



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Gonçalo Matos dos Santos

**MÉTODOS AVANÇADOS PARA O DIAGNÓSTICO DE  
FALHAS NO ROTOR DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE  
ÍMANES PERMANENTES MULTIFÁSICAS**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores no Ramo de Energia, orientada pelo Professor Doutor Sérgio  
Manuel Ângelo da Cruz e apresentada ao Departamento de Engenharia  
Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

Setembro de 2023





FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Universidade de Coimbra  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Dissertação de Mestrado

# **Métodos Avançados para o Diagnóstico de Falhas no Rotor de Máquinas Síncronas de Ímanes Permanentes Multifásicas**

Gonçalo Matos dos Santos

Júri:

Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira (presidente)

Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz (orientador)

Professor Doutor Marco Alexandre Cravo Gomes (vogal)

Coimbra, setembro de 2023



*“No meio do caos há sempre uma oportunidade”*

Sun Tzu

*“Only those who attempt the absurd can achieve the impossible.”*

Albert Einstein

*“The present is theirs; the future, for which I really worked, is mine.”*

Nikola Tesla



# Agradecimentos

A realização desta dissertação é o culminar do trabalho e dedicação investidos ao longo do último ano e que me trouxe imenso conhecimento e capacidades essenciais para a vida. A concretização desta etapa importante, e a concretização de um sonho de criança, deve-se também ao contributo de um conjunto de pessoas sem as quais não teria sido possível e às quais expresso o meu sincero agradecimento:

Ao Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz, meu orientador, a quem devo todo o conhecimento transmitido no decorrer deste trabalho. Aprendi muito, não só sobre assuntos inteiramente relacionados com a realização desta dissertação, mas também sobre como ser uma melhor pessoa e um bom profissional. Serão conselhos que certamente levarei para a vida. Obrigado, também, ao Instituto de Telecomunicações, e ao DEEC, por todos os materiais disponibilizados que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, Mara, Rogério e Gonçalo Abrantes, pelo companheirismo, bom ambiente e espírito de interajuda. Obrigado por todas as trocas de ideias e conversas mais informais que ajudaram a tornar esta etapa mais fácil.

Aos meus bons amigos Roma e Diana, um muitíssimo obrigado por todos os momentos, desabafos e gargalhadas que ajudaram a que estes dois anos fossem incríveis. Serão memórias que levo para a vida.

Ao meu grande amigo Pedro, obrigado por teres estado presente e seres também uma inspiração para seguir sempre os meus sonhos, mostrando a cada dia que, com esforço e dedicação, tudo se consegue.

Ao meu colega de casa e grande amigo, Daniel, pelo companheirismo e por todas as memórias que criámos durante estes anos.

À minha namorada Teresa por ter estado sempre ao meu lado, por nunca me ter deixado desistir e por me ajudar em todas as etapas deste processo e me fazer sempre acreditar em mim e no que sou capaz. Sem ti certamente não teria sido igual.

À minha família, especialmente ao meu pai, mãe e avó, por me terem ajudado sempre em tudo e por todo o esforço e sacrifício que fizeram para que eu pudesse concretizar este sonho.

A todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho, um muito obrigado.

Dedico este trabalho ao *meu avô António* e *avó Virgínia*, que certamente estariam orgulhosos de mim.





# Resumo

Num Mundo cada vez mais eletrificado e dependente da energia elétrica, a utilização desta de forma racional e eficiente torna-se um assunto de elevado interesse. A transição energética está a acontecer e, por isso, nos últimos anos tem-se vindo a assistir a um aumento da eletrificação dos transportes e da instalação de fontes de energia renovável como, por exemplo, a energia eólica. O crescimento destes dois setores, em que existe uma máquina elétrica como o elemento gerador e/ou propulsor, surge também com máquinas de nova geração, como as máquinas multifásicas, o que leva à necessidade de se desenvolverem novas técnicas para o diagnóstico de falhas que ocorrem nestes ativos elétricos, podendo-se assim fazer uma melhor gestão dos mesmos, evitar desperdícios de energia e aumentar a sua vida útil.

Esta dissertação teve como objetivo realizar o diagnóstico de falhas nos ímanes permanentes do rotor de máquinas síncronas de ímanes permanentes multifásicas, devido à maior disseminação destas máquinas elétricas no contexto energético atual.

A concretização deste objetivo prendeu-se com a análise do 6<sup>o</sup> harmónico do vetor espacial da tensão e do vetor espacial da saída do observador de perturbações (DOB), onde para várias velocidades e vários regimes de carga se estudou a variação da sua amplitude com a ocorrência da desmagnetização. Para os ensaios experimentais, ao contrário do que foi realizado para as simulações, foi aplicada uma técnica de compensação de tempo morto à tensão, devido ao efeito deste na componente espectral utilizada como indicadora de falha.

Os resultados obtidos levaram ao desenvolvimento de duas técnicas de diagnóstico capazes de indicar a ocorrência da desmagnetização, sendo que a técnica que faz uso do vetor espacial da tensão é mais eficaz para velocidades altas e médias, enquanto a técnica que faz uso do vetor espacial da saída do DOB foi eficaz para todas as velocidades.

**Palavras-chave:** máquina síncrona de ímanes permanentes; máquinas multifásicas; diagnóstico de falhas; desmagnetização; observador de perturbações; controlo preditivo.



# Abstract

In an increasingly electrified and electricity-dependent world, the rational and efficient use of electricity is a matter of great interest. The energy transition is taking place and, therefore, in recent years we have seen an increase in the electrification of transport and the installation of renewable energy sources such as wind energy. The growth of these two sectors, in which there is an electrical machine as the generating and/or propulsion element, also comes with a new generation of machines, such as multiphase machines, which leads to the need to develop new techniques for diagnosing faults that may occur in these electrical assets, thus allowing a better management of them, avoiding energy waste and increasing their lifespan.

The purpose of this dissertation was to diagnose faults in the rotor permanent magnets of multiphase permanent magnet synchronous machines, due to the greater spread of these electrical machines in today's energy context.

This objective was achieved by analysing the 6th harmonic of the voltage space vector and the disturbance observer (DOB) output space vector, where the variation of their amplitude with the occurrence of demagnetisation was studied for various speeds and load regimes. For the experimental tests, unlike the simulations, a dead-time compensation technique was applied to the voltage, due to its effect on the spectral component used as a fault indicator.

The results obtained led to the development of two diagnostic techniques capable of indicating the occurrence of demagnetisation, with the technique that makes use of the voltage space vector being more effective for high and medium speeds, while the technique that makes use of the DOB output space vector was effective for all speeds.

**Keywords:** permanent magnet synchronous machine; multiphase machines; fault diagnosis; fault diagnosis; disturbance observer; predictive control.



# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	2
<b>2. Métodos de Diagnóstico em PMSMs</b> .....	<b>3</b>
2.1 Falhas em PMSMs.....	3
2.2 Diagnóstico de falhas em M-PMSMs.....	5
2.2.1 Métodos baseados em modelos .....	5
2.2.2 Métodos baseados em análise de sinais .....	6
2.2.3 Métodos baseados em inteligência artificial .....	7
2.2.4 Métodos de diagnóstico de falhas nos ímanes de PMSMs.....	7
<b>3. Modelo do M-PMSM e Estratégia de Controlo</b> .....	<b>15</b>
3.1 Estratégia de controlo aplicada ao M-PMSM .....	15
3.1.1 Modelo matemático do M-PMSM.....	15
3.1.2 Controlo preditivo de corrente com observador de perturbações.....	18
3.2 Descrição do modelo de co-simulação .....	22
3.3 Descrição da montagem experimental .....	24
<b>4. Resultados</b> .....	<b>27</b>
4.1 Análise dos resultados de simulação .....	27
4.2 Análise dos resultados experimentais .....	39
4.3 Considerações sobre as estratégias de diagnóstico desenvolvidas.....	52
<b>5. Conclusões e Trabalho Futuro</b> .....	<b>55</b>
5.1 Conclusão .....	55
5.2 Perspetivas de trabalho futuro .....	57
<b>Referências</b> .....	<b>59</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>65</b>
Anexo A. Características do M-PMSM e do MIT.....	67
Anexo B. Testes de medida da força contraeletromotriz no M-PMSM.....	68
Anexo C. Imagens da montagem experimental.....	69



# Lista de Símbolos

$f_{demag}$	Componente espectral devido à desmagnetização	Hz
$f_s$	Frequência fundamental	Hz
$p$	Número de pares de polos	
$e_f$	Força contraeletromotriz em estado de falha	V
$e_h$	Força contraeletromotriz em estado saudável	V
$n_{eff}$	Número de ímanes saudáveis num estado de falha	
$n_{tot}$	Número total de ímanes no rotor	
$\delta_m$	Espessura do íman permanente	mm
$T_s$	Período de amostragem do sistema de controlo	s
$u_s^{abc}$	Vetor da tensão, em coordenadas de fase	V
$R_s$	Resistência dos enrolamentos estatóricos	$\Omega$
$i_s^{abc}$	Vetor da corrente, em coordenadas de fase	A
$L_s^{abc}$	Indutância em coordenadas de fase	H
$e_s^{abc}$	Vetor da força contraeletromotriz, em coordenadas de fase	V
$\psi_{s,PM}^{abc}$	Vetor do fluxo gerado pelos ímanes, em coordenadas de fase	Wb
$\psi_s^{abc}$	Vetor do fluxo encadeado, em coordenadas de fase	Wb
$T_{VSD}$	Matriz da transformação VSD	
$R$	Matriz de rotação	
$u_s^{dq}$	Tensões no subespaço $dq$	V
$i_s^{dq}$	Correntes no subespaço $dq$	A
$L_s^{dq}$	Indutâncias no subespaço $dq$	H
$\omega_r$	Velocidade angular elétrica do rotor	rad/s
$e_s^{dq}$	Força contraeletromotriz no referencial síncrono	V
$\psi_{s,PM}^{dq}$	Fluxo gerado pelos ímanes permanentes no referencial rotórico	Wb
$\psi_s^{dq}$	Fluxo estatórico encadeado no referencial rotórico	Wb
$\theta$	Posição angular do rotor	rad
$g_f$	Função custo do estágio fundamental do DOB-PCC	
$g_f$	Função custo do estágio secundário do DOB-PCC	
$u^{x'y'}$	Vetor espacial da tensão no subespaço $x'y'$	V
$u^{x'}$	Componente do vetor espacial da tensão no eixo $x'$	V
$u^{y'}$	Componente do vetor espacial da tensão no eixo $y'$	V
$u_{DOB}^{dq}$	Vetor espacial da saída do DOB no subespaço $dq$	V

$u_{DOB}^d$	Componente do vetor espacial da saída do DOB no eixo $d$	V
$u_{DOB}^q$	Componente do vetor espacial da saída do DOB no eixo $q$	V
$u_{DOB}^{x'y'}$	Vetor espacial da saída do DOB no subespaço $x'y'$	V
$u_{DOB}^{x'}$	Componente do vetor espacial da saída do DOB no eixo $x'$	V
$u_{DOB}^{y'}$	Componente do vetor espacial da saída do DOB no eixo $y'$	V
$U_{DOB}^{dq}$	Módulo do vetor espacial da saída do DOB, no subespaço $dq$	V
$\Delta U_{a_i}$	Erro de tensão na fase $a_i$	V
$\Delta U_{b_i}$	Erro de tensão na fase $b_i$	V
$U_d$	Erro de tensão associado ao tempo morto dos ímanes	V
$T_d$	Tempo morto	s
$T_{on}$	Tempo de entrada em condução dos IGBTs	s
$T_{off}$	Tempo de entrada no corte dos IGBTs	s
$T_{pwm}$	Período de comutação dos IGBTs	s
$U_{DC}$	Tensão do barramento DC	V
$U_{sat}$	Tensão de saturação dos IGBTs dos inversores	V
$U_{diode}$	Queda de tensão nos díodos do inversor	V
$n$	Velocidade de rotação do rotor	rpm
$P_n$	Potência nominal do M-PMSM	W
$U_n$	Tensão nominal do M-PMSM	V
$I_n$	Corrente nominal do M-PMSM	A
$q$	Número de ranhuras por polo e por fase	
$T_n$	Binário nominal	N.m
$\eta$	Rendimento	%
$m$	Número de fases	
$\tau_c$	Passo da bobina	m
$L_{dq}$	Indutância do M-PMSM no subespaço $dq$	H
$L_{x'y'}$	Indutância do M-PMSM no subespaço $x'y'$	H
$L_{z1z2}$	Indutância do M-PMSM no subespaço $z1z2$	H



# Lista de Acrónimos

DC	Corrente contínua ( <i>Direct Current</i> )
DOB	Observador de perturbações ( <i>Disturbance Observer</i> )
DOB-PCC	Controlo preditivo de corrente com observador de perturbações ( <i>Disturbance Observer – Predictive Current Controller</i> )
DTC	Controlo direto de binário ( <i>Direct Torque Control</i> )
EKF	Filtro de <i>Kalman</i> estendido ( <i>Extended Kalman Filter</i> )
FCS-MPC	<i>Finite Control Set – Model Predictive Control</i>
FEA	Análise de elementos finitos ( <i>Finite Element Analysis</i> )
FFT	Transformada rápida de <i>Fourier</i> ( <i>Fast Fourier Transform</i> )
FL	Lógica difusa ( <i>Fuzzi Logic</i> )
FOC	Controlo por orientação de campo ( <i>Field Oriented Control</i> )
HRC	Ligação de alta resistência ( <i>High Resistance Connection</i> )
IGBT	Transístor bipolar de porta isolada ( <i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i> )
I-PMSM	Motor síncrono de ímanes permanentes com ímanes no interior do rotor ( <i>Interior-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor</i> )
MIT	Motor de indução trifásico
M-PMSM	Motor síncrono de ímanes permanentes multifásico ( <i>Multiphase Permanent Magnet Synchronous Motor</i> )
MTPA	Binário máximo por Ampere ( <i>Maximum Torque Per Ampere</i> )
NN	Rede neuronal ( <i>Neural Network</i> )
OPF	Falha de fase em circuito aberto ( <i>Open-Phase Fault</i> )
PCC	Controlo preditivo de corrente ( <i>Predictive Current Control</i> )
PMSM	Motor síncrono de ímanes permanentes ( <i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> )
PSC	Controlo preditivo de velocidade ( <i>Predictive Speed Control</i> )
PTC	Controlo preditivo de binário ( <i>Predictive Torque Control</i> )
S-PMSM	Motor síncrono de ímanes permanentes colocados à superfície do rotor ( <i>Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor</i> )

STFT	Transformada curta de <i>Fourier</i> ( <i>Short Time Fourier Transform</i> )
V/f	Controlo tensão/frequência
VEV	Variador eletrónico de velocidade
VSD	Decomposição em subespaços vetoriais ( <i>Vector Space Decomposition</i> )
ZSVC	Componente de sequência nula da tensão ( <i>Zero Sequence Voltage Component</i> )

# Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> - Classificação dos diferentes tipos de falha que ocorrem em PMSMs.....	3
<b>Figura 2.2</b> – Esquema de ligações para a criação de um neutro artificial e posterior medição da ZSVC [5]. .....	8
<b>Figura 2.3</b> – Espectro do vetor espacial da força contraeletromotriz normalizada em estado saudável e com desmagnetização: (a) saudável, no subespaço $\alpha\beta$ ; (b) saudável, no subespaço $xy$ estacionário; (c) desmagnetizado, no subespaço $\alpha\beta$ ; (d) desmagnetizado, no subespaço $xy$ estacionário. Adaptado de [36]......	11
<b>Figura 2.4</b> – Espectro do vetor espacial da tensão de referência por meio de FEA e ensaios experimentais, no subespaço $xy$ estacionário: (a) FEA em estado saudável; (b) experimental em estado saudável; (c) FEA com desmagnetização; (d) experimental com desmagnetização. Adaptado de [37]......	12
<b>Figura 2.5</b> – Fluxo magnético no entreferro do PMSM: (a) com desmagnetização local; (b) com desmagnetização uniforme. Adaptado de [37]......	13
<b>Figura 3.1</b> - Disposição espacial dos enrolamentos do 6-PMSM.....	16
<b>Figura 3.2</b> -Diagrama geral da estratégia DOB-PCC proposta. Adaptado de [3]. .....	21
<b>Figura 3.3</b> – Vista em corte do modelo 2-D do PMSM desenvolvido em ambiente Ansys Maxwell.....	22
<b>Figura 3.4</b> – Integração do modelo 2-D em elementos finitos do M-PMSM com o sistema de controlo do M-PMSM em ambiente Ansys Twin Builder. ....	23
<b>Figura 3.5</b> - Um polo desmagnetizado do M-PMSM: (a) do M-PMSM real, visto de cima; (b) do modelo 2-D do M-PMSM visto de frente.....	23
<b>Figura 3.6</b> - Diagrama unifilar da montagem experimental.....	25
<b>Figura 4.1</b> - Evolução do 6º harmónico de sequência positiva, em eixos $x'y'$ , do vetor espacial: (a) da tensão a 1400 rpm; (b) da saída do DOB a 1400 rpm; (c) da tensão a 1200 rpm; (d) da saída do DOB a 1200 rpm; (e) da tensão a 900 rpm; (f) da saída do DOB a 900 rpm; (g) da tensão a 600 rpm; (h) da saída do DOB a 600 rpm.....	29
<b>Figura 4.2</b> – Variação do 6º harmónico de sequência positiva em eixos $x'y'$ , do vetor espacial: (a) da tensão, como motor, a 100% de carga; (b) da saída do DOB, como motor, a 100% de carga; (c) da tensão com carga nula; (d) da saída do DOD com carga nula; (e) da tensão, como gerador, a 100% de carga; (f) da saída do DOB, como gerador, a 100% de carga.....	31
<b>Figura 4.3</b> - Variação da divisão da amplitude do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial pela velocidade angular: (a) da tensão, como motor, a 100% de carga; (b) da saída do DOB, como motor, a 100% de carga; (c) da tensão, com carga nula; (d)	

da saída do DOB, com carga nula; (e) da tensão, como gerador, com 100% de carga; (f) da saída do DOB, como gerador, com 100% de carga. ....	33
<b>Figura 4.4</b> – Variação da amplitude do 6º harmónico de sequência negativa do vetor espacial da tensão: (a) a 1400 rpm; (b) a 1200 rpm; (c) a 900 rpm; (d) a 600 rpm. ....	34
<b>Figura 4.5</b> – Variação do módulo do vetor espacial da saída do DOB: (a) para 1400 rpm; (b) para 1400 rpm, normalizado pela velocidade angular; (c) para 1200 rpm; (d) para 1200 rpm, normalizado pela velocidade angular; (e) para 900 rpm; (f) para 900 rpm, normalizado pela velocidade angular; (g) para 600 rpm; (h) para 600 rpm, normalizado pela velocidade angular.....	36
<b>Figura 4.6</b> – Variação da tensão aplicada do M-PMSM, para vários regimes de carga: (a) para 1400 rpm; (b) para 1200 rpm; (c) para 900 rpm; (d) para 600 rpm.....	37
<b>Figura 4.7</b> – Forma de onda do (a) sinal de erro de tensão e (b) espectro do vetor espacial da tensão com e sem compensação do tempo morto. ....	40
<b>Figura 4.8</b> - Evolução do 6º harmónico de sequência positiva, do vetor espacial da tensão, no subespaço $x'y'$ , para 1400 rpm: (a) sem compensação de tempo morto; (b) com compensação de tempo morto.....	41
<b>Figura 4.9</b> - Evolução do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, em eixos $x'y'$ , para diferentes regimes de carga: (a) a 1200 rpm, sem compensação de tempo morto; (b) a 1200 rpm, com compensação de tempo morto; (c) a 900 rpm, sem compensação de tempo morto; (d) a 900 rpm, com compensação de tempo morto; (e) a 600 rpm, sem compensação de tempo morto; (f) a 600 rpm, com compensação de tempo morto; (g) a 300 rpm, sem compensação de tempo morto; (h) a 300 rpm, com compensação de tempo morto.....	42
<b>Figura 4.10</b> – Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, para diferentes velocidades: (a) como motor, a 100% de carga; (b) como motor, a 75% de carga; (c) como motor, a 50% de carga; (d) como motor, a 25% de carga; (e) em vazio; (f) como gerador, a 25% de carga; (g) como gerador, a 50% de carga; (h) como gerador, a 75% de carga; (i) como gerador, a 100% de carga. ....	45
<b>Figura 4.11</b> – Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes regimes de carga: (a) a 1400 rpm; (b) a 1200 rpm; (c) a 900 rpm; (d) a 600 rpm; (e) a 300 rpm.....	46
<b>Figura 4.12</b> - Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes velocidades: (a) como motor, a 100% de carga; (b) como motor, a 75% de carga; (c) como motor, a 50% de carga; (d) como motor, a 25% de carga; (e) em vazio; (f) como gerador, a 25% de carga; (g) como gerador, a 50% de carga; (h) como gerador, a 75% de carga; (i) como gerador, a 100% de carga. ....	49

