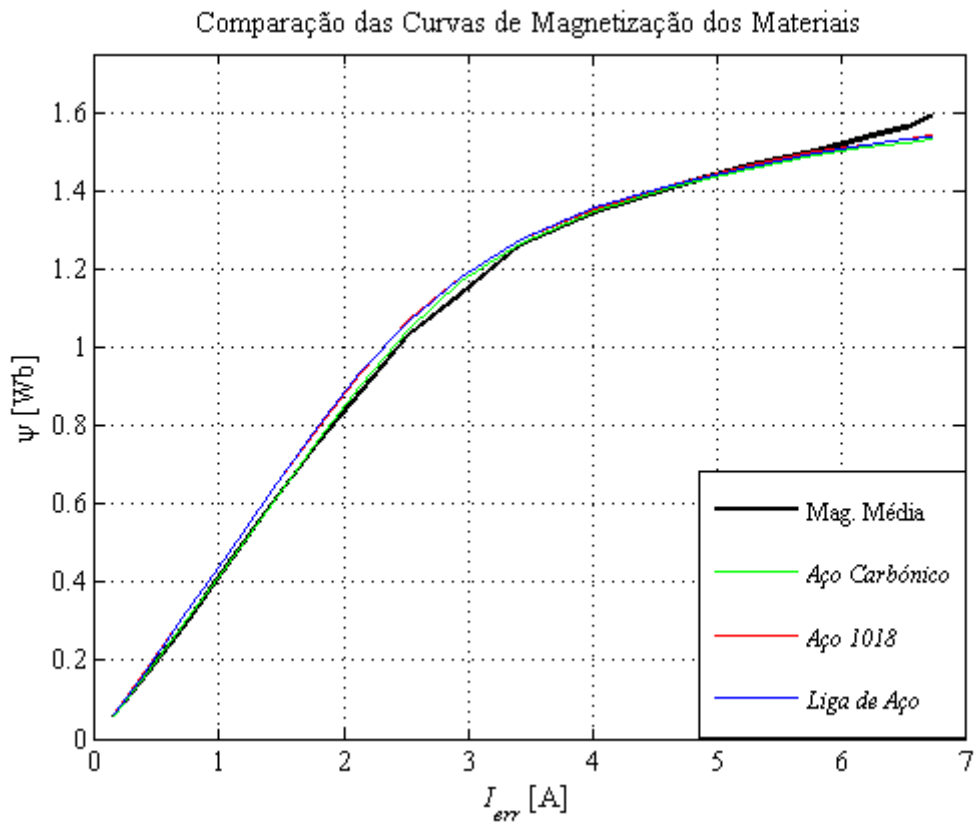


Figura 3.11 – Comparação da curva de magnetização dos diferentes materiais.

CAPÍTULO

4

Cálculo do novo enrolamento estatorico

Neste capítulo faz-se o cálculo do novo enrolamento ao MRVC e as suas novas características.

4.1 Introdução

O cálculo de um enrolamento para o MRVC deve ter em conta uma análise ao desempenho do MRVC.

Todos os modelos matemáticos de processos electromagnéticos em Máquinas de Relutância Variável publicados até ao momento têm se baseado na equação de malha:

$$U = Ri + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (4.1)$$

E a equação de binário

$$T = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right] \quad (4.2)$$

Onde:

U - É a tensão aplicada à fase que está em análise.

i - É a corrente aplicada a fase.

Ψ - É o fluxo encadeado da fase de bobinas.

W' - É a coenergia.

θ - É a posição do rotor.

O fluxo encadeado Ψ é uma função da posição do rotor θ e as correntes em todas as m fases i_1, \dots, i_m . Devido ao fraco acoplamento magnético entre as fases de um MRVC o fluxo encadeado pode ser tratado como uma função de uma única corrente na fase em consideração: $\Psi = f(i, \theta)$.

As diferenças entre os modelos existentes residem na forma como as equações (4.1) e (4.2) são resolvidas computacionalmente.

4.2 Modelo matemático

O método de Runge-Kutta de quarta ordem, um dos mais utilizados para a resolução de equações diferenciais ordinárias, faz uma média de quatro declives calculados nos extremos e a meio do intervalo $[\theta_n, \theta_n + h]$. Este método é computacionalmente mais eficiente do que o método de Euler modificado porque, apesar de exigir quatro avaliações da função em vez das duas exigidas por etapa, o passo h poder ser muito maior sem que por isso haja perda de precisão. Por este motivo este método tem sido um dos mais utilizados na resolução de (4.1).

Aplicando este método a (4.1), e reescrevendo-a, considerando a velocidade constante, obtém-se:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{V - RI(\theta, \Psi)}{\omega} \quad (4.3)$$

Considerando no método de Runge-Kutta de quarta ordem:

$$h = \Delta \theta = \omega \Delta t \quad (4.4)$$

$$\varepsilon \leq h^4 \quad (4.5)$$

$$\Psi(\theta_0) = 0 \quad (4.6)$$

Obtém-se:

$$\Psi(\theta_{n+1}) = \Psi(\theta_n) + \Delta \Psi(\theta_n) \quad (4.7)$$

Onde:

$$\Delta \Psi(\theta_n) = \frac{1}{6} [k_1(\theta_n) + 2k_2(\theta_n) + 3k_3(\theta_n) + k_4(\theta_n)] \quad (4.8)$$

Sendo os coeficientes k_i calculados de acordo com:

$$k_1(\theta_n) = \frac{V - R \cdot \frac{FMM[(\theta_n, N \times \Phi(\theta_n))]}{N}}{\omega} \Delta\theta \quad (4.9)$$

$$k_2(\theta_n) = \frac{V - R \cdot \frac{FMM\left[\left(\theta_n + \frac{\Delta\theta}{2}\right), \left(N \times \Phi(\theta_n) + \frac{k_1(\theta_n)}{2}\right)\right]}{N}}{\omega} \Delta\theta \quad (4.10)$$

$$k_3(\theta_n) = \frac{V - R \cdot \frac{FMM\left[\left(\theta_n + \frac{\Delta\theta}{2}\right), \left(N \times \Phi(\theta_n) + \frac{k_1(\theta_n)}{2}\right)\right]}{N}}{\omega} \Delta\theta \quad (4.11)$$

$$k_4(\theta_n) = \frac{V - R \cdot \frac{FMM[(\theta_n + \Delta\theta), (N \times \Phi(\theta_n) + k_3(\theta_n))]}{N}}{\omega} \Delta\theta \quad (4.12)$$

O campo magnético pode ser calculado a cada iteração através de uma análise numérica de elementos finitos aplicado ao campo magnético, onde se analisam os circuitos eléctricos e magnéticos simultaneamente. Ou, as características magnéticas podem ser pré-calculadas para várias correntes e posições do rotor, designadas por curvas de magnetização, sendo depois construída uma tabela de consulta representativa da função $i = f(\Psi, \theta)$, que para se obter uma independência completa do número de espiras do enrolamento se construiu na forma $FMM = f(\Phi, \theta)$, tendo-se também adaptado o cálculo dos coeficientes como se pôde constatar em (4.9), (4.10), (4.11) e (4.12).

Para o cálculo da tabela de consulta voltou-se a utilizar o FEMM. Sendo calculo do binário para resolução de (4.2), e uma vez que o FEMM efectua esse cálculo de forma rápida, optou-se pela construção de uma tabela de consulta adicional, esta representativa da função $T = f(FMM, \theta)$

Os valores da FMM e do binário, necessários ao cálculo, que não existam na tabela vão ser calculados através de interpolação numérica, sendo o método de interpolação mais aconselhável o “Cubic Spline Interpolation”.

4.3 Curvas de consulta

Uma vez definida a curva de magnetização média do material ferromagnético do MRVC, é possível, e no caso aconselhável, calcular as tabelas de consulta, mencionadas anteriormente, através do FEMM e do MatLab. Para tal foi necessário fazer algumas alterações ao modelo do FEMM como se verifica na Figura 4.1.

Após esta alteração o modelo passou a conter todos os enrolamentos. Desta forma foi possível avaliar os valores de fluxo encadeado pelas várias fases, e assim avaliar o fraco acoplamento electromagnético entre fases.

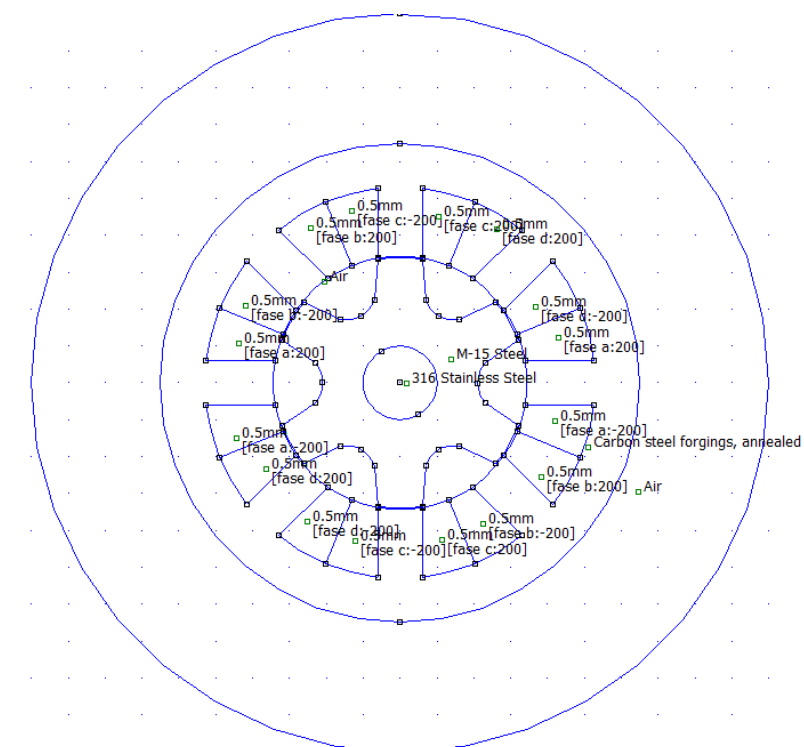


Figura 4.1 – Modelo, desenvolvido para o FEMM, da geometria considerada na determinação do valor do binário.

Para minimizar as necessidades de intervenção do operador/projectista ao longo deste processo, bastante exaustivo, desenvolveu-se código em Matlab, que se apresenta em anexo, capaz de modificar a posição relativa do rotor e a corrente na fase, e capaz de recolher e guardar os resultados necessário à construção das tabelas $FMM = f(\Phi, \theta)$ e $T = f(\Phi, \theta)$. A Figura 4.2, e a Figura 4.3, apresentam de forma gráfica os valores recolhidos, e onde se podem verificar as zonas com maior capacidade para o motor desenvolver binário, bem como as situações em que o núcleo magnético se apresenta com maiores níveis de saturação.

Importa referir que os valores originalmente obtidos se apresentavam na forma $\Phi = f(FMM, \theta)$ e $T = f(FMM, \theta)$, pelo que foi necessário fazer a inversão da

tabela, usando-se para tal, e sempre que necessário a técnica de interpolação “Cubic Spline”.