<b>Figura 4.13</b> - Variação do módulo do vetor espacial da saída do DOB: (a) para 1400 rpm; (b) para 1200 rpm; (c) para 900 rpm; (d) para 600 rpm; (e) para 300 rpm.....	50
<b>Figura 4.14</b> – Forma de onda da corrente de curto-circuito, para 7 espiras: (a) a 1200 rpm; (b) a 600 rpm.....	51
<b>Figura 4.15</b> – Variação do 6º harmónico de sequência positiva, em eixos $x'y'$ : (a) da tensão, com compensação do tempo morto, a 1200 rpm; da saída do DOB, a 1200 rpm. ....	51
<b>Figura 4.16</b> – Variação do 6º harmónico, de sequência positiva, em eixos $x'y'$ : (a) da tensão, com compensação do tempo morto, a 600 rpm; (b) da saída do DOB, a 600 rpm. ....	52
<b>Figura 4.17</b> – Árvore de decisão para os métodos de diagnóstico desenvolvidos: (a) através do 6º harmónico, de sequência positiva, do vetor espacial da tensão, em eixos $x'y'$ ; (b) através do 6º harmónico, de sequência positiva, do vetor espacial da saída do DOB, em eixos $x'y'$ .....	53
<b>Figura A.1</b> - Chapa de características do MIT.....	67
<b>Figura B.1</b> - Esquema de ligações unifilar das tomadas das bobinas.....	68
<b>Figura C.1</b> - M-PMSM acoplado ao MIT, montados na base.....	69
<b>Figura C.2</b> - M-PMSM desmagnetizado.....	69
<b>Figura C.3</b> - Banco de condensadores do barramento DC (esquerda) e ponte inversora trifásica (direita).....	70
<b>Figura C.4</b> - Resistências de travagem no barramento DC (esquerda) e caixa de medição de corrente (direita).....	70
<b>Figura C.5</b> - Setup experimental em grande angular.....	71



## Lista de Tabelas

<b>Tabela 4.1</b> – Resultados de simulação relativos ao 5º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão em eixos $xy$ e do 6º harmónico de sequência positiva em eixos $x'y'$ , para uma velocidade de 1200 rpm. ....	28
<b>Tabela 4.2</b> – Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da tensão, para diferentes regimes de carga. ....	30
<b>Tabela 4.3</b> – Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes regimes de carga. ....	30
<b>Tabela 4.4</b> - Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da tensão, para diferentes velocidades. ....	32
<b>Tabela 4.5</b> - Variação média 6º harmónico do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes velocidades. ....	32
<b>Tabela 4.6</b> – Variação média da força contraeletromotriz para diferentes velocidades, obtida através do DOB-PCC. ....	38
<b>Tabela 4.7</b> - Variação média da força contraeletromotriz para diferentes velocidades, através da equação 2.2. ....	38
<b>Tabela 4.8</b> – Variação média do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, no subespaço $x'y'$ , para diferentes regimes de carga, como motor e como gerador, sem compensação do tempo morto. ....	43
<b>Tabela 4.9</b> - Variação média do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, no subespaço $x'y'$ , para diferentes regimes de carga, como motor e como gerador, com compensação do tempo morto. ....	43
<b>Tabela 4.10</b> – Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da tensão, no subespaço $x'y'$ , para diferentes velocidades, com compensação do tempo morto. ....	45
<b>Tabela 4.11</b> – Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, em eixos $x'y'$ , para diferentes regimes de carga, como motor e gerador, em estado saudável, de falha e subtração entre falha e saudável. ....	47
<b>Tabela 4.12</b> - Variação média do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, em eixos $x'y'$ , para diferentes velocidades, em estado saudável, em falha e para a diferença de sinais do DOB. ....	49
<b>Tabela A.1</b> - Características do M-PMSM utilizado. ....	67
<b>Tabela B.1</b> - Testes da força contraeletromotriz para o M-PMSM. ....	68





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento e motivação

O conceito de máquina elétrica multifásica já não é novo, tendo sido proposto em 1969 por E. E. Ward e H. Härer [1]. No entanto, devido ao baixo desenvolvimento da eletrónica de potência e dos microprocessadores, e devido ao facto de estes sistemas serem considerados demasiado complexos, esta tecnologia não suscitou interesse na comunidade científica da época [2]. Nas décadas seguintes, com o aprimoramento da eletrónica de potência e o crescente desempenho dos sistemas de processamento, as máquinas multifásicas voltaram a suscitar interesse e ultimamente tem-se vindo a verificar o aumento da utilização de motores síncronos de ímanes permanentes multifásicos (M-PMSM), tanto no setor industrial como em tração elétrica e em geração renovável, especialmente em geradores eólicos [2], [3].

Este tipo de máquinas elétricas recebe o nome de multifásicas quando apresentam mais do que três fases [2], sendo o PMSM utilizado neste trabalho uma máquina hexafásica (seis fases).

A escolha dos M-PMSMs, em detrimento das máquinas de indução trifásicas, prende-se essencialmente com o facto de estes possuírem uma maior capacidade de tolerância a falhas e melhor desempenho dinâmico [2], [4]. As principais vantagens das máquinas multifásicas são as seguintes:

- A sua capacidade de tolerância a falhas (não catastróficas) torna possível uma operação pós-falha mais suave;
- Têm uma corrente por fase mais baixa;
- O binário desenvolvido está sujeito a menos oscilações;
- O maior número de graus de liberdade, que permite a capacidade de tolerância a falhas;
- Têm menores perdas no rotor;
- Têm uma elevada densidade de potência e de binário;
- Têm uma estrutura mais compacta e mais leve;
- Têm uma elevada fiabilidade.

Apesar dos M-PMSMs apresentarem estas características que claramente os destacam das máquinas trifásicas, estes ainda estão sujeitos a falhas durante a sua operação, as quais são muito semelhantes às que ocorrem nas máquinas trifásicas, nomeadamente falhas mecânicas e elétricas, mas a presença de ímanes no rotor dos M-PMSMs leva a que surja um novo tipo de falha que ocorre nos mesmos: a desmagnetização. Esta desmagnetização pode ser uniforme ou não uniforme, tendo ambas impacto no funcionamento da máquina [5].

Embora já exista um número considerável de estudos na literatura que visam estudar o comportamento das máquinas síncronas de ímanes permanentes e detetar as falhas que ocorrem nestas, ainda existe uma falta de conhecimento no diagnóstico de falhas em máquinas multifásicas. A procura deste conhecimento é essencial uma vez que a inserção de métodos de diagnóstico nos sistemas de controlo já utilizados adiciona valor e segurança à utilização destas máquinas [4].

O diagnóstico de falhas ganha elevada relevância não só pelo facto de permitir prolongar a vida útil do ativo elétrico, ou permitir uma adaptação do controlo de forma a operar numa situação condicionada, mas também porque se evita o desperdício de energia que surge com a diminuição da eficiência da máquina em situação de avaria.

### **1.2 Objetivos**

Esta dissertação teve como objetivo o diagnóstico de falhas num PMSM multifásico, com foco no diagnóstico da desmagnetização dos ímanes permanentes presentes no rotor.

Pretendeu-se desenvolver técnicas de diagnóstico que sejam capazes de detetar a ocorrência de desmagnetização e que sejam imunes à presença de outro tipo de falhas, como curtos-circuitos entre espiras, entre outras. De forma a concretizar-se este objetivo, investigou-se o comportamento do 6<sup>o</sup> harmónico de sequência positiva, e de sequência negativa, do vetor espacial da tensão de alimentação do M-PMSM e do vetor espacial da saída do DOB, uma vez que estes harmónicos surgem do facto de a indução magnética criada pelos ímanes não apresentar uma forma sinusoidal e também da existência de tempos mortos nas pontes inversoras. O facto de estes harmónicos estarem diretamente relacionados com a indução magnética gerada pelos ímanes leva a que sejam ótimos candidatos à deteção de desmagnetização no M-PMSM. A validação destes métodos de diagnóstico baseou-se na realização de ensaios experimentais com um M-PMSM sujeito a desmagnetização, assim como em simulações recorrendo à análise de elementos finitos (FEA), através do software *Ansys Eletronics*.

# Capítulo 2

## Métodos de Diagnóstico em PMSMs

Este capítulo apresenta uma descrição dos tipos de falhas que ocorrem em PMSMs e a sua origem, assim como uma revisão dos métodos de diagnóstico existentes para a deteção de falhas que são passíveis de acontecer nestas máquinas, terminando com uma revisão dos métodos de diagnóstico utilizados para detetar falhas nos ímanes permanentes.

### 2.1 Falhas em PMSMs

As falhas que ocorrem nos PMSMs podem ser classificadas em várias categorias, normalmente de acordo com o seu tipo ou localização [4]. Neste capítulo as falhas serão classificadas de acordo com a sua tipologia.

As três grandes categorias de falhas que ocorrem nos PMSMs são: mecânicas, elétricas e magnéticas [4], [6]–[8]. Cada tipo de falha tem uma origem diferente e diferentes efeitos nas condições de funcionamento da máquina, estando resumidas na Figura 2.1.

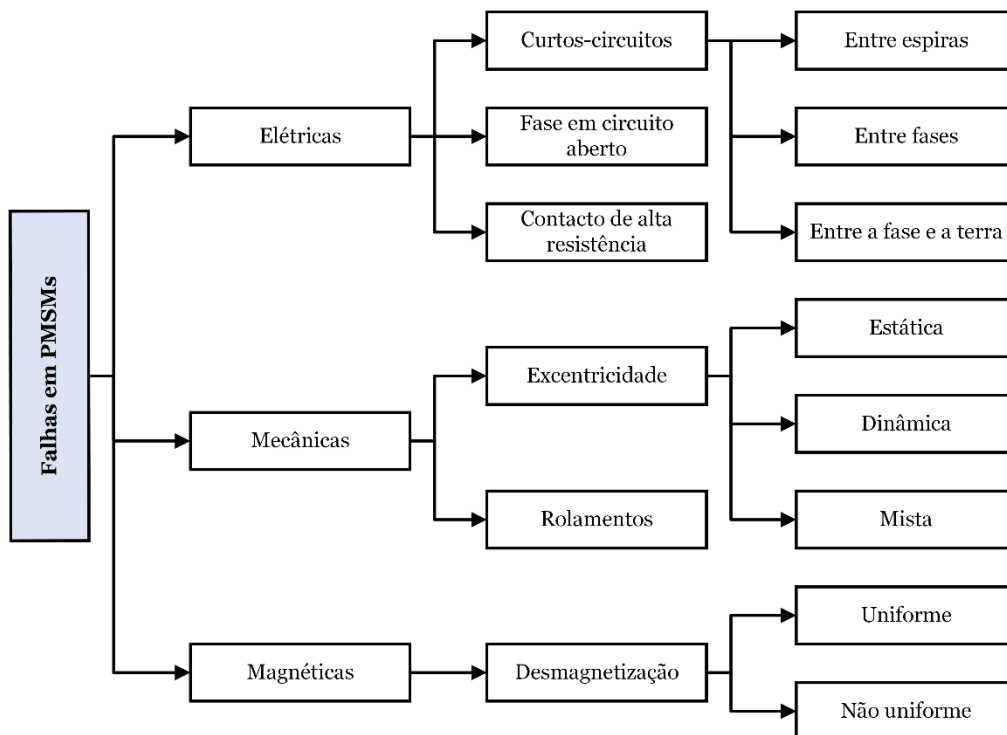


Figura 2.1 - Classificação dos diferentes tipos de falha que ocorrem em PMSMs.

- **Falhas mecânicas:** este tipo de falhas está tipicamente associado a condições de funcionamento severas [7]. Dentro deste tipo distinguem-se a excentricidade, que pode ser estática ou dinâmica, e consiste num desalinhamento entre o eixo de rotação do rotor e o estator e que, em situações mais severas, pode levar a que o rotor entre em contacto com o estator danificando assim ambos [9], e as falhas nos rolamentos, que são causadas por mau acoplamento entre motor e carga, má lubrificação ou envelhecimento [4], e que podem dar origem também a excentricidade. A falha mecânica mais frequente é a falha nos rolamentos.
- **Falhas elétricas:** as falhas elétricas são as mais comuns. Dentro destas destacam-se os curtos-circuitos entre fases, entre espiras, ou entre a fase e a terra, as ligações de alta resistência (HRC) e as fases em circuito aberto (OPF) [6], [10]. Os curtos-circuitos ocorrem essencialmente devido à perda de capacidade de isolamento entre condutores, o que pode levar a elevadas correntes de circulação e, conseqüentemente, elevadas temperaturas, que podem levar até à desmagnetização dos ímanes [4], [8]. As OPFs ocorrem devido à má ligação dos condutores ou então a falhas nos braços do inversor, enquanto as HRCs ocorrem quando existe corrosão nos contactos, vibrações ou má instalação dos condutores nos contactos [10].
- **Falhas magnéticas:** as falhas magnéticas são falhas específicas dos PMSMs. Estas falhas correspondem à desmagnetização dos ímanes presentes no rotor que pode ser classificada como uniforme, quando ocorre em todo o polo de forma igual, ou não uniforme, quando ocorre em apenas uma parte do polo, por exemplo [8]. A desmagnetização pode ocorrer ao longo do tempo, por envelhecimento dos ímanes, elevadas temperaturas no interior da máquina, ou por correntes elevadas no estator, devido a curtos-circuitos ou outros fenómenos que criam campos magnéticos que se opõem ao campo magnético gerado pelos ímanes, diminuindo assim o campo magnético remanescente dos mesmos [8], [11]. Nos PMSMs este tipo de falha pode levar à destruição da máquina, uma vez que a diminuição do fluxo magnético no entreferro leva a que o binário desenvolvido seja menor e, por consequência, para um mesmo binário circula mais corrente no estator que leva a que a eficiência e o desempenho do PMSM se degradem ao longo do tempo [8].

Para além dos três grandes tipos de falhas descritos anteriormente, existem ainda outros que, apesar de não ocorrerem diretamente na máquina, têm um impacto no desempenho da mesma e podem até levar ao surgimento de falhas. Estas falhas ocorrem na ponte inversora, principalmente nos IGBTs, o que leva a uma OPF, ou então nos sensores, por exemplo, de corrente, que são essenciais para o funcionamento do acionamento [7], [8].

## 2.2 Diagnóstico de falhas em M-PMSMs

São vários os tipos de métodos utilizados para realizar a deteção de falhas em M-PMSMs, podendo estes ser divididos em três grandes grupos: baseados em modelos, baseados na análise de sinais recorrendo a diferentes técnicas de processamento de sinal e baseados em inteligência artificial. Também existem métodos baseados em *hardware* adicional, mas tendem a ser métodos invasivos pelo que não são objeto de análise [7].

### 2.2.1 Métodos baseados em modelos

Os métodos de diagnóstico baseados em modelos, como o nome indica, necessitam do conhecimento prévio do modelo da máquina à qual se pretende aplicar o método. Este modelo é tipicamente um modelo matemático, regido por equações matemáticas, que permitem descrever o comportamento do PMSM em diferentes pontos de operação, mas pode também ser obtido através da aquisição das características físicas do PMSM [7].

No geral, o diagnóstico de falhas que se baseia neste conceito gera um resíduo resultante da comparação entre um sinal obtido através do uso do PMSM saudável e o mesmo sinal obtido do PMSM que está sujeito à falha que se pretende estudar, sendo depois este resíduo o indicador da falha [4], [7]. A geração deste resíduo pode ter várias origens dependendo da abordagem utilizada, como, por exemplo, através da estimação de parâmetros ou da utilização de observadores.

Em [12] e [13] faz-se a estimação da força contraeletromotriz de forma a se detetar curtos-circuitos entre espiras e em [14] faz-se a estimação do fluxo magnético recorrendo a um Filtro de *Kalman* Estendido (EKF) de forma a detetar-se a desmagnetização.

Os observadores são, também, amplamente utilizados para a estimação de parâmetros [15] e/ou variáveis [16], o que permite fazer estimativas de perturbações

que ocorrem durante o funcionamento do PMSM, como, por exemplo, a desmagnetização. Esta capacidade de estimação de perturbações faz com que os observadores sejam também incorporados em estratégias de controlo tolerantes a falhas [17]–[21], como o controlo preditivo, de forma a mitigar erros e melhorar a estabilidade e a resposta dinâmica do acionamento.

Em [3] é proposta a implementação de um observador de perturbações no controlo preditivo de corrente (DOB-PCC) com o intuito de mitigar os efeitos de erros dos parâmetros dos modelos, entre outros. Este tipo de implementação demonstra potencial para o diagnóstico de falhas e será alvo de estudo aprofundado no decorrer deste trabalho.

Ultimamente têm também surgido métodos de diagnóstico que fazem uso da análise de elementos finitos (FEA), e nesta análise tem-se em conta as características físicas e geométricas do PMSM, podendo assim fazer-se simulações extremamente realistas, mas que requerem um esforço computacional bastante elevado [8].

### 2.2.2 Métodos baseados em análise de sinais

Os métodos de diagnóstico baseados em análise de sinais fazem uso de sinais extraídos durante o funcionamento do PMSM que são posteriormente processados e analisados, podendo estes métodos ser *online* ou *offline* [4], [7], [8].

Estes sinais podem ser correntes, tensões, sinais de vibração, temperatura, binário, força contraeletromotriz, entre outros [8], aos quais são posteriormente aplicadas técnicas de processamento de sinal, como a transformada rápida de Fourier (FFT) [22], [23], transformada de onduleta (WT) [24], transformada de Hilbert-Huang (HHT) [25], entre outras [7], permitindo realizar a deteção da desmagnetização.

Dentro do grupo dos métodos baseados em processamento de sinal ainda se pode identificar os que se baseiam em análise no domínio da frequência, onde a FFT é amplamente utilizada, os que se baseiam na análise no domínio do tempo-frequência, onde a WT e a HHT são utilizadas [8].

Os métodos de diagnóstico de falhas que recorrem a técnicas de processamento de sinal são amplamente utilizados, uma vez que estes podem ser aplicados em regimes estacionários, em que o PMSM opera num regime de carga e/ou velocidade constantes, ou em regimes não estacionários, em que o PMSM sofre uma variação de velocidade ou de carga. No contexto industrial, ou de geração renovável, os regimes estacionários podem não ser muito comuns, pois, devido ao processo produtivo, o PMSM pode estar

sujeito a variações de carga ou velocidade, como acontece, por exemplo, em geradores eólicos. As técnicas de processamento de sinal em regimes não estacionários apresentam então uma vantagem neste contexto [5]. A transformada curta de Fourier (STFT) é um exemplo, onde o sinal é dividido em pequenos intervalos nos quais é aplicada a FFT. Nesses pequenos intervalos o sinal é considerado como estando num regime estacionário, ou quase estacionário, permitindo assim aplicar a FFT. No entanto, a aplicação da STFT leva a que o tamanho destes períodos tenha de ser bem escolhido, tendo em conta as variações a que o sinal a ser analisado está sujeito [5].

### **2.2.3 Métodos baseados em inteligência artificial**

Os métodos baseados em inteligência artificial (AI) consistem na aplicação de técnicas de inteligência artificial para análise de sinais extraídos da máquina em estudo, sendo capazes de extrair características e padrões associados a falhas, podendo-se fazer assim um diagnóstico. As redes neuronais (NN) e a lógica difusa (FL) são métodos bastante utilizados, uma vez que apresentam flexibilidade de implementação e uma boa precisão e qualidade de resultados [26]. As NN consistem num conjunto de algoritmos de AI que são modelados de acordo com um sistema neuronal biológico cujo objetivo é detetar padrões e relações entre variáveis. A FL assemelha-se ao raciocínio humano e, por isto, tem tolerância a informação imprecisa [7].

Em [27] fez-se uso de uma rede neuronal convolucional (CNN) para detetar desmagnetização através do sinal de corrente do PMSM, não sendo necessário um pré-processamento dos sinais de corrente. Em [28] parte-se do mesmo princípio, mas fez-se também a deteção de curtos-circuitos entre espiras, sendo a CNN capaz de fazer a distinção entre cada falha.

### **2.2.4 Métodos de diagnóstico de falhas nos ímanes de PMSMs**

A deteção de desmagnetização nos ímanes de PMSMs é de extrema importância uma vez que esta afeta consideravelmente o desempenho e eficiência do mesmo. Os vários métodos que permitem identificar a ocorrência de desmagnetização fazem uso da análise do espectro da corrente, tensão, força contraeletromotriz, binário, e até de grandezas magnéticas dos ímanes [5].

A análise do espectro das correntes de sequência nula apresenta também a capacidade de detetar a desmagnetização, tendo sido concluído em [29] que existem conjuntos de harmónicos que permitem detetar a falha para altas e baixas velocidades.

A componente fundamental de sequência nula da tensão é um sinal bastante utilizado e que permite detetar desmagnetização, uma vez que a componente fundamental apresenta uma diminuição na sua amplitude com o aumento da gravidade da falha [30]. Este sinal é obtido através da medição da tensão entre o neutro do enrolamento trifásico e um neutro criado através de resistências ligadas à alimentação desse enrolamento. A Figura 2.2 demonstra como essa medição pode ser feita.

Existem também métodos que fazem uso de observadores para detetar a desmagnetização [31].