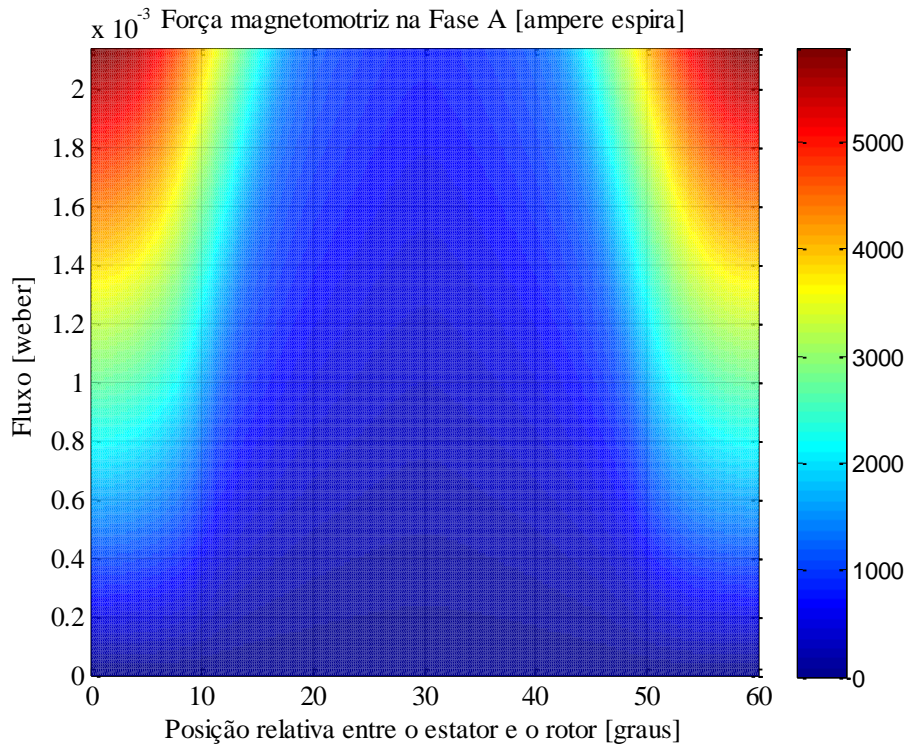


Figura 4.2 – Representação da força magnetomotriz.

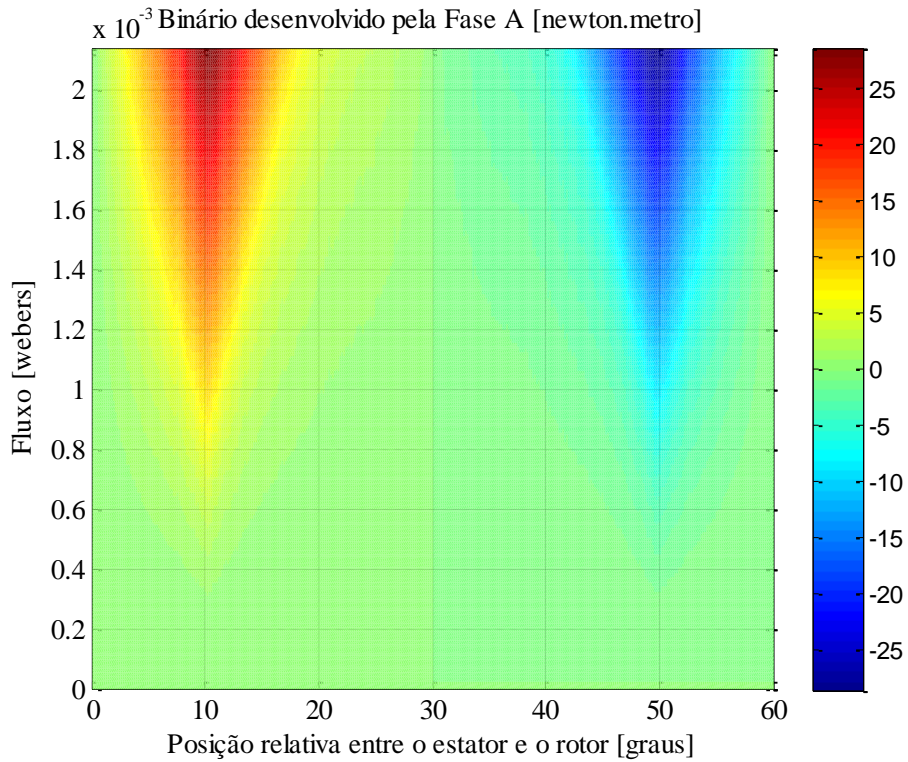


Figura 4.3 – Representação do binário.

Na Figura 4.4, e na Figura 4.5, pode-se observar o fraco acoplamento electromagnético entre fases.

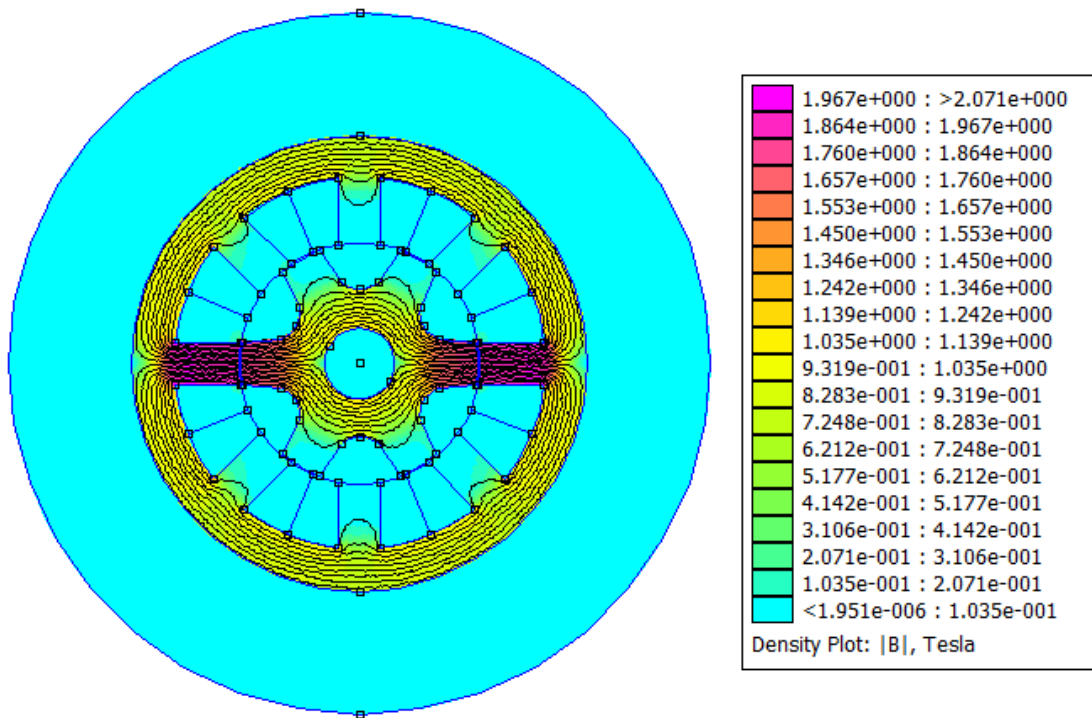


Figura 4.4 – Distribuição da densidade de fluxo quando as saliências polares da Fase 1 se encontram fortemente saturadas.

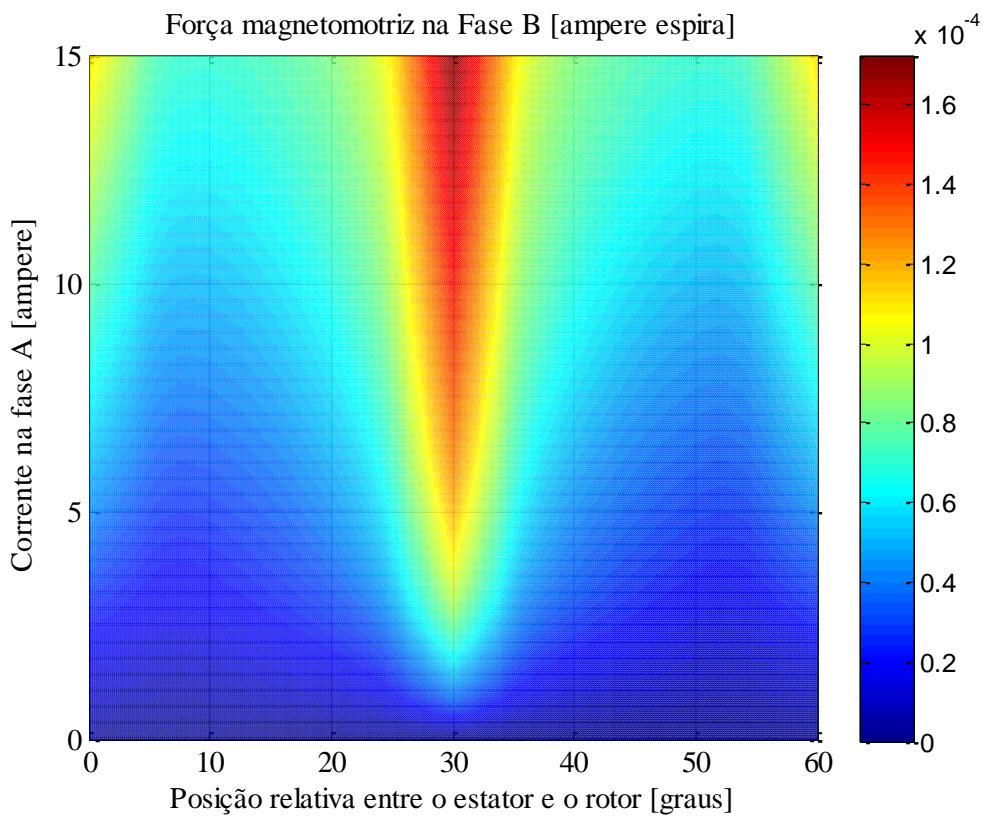


Figura 4.5 – Fluxo ligado por uma fase não alimentada.

4.4 Modo de operação

O fluxo magnético no MRVC não é constante, mas necessita de ser estabelecido a partir do zero a cada “passo”. Uma vez que sentido do binário desenvolvido pelo motor não depende do sentido da tensão, corrente ou fluxo, mas apenas da taxa de crescimento da indutância, a alimentação de uma fase deve, sempre, ser sincronizada com a posição do rotor, de forma a garantir a produção de binário com o sentido desejado.

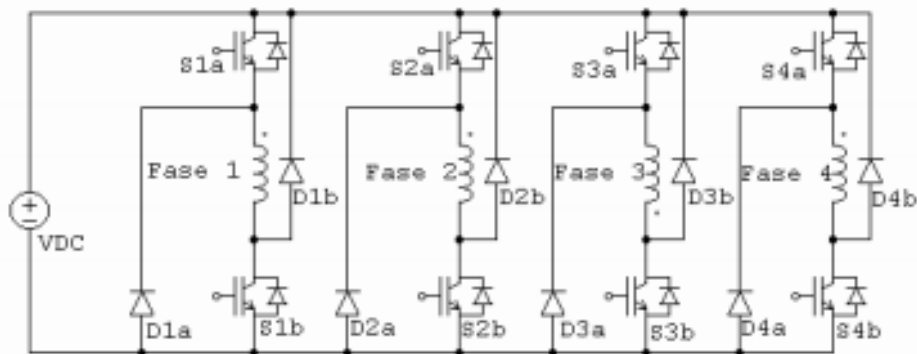


Figura 4.6 – Modos de condução de uma fase [9]

Supondo que o circuito eléctrico da máquina se representa sobre a forma da Figura 4.6. No controlo do MRVC, sendo um motor de grande velocidade é usada o modo de operação de um só impulso, onde ambos os IGBT's são ligados para o ângulo inicial θ_0 e ambos desligam-se no ângulo θ_c (ângulo de comutação).

Importa referir que, a velocidades elevadas, é comum encontrar situações em que os MRVC operam com ângulos de início de condução anteriores à posição não alinhada e com ângulos de comutação modestos. Desta forma permite-se que a corrente atinja valores significativos na região de maior produção de binário, conseguindo-se compensar o binário resistente produzido entre o início da condução e a posição não alinhada.

4.5 Especificações

Quando se altera o enrolamento do MRVC tem-se como objectivo manter ou melhorar as características iniciais do motor, para isso é necessário analisar todos os seus parâmetros.