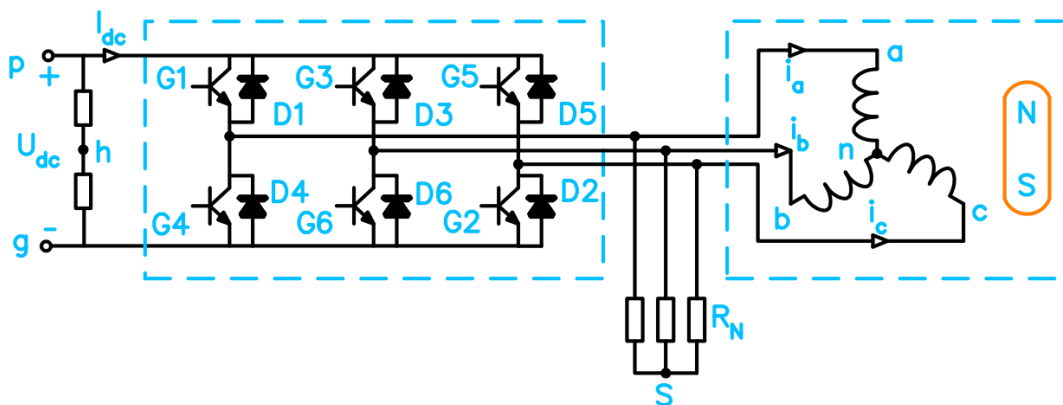


Figura 2.2 – Esquema de ligações para a criação de um neutro artificial e posterior medição da ZSVC [5].

### **Análise do espectro das correntes estatóricas**

Um dos métodos que é bastante utilizado é a análise do espectro das correntes estatóricas (MCSA), que consiste na análise do comportamento de uma, ou várias, componentes espectrais da corrente que, devido à assimetria provocada pela desmagnetização dos ímanes, sofrem alterações na sua amplitude e/ou fase [5]. De todos os estudos realizados verifica-se, no geral, que a ocorrência de desmagnetização leva a um aumento do conteúdo harmónico das correntes o que leva a que esta técnica seja viável para a deteção deste tipo de falha.

A ocorrência desta falha leva, também, a que surjam componentes harmónicas na corrente que seguem a seguinte equação [9], [30]:

$$f_{demag} = f_s \left(1 \pm \frac{k}{p}\right), k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

onde  $f_{demag}$  corresponde à componente espectral que surge na corrente do estator devido à desmagnetização,  $f_s$  é a frequência fundamental,  $p$  é o número de pares de



polos e  $k$  é um inteiro positivo diferente de zero. O surgimento destas componentes espectrais é, no entanto, dependente da configuração dos enrolamentos, não estando presentes quando se está diante de uma configuração simétrica dos mesmos [30].

Tendo em conta (2.1), em [9] fez-se a deteção de desmagnetização parcial e de excentricidade, através da comparação do espectro da corrente em vários níveis de desmagnetização parcial e de excentricidade. De uma forma muito semelhante, em [32], fez-se a deteção de desmagnetização e posterior diferenciação, quando esta ocorre ao mesmo tempo que excentricidade ou curtos-circuitos, através das componentes homopolares. No entanto, esta técnica pode não ser viável quando o PMSM está sujeito a uma estratégia de controlo preditivo de corrente, uma vez que estas componentes podem ser afetadas pelo controlo [30].

Em [33], através de FEA, foram estudados os harmónicos de terceira, quinta, sétima e nona ordem, assim como a componente fundamental das correntes, de forma a detetar desmagnetização uniforme, enquanto para a desmagnetização não uniforme, foram estudadas as componentes espectrais que seguem (2.1). Para a desmagnetização uniforme, os harmónicos de terceira e quinta ordem apresentaram maior variação entre o caso de máquina saudável e com falha.

Em [29] aplica-se a FFT às correntes do estator e conclui-se que, para altas velocidades, os harmónicos de 1º e 5º ordem apresentam variação suficiente para detetar desmagnetização no PMSM, mas a baixas velocidades tal já não se verifica, pelo que a baixas velocidades são os harmónicos de 6º e 9º ordem que apresentam uma variação considerável. Existe também a possibilidade de detetar desmagnetização através das correntes de sequência nula, sendo neste caso o harmónico de ordem 3 o que permite detetar a falha. A baixas velocidades existe sempre alguma dificuldade em detetar a falha uma vez que as amplitudes das componentes espectrais, e as suas variações, são mais pequenas [29].

### **Análise do espectro da força contraeletromotriz**

Um sinal bastante utilizado para a detecção de desmagnetização é a força contraeletromotriz, pois esta está diretamente relacionada com os ímanes presentes no PMSM. A força contraeletromotriz é a tensão presente nos terminais dos enrolamentos do PMSM e que é gerada devido à interação dos ímanes permanentes com os enrolamentos estáticos. O movimento relativo entre os ímanes e os enrolamentos leva a que a variação de fluxo magnético no enrolamento induza uma tensão no mesmo, explicada pela Lei de Lenz. Esta tensão tem a característica de que se opõe à tensão aplicada pelo acionamento aos terminais dos enrolamentos estáticos.

A desmagnetização leva a uma redução do fluxo magnético o que provoca distorções na forma de onda da força contraeletromotriz, tornando este sinal um excelente candidato para a detecção desta falha [5], [30].

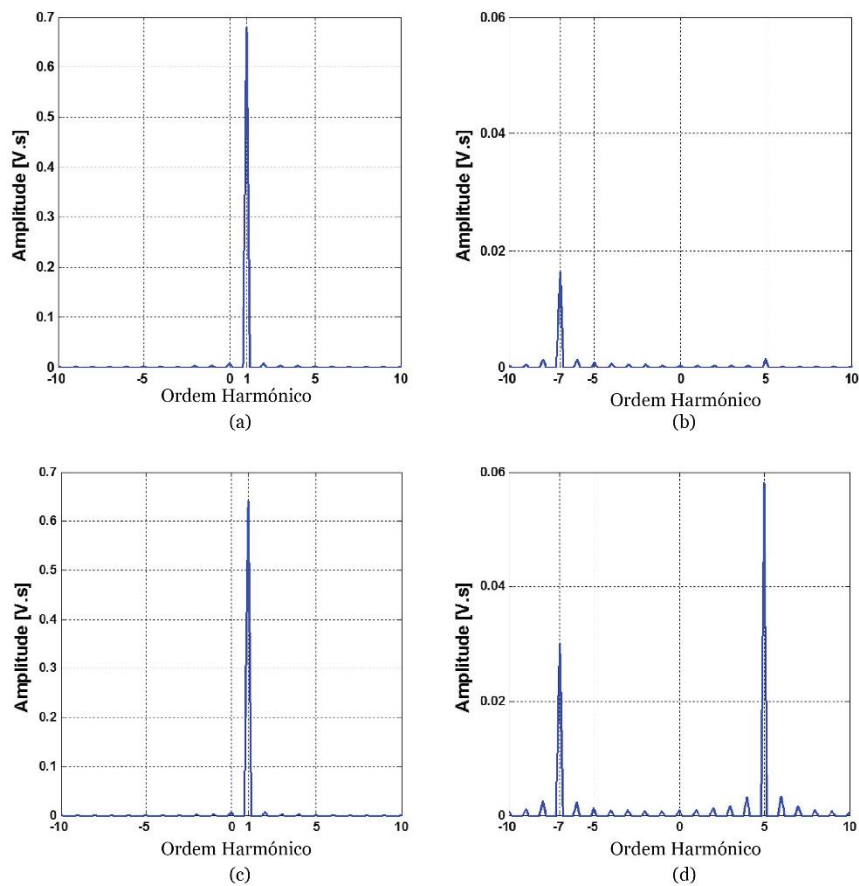
Esta diminuição do fluxo magnético, e conseqüente diminuição da força contraeletromotriz, é proporcional ao número de ímanes que se encontram saudáveis após a ocorrência da falha e o número total de ímanes na máquina, de acordo com a seguinte equação [5]:

$$e_f = \frac{n_{eff}}{n_{tot}} \cdot e_h = k \cdot e_h \quad (2.2)$$

onde  $e_f$  e  $e_h$  são a força contraeletromotriz em estado da falha e em estado saudável, respetivamente, e  $n_{eff}$  e  $n_{tot}$  são o número de ímanes saudáveis após a falha e o número total de ímanes presentes na máquina, respetivamente.

A ocorrência da desmagnetização nos ímanes leva a que os harmónicos presentes no fluxo no entreferro sofram variações, provocando alterações nos harmónicos de 5º e 7º ordem, do vetor espacial da força contraeletromotriz, que já estão presentes devido ao facto de a distribuição do fluxo não ser sinusoidal [34]–[36], tornando-se então ótimos candidatos para a detecção de desmagnetização.

Em [36] fez-se a detecção de desmagnetização uniforme no PMSM de seis fases, através do 5º harmónico da componente direta do vetor espacial da força contraeletromotriz. Foi estudado o comportamento da componente fundamental no subespaço  $\alpha\beta$  e 5º harmónico de sequência positiva e 7º harmónico de sequência negativa, no subespaço  $xy$  estacionário, verificando-se que de um estado de funcionamento saudável para um estado de funcionamento com falha, a componente fundamental diminui ligeiramente, mas o 5º harmónico tem um aumento significativo, como representado na Figura 2.3.



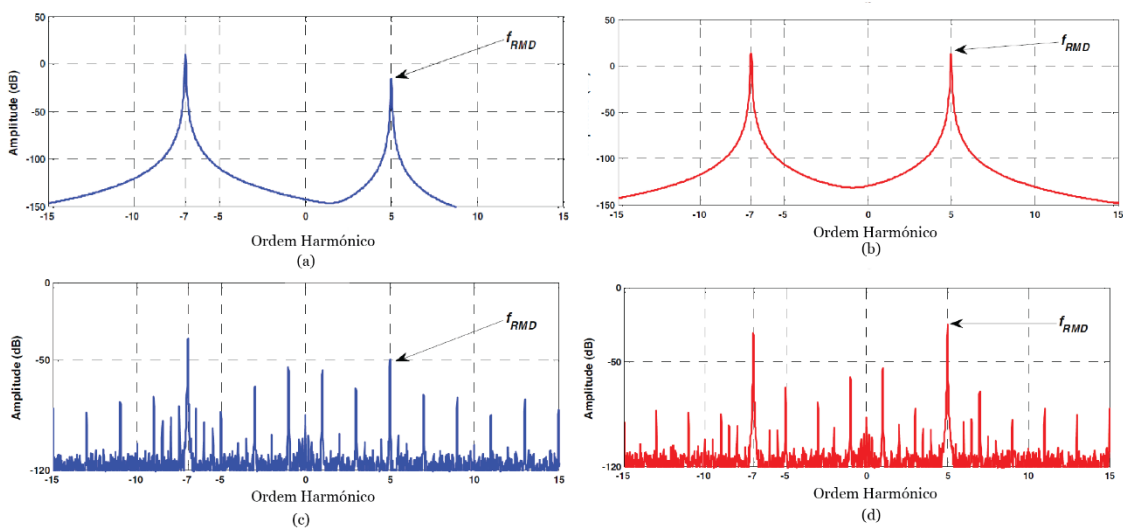
**Figura 2.3** – Espectro do vetor espacial da força contraeletromotriz normalizada em estado saudável e com desmagnetização: (a) saudável, no subespaço  $\alpha\beta$ ; (b) saudável, no subespaço  $xy$  estacionário; (c) desmagnetizado, no subespaço  $\alpha\beta$ ; (d) desmagnetizado, no subespaço  $xy$  estacionário. Adaptado de [36].

Em [35] fez-se um estudo semelhante, tendo sido utilizados o 5<sup>o</sup> harmônico de sequência positiva e o 7<sup>o</sup> harmônico de sequência negativa do vetor espacial da força contraeletromotriz. Neste estudo verificou-se também que o 5<sup>o</sup> harmônico é mais sensível à desmagnetização uniforme, enquanto o 5<sup>o</sup> e o 7<sup>o</sup> variam ligeiramente com a desmagnetização parcial. Em [34] segue-se a mesma filosofia de diagnóstico, mas avaliando o comportamento do 7<sup>o</sup> harmônico de sequência negativa, num PMSM de cinco fases.

### Análise do espectro da tensão

A tensão de alimentação do PMSM é também uma forte candidata à detecção de desmagnetização dos ímãs permanentes no mesmo.

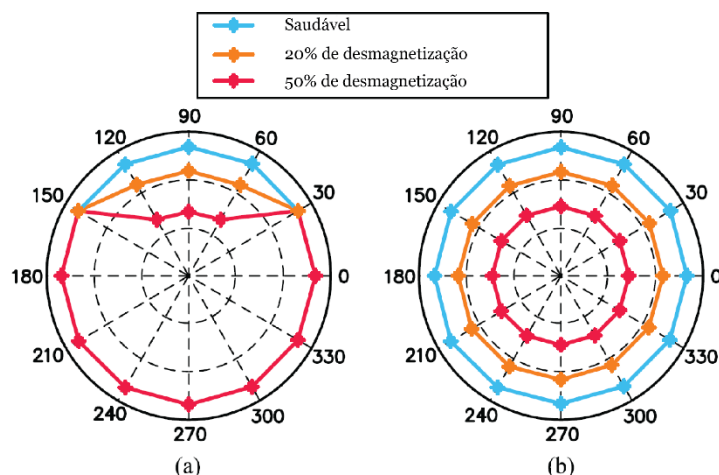
Em [37] fez-se uso do 5º harmônico de sequência positiva do vetor espacial da tensão de referência, no subespaço  $xy$  estacionário, para realizar a detecção da desmagnetização num PMSM assimétrico de seis fases, como representado na Figura 2.4. O resultado foi obtido através de FEA e posteriormente confirmado através de ensaios experimentais.



**Figura 2.4** – Espectro do vetor espacial da tensão de referência por meio de FEA e ensaios experimentais, no subespaço  $xy$  estacionário: (a) FEA em estado saudável; (b) experimental em estado saudável; (c) FEA com desmagnetização; (d) experimental com desmagnetização. Adaptado de [37].

Para além da análise do espectro das correntes estatóricas, da força contraeletromotriz e da tensão de alimentação, existem também outros métodos de diagnóstico de desmagnetização que se baseiam na estimação, ou medição, do fluxo magnético no entreferro, na estimação da temperatura dos ímãs permanentes durante a operação do PMSM e até no binário desenvolvido pelo PMSM [5].

A utilização de bobinas de prova em [38] permite medir o fluxo magnético no entreferro e verificar a ocorrência de desmagnetização uniforme e não uniforme, podendo até permitir a localização da falha, como representado na Figura 2.5.



**Figura 2.5** – Fluxo magnético no entreferro do PMSM: (a) com desmagnetização local; (b) com desmagnetização uniforme. Adaptado de [37].

A estimação da temperatura dos ímanes pode também dar informação sobre a ocorrência de desmagnetização, pois esta leva a que a temperatura dentro do PMSM deixe de ter uma distribuição uniforme, como verificado em [39], onde se recorreu à injeção de sinais de alta frequência para realizar esta estimativa.

O aumento da temperatura pode levar à desmagnetização dos ímanes se esta ultrapassar o ponto de *Curie*, que corresponde à temperatura à qual os ímanes perdem as suas propriedades magnéticas.

Outros métodos também têm vindo a ser estudados, nomeadamente a análise do binário desenvolvido pelo PMSM, que, devido à ocorrência de desmagnetização, irá apresentar maior oscilação, assim como o uso de sinais de vibração e acústicos [5].

Devido à alteração da distribuição do fluxo no entreferro, provocada pela desmagnetização dos ímanes permanentes, o binário irá apresentar mais oscilações. Estas oscilações podem gerar padrões que podem dar indicação da ocorrência da falha.

Os sinais de vibração são amplamente usados como método de diagnóstico de falhas, através da análise do seu espectro, de uma forma muito semelhante ao que é feito para as correntes e tensões, através da aplicação da FFT. No entanto, este método de diagnóstico obriga a que sejam colocados sensores de vibração no PMSM, tipicamente colados na carcaça.



## Capítulo 3

### Modelo do M-PMSM e Estratégia de Controlo

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático do M-PMSM, assim como a estratégia de controlo aplicada ao mesmo, seguidos do modelo de co-simulação utilizado e de uma descrição da montagem experimental.

#### 3.1 Estratégia de controlo aplicada ao M-PMSM

A estratégia de controlo do acionamento onde um M-PMSM assimétrico está integrado é o controlo preditivo de corrente, ao qual foi adicionado um observador de perturbações com o intuito de compensar erros de parâmetros e outras perturbações [3]. Esta estratégia de controlo baseia-se no uso de um modelo matemático do M-PMSM, pelo que se expõe de seguida o mesmo.

##### 3.1.1 Modelo matemático do M-PMSM

O modelo matemático do M-PMSM em coordenadas de fase ( $abc$ ) é dado por [40]:

$$u_s^{abc} = R_s i_s^{abc} + L_s^{abc} \frac{di_s^{abc}}{dt} + e_s^{abc} \quad (3.1)$$

$$e_s^{abc} = \frac{d\psi_{s,PM}^{abc}}{dt} \quad (3.2)$$

$$\psi_s^{abc} = L_s^{abc} i_s^{abc} + \psi_{s,PM}^{abc}, \quad (3.3)$$

onde  $u_s^{abc}$ ,  $i_s^{abc}$ ,  $\psi_s^{abc}$ ,  $\psi_{s,PM}^{abc}$  e  $e_s^{abc}$  são os vetores da tensão, da corrente, do fluxo encadeado, do fluxo encadeado devido aos ímanes permanentes e da força contraeletromotriz, respetivamente.  $R_s$  e  $L_s^{abc}$  representa a resistência dos enrolamentos estatóricos e a matriz das indutâncias dos enrolamentos da máquina, respetivamente.

Os vetores das grandezas elétricas são definidos por:

$$u_s^{abc} = [u_{a1} \ u_{b1} \ u_{c1} \ u_{a2} \ u_{b2} \ u_{c2}]^T \quad (3.4)$$

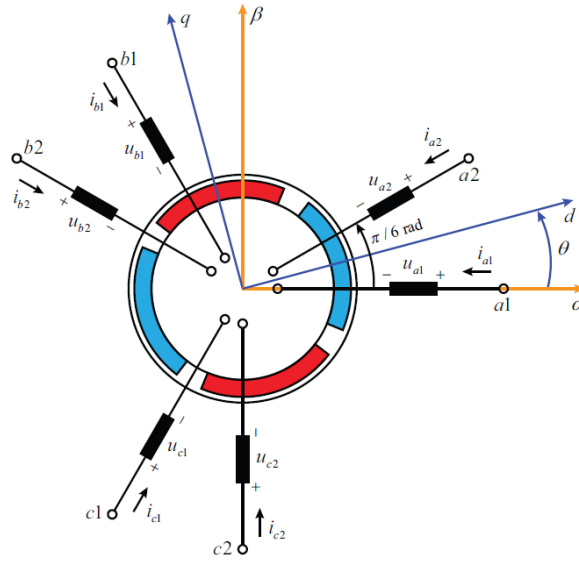
$$i_s^{abc} = [i_{a1} \ i_{b1} \ i_{c1} \ i_{a2} \ i_{b2} \ i_{c2}]^T \quad (3.5)$$

$$\psi_s^{abc} = [\psi_{a1} \ \psi_{b1} \ \psi_{c1} \ \psi_{a2} \ \psi_{b2} \ \psi_{c2}]^T \quad (3.6)$$

$$\psi_{s,PM}^{abc} = [\psi_{a1,PM} \ \psi_{b1,PM} \ \psi_{c1,PM} \ \psi_{a2,PM} \ \psi_{b2,PM} \ \psi_{c2,PM}]^T \quad (3.7)$$

$$e_s^{abc} = [e_{a1} \ e_{b1} \ e_{c1} \ e_{a2} \ e_{b2} \ e_{c2}]^T. \quad (3.8)$$

A decomposição das grandezas usando a transformação VSD permite obter o modelo matemático do M-PMSM em três subespaços ortogonais, que têm a denominação de  $\alpha\beta$ ,  $xy$  e  $z1z2$ . O subespaço  $\alpha\beta$ , estacionário, encontra-se representado na Figura 3.1, bem como os eixos magnéticos dos seis enrolamentos da máquina.



**Figura 3.1** - Disposição espacial dos enrolamentos do 6-PMSM.

A transformação VSD aplicada habitualmente a uma máquina de seis fases assimétrica é definida como [40], [41]:

$$T_{VSD} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{-2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{-4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{-\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{-5\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{-9\pi}{6}\right) \\ 0 & -\sin\left(\frac{-2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{-4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{-\pi}{6}\right) & -\sin\left(\frac{-5\pi}{6}\right) & -\sin\left(\frac{-9\pi}{6}\right) \\ 1 & \cos\left(\frac{-4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{-2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{-5\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{-\pi}{6}\right) & \cos\left(\frac{-9\pi}{6}\right) \\ 0 & -\sin\left(\frac{-4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{-2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{-5\pi}{6}\right) & -\sin\left(\frac{-\pi}{6}\right) & -\sin\left(\frac{-9\pi}{6}\right) \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

sendo as variáveis da máquina transformadas de coordenadas de fase para os três subespaços da seguinte forma:



$$[f_\alpha \ f_\beta \ f_x \ f_y \ f_{z1} \ f_{z2}]^T = T_{VSD} \cdot [f_{a1} \ f_{b1} \ f_{c1} \ f_{a2} \ f_{b2} \ f_{c2}]^T, \quad (3.10)$$

onde  $\{f_\alpha, \dots, f_{z2}\}$  representa as variáveis da máquina após a aplicação da transformação VSD.