Assim, este projecto teve como ponto de partida as seguintes especificações:

- O barramento de alimentação DC deve ter um valor de tensão obtido directamente, por rectificação não comandada, da rede de alimentação em baixa tensão, 300V DC caso a alimentação do rectificador seja monofásica e 525V DC caso a alimentação do rectificador seja trifásica.
- A velocidade Nominal da máquina deve ser mantida nas 3000rpm.
- Os dois enrolamentos de uma fase devem, preferencialmente ser ligados em paralelo, para se potenciar a tolerância a falhas da máquina.

4.6 Dimensionamento geométrico do enrolamento

Durante o dimensionamento de uma máquina, ou de um enrolamento, muitas das condições ou restrições são definidas de modo empírico, com base na experiencia anterior do projectista.

Para a escolha do diâmetro do condutor procedeu-se a uma selecção prévia de três diâmetros para avaliação mais profunda. No entanto pode verificar adiante que qualquer um deles permitira a construção de um enrolamento capaz de satisfazer as condições prévias.

Uma vez seleccionado o diâmetro do condutor é possível definir o valor nominal de corrente que este pode transportar, nas condições de refrigeração típicas de uma máquina. Assim, é usual considerar-se a seguinte relação para o cálculo deste valor.

$$I_{nom} = \frac{\pi D_{cu}^2}{4} * 3,5 \times 10^6 \quad (4.13)$$

Obtendo-se a seguinte equação para o cálculo da secção transversal de cobre duma bobina.

$$A_{cu} = \frac{\pi N D_{cu}^2}{4} \quad (4.14)$$

A relação entre esta secção e o valor da secção disponível para alojamento da bobina (área da cava), denominada de Factor de enchimento, encontra-se representada pela seguinte equação, sendo recomendável que o seu valor não seja superior a 50% no caso enrolamentos concentrados constituídos por bobinas de fio de secção circular de baixo calibre (diâmetro).

$$K_{enchimento} = \frac{A_{cu}}{A_c} \leq 0,5 \quad (4.15)$$

Manipulando matematicamente (4.14) e (4.15) obtém-se:

$$N_{máx} = 0,5 \frac{A_c}{\pi D_{cu}^2} \quad (4.16)$$

onde $N_{máx}$ representa o número máximo de espiras admissível na cava.

Para o cálculo da resistência de uma bobina tem-se:

$$R = \frac{1,7e^{-8} \cdot N_1 \cdot (2,2 \cdot W + 0,9 \cdot \pi \cdot (bp + Lb))}{\pi \frac{D_{cu}^2}{4}} \quad (4.17)$$

Onde N_1 representa o número de espira da bobina, W o comprimento magnético axial da máquina, bp a largura do dente, e Lb a largura da bobina. Como se mostra na Figura 4.7.

Sempre que as bobinas de uma fase se encontrem ligadas em série a resistência da fase é dada por:

$$R_{cu} = \frac{1,7e^{-8} \cdot N \cdot (2,2 \cdot W + 0,9 \cdot \pi \cdot (bp + Lb))}{\pi \frac{D_{cu}^2}{4}} \quad (4.18)$$

Onde N representa o número total de espiras de uma fase.

Analisando a geometria do núcleo ferromagnético da máquina obtém-se:

$$\begin{aligned} bp &= 0,012 & Lb &= 0,022 \\ A_c &= 3.8205 \cdot 10^{-4} & W &= 161 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Uma vez definidas as diferentes limitações, desenvolveu-se código, em Matlab, para implementação do algoritmo, apresentado na Figura 4.8, capaz de calcular o número de espira das bobinas, considerando diferentes topologias de enrolamento.

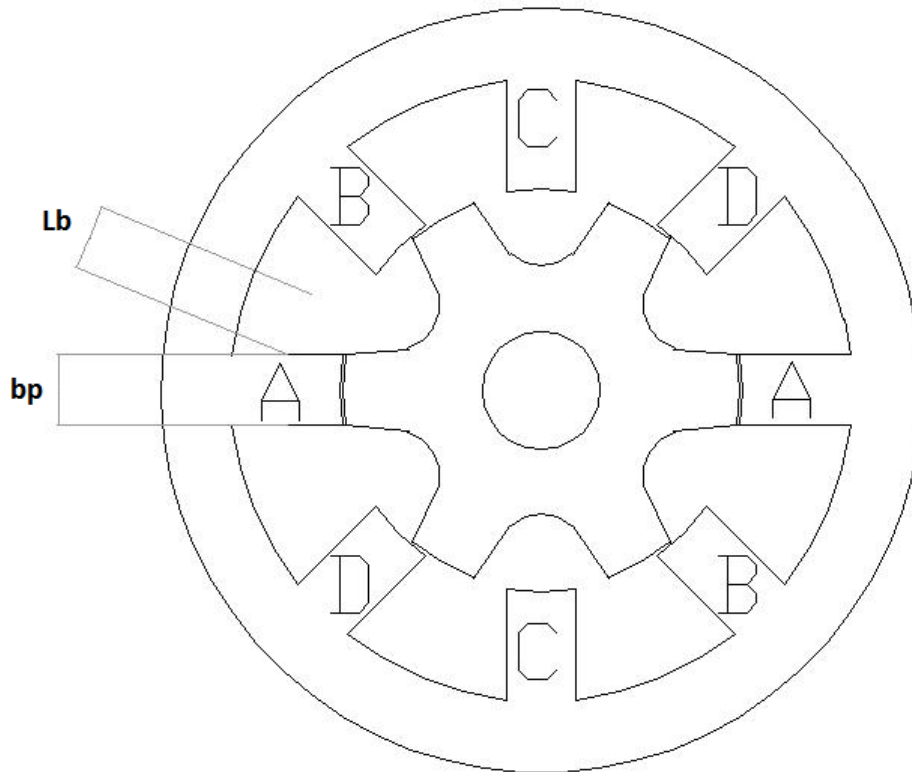


Figura 4.7 – Representação da largura do dente e largura da bobina.

Da análise de funcionamento do accionamento original definiu-se uma estratégia de comando, para o regime nominal, com um só impulso, tensão constante entre as duas posições $\theta_0 = -0,1\tau_s$ e $\theta_c = 0,3\tau_s$, sendo τ_s o passo polar do estator dado por:

$$\tau_s = \frac{2\pi}{N_s}, \text{ sendo } N_s = 6 \quad (4.19)$$

Considerou-se ainda que o sistema possui um limitador de corrente que “corta” a alimentação sempre o valor de corrente seja superior a $4I_{nom}$.

Nas tabelas seguinte, onde N_r é o número de ramos por fase e I_{pu} é o valor de corrente na fase relativo ao seu valor nominal, mostram os resultados obtidos considerando vários arranjos de enrolamento.

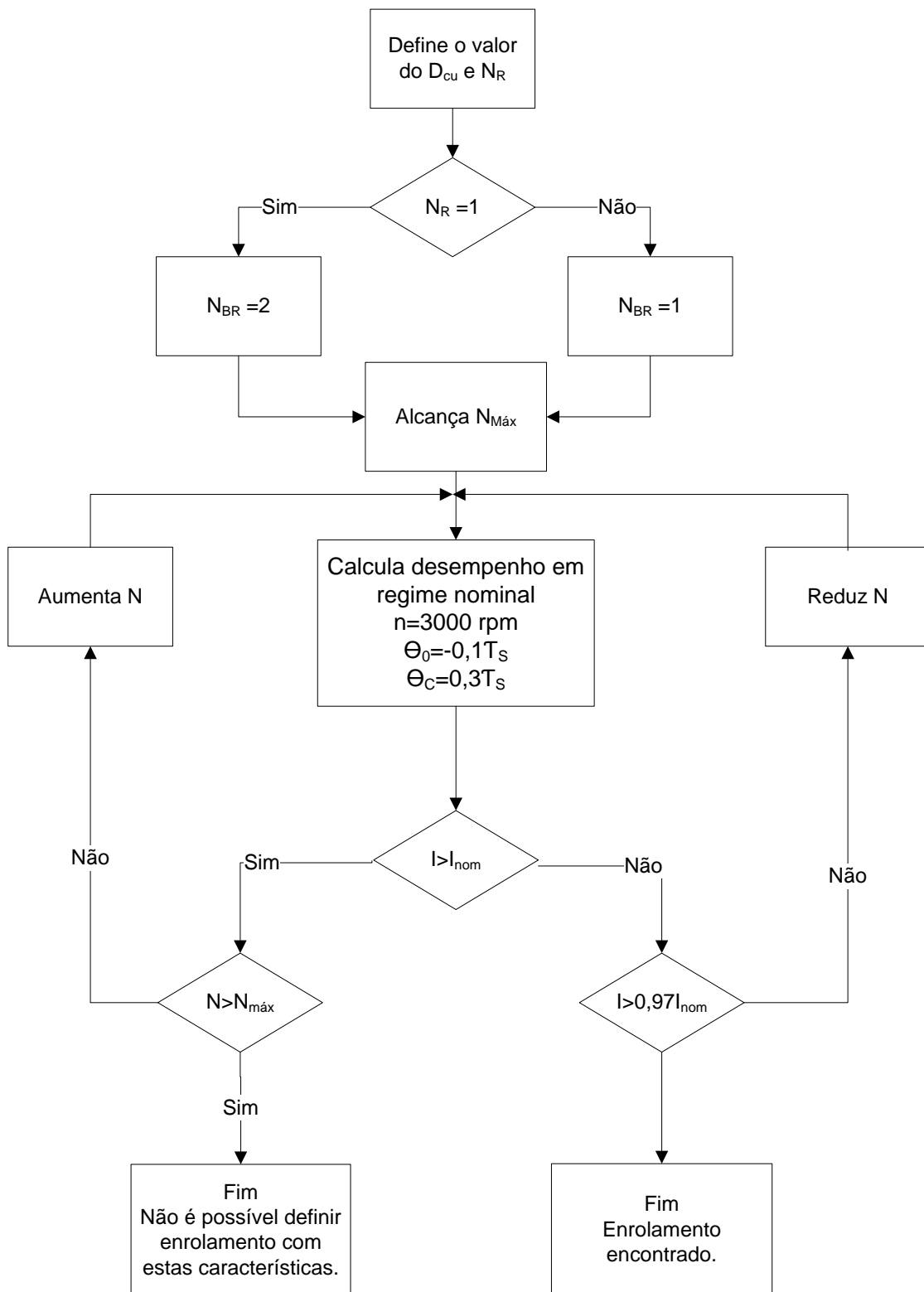


Figura 4.8 – Representação do algoritmo para calcular o número de espiras das bobinas.

I_{pu} (A)					Potência (W)			
Diâmetro (mm)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,7
Nr=1	0,975	0,972	0,992	0,992	183,006	291,417	434,973	598,425
Nr=2	0,973	0,996	1,161	1,460	377,615	613,952	-	-
Nr=4	1,061	1,482	2,078	2,254	-	-	-	-
Nr=6	1,440	2,073	2,307	2,368	-	-	-	-
Factor de Enchimento (%)					Rendimento (%)			
Diâmetro (mm)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,7
Nr=1	0,232	0,293	0,349	0,409	86,238	89,073	90,906	92,333
Nr=2	0,332	0,412	0,459	0,479	90,407	92,399	-	-
Nr=4	0,453	0,481	0,456	0,475	-	-	-	-
Nr=6	0,478	0,456	0,488	0,520	-	-	-	-
Número de espiras por fase					Binário (N.m)			
Diâmetro (mm)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,7
Nr=1	706	570	472	406	0,583	0,928	1,385	1,905
Nr=2	505	401	-	-	1,202	1,954	-	-
Nr=4	-	-	-	-	-	-	-	-
Nr=6	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 4.1 – Apresentação dos valores para o ensaio em monofásico, com uma tensão de 300V $\theta_0 = -0,1\tau_s$ e $\theta_C = 0,3\tau_s$.

I_{pu} (A)					Potência (W)			
Diâmetro (mm)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5
Nr=1	0,970	0,971	0,972	1,000	75,323	179,175	328,032	536,344
Nr=2	0,970	0,970	0,999	1,406	158,122	370,356	691,802	-
Nr=4	0,972	1,053	1,841	2,138	328,032	-	-	-
Nr=6	0,970	1,486	2,104	2,396	499,295	-	-	-
Factor de Enchimento (%)					Rendimento (%)			
Diâmetro (mm)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5
Nr=1	0,151	0,231	0,311	0,384	0,795529	0,86161	0,897067	0,91797
Nr=2	0,217	0,330	0,436	0,460	0,853284	0,903411	0,928603	-
Nr=4	0,311	0,451	0,453	0,481	0,897067	-	-	-
Nr=6	0,382	0,466	0,478	0,456	0,917439	-	-	-
Número de espiras por fase					Binário (N.m)			
Diâmetro (mm)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5
Nr=1	1836	1248	944	748	0,240	0,570	1,044	1,707
Nr=2	1321	892	663	-	0,503	1,179	2,202	-
Nr=4	944	-	-	-	1,044	-	-	-
Nr=6	775	-	-	-	1,589	-	-	-

Quadro 4.2 – Apresentação dos valores para o ensaio em trifásico, com uma tensão de 525V $\theta_0 = -0,1\tau_s$ e $\theta_C = 0,3\tau_s$.

Analisando cada uns dos valores e tendo em consideração, que se deverá escolher o tipo de condutor com uma corrente I_{pu} inferior a 1A, verifica-se que esta condição pode ser satisfeita considerando diferentes arranjos do enrolamento, seja na ligação monofásica como na trifásica.

Considerando-se os resultados anteriormente expostos, definiu-se, como mais conveniente, o dimensionamento de um enrolamento com uma tensão de alimentação DC de 525V.

No Sentido de melhor avaliar a escolha dos ângulos de comutação e de início de condução, efectuou-se novo estudo, desta vez considerando diferentes combinações dos referidos ângulos, com valores na redondeza dos considerados anteriormente.

I_{pu} (A)						
Diâmetro do condutor 0.3mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.9701	0.9719	0.9708	0.9716	0.9706	0.9702
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.9716	1.1186	0.9702	1.0310	0.9716	0.9986
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.9965	1.7021	0.9985	1.5512	0.9996	1.4059
Diâmetro do condutor 0.4mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.9724	0.9701	0.9715	0.9707	0.9727	0.9707
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.9732	1.1497	0.9729	1.0532	0.9719	0.9991
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.9960	1.7479	0.9989	1.5967	0.9963	1.4514
Diâmetro do condutor 0.5mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_C = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.9716	0.9713	0.9718	0.9701	0.9705	0.9718
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.9726	1.1969	0.9705	1.0967	0.9730	1.0099
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.9996	1.8180	0.9960	1.6614	0.9977	1.5129

Quadro 4.3 – Apresentação do valor de corrente na fase relativo ao seu valor nominal, sendo Nbr=1.

Factor de enchimento						
Diâmetro do condutor 0.3mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.2538	0.3626	0.2424	0.3464	0.2309	0.3301
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.3414	0.4526	0.3263	0.4506	0.3105	0.4362
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.4235	0.4605	0.4040	0.4605	0.3844	0.4605
Diâmetro do condutor 0.4mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.2572	0.3682	0.2461	0.3519	0.2346	0.3356
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.3460	0.4526	0.3309	0.4526	0.3158	0.4434
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.4297	0.4605	0.4101	0.4605	0.3916	0.4605
Diâmetro do condutor 0.5mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.2624	0.3756	0.2509	0.3593	0.2398	0.3427
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.3533	0.4526	0.3381	0.4526	0.3223	0.4506
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.4379	0.4605	0.4194	0.4605	0.3998	0.4605

Quadro 4.4 - Apresentação do factor de enchimento, sendo Nbr=1.

Número de espiras por bobina						
Diâmetro do condutor 0.3mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	1372	980	1310	936	1248	892
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	1038		992		944	663
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	824		786		748	
Diâmetro do condutor 0.4mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	1390	995	1330	951	1268	907
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	1052		1006		960	674
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	836		798		762	
Diâmetro do condutor 0.5mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	1418	1015	1356	971	1296	926
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	1074		1028		980	
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	852		816		778	

Quadro 4.5 - Apresentação do número de espiras por bobina, sendo Nbr=1.

Potência						
Diâmetro do condutor 0.3mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	189.4	392.8	184.6	382.3	179.1	370.3
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	347.2		337.7		328.0	691.8
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	566.4		552.4		536.3	
Diâmetro do condutor 0.4mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	192.4	394.7	188.3	387.0	184.0	377.6
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	350.5		343.3		334.7	703.3
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	568.6		558.7		543.9	
Diâmetro do condutor 0.5mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	174.2	350.8	173.7	350.1	171.1	346.8
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	311.9		310.9		308.1	
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	502.8		500.9		496.6	

Quadro 4.6 – Apresentação do valor previsto para a potência, sendo Nbr=1.

Rendimento						
Diâmetro do condutor 0.3mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.8561	0.8990	0.8589	0.9012	0.8616	0.9034
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.8926		0.8949		0.8971	0.9286
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.9142		0.9161		0.9180	
Diâmetro do condutor 0.4mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.8562	0.8987	0.8598	0.9015	0.8630	0.9041
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.8922		0.8951		0.8979	0.9291
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.9138		0.9162		0.9187	
Diâmetro do condutor 0.5mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.8343	0.8683	0.8458	0.8884	0.8508	0.8927
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.8633		0.8820		0.8862	
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	0.8795		0.9034		0.9079	

Quadro 4.7 – Apresentação do valor previsto para a potência, sendo Nbr=1.

Binário						
Diâmetro do condutor 0.3 mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.6028	1.2503	0.5877	1.2170	0.5703	1.1789
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	1.1053		1.0749		1.0442	2.2021
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	1.8028		1.7585		1.7072	
Diâmetro do condutor 0.4 mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.6123	1.2566	0.5994	1.2319	0.5857	1.2021
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	1.1158		1.0928		1.0654	2.2386
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	1.8100		1.7786		1.7312	
Diâmetro do condutor 0.5 mm						
	Nr=1		Nr=2		Nr=4	
	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$	$\theta_c = 0,3\tau_s$	$\theta_0 = 0,35\tau_s$
$\theta_0 = -0,14\tau_s$	0.5544	1.1166	0.5531	1.1146	0.5446	1.1038
$\theta_0 = -0,12\tau_s$	0.9929		0.9899		0.9808	
$\theta_0 = -0,10\tau_s$	1.6004		1.5946		1.5808	

Quadro 4.8 – Apresentação do valor do binário, sendo Nbr=1.

4.6.1 Especificações do protótipo

Analisando os resultados obtidos, pode se visualizar as diferenças entre as várias dimensões dos condutores apresentados, optou-se pela seguinte solução:

Protótipo seleccionado	
I_{pu} (A)	0,9991
Factor de enchimento (%)	44,34
Número de espiras por bobina	674
Potencia (W)	703,3
Resistência do enrolamento (Ω)	41
Rendimento (%)	92,91
Binário (N.m)	2,24
θ_0	$-0,12\tau_s$
θ_c	$0,35\tau_s$

Quadro 4.9 – Apresentação das especificações seleccionadas.

Na Figura 4.9 apresentam-se as formas de onda da tensão, da corrente e do binário esperados para o protótipo. Analisando a Figura 4.9 verifica-se um talhamento da tensão aplicada à fase entre a posição angular de 2 a 10 graus, resultado da actuação do limitador de corrente.

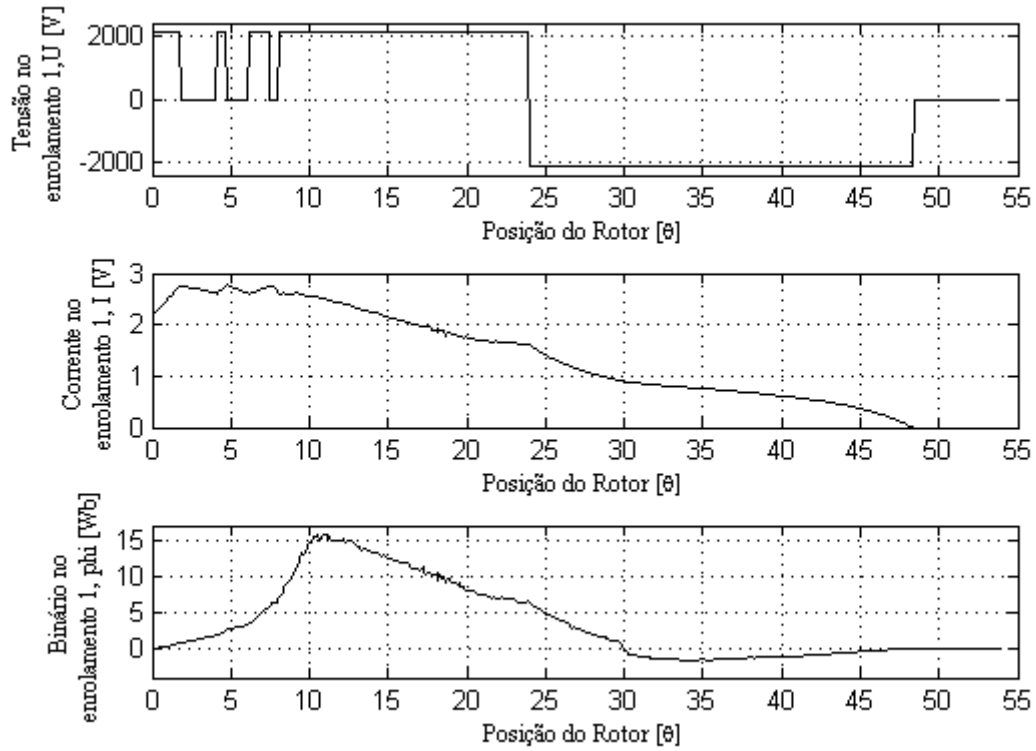


Figura 4.9 – Formas de onda esperadas para o protótipo.

CAPÍTULO

5

Construção e Ensaio do Protótipo

Aplicação das novas bobinas. Medição e teste de continuidade das bobinas. Ensaios às várias fases do motor para confirmação do valor do binário em várias posições rotóricas.

5.1 Apresentação de construção do enrolamento

5.1.1 Montagem das bobinas

A colocação das bobinas nas cavas do motor deve ser cuidadosa, devido ao facto do material do estator poder danificar o isolamento da bobina. Uma vez colocadas as bobinas nas cavas devem encaixar-se as respectivas cunhas das cavas. Seguidamente, aplicou-se fita isolante, comumente designada por fita ou papel hidráulico, em torno de todas as bobinas, e finalmente, aplicou-se verniz, necessário à fixação das espiras, nomeadamente nos topos das bobinas, permitindo ao mesmo tempo uma diminuição do ruído de vibração das mesmas.