As estratégias de controle habitualmente usadas em M-PMSMs são baseadas no uso de referenciais a rodar à velocidade do rotor da máquina. Assim, de forma a se poder obter as mesmas variáveis num referencial rotórico, isto é, a rodar à velocidade do rotor, define-se a seguinte matriz de rotação:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

dando origem às variáveis da máquina, neste referencial, da seguinte forma:

$$[f_d \ f_q \ f_{x'} \ f_{y'} \ f_{z1} \ f_{z2}]^T = R \cdot [f_\alpha \ f_\beta \ f_x \ f_y \ f_{z1} \ f_{z2}]^T, \quad (3.12)$$

onde para se obter  $\{f_d, f_q\}$  aplica-se às variáveis  $\{f_\alpha, f_\beta\}$  uma rotação no sentido anti-horário, ao passo que para obter as variáveis  $\{f_{x'}, f_{y'}\}$ , aplica-se às variáveis  $\{f_x, f_y\}$  uma rotação no sentido horário.

O modelo matemático do M-PMSM, no referencial rotórico, é então dado por [40], [42]:

$$u_s^{dq} = R_s i_s^{dq} + L_s^{dq} \frac{di_s^{dq}}{dt} + \omega_r J L_s^{dq} i_s^{dq} + e_s^{dq} \quad (3.13)$$

$$e_s^{dq} = \omega_r J \psi_{s,PM}^{dq} + \frac{d\psi_{s,PM}^{dq}}{dt} \quad (3.14)$$

$$\psi_s^{dq} = L_s^{dq} i_s^{dq} + \psi_{s,PM}^{dq}, \quad (3.15)$$

onde  $\omega_r$  representa a velocidade angular de rotação do rotor. O vetor das indutâncias  $L_s^{dq}$  é dado por:

$$L_s^{dq} = \text{diag}\{L_{dq} \ L_{dq} \ L_{x'y'} \ L_{x'y'} \ L_{z1z2} \ L_{z1z2}\}, \quad (3.16)$$

e  $L_{dq}$ ,  $L_{x'y'}$  e  $L_{z1z2}$  são as indutâncias da máquina nos subespaços  $dq$ ,  $x'y'$  e  $z1z2$ , respetivamente.

A matriz  $J$  é dada por:

$$J = \frac{1}{\omega_r} \left( R \cdot \frac{dR^{-1}}{dt} \right). \quad (3.17)$$

A força contraeletromotriz irá apresentar harmônicos que são criados devido ao fluxo encadeado não sinusoidal gerado pelos ímanes permanentes. Como no subespaço  $x'y'$  a impedância da máquina é bastante pequena, comparativamente à indutância nos eixos  $dq$ , e o 5º e 7º harmônicos podem induzir correntes não desprezáveis, estes e a componente fundamental não devem ser desprezados, pelo que o vetor  $e_s^{dq}$  reduz-se a [42]:

$$e_s^{dq} = \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_{s,PM1} \\ -5\psi_{s,PM5} \sin(6\theta - \phi_5) - 7\psi_{s,PM7} \sin(6\theta + \phi_7) \\ 5\psi_{s,PM5} \sin(6\theta + \phi_5) - 7\psi_{s,PM7} \sin(6\theta + \phi_7) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

A aplicação da transformação VSD leva a que os harmônicos das diferentes grandezas sejam mapeados em diferentes subespaços. Para o caso do PMSM em estudo, que é hexafásico e assimétrico (em 30°), a componente DC e os harmônicos de ordem  $3k$ , com  $k \in \{0,1, \dots, \infty\}$ , são mapeados no plano de sequência nula, ou  $z1z2$ , os harmônicos de ordem  $12k \pm 1$  são mapeados no plano  $\alpha\beta$  e os harmônicos de ordem  $(12k + 6) \pm 1$  são mapeados no plano  $xy$  [2].

### 3.1.2 Controle preditivo de corrente com observador de perturbações

O controle preditivo, do qual faz parte o *Finite Control Set Model Predictive Control* (FCS-MPC), tem vindo a substituir as estratégias de controle mais clássicas, como o controle por orientação de campo (FOC), controle direto de binário (DTC) e o controle tensão/frequência (V/f), devido à melhor resposta dinâmica, menores requerimentos de sintonização, maior flexibilidade na definição de objetivos e mais fácil inclusão de restrições [41].

As estratégias de FCS-MPC são classificadas de acordo com o objetivo de controle, como o controle preditivo de corrente (PCC), o controle preditivo de binário (PTC) e o controle preditivo de velocidade (PSC) [41].

A estratégia de controle adotada, quer em ambiente de simulação quer em ambiente experimental, é o controle preditivo de corrente, a qual foi anteriormente melhorada com a inclusão de um observador de perturbações com o objetivo de compensar erros de parâmetros, perturbações diversas, oriundas do funcionamento do PMSM, erros associados aos tempos mortos das pontes inversoras, entre outros [3]. Para esta estratégia de controle o modelo matemático da máquina, no referencial rotórico, é dado por [3], [43]:

$$\frac{di_s}{dt} = A \cdot i_s + B \cdot u_s - B \cdot e_s + B \cdot d_s, \quad (3.19)$$

onde  $i_s$ ,  $u_s$ ,  $e_s$  e  $d_s$  são os vetores da corrente, da tensão, da força contraeletromotriz e da saída do DOB, respetivamente, e as matrizes  $A$  e  $B$  são dadas por:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{dq}} & \omega_r & 0 & 0 \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_{dq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_{xy}} & -\omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & -\frac{R_s}{L_{xy}} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$B = \text{diag} \left\{ \frac{1}{L_{dq}}, \frac{1}{L_{dq}}, \frac{1}{L_{xy}}, \frac{1}{L_{xy}} \right\}. \quad (3.21)$$

onde  $\{L_{dq}, L_{xy}\}$  são as indutâncias da máquina nos subespaços  $dq$  e  $x'y'$ .

De forma a reduzir as componentes de alta frequência dos sinais, associadas à comutação dos IGBTs, esta estratégia de controle segue a abordagem de amostragem sincronizada, isto é, as medições são feitas a meio do período  $T_s$ . Esta abordagem obriga a que a estratégia DOB-PCC tenha de ser executada em menos de  $0,5T_s$ , pelo que o controle deve primeiro estimar o vetor de corrente para o instante  $k + 0,5$  e depois prever o mesmo para o instante  $k + 1,5$  [3]. Tendo em conta este atraso, aplicando o método de discretização de Euler à equação (3.19), o vetor da corrente estimado para o instante  $k + 0,5$  é dado por:

$$i_s^{k+0,5} = \left[ I_6 + A \cdot \frac{T_s}{2} \right] \cdot i_s^k + B \cdot \frac{T_s}{2} \cdot [u_s^{k-0,5} - e_s^k + \hat{d}_s^k], \quad (3.22)$$

onde  $I_6$  é a matriz identidade e, para o instante  $k + 1,5$ , é dado por:

$$i_s^{k+1,5} = [I_6 + A \cdot T_s] \cdot i_s^{k+0,5} + B \cdot T_s \cdot [u_s^{k+0,5} - e_s^k + \hat{d}_s^{k+0,5}]. \quad (3.23)$$

Este tipo de estratégia de controle baseia-se em dois estágios de controle, como representado na Figura 3.2: um é responsável pelo controle das correntes no subespaço  $dq$ , denominado por estágio fundamental, e o outro é responsável pelo controle das correntes no subespaço  $x'y'$ , denominado por estágio secundário. Em cada estágio de controle o objetivo é minimizar uma função custo através da seleção dos vetores de tensão que levam a esse fim. A função custo para o estágio fundamental é dada por:

$$g_f = (i_{ds}^* - i_{ds}^{k+1,5})^2 + (i_{qs}^* - i_{qs}^{k+1,5})^2, \quad (3.24)$$

onde  $i_{ds}^{k+1,5}$  e  $i_{qs}^{k+1,5}$  são as componentes  $dq$  da corrente, calculadas para o instante  $k + 1,5$  através de (3.23), e a função custo para o estágio secundário é dada por:

$$g_s = (i_{x's}^* - i_{x's}^{k+1,5})^2 + (i_{y's}^* - i_{y's}^{k+1,5})^2, \quad (3.25)$$

onde  $i_{x's}^{k+1,5}$  e  $i_{y's}^{k+1,5}$  são as componentes  $x'y'$  da corrente, calculadas para o instante  $k + 1,5$  através de (3.23) [3], [43].

As referências  $\{i_{ds}^*, i_{x's}^*, i_{y's}^*\}$  são definidas como zero, de forma a se operar a máquina na condição de máximo binário por ampere (MTPA), enquanto a referência  $i_{qs}^*$  controla o binário desenvolvido pela mesma [3].

O binário desenvolvido pela máquina é dado por:

$$t_e = 3p\psi_{s,PM_1}i_{qs}, \quad (3.26)$$

onde  $t_e$  é o binário desenvolvido e  $\psi_{s,PM_1}$  é o fluxo encadeado gerado pelos ímanes permanentes. De (3.26) verifica-se que apenas a corrente  $i_{qs}$  contribui para o binário desenvolvido e que o fluxo encadeado gerado pelos ímanes permanentes também afeta o binário pelo que, se pode verificar que com a desmagnetização dos ímanes o binário desenvolvido pelo M-PMSM, para uma mesma corrente, também irá ser menor.

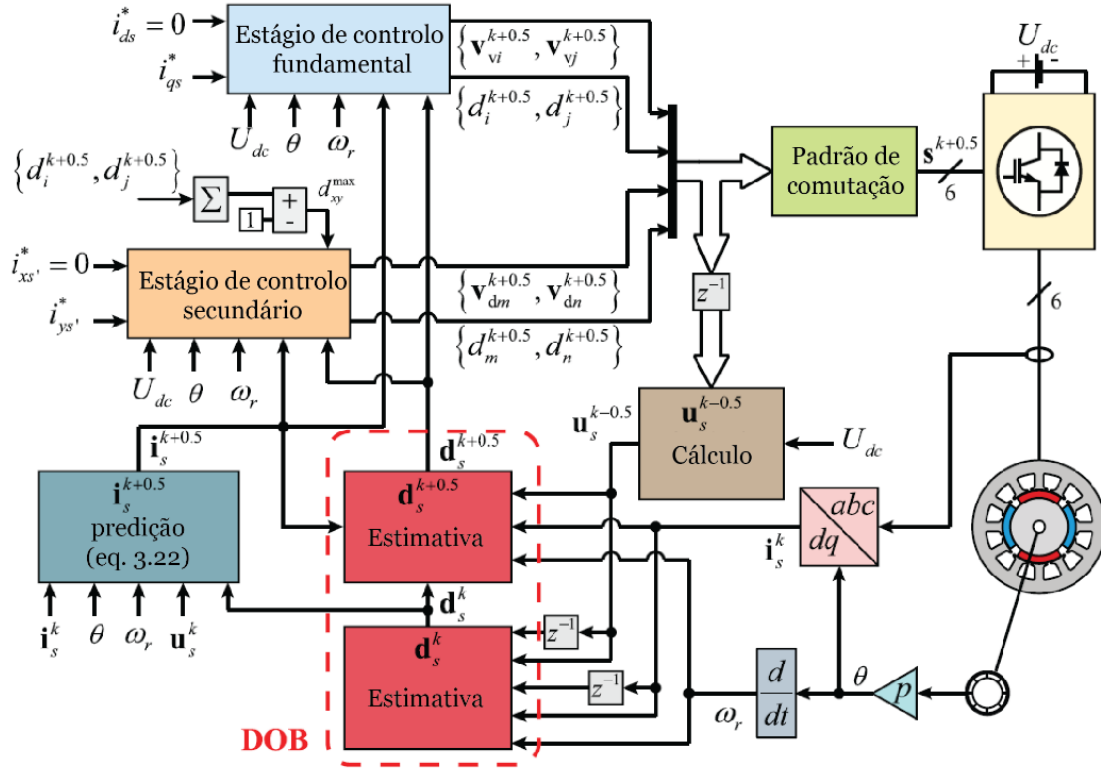


Figura 3.2 - Diagrama geral da estratégia DOB-PCC proposta. Adaptado de [3].

Como foi referido anteriormente, a estratégia de controle aplicada ao acionamento é a preditiva de corrente à qual foi introduzido um observador de perturbações. Como demonstrado em (3.19) é adicionada uma componente à equação que descreve o M-PMSM no referencial rotórico e que tem como função compensar perturbações às quais o acionamento está sujeito durante a sua operação. Como esta componente não pode ser calculada, o DOB tem a função de estimar o vetor  $d_s$  e as componentes deste vetor são definidas como [3]:

$$\begin{cases} d_{ds} = \bar{\xi}_d \\ d_{qs} = \bar{\xi}_q \\ d_{x's} = \bar{\xi}_{x'} + \bar{\xi}_{x',6} \\ d_{y's} = \bar{\xi}_{y'} + \bar{\xi}_{y',6} \end{cases} \quad (3.27)$$

onde  $\bar{\xi}_d$ ,  $\bar{\xi}_q$ ,  $\bar{\xi}_{x'}$  e  $\bar{\xi}_{y'}$  são os termos constantes do vetor  $d_s$  no subespaço  $dq$  e  $x'y'$  e são considerados desconhecidos e invariantes no tempo. No entanto,  $\bar{\xi}_{x',6}$  e  $\bar{\xi}_{y',6}$  são os termos sinusoidais do vetor  $d_s$  no subespaço  $x'y'$ , à frequência  $6\omega_r$ , e estão relacionados com o 6º harmónico neste subespaço, que é derivado dos tempos mortos nas pontes inversoras e do 5º e 7º harmónicos oriundos da força contraeletromotriz [3], como mostrado por (3.18).

O vetor  $d_s$  pode ser então definido pelo seguinte sistema exógeno [3]:

$$\begin{cases} d_s = V\xi \\ \xi = W\xi' \end{cases} \quad (3.28)$$

e as matrizes  $V$  e  $W$  são definidas como [3]:

$$\xi = [\bar{\xi}_d \quad \bar{\xi}_q \quad \bar{\xi}_{x'} \quad \bar{\xi}_{y'} \quad \bar{\xi}_{x',6} \quad \bar{\xi}_{y',6} \quad \dot{\bar{\xi}}_{x',6} \quad \dot{\bar{\xi}}_{y',6}]^T \quad (3.29)$$

$$V = \begin{bmatrix} I_2 & 0_2 & 0_2 & 0_2 \\ 0_2 & I_2 & I_2 & 0_2 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 0_2 & 0_2 & 0_2 & 0_2 \\ 0_2 & 0_2 & 0_2 & 0_2 \\ 0_2 & 0_2 & 0_2 & I_2 \\ 0_2 & 0_2 & -36\omega_r^2 I_2 & 0_2 \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Estando o vetor  $d_s$  estimado, a equação (3.19) está então completa e já tem em conta as perturbações a que o acionamento está sujeito.

### 3.2 Descrição do modelo de co-simulação

De forma a poder obter resultados de simulação do PMSM, em estado saudável e de falha, foi utilizada uma co-simulação recorrendo a um *software* de elementos finitos: *Ansys Eletronics*. Esta ferramenta de elementos finitos tem a capacidade de fornecer resultados com elevado rigor, uma vez que tem em conta as dimensões físicas e as propriedades dos materiais utilizados, que são escolhidos de acordo com os materiais utilizados no protótipo do PMSM. A complexidade computacional é alta, pelo que foi utilizado um modelo em 2-D previamente desenvolvido, de acordo com a Figura 3.3.

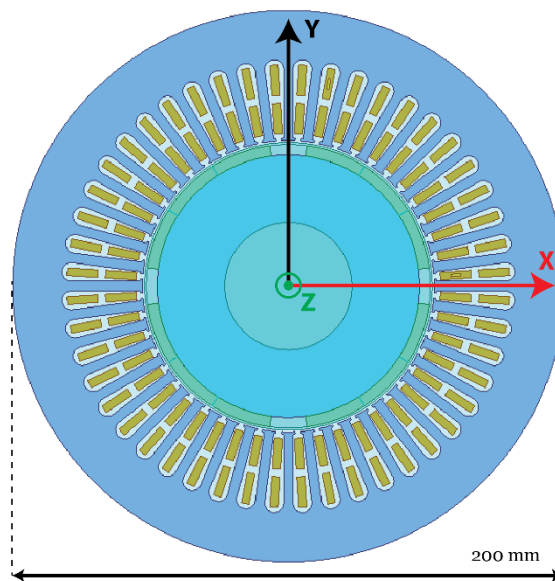
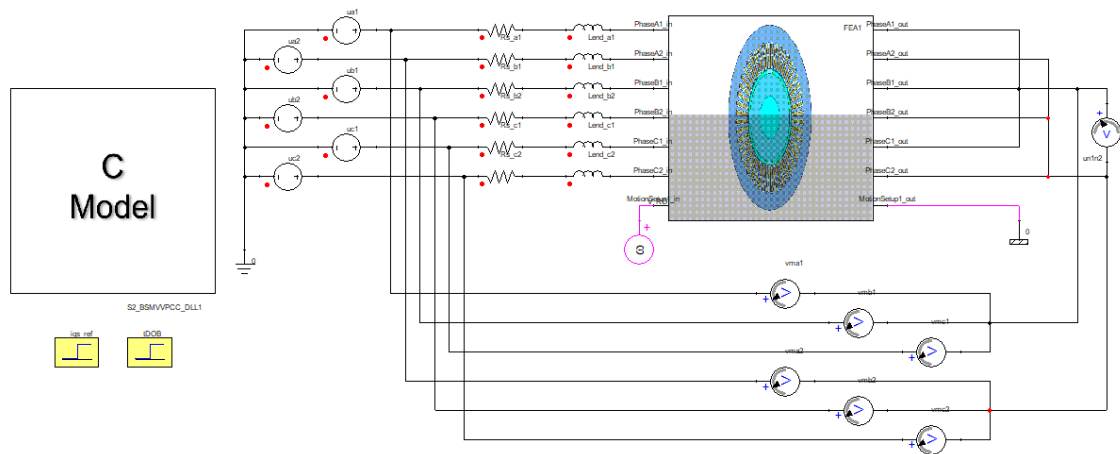


Figura 3.3 – Vista em corte do modelo 2-D do PMSM desenvolvido em ambiente Ansys Maxwell.

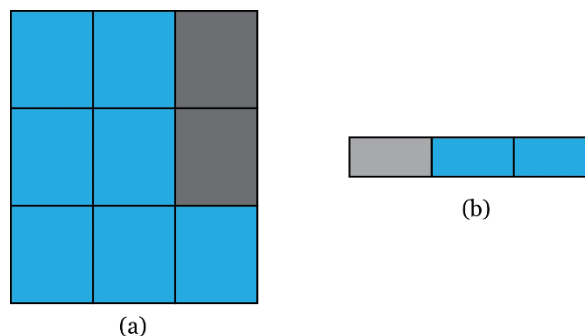
Este modelo foi integrado com o sistema de controle desenvolvido em ambiente *Matlab/Simulink*, através do *Ansys Twin Builder*, tal como representado na Figura 3.4. O sistema de controle utilizado, quer no modelo de co-simulação quer na montagem experimental, é o controle preditivo de corrente com um observador de perturbações (DOB-PCC).

Neste ambiente de co-simulação não existe eletrónica de potência, nomeadamente as pontes inversoras, uma vez que para isso seria necessário usar um período de amostragem  $T_s$  muito inferior ao utilizado na montagem experimental, que é de  $125 \mu s$ . No entanto, devido à presença do DOB e das características do sistema de controle, o  $T_s$  adotado nas simulações foi de  $62,5 \mu s$  de modo a poder-se amostrar os sinais a meio de período de comutação imposto pelo modulador do sistema [3].



**Figura 3.4** – Integração do modelo 2-D em elementos finitos do M-PMSM com o sistema de controle do M-PMSM em ambiente *Ansys Twin Builder*.

A desmagnetização dos ímanes permanentes foi conseguida atuando no modelo desenvolvido no *Ansys Maxwell*, através da alteração da indução magnética em cada segmento de ímã em cada polo, podendo-se assim realizar simulações com o PMSM com vários tipos de desmagnetização. Cada polo é composto por nove segmentos iguais de ímã permanente como representado na Figura 3.5.



**Figura 3.5** - Um polo desmagnetizado do M-PMSM: (a) do M-PMSM real, visto de cima; (b) do modelo 2-D do M-PMSM visto de frente.

De forma a se poder realizar simulações com o mesmo nível de desmagnetização do protótipo do M-PMSM real, que tem 2 dos 9 ímanes de cada polo desmagnetizados (Figura 3.5-a), e devido à característica do modelo 2-D em elementos finitos do M-PMSM que, por cada polo tem três secções representativas de 3 ímanes cada uma, alterou-se a indução magnética de uma dessas secções para 33% das restantes duas (Figura 3.5-b).

### 3.3 Descrição da montagem experimental

A montagem experimental, representada por um esquema unifilar na Figura 3.6, consiste num PMSM assimétrico, de seis fases, acoplado mecanicamente a um motor de indução trifásico (MIT) que, por sua vez, é alimentado através de um variador eletrónico de velocidade (VEV) da WEG. Este MIT tem como função impor uma velocidade selecionada pelo utilizador e atuar como carga mecânica ao M-PMSM.

O PMSM é alimentado por duas pontes inversoras *Semikron* trifásicas. Estas pontes inversoras são alimentadas por um barramento DC criado através de um retificador trifásico que, por sua vez, é alimentado por um autotransformador de forma a ser possível ajustar o nível de tensão desse barramento.