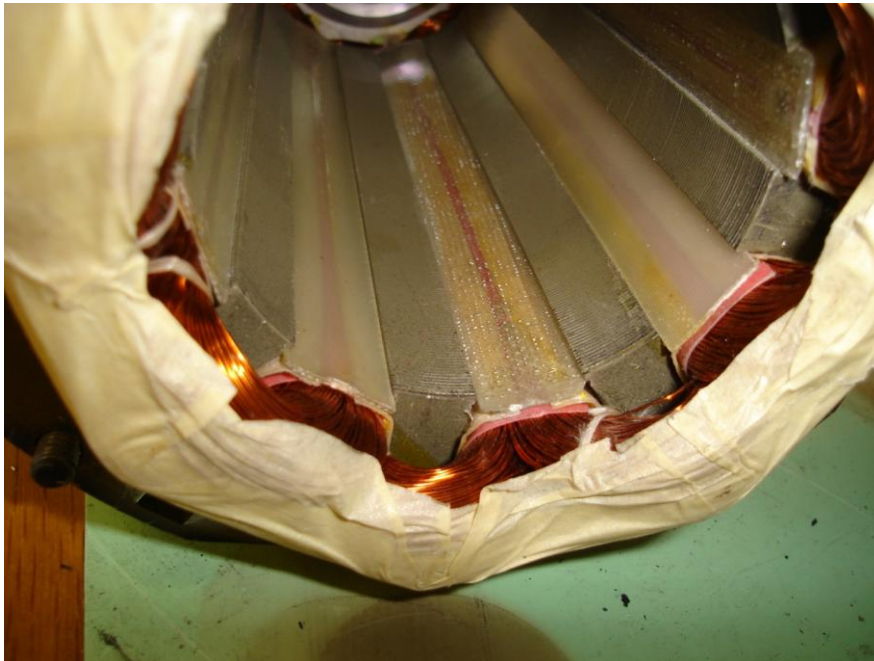


Figura 5.1 – O novo enrolamento.

No processo seguinte, puramente mecânico, colocou-se o rotor, tendo o cuidado de verificar que:

- Não havia contacto mecânico entre rotor e estator (verificação da inexistência de excentricidade ou de mau acomodamento da bobinagem nas cavas)
- O veio não apresentava atritos de rolamento anormais (verificação do estado do rolamento)

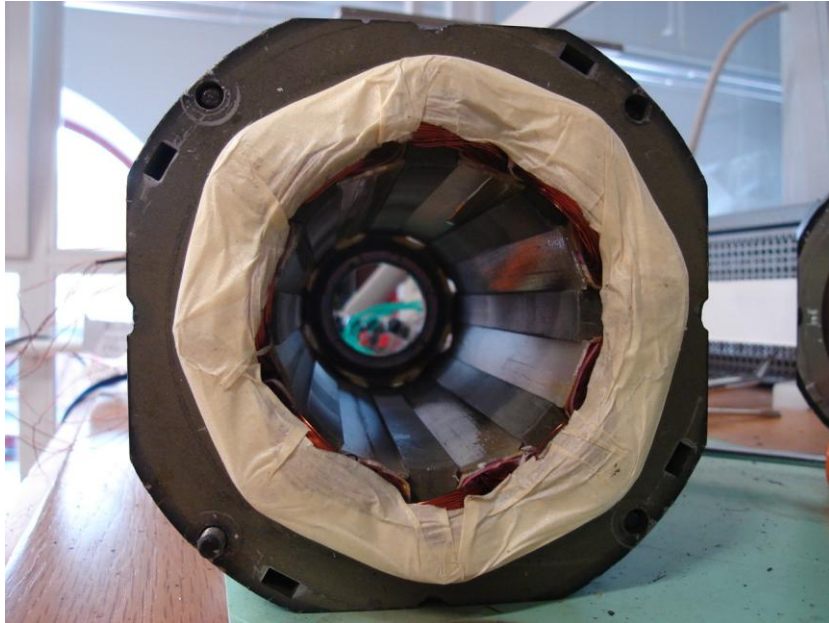


Figura 5.2 – MRVC com o novo enrolamento.

5.1.2 Avaliação da continuidade dos enrolamentos

Uma vez terminada a montagem do motor, efectuaram-se alguns ensaios com o objectivo de detectara a existência de defeitos graves nas bobinas, tais como:

- Circuitos abertos nas bobinas
- Curto-circuitos entre as espiras de bobinas diferentes.
- Curto-circuitos graves entre espiras de uma bobina

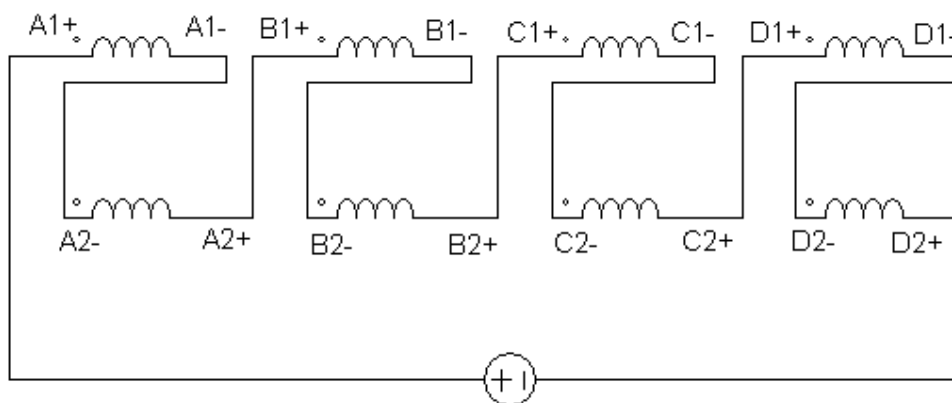


Figura 5.3 – Circuito de ligação das bobinas.

Para tal as bobinas do motor foram ligadas de acordo com o esquema que se apresenta na Figura 5.3. De seguida alimentou-se o circuito com diferentes valores tensão contínua, conduzindo a diferentes valores de corrente e consequentemente

a temperaturas diferentes no enrolamento. Para cada valor de corrente registaram-se as tensões ao longo do circuito, para posterior cálculo das respectivas resistências. Os valores obtidos, que se apresentam no Quadro 5.1, com representação gráfica na Figura 5.4, para mais fácil visualização, mostram a tendência esperada para um aumento da resistência com a temperatura, e uma quase uniformidade das resistências individuais das bobinas.

Ensaio	θ [°C] I [A]	56,7° 0,306	38,7° 0,236	22,3° 0
Tensões aos terminais [V]	A1+ ; D2+	109,8	79,70	-
	A1- ; D2+	95,7	69,50	-
	B1+ ; D2+	82,3	59,69	-
	B2- ; D2+	68,4	49,70	-
	C1+ ; D2+	56,7	39,73	-
	C2- ; D2+	40,65	29,54	-
	D1+ ; D2+	27,28	19,79	-
	D2- ; D2+	13,79	10,01	-
Resistências entre os terminais [Ω]	A1+ ; A1-	45,48	42,50	42,50
	A2+ ; A2-	43,23	40,88	40,40
	B1+ ; B1-	44,84	41,63	41,40
	B2+ ; B2-	43,23	41,54	39,50
	C1+ ; C1-	46,29	42,46	39,50
	C2+ ; C2-	43,23	40,63	39,80
	D1+ ; D1-	43,71	40,75	39,20
	D2+ ; D2-	44,19	41,71	40,40

Quadro 5.1 – Apresentação dos valores da resistência das bobinas.

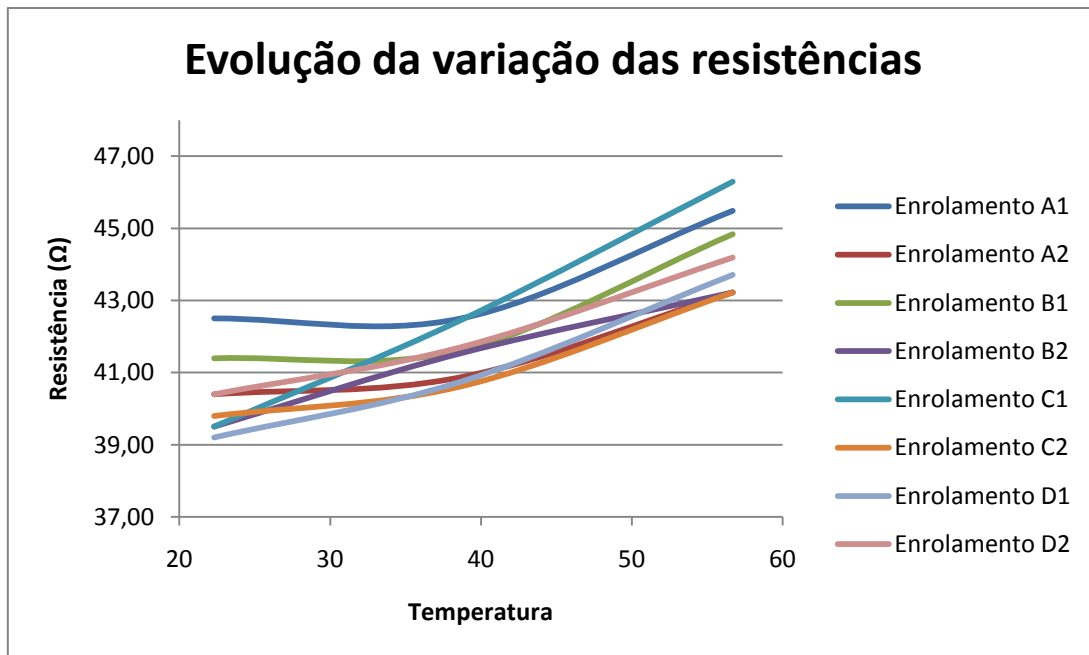


Figura 5.4 – Apresentação da evolução da variação das resistências com a temperatura.

Comparando os valores obtidos experimentalmente com os valores estimados pelo modelo utilizado, nota-se que existe uma boa correspondência, já que os valores reais apresentam variações inferiores a 10% do valor estimado.

5.2 Caracterização experimental

A caracterização electromecânica, experimental, foi efectuada bloqueando o rotor em diferentes posições, e, para cada uma dessas posições aplicou-se, separadamente, a cada uma das fases, uma corrente de intensidade ajustada. Desta forma foi possível relacionar o valor da intensidade de corrente e da posição relativa entre estator e rotor com o binário útil desenvolvido no veio do motor.

Na Figura 5.5 apresenta-se um vista geral do banco de ensaio, onde se pode observar não só o motor, mas também a célula de carga e o braço utilizado para decompor o binário em força.

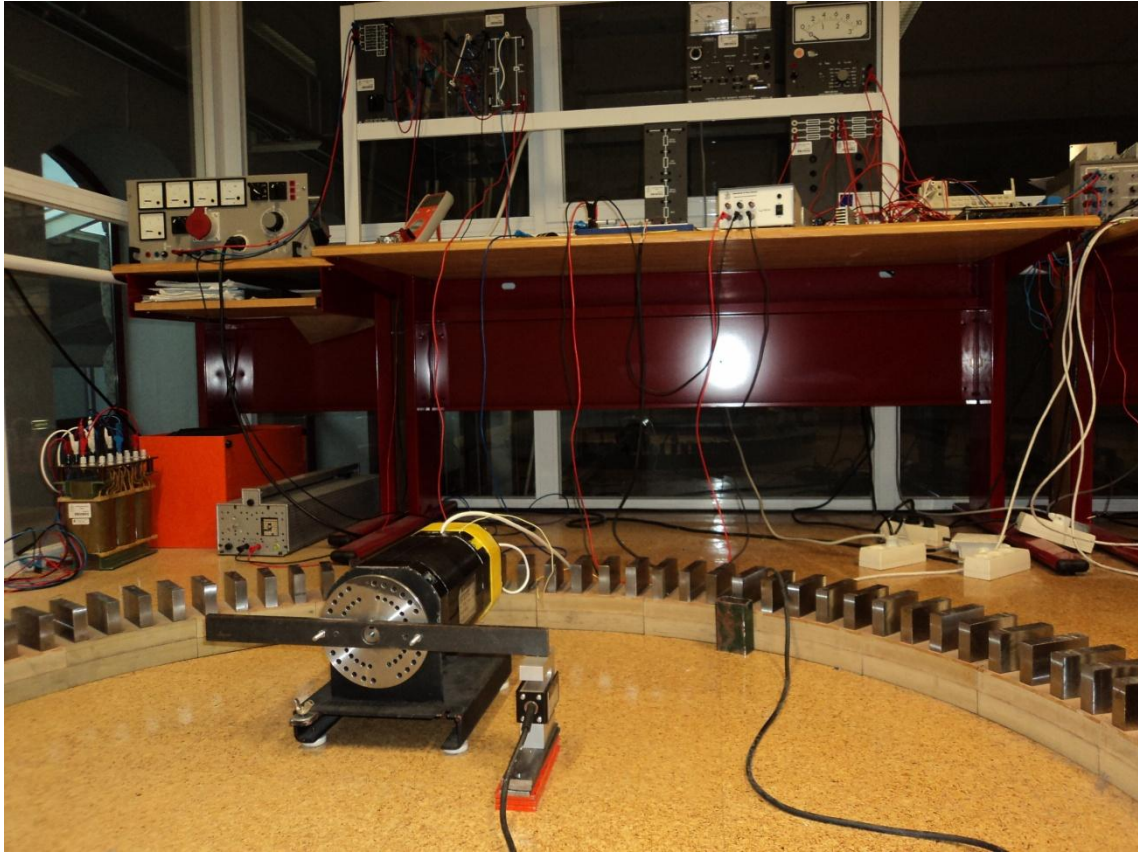


Figura 5.5 – Apresentação do banco de ensaio.