O controlo do PMSM é executado numa plataforma *dSpace 1103* coadjuvado por um *cRIO 9066* da *National Instruments*. Esta plataforma tem a capacidade de comunicar com um computador, que serve de interface com o utilizador e o acionamento, de gerar os *duty-cycles* de cada braço do inversor, que são depois enviados para o *cRIO 9066* que gera os sinais PWM para as pontes inversoras, passando antes por uma placa de isolamento, e de fazer aquisição dos sinais de corrente, de tensão do barramento DC e posição do rotor do PMSM que é fornecida por um *encoder* de 2048 *ppr* colocado no veio.

No barramento DC está ligado um banco de condensadores, com a função de estabilizar a tensão, e uma resistência de travagem que tem como função dissipar energia quando se opera o PMSM em modo de gerador.



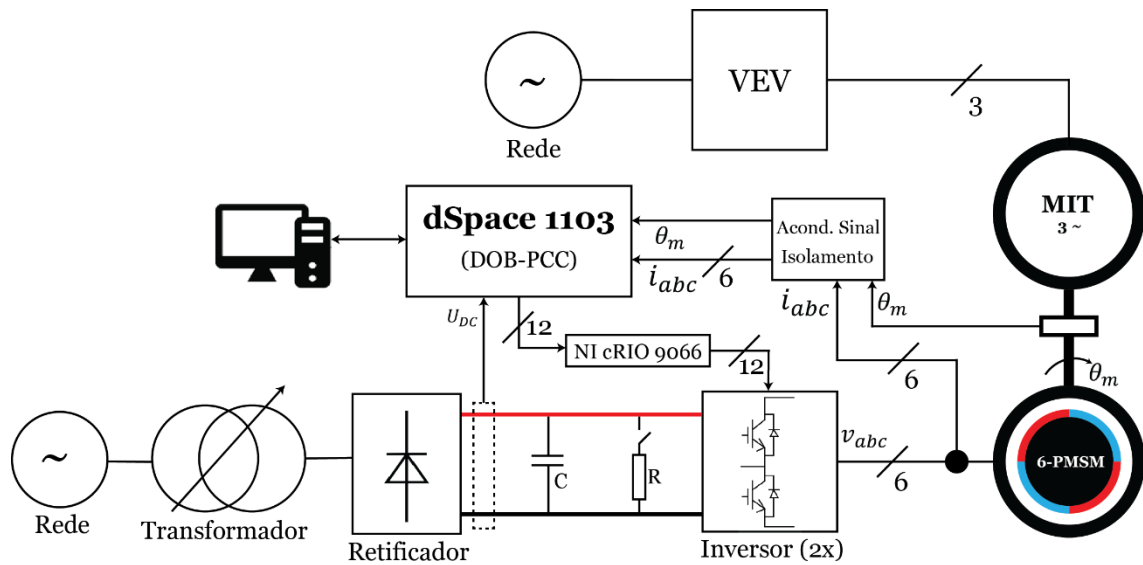


Figura 3.6 - Diagrama unifilar da montagem experimental.

Para a interface do utilizador com o acionamento foi utilizado o *software Controldesk* que permite controlar a operação do acionamento e também realizar a aquisição de dados. Nesta interface com o utilizador é possível alterar os parâmetros da máquina, que são tidos em conta pela estratégia de controlo, assim como alterar parâmetros do DOB e alterar as referências das correntes.



# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Análise dos resultados de simulação

De forma a se poder realizar a deteção da desmagnetização num ambiente controlado, isto é, num ambiente em que se sabe que o PMSM não apresenta qualquer anomalia, como assimetria, excentricidade, erros de parâmetros, entre outros, em relação ao modelo matemático considerado pelo sistema de controlo, recorreu-se a um modelo de co-simulação. O modelo utilizado foi o descrito na secção 3.2, e os parâmetros do M-PMSM representados nesse modelo estão descritos na secção A dos anexos, e realizaram-se simulações para várias velocidades e para vários regimes de carga, como motor e como gerador. Fez-se uma análise do 6º harmónico de sequência positiva, em eixos  $x'y'$ , do vetor espacial da tensão e do vetor espacial da saída do DOB, que são definidos por:

$$u^{x'y'} = u^{x'} + ju^{y'} \quad (3.26)$$

$$u_{DOB}^{x'y'} = u_{DOB}^{x'} + ju_{DOB}^{y'} \quad (3.27)$$

onde  $u^{x'y'}$  é o vetor espacial da tensão no subespaço  $x'y'$ ,  $u^{x'}$  é a componente  $x'$  da tensão de referência do modulador,  $u^{y'}$  é a componente  $y'$  da tensão de referência do modulador,  $u_{DOB}^{x'y'}$  é o vetor espacial da saída do DOB,  $u_{DOB}^{x'}$  é a componente  $x'$  do DOB e  $u_{DOB}^{y'}$  é a componente  $y'$  do DOB.

Como visto na secção 2.2.4 e em [37], o 5º harmónico de sequência positiva da tensão em eixos  $xy$  é um índice sensível para a deteção de desmagnetização em PMSMs, mas este índice encontra-se no referencial estacionário (eixos  $xy$ ) e o sistema de controlo DOB-PCC está desenvolvido para operar no referencial rotórico (eixos  $x'y'$ ). O 5º harmónico de sequência positiva, da tensão, em eixos  $xy$  tem uma correspondência com o 6º harmónico de sequência positiva, da tensão, em eixos  $x'y'$ , pelo que se realizou o estudo apresentado na Tabela 4.1, com o objetivo de verificar se se perde, ou não, informação ao passar-se de um referencial estatórico para um referencial rotórico, ou vice-versa. Os valores de carga positiva correspondem a um funcionamento como motor e os valores de carga negativa ao funcionamento como gerador, expressos em percentagem da carga nominal.

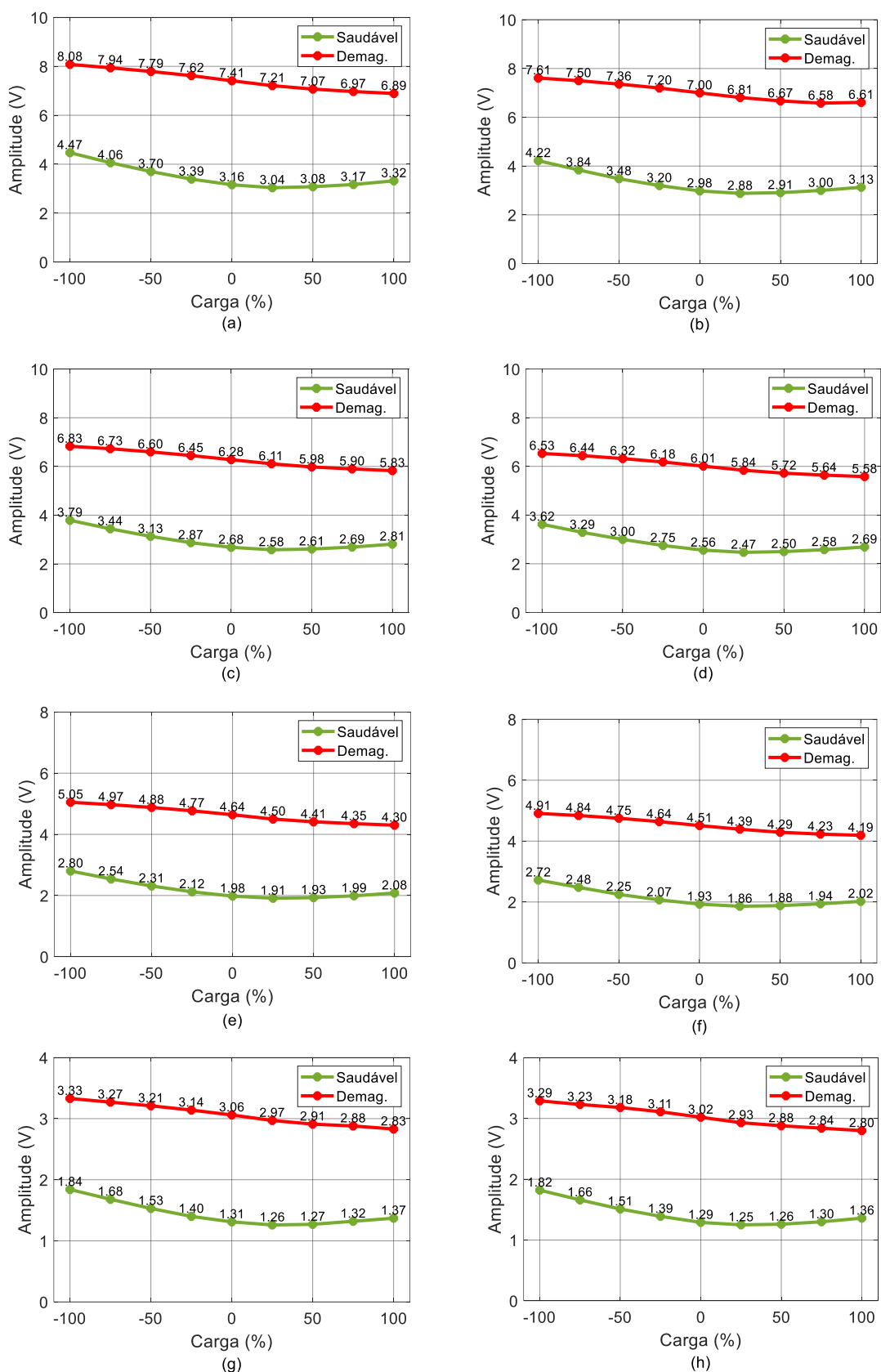
**Tabela 4.1** – Resultados de simulação relativos ao 5º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão em eixos  $xy$  e do 6º harmónico de sequência positiva em eixos  $x'y'$ , para uma velocidade de 1200 rpm.

Carga (%)	$+5f_s$ (em $xy$ )		$+6f_s$ (em $x'y'$ )	
	Saudável	Desmagnetizado	Saudável	Desmagnetizado
	Amplitude (V)	Amplitude (V)	Amplitude (V)	Amplitude (V)
100%	2,812	5,832	2,812	5,832
75%	2,691	5,896	2,691	5,897
50%	2,609	5,981	2,610	5,981
25%	2,581	6,106	2,581	6,106
0%	2,677	6,280	2,677	6,280
-25%	2,874	6,455	2,871	6,453
-50%	3,132	6,604	3,132	6,604
-75%	3,442	6,728	3,442	6,728
-100%	3,786	6,827	3,786	6,827

Como se pode verificar pelas amplitudes dos harmónicos, nos dois sistemas de eixos, a informação não é alterada na troca de referencial, uma vez que as amplitudes são as mesmas, pelo que se irá utilizar o 6º harmónico de sequência positiva em eixos  $x'y'$  como indicador de falha. As pequenas variações estão associadas a pequenos erros no cálculo da FFT dos sinais.

Como a distribuição do fluxo encadeado no entreferro não é sinusoidal, o 5º e o 7º harmónicos irão ter influência não desprezável. Uma vez que existe uma correspondência entre o 5º harmónico em eixos  $xy$  e o 6º harmónico, de sequência positiva, em eixos  $x'y'$ , como observado anteriormente, e entre o 7º harmónico em eixos  $xy$  e o 6º harmónico, de sequência negativa, em eixos  $x'y'$ , estes irão ser objeto de análise em contexto de simulação.

Na figura 4.1 está representada a amplitude do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão (esquerda) e do vetor espacial da saída do DOB (direita), para um conjunto de velocidades e para vários regimes de carga, como motor (carga positiva) e gerador (carga negativa).



**Figura 4.1** - Evolução do 6º harmônico de sequência positiva, em eixos  $x'y'$ , do vetor espacial: (a) da tensão a 1400 rpm; (b) da saída do DOB a 1400 rpm; (c) da tensão a 1200 rpm; (d) da saída do DOB a 1200 rpm; (e) da tensão a 900 rpm; (f) da saída do DOB a 900 rpm; (g) da tensão a 600 rpm; (h) da saída do DOB a 600 rpm.

Verifica-se que existe uma clara distinção entre a amplitude do 6º harmónico de sequência positiva, quer da tensão quer da saída do DOB em estado saudável, isto é, sem nenhuma falha no PMSM, e em estado de falha. A variação da componente espectral indicadora da falha, em percentagem, para a tensão é apresentada na Tabela 4.2 e, para a saída do DOB, é apresentada na Tabela 4.3.

**Tabela 4.2** – Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da tensão, para diferentes regimes de carga.

	Motor					Gerador				
<b>Carga (A)</b>	4,8	3,6	2,4	1,2	0,0	1,2	2,4	3,6	4,8	
<b>Saudável</b>	2,39	2,29	2,22	2,20	2,28	2,45	2,67	2,93	3,23	
<b>Falha</b>	4,96	5,03	5,09	5,20	5,35	5,50	5,62	5,73	5,82	
$\Delta_{tensão}$ (V)	2,57	2,74	2,87	3,00	3,07	3,05	2,95	2,80	2,59	
$\Delta_{tensão}$ (%)	107	119	129	136	134	125	111	95	80	

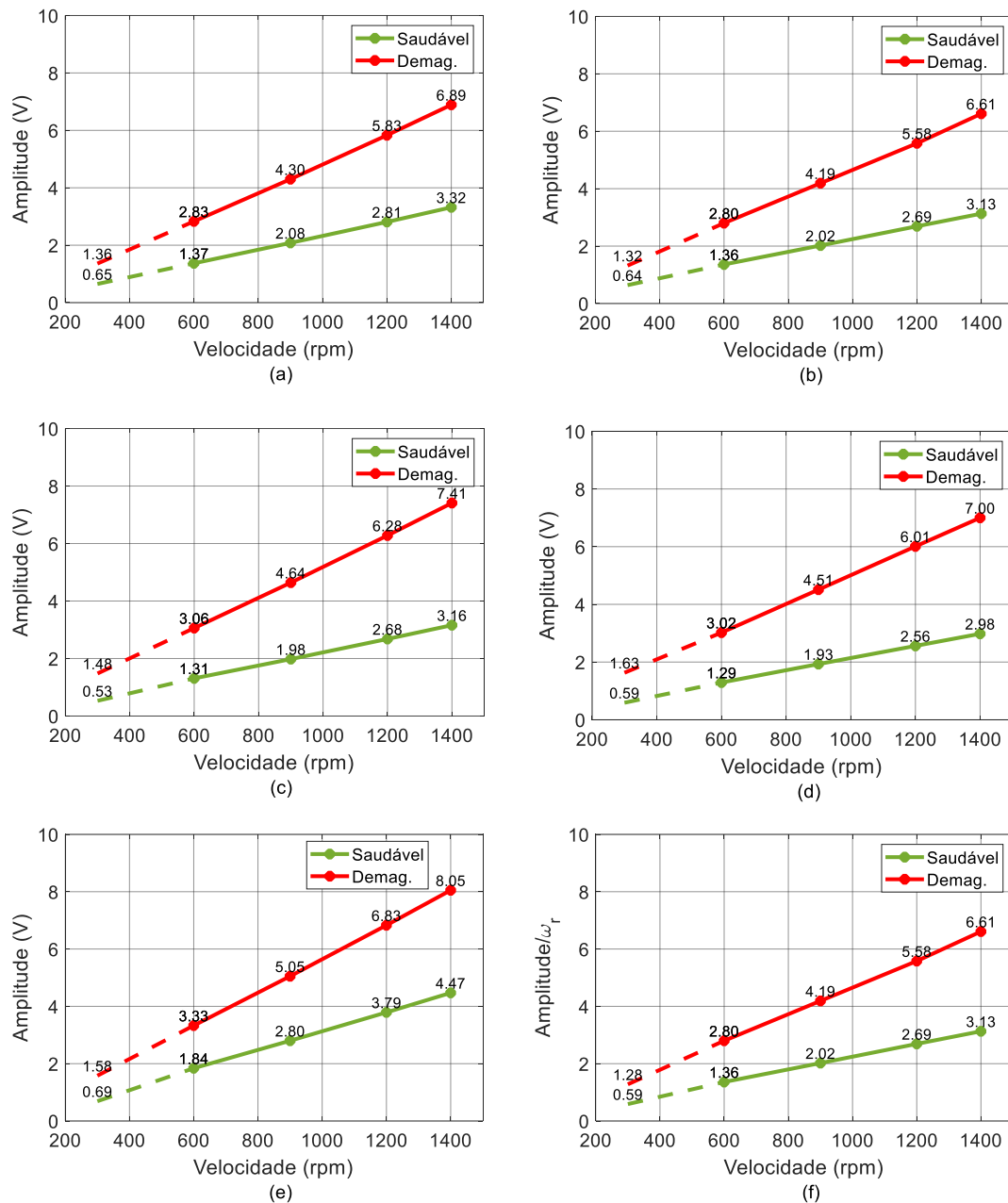
**Tabela 4.3** – Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes regimes de carga.

	Motor					Gerador				
<b>Carga (A)</b>	4,8	3,6	2,4	1,2	0,0	1,2	2,4	3,6	4,8	
<b>Saudável</b>	2,30	2,21	2,14	2,12	2,19	2,35	2,56	2,82	3,10	
<b>Falha</b>	4,77	4,82	4,89	4,99	5,14	5,28	5,40	5,50	5,59	
$\Delta_{DOB}$ (V)	2,47	2,61	2,75	2,87	2,95	2,93	2,84	2,68	2,49	
$\Delta_{DOB}$ (%)	107	119	129	136	134	124	111	95	81	

Por análise das Tabelas 4.2 e 4.3, onde  $\Delta_{tensão}$  representa a variação do 6º harmónico da tensão e  $\Delta_{DOB}$  a variação do 6º harmónico da saída do DOB, pode-se verificar que o 6º harmónico, quer para a tensão quer para a saída do DOB, apresenta uma variação semelhante, em amplitude e em percentagem. Esta semelhança deve-se ao facto de a saída do DOB ser um termo compensatório que é somado à tensão a aplicar ao PMSM, pelo que os espectros entre a tensão de referência são semelhantes.

A amplitude do harmónico é dependente da velocidade de operação da máquina. A dependência da amplitude do 6º harmónico de sequência positiva com a velocidade pode ser verificada na Figura 4.2, onde se observa o evidente aumento da amplitude do indicador de falha em estudo, quer na tensão quer na saída do DOB, com o aumento da velocidade. Foram apenas considerados três regimes de carga, por simplicidade de

análise: carga nominal, como motor e gerador, e em vazio. A linha a tracejado corresponde a uma estimativa da amplitude para 300 rpm, uma vez que, devido a instabilidade no DOB, não foi possível realizar simulações a essa velocidade.



**Figura 4.2** – Variação do 6º harmônico de sequência positiva em eixos  $x'y'$ , do vetor espacial: (a) da tensão, como motor, a 100% de carga; (b) da saída do DOB, como motor, a 100% de carga; (c) da tensão com carga nula; (d) da saída do DOD com carga nula; (e) da tensão, como gerador, a 100% de carga; (f) da saída do DOB, como gerador, a 100% de carga.

As Tabelas 4.4 e 4.5 resumem a variação do indicador de falha, em amplitude e em percentagem. Para cada velocidade foi feita a média da amplitude do indicador de falha, assim como da variação em percentagem, de forma a poder ter-se uma visão mais abrangente da variação para diferentes velocidades.