Da Figura 5.6 à Figura 5.13 pode observar-se o andamento do binário em função da corrente de cada uma das fases, do tipo de ligação entre as bobinas de uma fase, e da posição relativa entre estator e rotor.

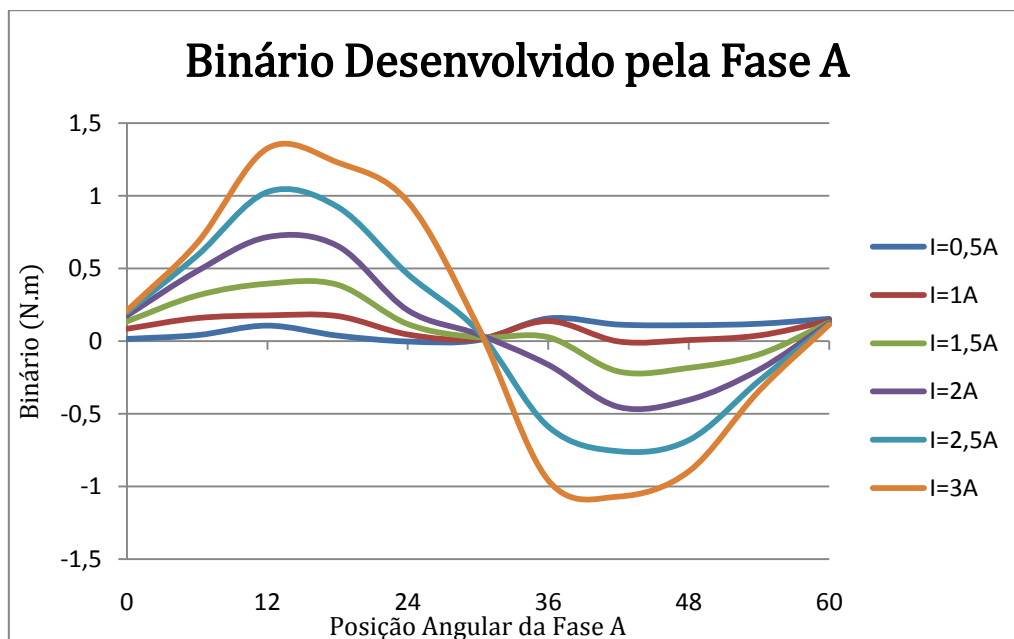


Figura 5.6 – Apresentação dos Valores de Binário na fase A, ligada em paralelo.

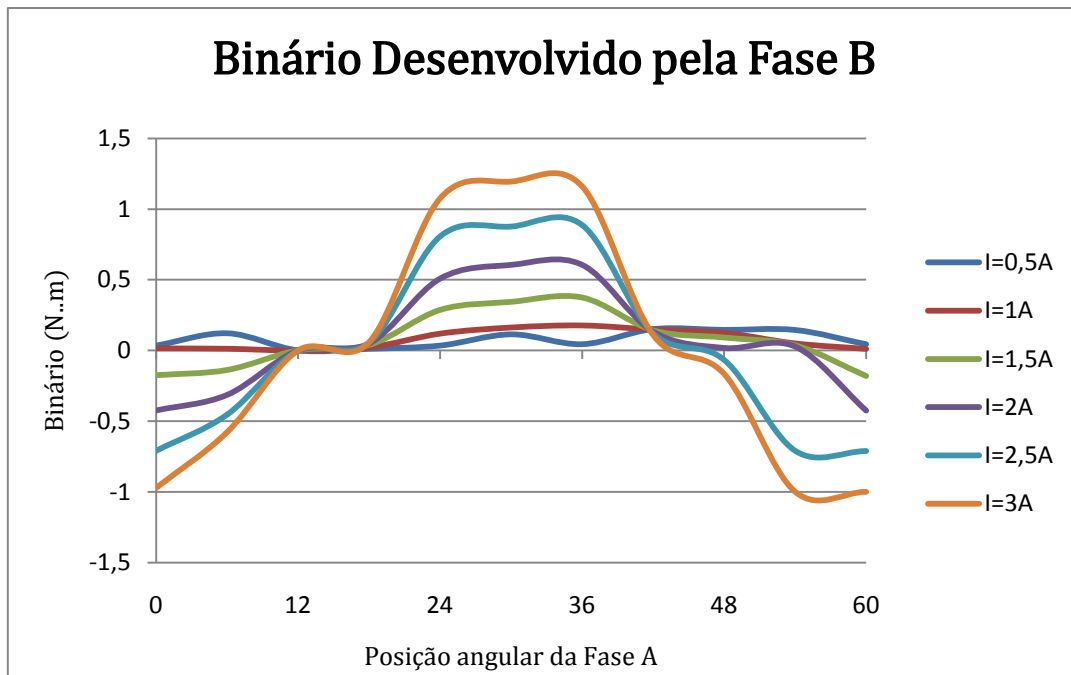


Figura 5.7 – Apresentação dos Valores de Binário na fase B, ligada em paralelo.

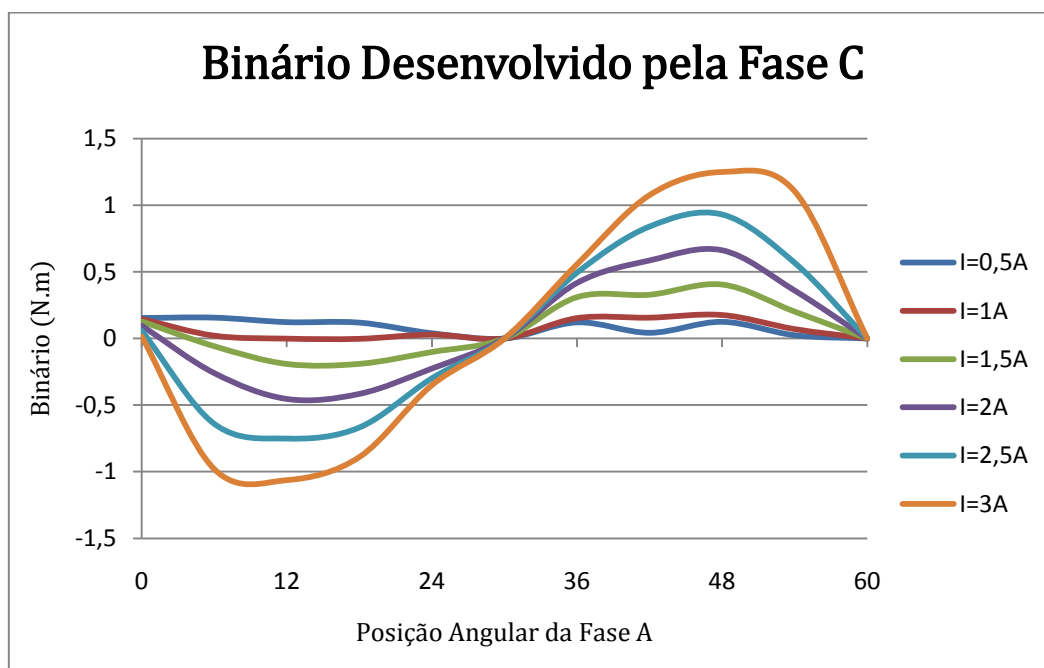


Figura 5.8 – Apresentação dos Valores de Binário na fase C, ligada em paralelo.

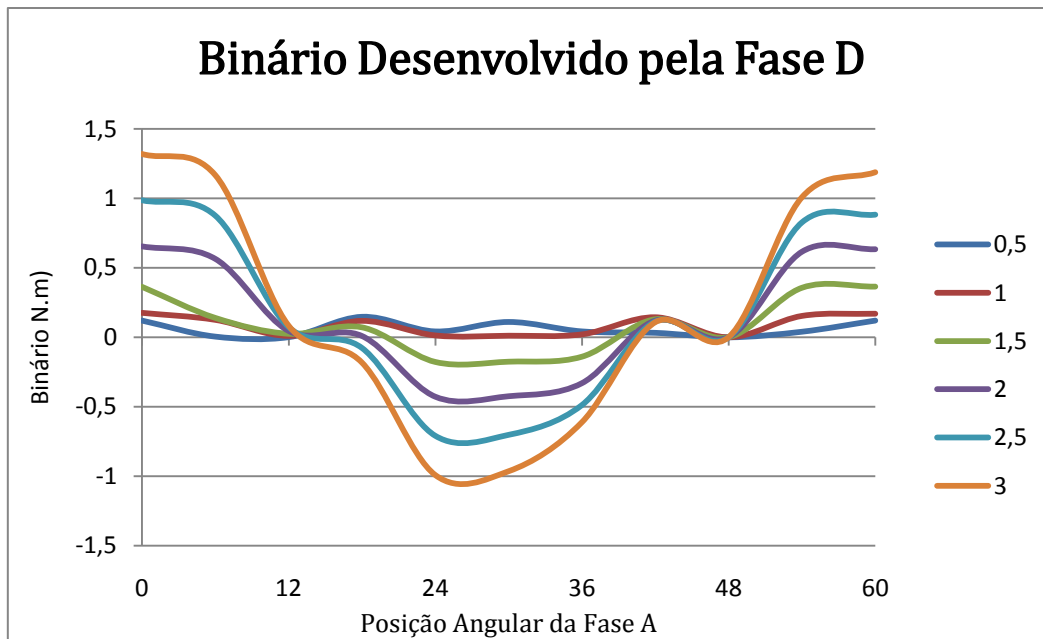


Figura 5.9 – Apresentação dos Valores de Binário na fase D, ligada em paralelo.

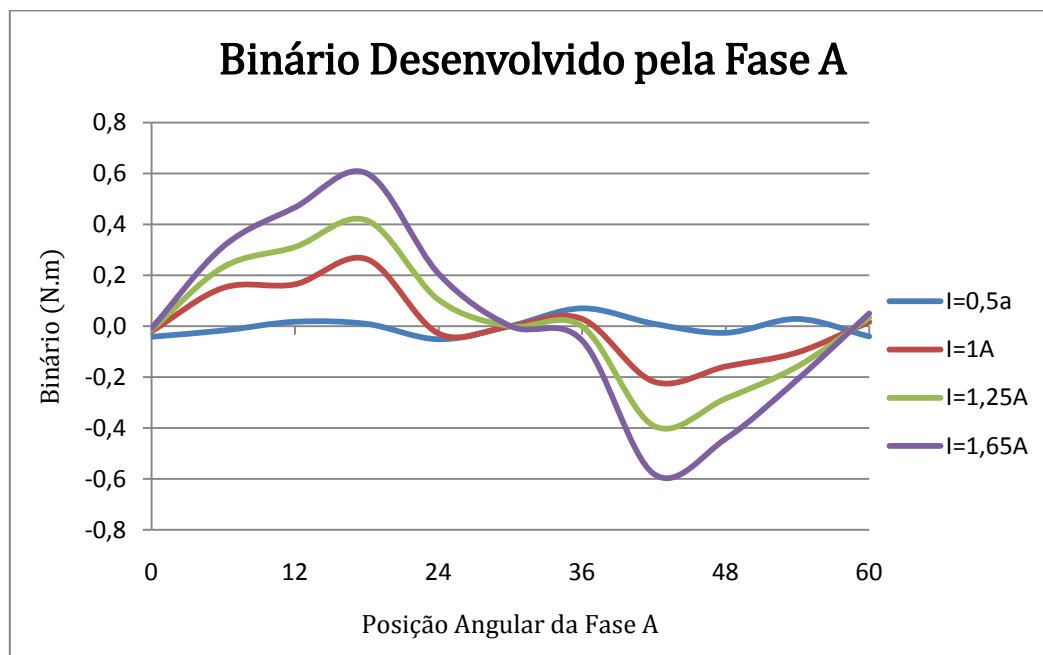


Figura 5.10 – Apresentação dos Valores de Binário na fase A, ligada em série.