**Tabela 4.4** - Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da tensão, para diferentes velocidades.

<b>Velocidade (rpm)</b>	1400	1200	900	600
<b>Saudável</b>	3,49	2,96	2,18	1,44
<b>Falha</b>	7,44	6,30	4,65	3,07
$\Delta_{6fs,tensão}$ (%)	116	115	115	115

**Tabela 4.5** - Variação média 6º harmónico do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes velocidades.

<b>Velocidade (rpm)</b>	1400	1200	900	600
<b>Saudável</b>	3,29	2,83	2,13	1,43
<b>Falha</b>	7,03	6,03	4,53	3,03
$\Delta_{6fs,DOB}$ (%)	116	115	115	115

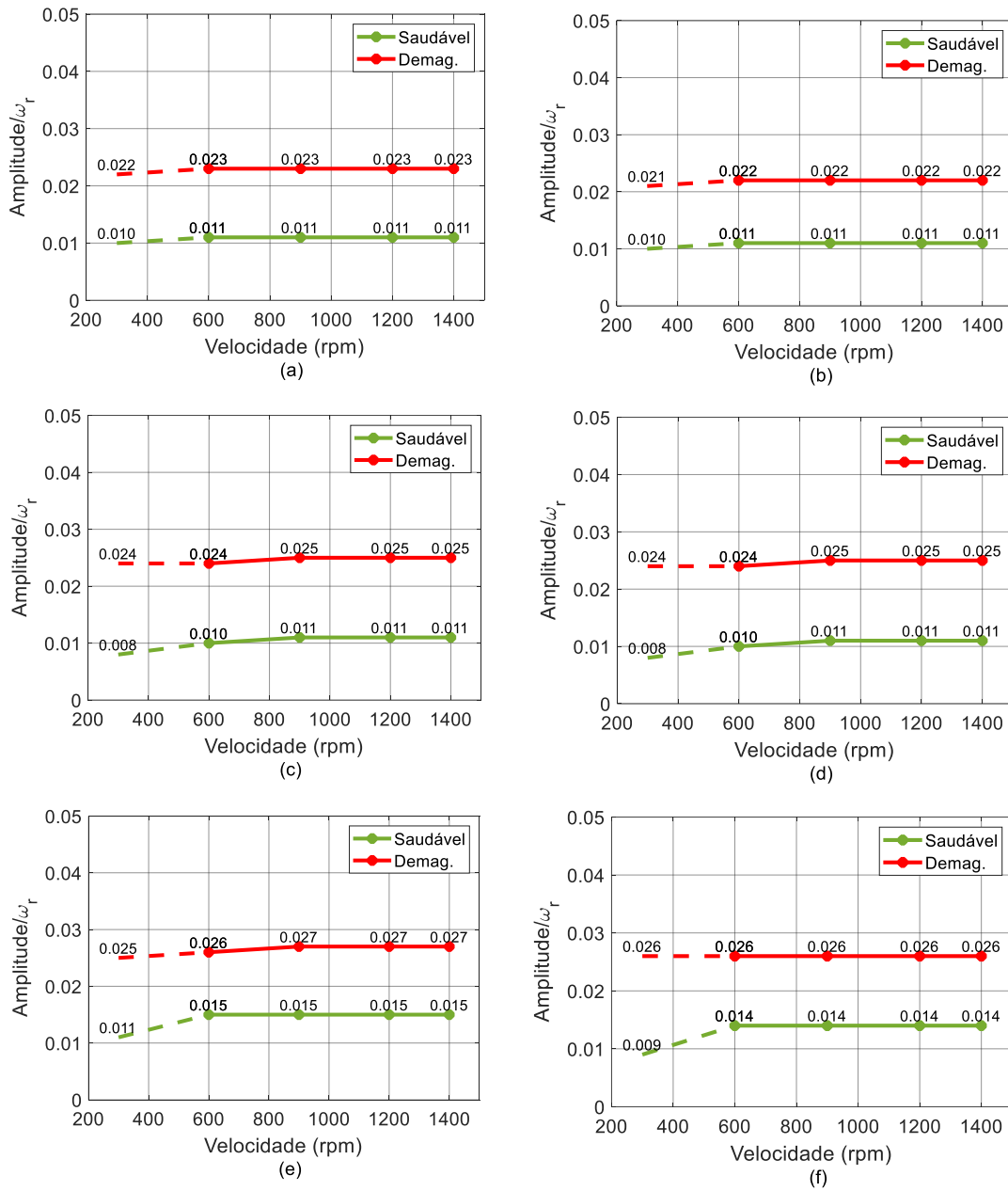
Observa-se que a variação em percentagem da amplitude do 6º harmónico de sequência positiva da tensão e da saída do DOB, para diferentes gamas de velocidades, é igual e em torno de 115%. Esta igualdade na variação em percentagem acontece devido ao facto de existir uma linearidade entre a amplitude da componente espectral e a velocidade, no sentido em que esta aumenta com o aumento da velocidade e diminui com a diminuição da velocidade. Ao comparar estas variações em percentagem com o apresentado nas Tabelas 4.2 e 4.3, verifica-se que os valores são próximos.

Apesar de este indicador de falha não ser independente da velocidade angular do PMSM, dividir a amplitude pela velocidade angular do PMSM, através de:

$$\omega_r = \frac{2\pi p}{60} n \quad (3.28)$$

onde  $\omega_r$  é a velocidade angular,  $p$  é o número de pares de polos e  $n$  é a velocidade do PMSM (em rpm), permite verificar que a deteção é possível a várias velocidades. Na Figura 4.3 está representado o resultado desta operação.





**Figura 4.3** - Variação da divisão da amplitude do 6º harmônico de sequência positiva do vetor espacial pela velocidade angular: (a) da tensão, como motor, a 100% de carga; (b) da saída do DOB, como motor, a 100% de carga; (c) da tensão, com carga nula; (d) da saída do DOB, com carga nula; (e) da tensão, como gerador, com 100% de carga; (f) da saída do DOB, como gerador, com 100% de carga.

Através da análise da Figura 4.1 e da Figura 4.3, complementada pela análise das Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, pode-se verificar que é possível detectar a desmagnetização de uma forma evidente, uma vez que a amplitude do indicador de falha escolhido destaca-se entre os dois estados do PMSM, apresentando uma variação em torno de 100%.

A variação do 6º harmônico de sequência positiva do vetor espacial da tensão e do vetor espacial da saída do DOB é semelhante, assim como as suas amplitudes, pelo que se verifica que a detecção da desmagnetização pode ser realizada quer através da tensão

de referência do sistema de controlo que é aplicada, em ambiente de simulação, ao PMSM quer através da saída do DOB. Esta semelhança deve-se ao facto de a saída do DOB ser uma tensão que atua como termo compensatório para quaisquer perturbações existentes durante a operação do PMSM que, neste caso, é a desmagnetização. Esta falha cria uma componente adicional nas tensões que se vai traduzir numa perturbação que é captada pelo DOB.

Como referido anteriormente, o 6º harmónico de sequência negativa tem origem na característica não sinusoidal do fluxo encadeado no entreferro, pelo que a análise do seu comportamento quando o M-PMSM é sujeito a desmagnetização é também um ponto de interesse. Na Figura 4.4 faz-se uma análise do comportamento da amplitude do 6º harmónico de sequência negativa da tensão aplicada ao M-PMSM.

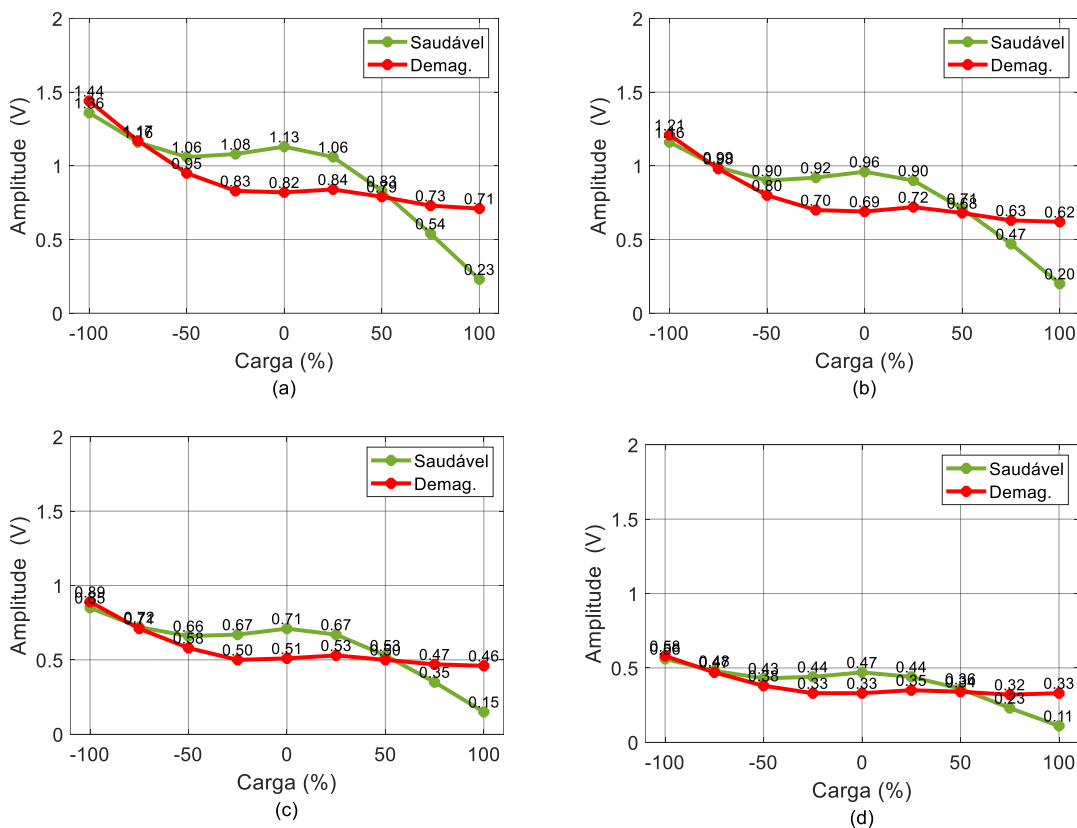


Figura 4.4 – Variação da amplitude do 6º harmónico de sequência negativa do vetor espacial da tensão: (a) a 1400 rpm; (b) a 1200 rpm; (c) a 900 rpm; (d) a 600 rpm.

Como se observa pela Figura 4.4, a distinção entre os dois estados de funcionamento do M-PMSM, estado saudável e com desmagnetização, é muito ténue e inconstante. Embora em alguns pontos ainda se possa distinguir o estado saudável do estado com desmagnetização, esta variação em amplitude é muito pequena, quando se compara com a variação em amplitude do 6º harmónico de sequência positiva, também do vetor espacial da tensão aplicada ao M-PMSM.

Como em ambiente de simulação não existem pontes inversoras e, consequentemente, não existem efeitos do tempo morto, o 6º harmónico de sequência negativa apenas tem origem na característica não sinusoidal do fluxo encadeado no entreferro gerado pelos ímanes permanentes.

Verifica-se então que esta componente espectral não é capaz de fornecer informação fidedigna sobre a ocorrência de desmagnetização, pelo que não será objeto de estudo nos dados obtidos por meio de ensaios experimentais no M-PMSM com desmagnetização.

Uma vez que o DOB tem como função, mas não só, compensar perturbações durante o funcionamento do PMSM, o módulo do vetor da sua saída, em eixos  $dq$ , permite detetar quando ocorre desmagnetização. Tal é possível pois o DOB faz a compensação de erros de parâmetros e, devido à ocorrência de desmagnetização, existe uma variação no fluxo gerado pelos ímanes, que é um parâmetro utilizado pelo algoritmo de controlo.

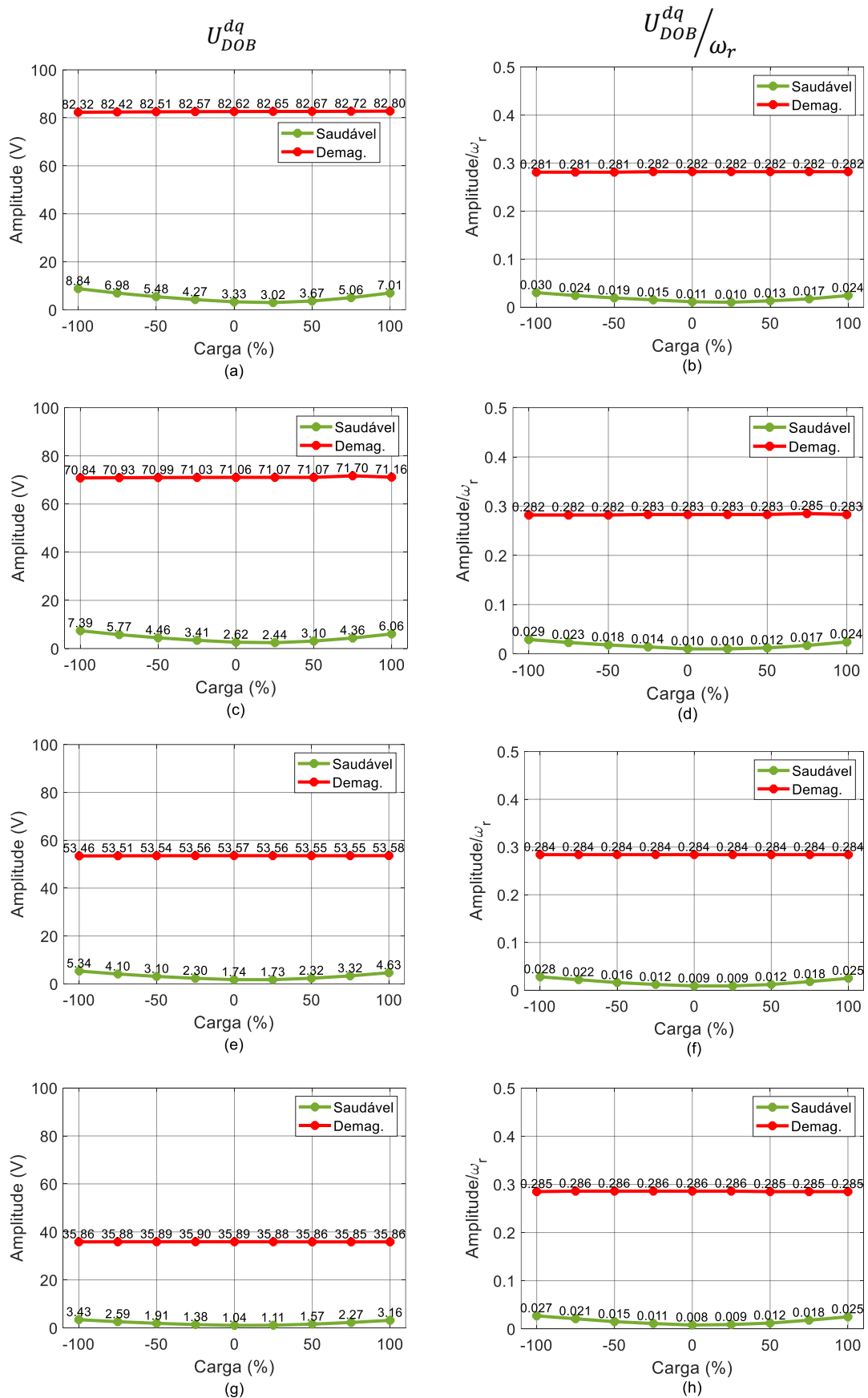
O vetor da saída do DOB, e o seu módulo, são dados por:

$$u_{DOB}^{dq} = u_{DOB}^d + ju_{DOB}^q \quad (3.28)$$

$$U_{DOB}^{dq} = \sqrt{(u_{DOB}^d)^2 + (u_{DOB}^q)^2} \quad (3.29)$$

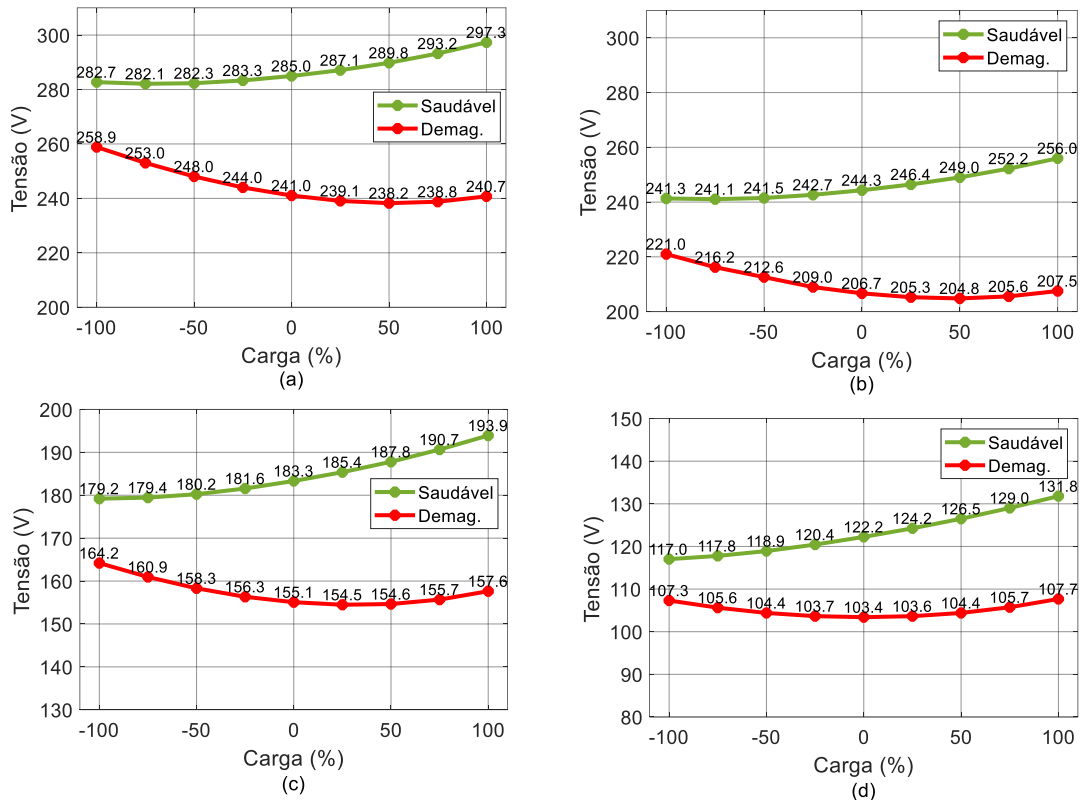
onde  $u_{DOB}^{dq}$  é o vetor espacial da saída do DOB, em eixos  $dq$ ,  $u_{DOB}^d$  é a componente segundo o eixo  $d$  do vetor espacial do DOB e  $u_{DOB}^q$  é a sua componente segundo o eixo  $q$ .

A evolução do módulo do vetor da saída do DOB é apresentada na Figura 4.5, tanto para diferentes regimes de carga como para diferentes velocidades do PMSM.



**Figura 4.5** – Variação do módulo do vetor espacial da saída do DOB: (a) para 1400 rpm; (b) para 1400 rpm, normalizado pela velocidade angular; (c) para 1200 rpm; (d) para 1200 rpm, normalizado pela velocidade angular; (e) para 900 rpm; (f) para 900 rpm, normalizado pela velocidade angular; (g) para 600 rpm; (h) para 600 rpm, normalizado pela velocidade angular.

Verifica-se que o módulo do vetor da saída do DOB pode ser utilizado como indicador da ocorrência de desmagnetização. A ocorrência de desmagnetização leva a que o fluxo gerado pelos ímanes permanentes seja menor e não coincida com o valor deste parâmetro assumido pelo controlo, que é de 0,98 Wb. A tensão também é afetada pela desmagnetização, como mostrado pela Figura 4.6, onde se verifica claramente que existe uma diminuição não desprezável da tensão aplicada ao M-PMSM.



**Figura 4.6** – Variação da tensão aplicada do M-PMSM, para vários regimes de carga: (a) para 1400 rpm; (b) para 1200 rpm; (c) para 900 rpm; (d) para 600 rpm.

A diminuição do fluxo gerado pelos ímanes leva a que a força contraeletromotriz sofra uma diminuição na sua amplitude. Apesar de a medição desta, num PMSM real, só ser possível com este em vazio, recorrendo ao modelo da máquina em elementos finitos é possível obter a sua estimativa. A Tabela 4.6 resume a variação média da força contraeletromotriz, para um conjunto de velocidades, obtida através do controlo aplicado do M-PMSM.

**Tabela 4.6** – Variação média da força contraeletromotriz para diferentes velocidades, obtida através do DOB-PCC.

<b>Velocidade (rpm)</b>	1400	1200	900	600
<b>Saudável</b>	284,91	244,26	183,24	122,18
<b>Falha</b>	241,01	207,49	155,66	103,79
$\Delta_{Back\ EMF}$ (V)	-42,90	-36,77	-27,58	-18,39
$\Delta_{Back\ EMF}$ (%)	-15,06	-15,05	-15,05	-15,05

O valor da força contraeletromotriz com a ocorrência de desmagnetização pode também ser obtido através de (2.2). Este cálculo requer, no entanto, conhecimento do valor desta em estado saudável e do número de ímanes que se encontram desmagnetizados. Os resultados obtidos através desta equação estão apresentados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7** - Variação média da força contraeletromotriz para diferentes velocidades, através da equação 2.2.

<b>Velocidade (rpm)</b>	1400	1200	900	600
<b>Saudável</b>	284,91	244,26	183,24	122,18
<b>Falha</b>	221,60	189,98	142,52	95,03
$\Delta_{Back\ EMF}$ (V)	-63,31	-54,28	-40,72	-27,15
$\Delta_{Back\ EMF}$ (%)	-22,22	-22,22	-22,22	-22,22

Pode-se verificar que a variação da força contraeletromotriz obtida por meio de FEA e através da equação 2.2 é de -15,05% e -22,22%, respetivamente. Estes valores são relativamente próximos, mas não iguais devido ao facto de a equação 2.2 apenas pretender dar uma ideia do nível de desmagnetização, não fornecendo um valor rigoroso. No entanto, comparando a Tabela 4.6 com a Tabela B.1 (Anexo B), que apresenta os valores da força contraeletromotriz medidos experimentalmente, verifica-se que esta variação é em torno dos 15%. A força contraeletromotriz é capaz de indicar que pode existir alguma falha nos ímanes no PMSM, porém esta conclusão implica que se conheça quais os valores numa condição saudável, o que nem sempre é possível de se obter.

## 4.2 Análise dos resultados experimentais

De uma forma semelhante ao que foi realizado no estudo baseado em simulações, foram realizados ensaios experimentais em que, para uma gama de velocidades alta, média e baixa, se colocou o M-PMSM sob vários regimes de carga, entre 0% e 100% da carga nominal, a funcionar como motor e como gerador. Para cada ensaio foi analisada a amplitude do 6º harmónico de sequência positiva em eixos  $x'y'$  (ou 5º harmónico de sequência positiva em eixos  $xy$ ), para o estado saudável e com falha, da tensão de referência e da saída do DOB.

No modelo de co-simulação utilizado não existe eletrónica de potência, pelo que o tempo morto dos inversores é nulo, mas nos ensaios experimentais o mesmo já não se verifica uma vez que devido à presença das pontes inversoras existe a necessidade da existência de tempo morto nas mesmas que é em torno de  $2,2 \mu s$ . Este tempo morto está presente para proteger o inversor pois, devido à característica não ideal dos IGBTs, é necessário ter um tempo de espera entre as comutações dos mesmos. Devido a esta característica e como o tempo morto tem a capacidade de influenciar o 5º e 7º harmónicos, aplicou-se um algoritmo de compensação do tempo morto, *offline*, à tensão aplicada ao M-PMSM.

A compensação do tempo morto adotada consiste no cálculo de um erro de tensão. Este erro de tensão, em coordenadas de fase, é obtido da seguinte forma [44]:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{a1} \\ \Delta U_{b1} \\ \Delta U_{c1} \\ \Delta U_{a2} \\ \Delta U_{b2} \\ \Delta U_{c2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s(i_{a1}) \\ s(i_{b1}) \\ s(i_{c1}) \\ s(i_{a2}) \\ s(i_{b2}) \\ s(i_{c2}) \end{bmatrix} U_d, \quad (3.26)$$

onde  $\Delta U_w$ , com  $w = \{a1, b1, c1, a2, b2, c2\}$ , corresponde ao erro de tensão em cada uma das fases devido ao tempo morto, que é definido como a diferença entre a tensão de referência do modulador e a tensão que é realmente aplicada ao M-PMSM. A função  $s(i_w)$  corresponde à função sinal e é definida como:

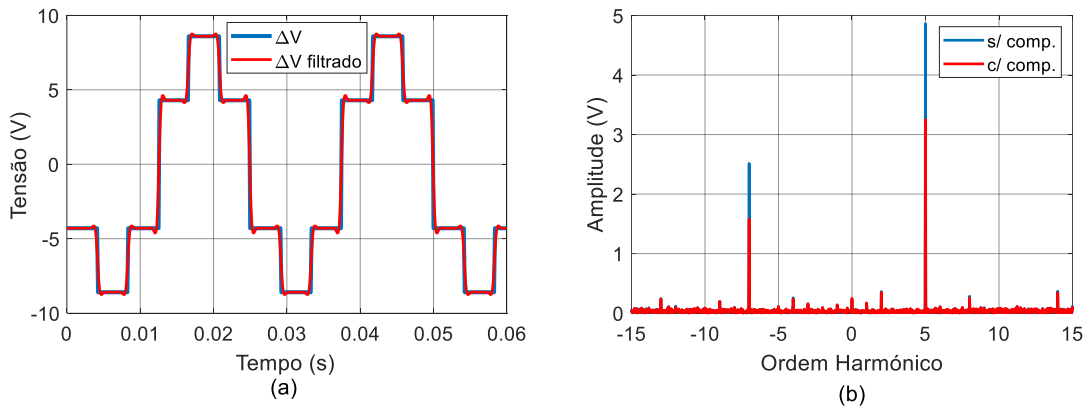
$$s(i_w) = \begin{cases} -1, & \text{se } i_w < 0 \\ 0, & \text{se } i_w = 0 \\ 1, & \text{se } i_w > 0 \end{cases}. \quad (3.27)$$

A variável  $U_d$  corresponde ao erro de tensão devido ao tempo morto e é dada por:

$$U_d = \frac{T_d + T_{on} - T_{off}}{T_{pwm}} (U_{DC} - U_{sat} + U_{diode}) - \frac{U_{diode} + U_{sat}}{2}, \quad (3.28)$$

onde  $T_d$ ,  $T_{on}$ ,  $T_{off}$ ,  $T_{pwm}$ ,  $U_{DC}$ ,  $U_{diode}$  e  $U_{sat}$  são o tempo morto ( $2,2 \mu s$ ), tempo para ligar o IGBT ( $1,168 \mu s$ ), tempo para desligar o IGBT ( $1,928 \mu s$ ), período de comutação ( $125 \mu s$ ), tensão barramento DC ( $650 \text{ V}$ ), tensão de saturação do IGBT e queda de tensão no diodo, respetivamente. A tensão de saturação e a queda de tensão no diodo foram desprezadas.

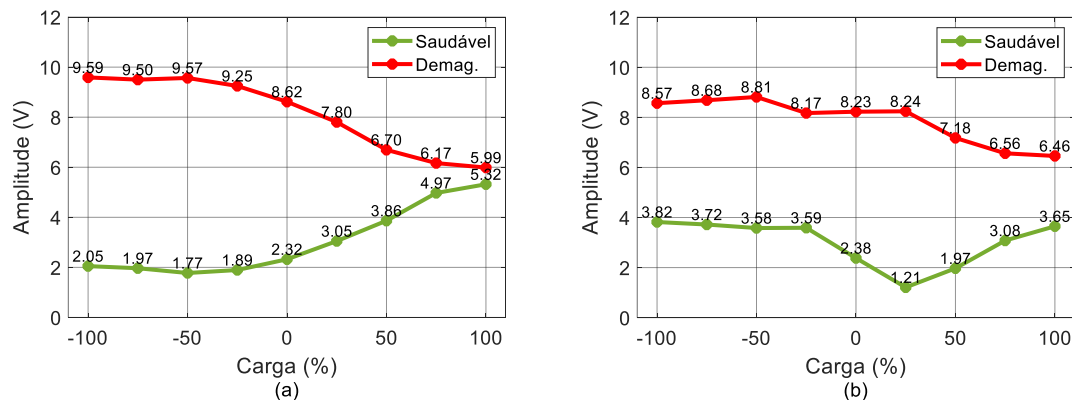
Após a aplicação deste algoritmo de compensação do tempo morto, o erro de tensão é convertido para eixos  $\alpha\beta$  através da transformação VSD. De forma a obter-se a tensão que é realmente aplicada ao PMSM, subtrai-se à tensão de referência, também em eixos  $\alpha\beta$  e filtrada, o erro de tensão, em  $\alpha\beta$ , e filtrado. A tensão obtida desta subtração é então transformada para o referencial rotórico através da matriz de rotação. O filtro aplicado tanto à tensão de referência como ao erro de tensão é um filtro passa-baixo de *Butterworth* de segunda ordem com frequência de corte de  $1 \text{ kHz}$  e é aplicado aos sinais de forma a que o desfasamento que este filtro introduz seja o mesmo para ambos os sinais. Na Figura 4.7 está representada a forma de onda do erro de tensão e o espectro da tensão, podendo-se ver a influência desta compensação no  $5^\circ$  e  $7^\circ$  harmónico.



**Figura 4.7** – Forma de onda do (a) sinal de erro de tensão e (b) espectro do vetor espacial da tensão com e sem compensação do tempo morto.

Na Figura 4.8 pode-se verificar o efeito que a aplicação deste método de compensação *offline* tem. Como se elimina praticamente quase toda a contribuição do tempo morto no  $6^\circ$  harmónico, fica-se com a informação relativa à desmagnetização, podendo observar-se claramente uma melhor distinção entre a condição de funcionamento saudável e em falha.



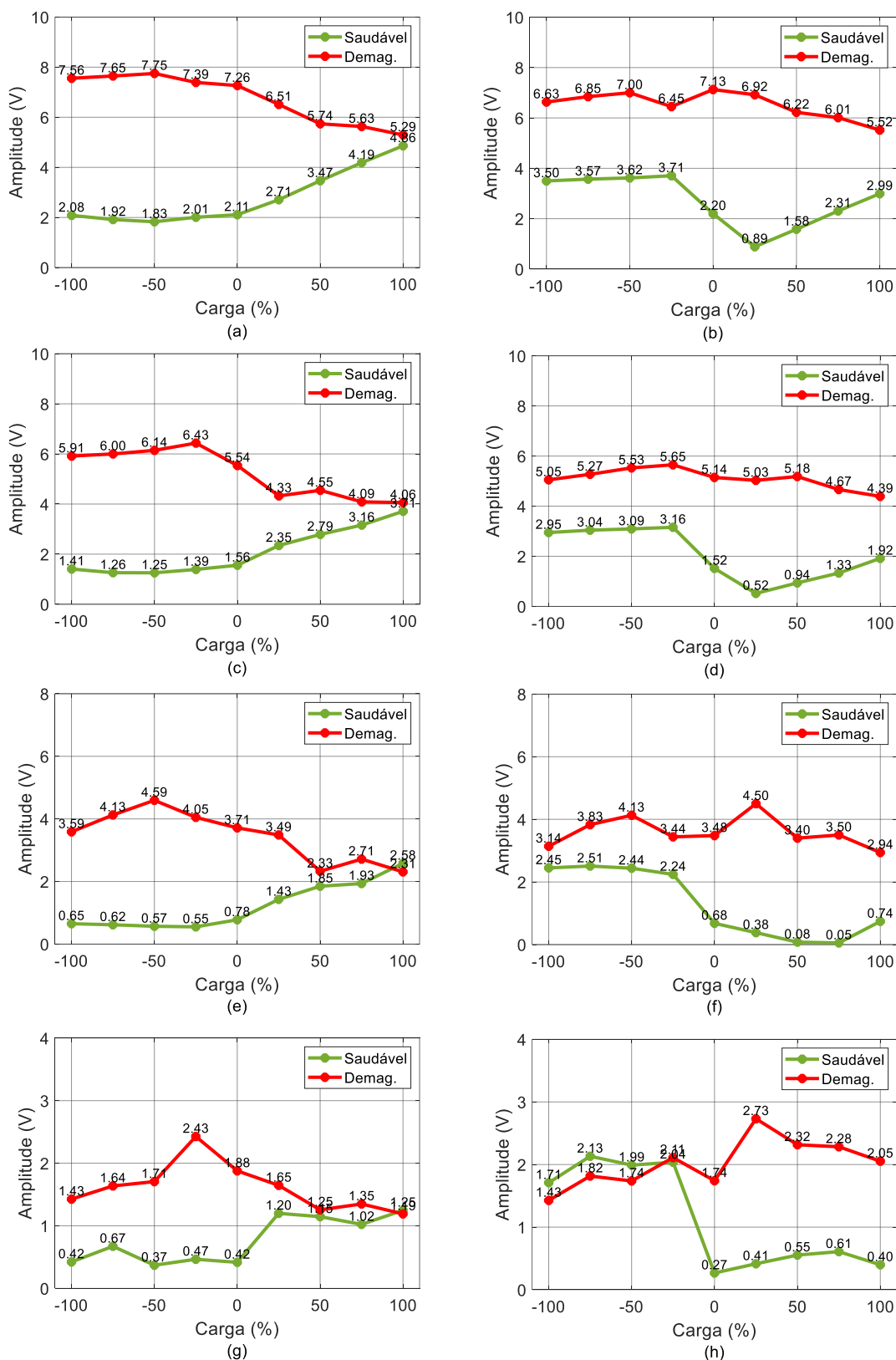


**Figura 4.8** - Evolução do 6º harmónico de sequência positiva, do vetor espacial da tensão, no subespaço  $x'y'$ , para 1400 rpm: (a) sem compensação de tempo morto; (b) com compensação de tempo morto.

Como o DOB foi desenvolvido para funcionar em eixos  $dq$  e  $x'y'$  e, como a tensão compensada é obtida em eixos  $\alpha\beta$  e  $xy$ , há necessidade de se averiguar se existe perda de informação aquando da troca entre estes dois eixos. Como já foi abordado na secção 4.1, não existe de facto perda de informação ao se trocar de eixos  $xy$  para eixos  $x'y'$ , pelo que toda a análise será feita nestes eixos.

O facto de a informação nestes dois eixos ser a mesma é uma vantagem, uma vez que o DOB foi desenvolvido para atuar no referencial rotórico, eliminando-se assim a necessidade de transformação dos sinais de saída do DOB.

Para diferentes velocidades, incorporando velocidades altas, média e baixas, e para vários regimes de carga, desde 0% a 100%, em intervalos de 25%, analisou-se o comportamento do 6º harmónico da tensão de referência do modulador e da tensão aplicada ao M-PMSM, que resulta da compensação de tempo morto aplicada *offline*, em estado saudável e com falha, como representado na Figura 4.9. Um valor de carga negativo representa o funcionamento como gerador e um valor de carga positivo representa o funcionamento como motor.



**Figura 4.9** - Evolução do 6º harmônico de seqüência positiva do vetor espacial da tensão, em eixos  $x'y'$ , para diferentes regimes de carga: (a) a 1200 rpm, sem compensação de tempo morto; (b) a 1200 rpm, com compensação de tempo morto; (c) a 900 rpm, sem compensação de tempo morto; (d) a 900 rpm, com compensação de tempo morto; (e) a 600 rpm, sem compensação de tempo morto; (f) a 600 rpm, com compensação de tempo morto; (g) a 300 rpm, sem compensação de tempo morto; (h) a 300 rpm, com compensação de tempo morto.

Como se pode verificar pela Figura 4.8 e Figura 4.9, a componente harmónica em estudo é capaz de fornecer informação sobre a ocorrência de desmagnetização, apresentando uma variação, em amplitude, quando esta falha ocorre. Embora se consiga verificar esta distinção sem se realizar a compensação de tempo morto, para valores de carga maiores, a funcionar como motor, a distinção entre o estado saudável e de falha fica mais ténue, pelo que a realização da compensação do tempo morto é uma clara vantagem nesta análise. De notar também que para velocidades médias-baixas e baixas já se torna difícil detetar a desmagnetização, uma vez que o 6º harmónico passa a ter um comportamento não tão linear, ao contrário do que se verificou nos dados fornecidos por FEA. Isto deve-se, essencialmente, ao facto de que no PMSM real existem muito mais perturbações, como os parâmetros da máquina que não são exatamente os reais, alinhamento não perfeito do rotor, que leva a vibrações, aquecimento do PMSM durante a sua operação, ruído nos sinais medidos e fornecidos ao algoritmo de controlo, entre outros. Esta constatação permite concluir que, para velocidades mais baixas, este método torna-se pouco eficaz na deteção de desmagnetização. As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam, de forma resumida, a variação média desta componente espectral, sem compensação e com compensação do tempo morto, respetivamente.

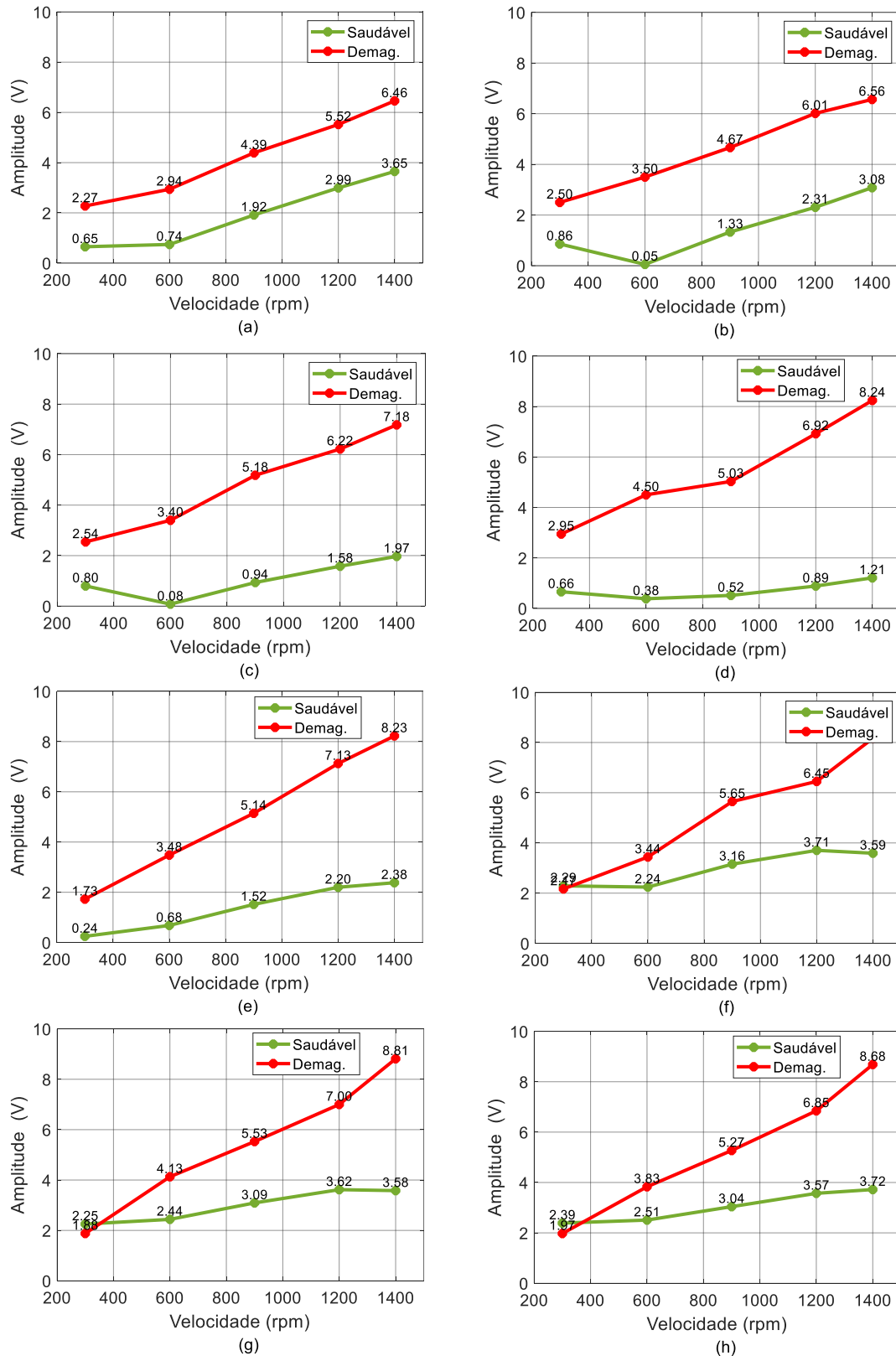
**Tabela 4.8** – Variação média do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, no subespaço  $x'y'$ , para diferentes regimes de carga, como motor e como gerador, sem compensação do tempo morto.

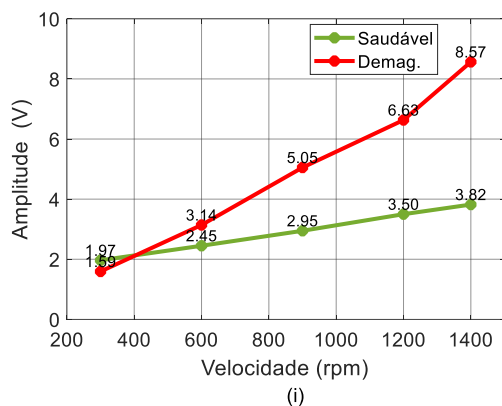
Carga (A)	Motor					Gerador			
	4,8	3,6	2,4	1,2	0,0	1,2	2,4	3,6	4,8
<b>Saudável</b>	3,54	3,06	2,62	2,15	1,44	1,26	1,16	1,29	1,32
<b>Falha</b>	3,77	3,99	4,11	4,74	5,38	5,91	5,96	5,78	5,61
$\Delta_{tensão}$ (V)	0,23	0,93	1,49	2,59	3,94	4,65	4,80	4,49	4,29
$\Delta_{tensão}$ (%)	6,5	30,4	56,9	120,5	273,6	369,1	413,8	348,1	325,0

**Tabela 4.9** - Variação média do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, no subespaço  $x'y'$ , para diferentes regimes de carga, como motor e como gerador, com compensação do tempo morto.

Carga (A)	Motor					Gerador			
	4,8	3,6	2,4	1,2	0,0	1,2	2,4	3,6	4,8
<b>Saudável</b>	1,99	1,53	1,07	0,73	1,40	3,00	2,99	3,05	2,94
<b>Falha</b>	4,34	4,65	4,91	5,53	5,14	5,18	5,47	5,32	5,00
$\Delta_{tensão}$ (V)	2,35	3,12	3,84	4,80	3,74	2,18	2,48	2,27	2,06
$\Delta_{tensão}$ (%)	118,1	203,9	358,9	657,5	267,1	72,7	82,9	74,4	70,0

O comportamento da amplitude do 6º harmônico de sequência positiva do vetor espacial da tensão com a variação da velocidade é apresentado na Figura 4.10, onde se verifica que com o aumento da velocidade, a amplitude da componente espectral também aumenta, e vice-versa, como averiguado no estudo de simulação.





**Figura 4.10** – Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, para diferentes velocidades: (a) como motor, a 100% de carga; (b) como motor, a 75% de carga; (c) como motor, a 50% de carga; (d) como motor, a 25% de carga; (e) em vazio; (f) como gerador, a 25% de carga; (g) como gerador, a 50% de carga; (h) como gerador, a 75% de carga; (i) como gerador, a 100% de carga.

De forma semelhante ao que foi verificado através de FEA, para baixas velocidades, existe uma distinção mais ténue entre o estado saudável e o estado de falha. Isto deve-se ao facto de que a baixas velocidades, a amplitude das componentes espectrais é menor e o efeito das perturbações durante o funcionamento é mais visível. A Tabela 4.10 resume a variação média desta componente espectral para diferentes velocidades, com compensação do tempo morto.

**Tabela 4.10** – Variação média do 6º harmónico do vetor espacial da tensão, no subespaço  $x'y'$ , para diferentes velocidades, com compensação do tempo morto.