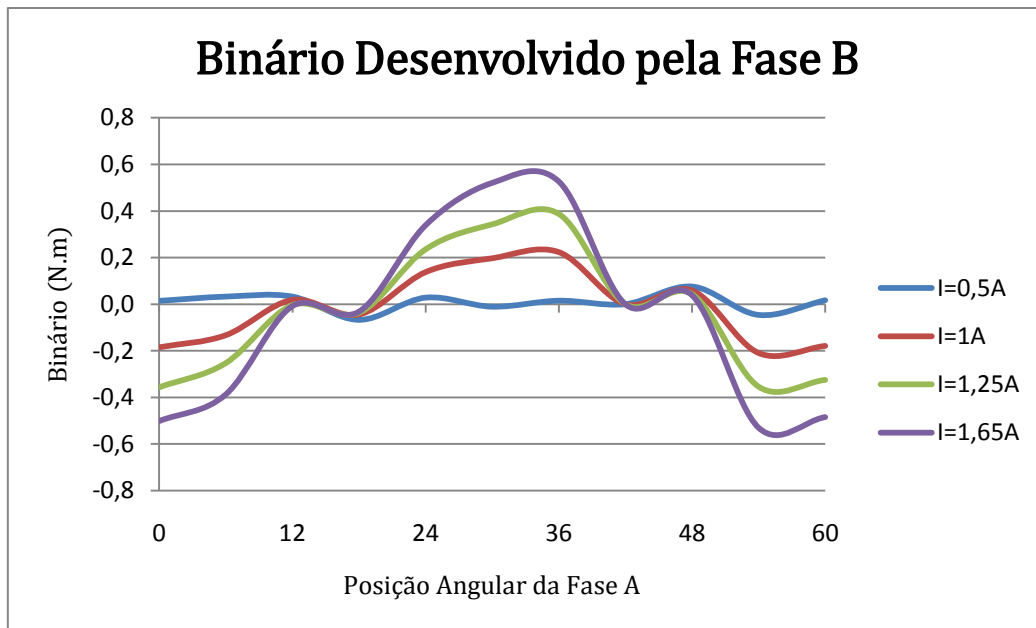


Figura 5.11 – Apresentação dos Valores de Binário na fase B, ligada em série.

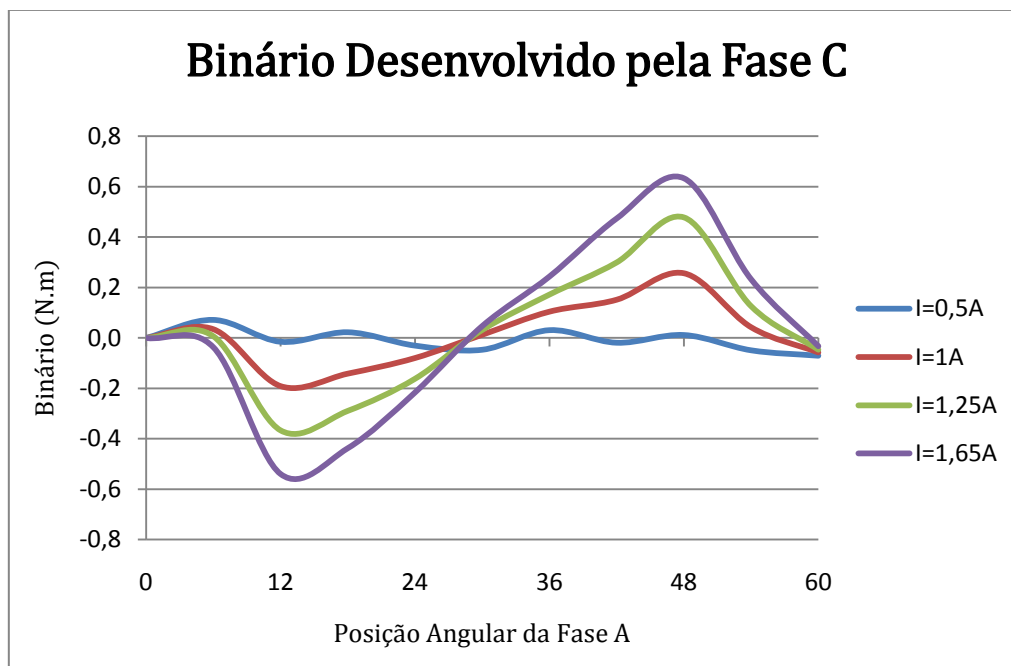


Figura 5.12 – Apresentação dos Valores de Binário na fase C, ligada em série.

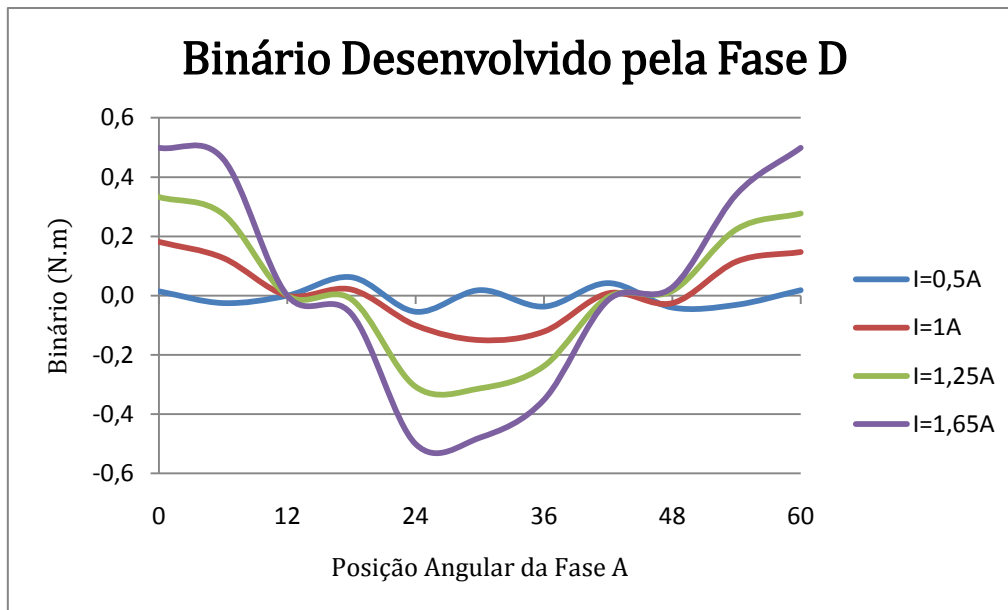


Figura 5.13 – Apresentação dos Valores de Binário na fase D, ligada em série.

5.3 Conclusão:

Analisando pormenorizadamente os resultados obtidos conclui-se que:

- As fases apresentam boa simetria geométrica em torno da posição alinhada.
- Se conseguiu um bom equilíbrio entre os dois ramos de uma mesma fase, uma vez que existe uma grande similitude entre os valores obtidos para o ensaio com ligação em série e em paralelo.
- O MRVC comporta-se como estudado no Capítulo 2, onde é demonstrado o princípio de funcionamento do mesmo.

CAPÍTULO

6

Considerações Finais

Neste capítulo apresentam-se, como complemento às conclusões, que foram sendo obtidas ao longo deste trabalho, algumas considerações finais, que se consideram relevantes. Adicionalmente, apresentam-se as sugestões, que se entendem mais relevantes, para prossecução deste trabalho futuro.

6.1 Considerações finais

Do ponto de visto do autor, este trabalho revelou-se um grande desafio, e, simultaneamente, um trabalho bastante enriquecedor na medida em que proporcionou um contacto aprofundado com varias áreas técnicas relativas aos accionamentos eléctricos de relutância variável.

Certo que o trabalho desenvolvido irá contribuir para um maior conhecimento sobre este tipo de motores, permitindo no futuro uma abordagem mais esclarecedora sobre formas de estudo dos mesmos, no entanto, o trabalho aqui apresentado apenas pretende ser um “guia” para trabalhos futuros, não tendo como objectivo impor nenhum método de análise deste tipo de equipamento, mas sim ser um método complementar a outros que possam ser adoptados.

Resumidamente as contribuições originais deste trabalho são:

- ✓ Desenvolvimento de um método de cálculo otimizado, baseado no desempenho da máquina em regime nominal.
- ✓ Apresentação de uma abordagem, que se pensa inovadora, para caracterização electromagnética de materiais existentes em geometrias complexas.

6.2 Trabalhos futuros

Nenhum trabalho com o cariz deste que se apresenta pode considerar-se esgotado no que se refere ao estudo científico e técnico que sobre ele se possa fazer. Assim, é entendimento do autor que os futuros trabalhos nesta área do saber devem explorar os seguintes aspectos:

- ✓ Análise do Comportamento térmico da máquina, com especial incidência na determinação do valor nominal das correntes de fase.
- ✓ Análise da histerese, e estudo de uma forma de incorporar este efeito no modelo computacional da máquina
- ✓ Análise detalhada do acoplamento entre fases e estudo dos efeitos provocados pela corrente numa fase nas restantes fase.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Manuel Vaz Guedes, 2003 Introdução à Tracção Eléctrica. Breve História da Tracção Eléctrica (1820 a 1895)
- [2] P. Chancharoensook and M.F. Rahman, *Determination Of Magnetization And Static Torque Characteristics Of A Four-Phase Switched Reluctance Motor: Experimental Investigations.*
- [3] Chancharoensook P. and Rahman M.F., *Machine's Characteristics Identification: A Preliminary Study on Direct Torque Control for Switched Reluctance Motor Drives*, presented at AUPEC 2000 Conference, Brisbane, September 2000, pp. 132-137.
- [4] Cheok, A.D., and Ertugrul, N., *Computer Based Automated Test Measurement system for Determining Magnetization Characteristics of Switched Reluctance Motors*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 3, June 2001, pp. 690-696.
- [5] Ferrero, A., and Raciti, A., *A Digital Method for the Determination of the Magnetic Characteristic of Variable Reluctance Motors*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 39, no. 4, August 1990, pp. 604-608.
- [6] Sharma, V.K., Murthy, S.S., and Singh, B., *An Improved Method for the Determination of Saturation Characteristics of Switched Reluctance Motors*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, no. 5, October 1999, pp. 995-1000.
- [7] Yadlapalli N., *Implementation of a novel soft-switching inverter for switched reluctance motor drives*, M. S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, July 1999.
- [8] Yogesh Pahariya, Rakesh Saxena and Bhim Singh "Switched Reluctance Motor Drive: A New Concept in Variable Speed Drive" IEEMA Journal, Volume XXV, no.10, PP 72 – 76, October 2005.
- [9] Davide Sérgio Baptista da Fonseca, *O Motor de Relutância Variável e a sua Tolerância a Falhas*, Trabalho de Síntese, Julho de 2001.
- [10] http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/4.html, 14 Janeiro de 2010
- [11] T.J.E. Miller, Switched Reluctance Motors and their Control, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.

[12] Hassan H. Moghbelli and Muhammad H. Rashid, The Switched Reluctance Motor Drive: Characteristics and Performances, EPE 91, pp. 1-391-1- 403, Firenze 1991.

[13] Yogesh Pahariya, Rakesh Saxena and Bhim Singh "*Switched Reluctance Motor Drive: A New Concept in Variable Speed Drive*" IEEMA Journal, Volume XXV, no.10, PP 72 – 76, October 2005.

[14] Rakesh Saxena, Bhim Singh and Yogesh Pahariya, "*Measurement of Flux Linkage and Inductance Profile of SRM*" International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 2, April, 2010.

[15] P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, P.T. Blenkinsop, J. Corda e N.N. Fulton, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", IEE proc., part B, Vol. 127, No. 4, pp. 253-265, July 1980.

[16] Ferrero A., Raciti A., "*A Digital Method For Determination Of Magnetic Characteristic Of Variable Reluctance Motor*" IEEE Transactions On Instrumentation & Measurement. Vol.39. No.4, August 1990. Pp. 604-608.

[17] Mizia, J., *et al*, "*Finite element force calculation: comparison of methods for electric machines*", IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 24 Issue: 1, Jan. 1988, pp. 447–450.

ANEXO

A.1.

Código fonte do cálculo do material no FEMM.

```

clear
clc
i=[ 152.009294617851e-003
    361.413729392876e-003
    709.659118652344e-003
    1.06867198114810e+000
    1.42811161388050e+000
    1.79777534298780e+000
    2.14209634881270e+000
    2.52539524887547e+000
    2.93984235127767e+000
    3.42890491485596e+000
    4.02547658284505e+000
    4.63845367431641e+000
    5.27161661783854e+000
    5.80127220153809e+000
    6.19797973632812e+000
    6.52753949846540e+000
    6.72871907552084e+000];

for J=1:17%valores de corrente

    openfemm
    opendocument('carbon steel.fem')
    mi_probdef(0,'millimeters','planar',1e-8,161,30);
    mi_setcurrent('fase a',i(J,1));
    mi_analyze(1);
    hideconsole;
    mi_loadsolution;
    X=mo_getcircuitproperties('fase a')
    psiA(J,1)=abs(X(1,3))
    X=mo_getcircuitproperties('fase b')
    psiB(J,1)=abs(X(1,3))
    save carbon_steel.mat
end

closefemm
clear

```

ANEXO

A.2.

Código fonte do cálculo do binário e da força magnetomotriz.

Primeira parte:

```
clear
clc
for k=1:121
    teta(k)=60*(k-1)/120;%variação do ângulo
end

for J=2:102%valores de corrente
    i(J,1)=(J-1)*4/50;
    fmm(J,1)=400*i(J,1);
    for k=1:121
        openfemm
        opendocument('carbon_steel.fem')
        mi_probdef(0,'millimeters','planar',1e-8,161,30); %define as
condições do problema
        mi_saveas('carbon_steel_temp.fem')
        mi_selectgroup(2);
        mi_moverotate(0,0,teta(k))
        mi_setcurrent('fase a',i(J,1));
        mi_analyze(1);
        hideconsole;
        mi_loadsolution;
        X=mo_getcircuitproperties('fase a');
        fiA(J,k)=abs(X(1,3))/400;
        Y=mo_getcircuitproperties('fase b');
        fiB(J,k)=abs(Y(1,3))/400;
        Z=mo_getcircuitproperties('fase c');
        fiC(J,k)=abs(Z(1,3))/400;
        ZZ=mo_getcircuitproperties('fase d');
        fiD(J,k)=abs(ZZ(1,3))/400;
        mo_groupselectblock(2);
        Torque_fmm_teta(J,k)=mo_blockintegral(22);
        save curvas_fmm_teta.mat
        closefemm
    end
end
end
```

Segunda parte:

```
clear
clc
load curvas_fmm_teta.mat
teta_rad=teta*pi()/180;
for J=2:200%valores de fluxo
    fi(J,1)=J*fiA(295,1)/200;
end
for J=2:200%valores de fluxo
    J
    for k=1:301
        k
        fmm_fi_teta(J,k)=interp1(fiA(:,k),fmm,fi(J,1),'spline');
        fmm_fi_teta(J,602-k)=fmm_fi_teta(J,k);

Torque_fi_teta(J,k)=interp2(teta,fmm,Torque_fmm_teta,teta(k),fmm_fi_teta(J,k),'spline');
        Torque_fi_teta(J,602-k)=-Torque_fi_teta(J,k);
    end
save curvas_fi_teta.mat fi teta teta_rad fmm_fi_teta Torque_fi_teta
end
```

ANEXO

A.3.

Tabelas de ensaio do protótipo em paralelo e em série.

Fase A ligada em paralelo						
	$I_A = 0,5 \text{ A}$	$I_A = 1 \text{ A}$	$I_A = 1,5 \text{ A}$	$I_A = 2 \text{ A}$	$I_A = 2,5 \text{ A}$	$I_A = 3 \text{ A}$
0	0,016	0,085	0,137	0,175	0,198	0,209
6	0,042	0,158	0,315	0,481	0,589	0,675
12	0,107	0,177	0,396	0,715	1,026	1,326
18	0,039	0,172	0,388	0,654	0,924	1,229
24	-0,002	0,046	0,118	0,211	0,460	0,959
30	0,008	0,014	0,027	0,047	0,069	0,098
36	0,156	0,138	0,028	-0,163	-0,589	-0,958
42	0,114	-0,002	-0,208	-0,453	-0,758	-1,069
48	0,109	0,008	-0,183	-0,405	-0,681	-0,896
54	0,120	0,039	-0,090	-0,197	-0,273	-0,342
60	0,153	0,139	0,129	0,123	0,117	0,113

Apresentação dos Valores de Binário do protótipo na fase A.

Fase B ligada em paralelo						
	$I_B = 0,5 \text{ A}$	$I_B = 1 \text{ A}$	$I_B = 1,5 \text{ A}$	$I_B = 2 \text{ A}$	$I_B = 2,5 \text{ A}$	$I_B = 3 \text{ A}$
0	0,034	0,015	-0,176	-0,425	-0,709	-0,972
6	0,121	0,012	-0,139	-0,315	-0,453	-0,578
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,011	0,022	0,038	0,049	0,055	0,060
24	0,034	0,119	0,286	0,509	0,806	1,076
30	0,114	0,162	0,343	0,606	0,876	1,194
36	0,044	0,176	0,373	0,606	0,886	1,159
42	0,151	0,147	0,141	0,132	0,121	0,108
48	0,145	0,124	0,090	0,017	-0,067	-0,167
54	0,145	0,050	0,035	0,027	-0,709	-1,000
60	0,043	0,011	-0,182	-0,426	-0,711	-1,000

Apresentação dos Valores de Binário do protótipo na fase B.

Fase C ligada em paralelo						
	$I_C = 0,5 \text{ A}$	$I_C = 1 \text{ A}$	$I_C = 1,5 \text{ A}$	$I_C = 2 \text{ A}$	$I_C = 2,5 \text{ A}$	$I_C = 3 \text{ A}$
0	0,154	0,146	0,129	0,097	0,060	0,016
6	0,157	0,021	-0,057	-0,259	-0,640	-0,979
12	0,123	-0,001	-0,190	-0,453	-0,751	-1,062
18	0,119	-0,002	-0,189	-0,415	-0,668	-0,889
24	0,040	0,029	-0,100	-0,225	-0,298	-0,349
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
36	0,121	0,153	0,311	0,417	0,495	0,557
42	0,043	0,156	0,329	0,585	0,841	1,076
48	0,125	0,176	0,405	0,661	0,931	1,249
54	0,024	0,071	0,202	0,359	0,568	1,104
60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Apresentação dos Valores de Binário do protótipo na fase C.

Fase D ligada em paralelo						
	$I_D = 0,5 \text{ A}$	$I_D = 1 \text{ A}$	$I_D = 1,5 \text{ A}$	$I_D = 2 \text{ A}$	$I_D = 2,5 \text{ A}$	$I_D = 3 \text{ A}$
0	0,120	0,176	0,364	0,654	0,986	1,319
6	0,005	0,126	0,139	0,564	0,876	1,166
12	0,001	0,010	0,025	0,045	0,073	0,082
18	0,147	0,119	0,071	0,008	-0,077	-0,183
24	0,042	0,014	-0,178	-0,429	-0,709	-0,993
30	0,110	0,012	-0,176	-0,425	-0,702	-0,965
36	0,042	0,021	-0,140	-0,331	-0,488	-0,612
42	0,032	0,145	0,130	0,119	0,113	0,108
48	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
54	0,040	0,154	0,357	0,615	0,827	1,007
60	0,120	0,170	0,365	0,633	0,883	1,187

Apresentação dos Valores de Binário do protótipo na fase D.

Fase A ligada em série				Fase B ligada em série				
	$I_A = 0,5 \text{ A}$	$I_A = 1 \text{ A}$	$I_A = 1,25 \text{ A}$	$I_A = 1,65 \text{ A}$	$I_B = 0,5 \text{ A}$	$I_B = 1 \text{ A}$	$I_B = 1,25 \text{ A}$	$I_B = 1,65 \text{ A}$
0	-0,042	-0,020	-0,014	-0,009	0,014	-0,185	-0,357	-0,502
6	-0,017	0,151	0,233	0,313	0,033	-0,133	-0,253	-0,387
12	0,017	0,165	0,312	0,467	0,033	0,018	-0,004	-0,008
18	0,009	0,263	0,416	0,600	-0,068	-0,044	-0,037	-0,032
24	-0,052	-0,029	0,104	0,206	0,028	0,138	0,235	0,339
30	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,011	0,197	0,343	0,521
36	0,070	0,029	-0,001	-0,057	0,015	0,224	0,388	0,527
42	0,009	-0,217	-0,392	-0,581	0,000	0,000	0,000	0,000
48	-0,026	-0,158	-0,284	-0,443	0,076	0,059	0,043	0,039
54	0,028	-0,103	-0,158	-0,210	-0,046	-0,209	-0,354	-0,530
60	-0,041	0,017	0,034	0,050	0,017	-0,179	-0,325	-0,484

Apresentação dos Valores de Binário do protótipo na fase A e B.

Fase C ligada em série				Fase D ligada em série				
	$I_C = 0,5 \text{ A}$	$I_C = 1 \text{ A}$	$I_C = 1,25 \text{ A}$	$I_C = 1,65 \text{ A}$	$I_D = 0,5 \text{ A}$	$I_D = 1 \text{ A}$	$I_D = 1,25 \text{ A}$	$I_D = 1,65 \text{ A}$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,181	0,332	0,499
6	0,072	0,035	0,006	-0,037	-0,025	0,127	0,275	0,461
12	-0,015	-0,191	-0,367	-0,540	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,023	-0,142	-0,289	-0,437	0,062	0,020	-0,013	-0,062
24	-0,030	-0,080	-0,162	-0,216	-0,054	-0,101	-0,308	-0,501
30	-0,047	0,013	0,031	0,047	0,019	-0,150	-0,313	-0,480
36	0,031	0,104	0,172	0,244	-0,037	-0,121	-0,238	-0,351
42	-0,019	0,152	0,299	0,474	0,042	0,007	-0,006	-0,015
48	0,012	0,257	0,478	0,633	-0,040	-0,026	0,016	0,028
54	-0,049	0,042	0,125	0,233	-0,031	0,115	0,224	0,342
60	-0,070	-0,057	-0,047	-0,033	0,019	0,147	0,277	0,498

Apresentação dos Valores de Binário do protótipo na fase C e D.