Velocidade (rpm)	1400	1200	900	600	300
<b>Saudável</b>	3,00	2,71	2,05	1,29	1,35
<b>Falha</b>	7,88	6,53	5,10	3,60	2,18
$\Delta_{6fs,tensão}$ (V)	4,88	3,82	3,05	2,31	0,83
$\Delta_{6fs,tensão}$ (%)	162,7	140,9	148,8	179,1	61,5

Como referido na secção 4.1, que diz respeito aos dados obtidos por meio de FEA, o espectro do vetor espacial da saída do DOB, no subespaço  $x'y'$ , é semelhante ao espectro do vetor espacial da tensão nas mesmas condições, pelo que se pode utilizar o mesmo para se realizar a deteção de desmagnetização.

Como o DOB tem a função de compensar o tempo morto, erros de parâmetros e outras perturbações às quais o acionamento está sujeito, os sinais gerados pelo mesmo irão conter informação relativa a tais fenómenos. Quando se introduz a desmagnetização no PMSM, esta nova perturbação irá também estar presente nos

sinais gerados pelo DOB, pelo que, de forma a se poder isolar a informação apenas relativa à desmagnetização, se realizou a operação de subtrair aos sinais gerados pelo DOB quando o PMSM está desmagnetizado, os sinais gerados pelo DOB quando este se encontra em estado saudável. Após esta subtração, o comportamento do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, no subespaço  $x'y'$ , é analisado, como demonstrado na Figura 4.11.

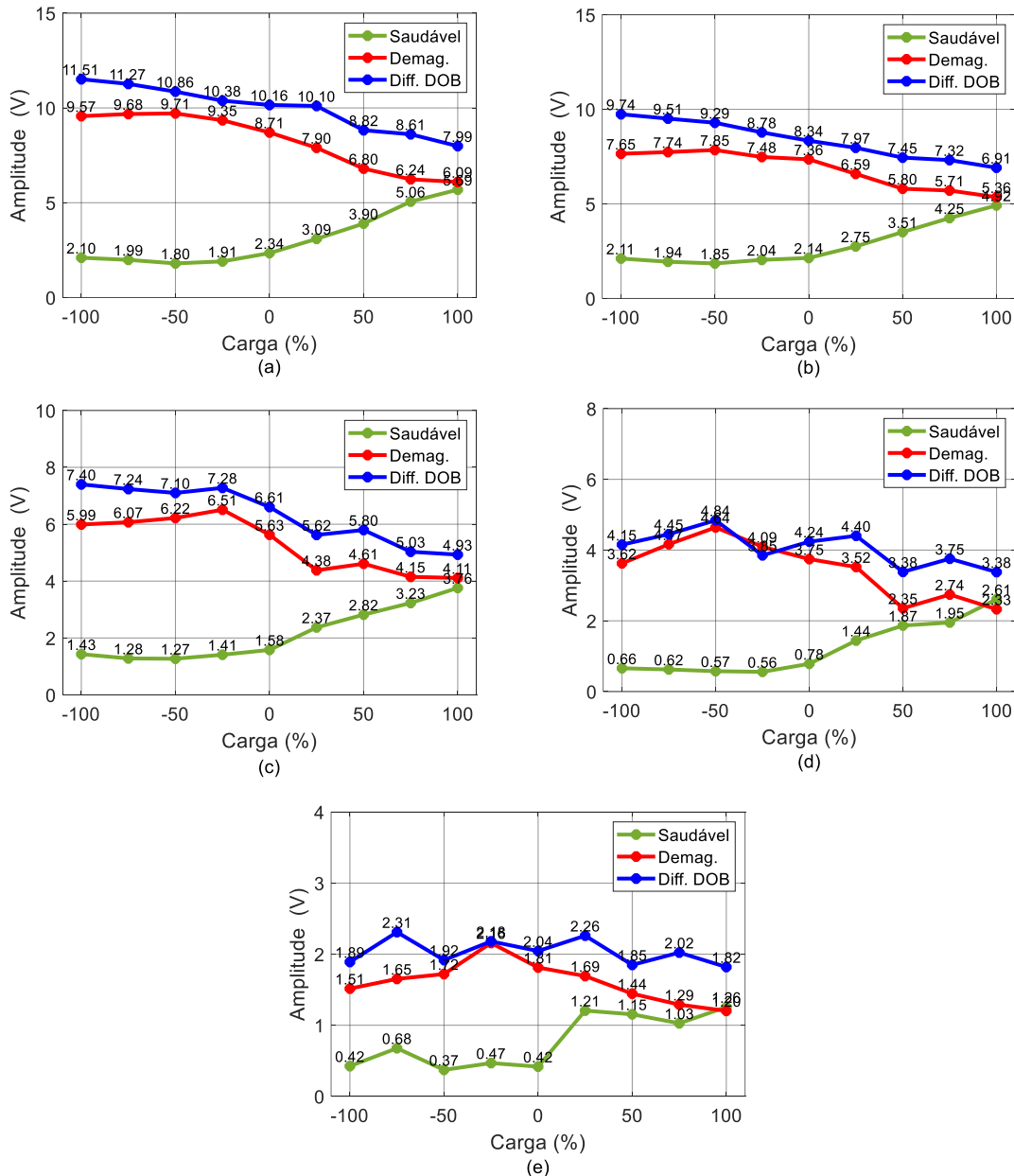


Figura 4.11 – Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes regimes de carga: (a) a 1400 rpm; (b) a 1200 rpm; (c) a 900 rpm; (d) a 600 rpm; (e) a 300 rpm.

A realização desta operação parte do pressuposto de que o protótipo do M-PMSM saudável é exatamente igual ao protótipo que está desmagnetizado. Naturalmente, os protótipos não são exatamente iguais, mas como foram produzidos em série, as diferenças de parâmetros entre ambos são pequenas pelo que o erro associado a este pressuposto é, também ele, pequeno.

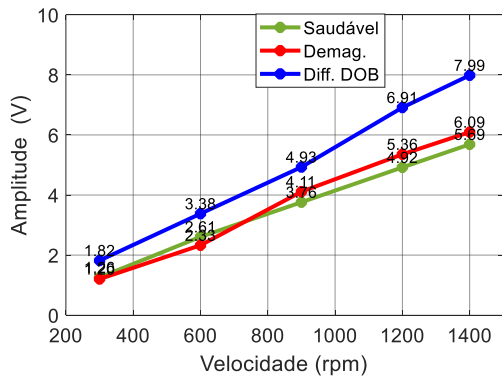
A distinção entre o estado saudável e o estado de falha torna-se mais evidente e constata-se que, ao contrário do que foi verificado para a tensão, a baixas velocidades é possível distinguir com maior facilidade o estado saudável e de falha, embora as altas e médias velocidades ainda continuem a ser as zonas de operação onde este método é mais eficaz. A Tabela 4.11 resume a variação média da componente espectral para os diferentes regimes de carga.

*Tabela 4.11 – Variação do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, em eixos  $x'y'$ , para diferentes regimes de carga, como motor e gerador, em estado saudável, de falha e subtração entre falha e saudável.*

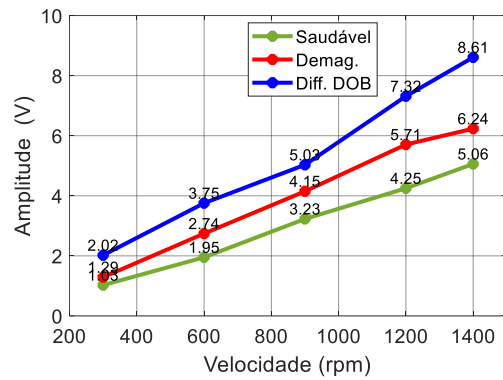
Carga (A)	Motor					Gerador			
	4,8	3,6	2,4	1,2	0,0	1,2	2,4	3,6	4,8
<b>Saudável</b>	3,65	3,10	2,65	2,17	1,45	1,28	1,17	1,30	1,34
<b>Falha</b>	3,82	4,03	4,20	4,82	5,45	5,92	6,03	5,86	5,67
<b>Diferença</b>	5,01	5,35	5,46	6,07	6,28	6,49	6,80	6,96	6,94
<b><math>\Delta</math> (V)</b>	0,17	0,93	1,55	2,65	4,00	4,64	4,86	4,56	4,33
<b><math>\Delta</math> (%)</b>	4,7	30,0	58,5	122,1	275,9	362,5	415,4	350,8	323,1
<b><math>\Delta_{diff}</math>. (V)</b>	1,36	2,25	2,81	3,90	4,83	5,21	5,63	5,66	5,60
<b><math>\Delta_{diff}</math>. (%)</b>	37,3	72,6	106,0	179,7	333,1	407,0	481,2	435,4	417,9

A variação desta componente espectral com a velocidade é apresentada na Figura 4.12, onde se verifica que esta componente é dependente da velocidade de operação do M-PMSM. Continua-se a verificar, no entanto, que é possível diferenciar os dois estados, de falha e saudável, sendo que, com a subtração dos sinais do DOB, essa diferença torna-se mais evidente.

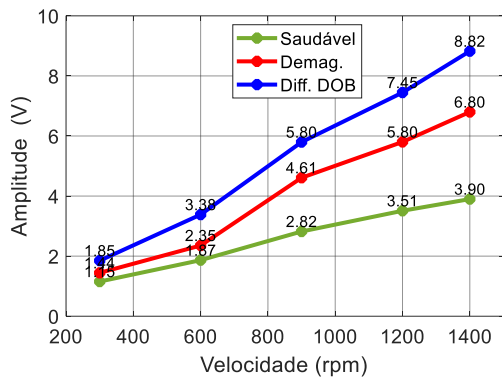
Quando o M-PMSM opera como gerador, a diferença de amplitude entre saudável e em falha é maior do que quando o PMSM opera como motor. De notar também que, a baixas velocidades, a diferença entre o estado saudável e o estado de falha torna-se mais ténue, como acontece com a tensão nos dados obtidos por simulação.



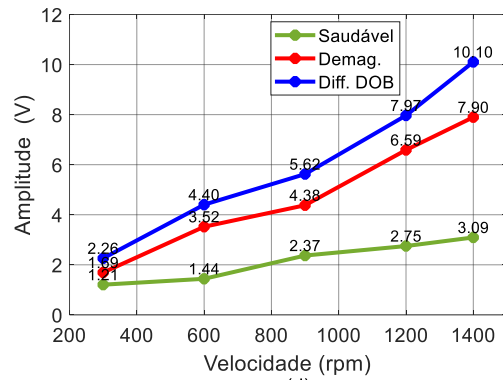
(a)



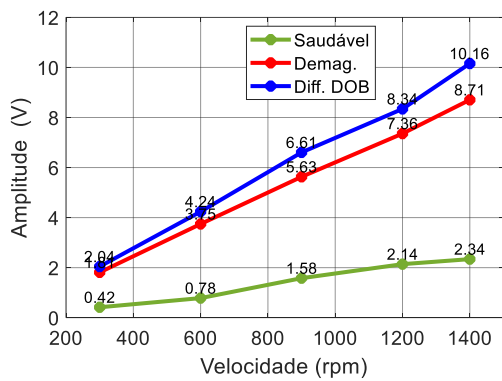
(b)



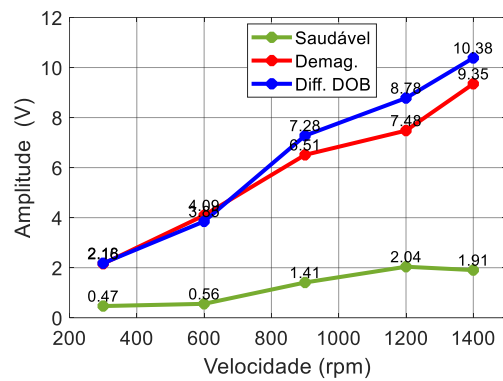
(c)



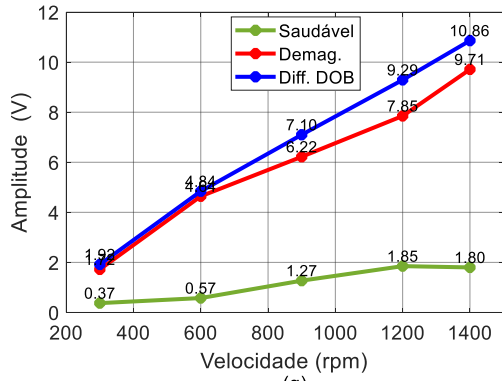
(d)



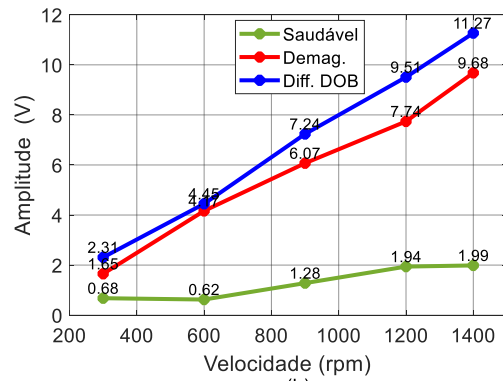
(e)



(f)

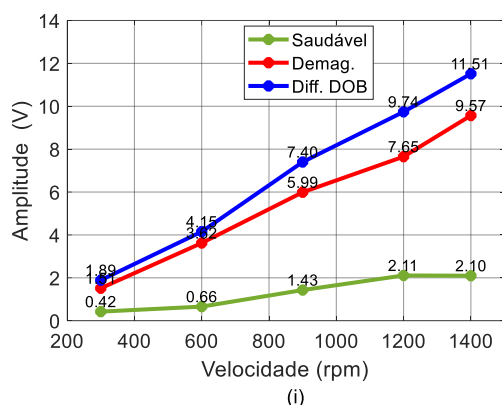


(g)



(h)





**Figura 4.12** - Variação do 6º harmônico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, para diferentes velocidades: (a) como motor, a 100% de carga; (b) como motor, a 75% de carga; (c) como motor, a 50% de carga; (d) como motor, a 25% de carga; (e) em vazio; (f) como gerador, a 25% de carga; (g) como gerador, a 50% de carga; (h) como gerador, a 75% de carga; (i) como gerador, a 100% de carga.

A Tabela 4.12 resume a variação média deste indicador, nos dois estados de funcionamento do M-PMSM, para a diferença entre os sinais do DOB, a várias velocidades.

**Tabela 4.12** - Variação média do 6º harmônico de sequência positiva do vetor espacial da saída do DOB, em eixos  $x'y'$ , para diferentes velocidades, em estado saudável, em falha e para a diferença de sinais do DOB.

Velocidade (rpm)	1400	1200	900	600	300
<b>Saudável</b>	3,10	2,83	2,13	1,23	0,78
<b>Falha</b>	8,23	6,84	5,30	3,47	1,61
<b>Diferença</b>	9,97	8,37	6,33	4,05	2,03
$\Delta$ (V)	5,13	4,01	3,17	2,24	0,83
$\Delta$ (%)	165,5	141,7	148,9	100,4	106,4
$\Delta_{diff}$ (V)	6,87	5,54	4,20	2,82	1,25
$\Delta_{diff}$ (%)	221,6	195,8	197,2	229,3	160,3

Uma vez que a saída do DOB é bastante influenciada pela desmagnetização, pois esta introduz um erro no parâmetro relativo ao fluxo gerado pelos ímanes, de forma semelhante ao realizado para os resultados de simulação, o módulo do vetor da saída do DOB, em eixos  $dq$ , pode dar indicação da ocorrência de desmagnetização. A evolução deste módulo com o regime de carga, e para várias velocidades, é apresentada na Figura 4.13.

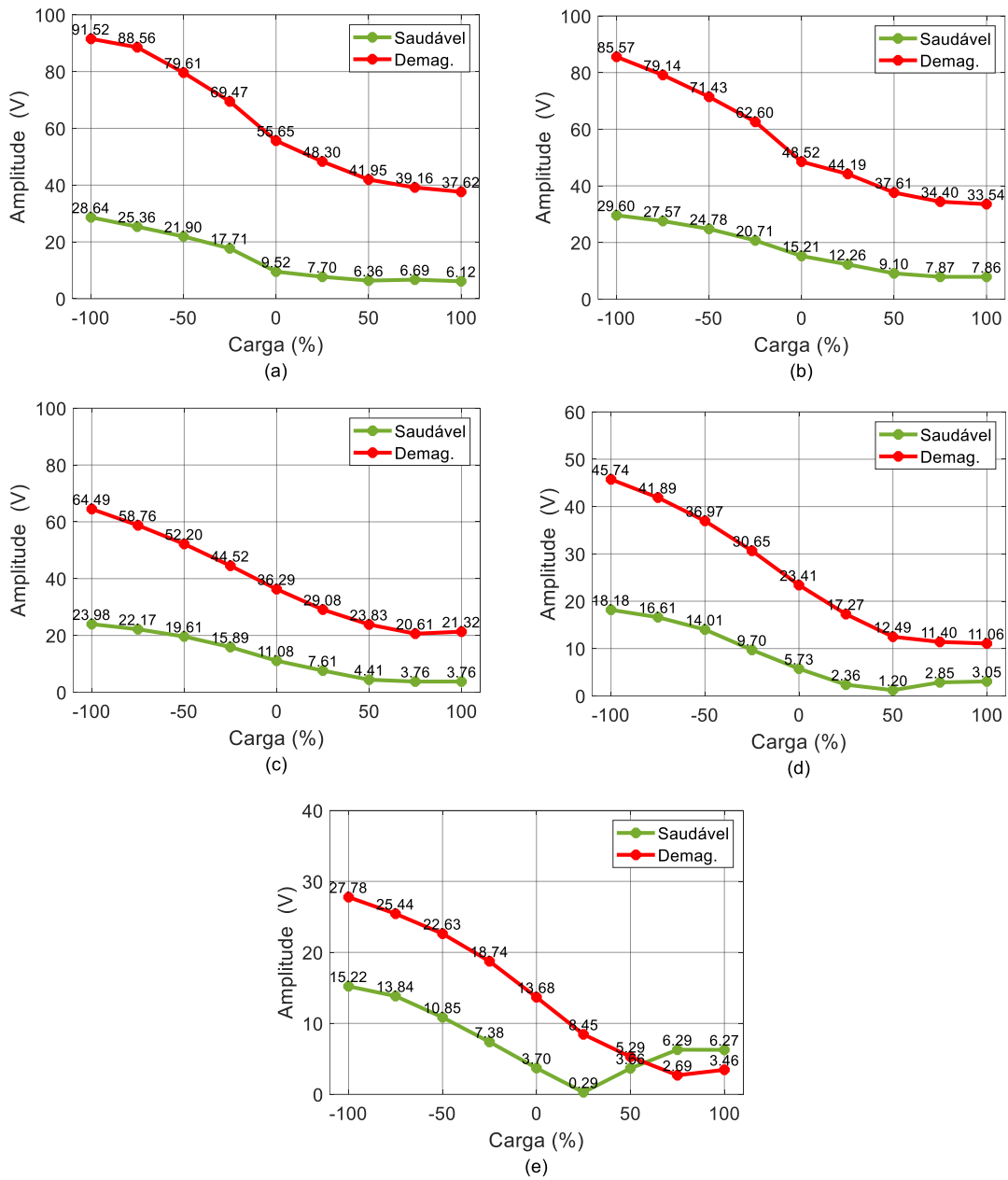
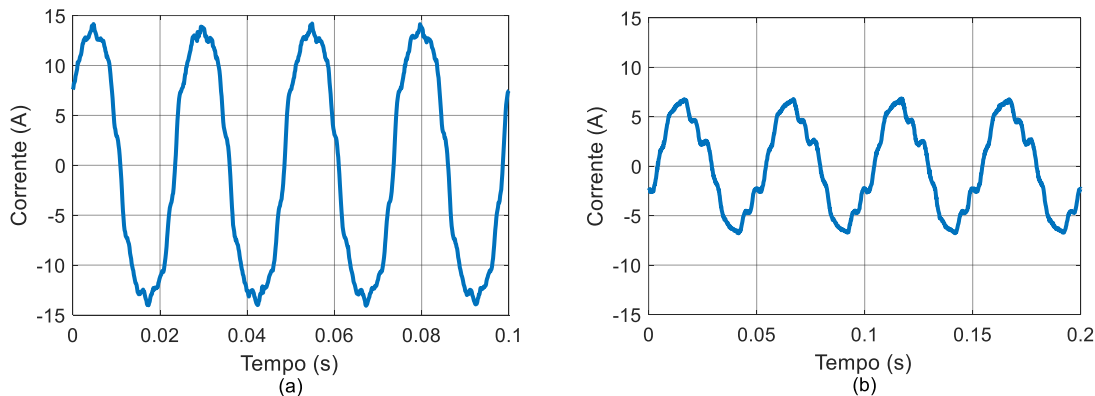


Figura 4.13 - Variação do módulo do vetor espacial da saída do DOB: (a) para 1400 rpm; (b) para 1200 rpm; (c) para 900 rpm; (d) para 600 rpm; (e) para 300 rpm.

Verifica-se que com a ocorrência de desmagnetização existe um claro aumento do módulo deste vetor para valores bastante superiores aos obtidos com o PMSM saudável. Esta variação é, no entanto, mais perceptível para velocidades maiores, pois, como se pode ver, para velocidades mais baixas, a diferença entre os dois estados é menor e, por vezes, imperceptível, mas este indicador, devido à sua grande amplitude, pode dar informação de que ocorreu desmagnetização.

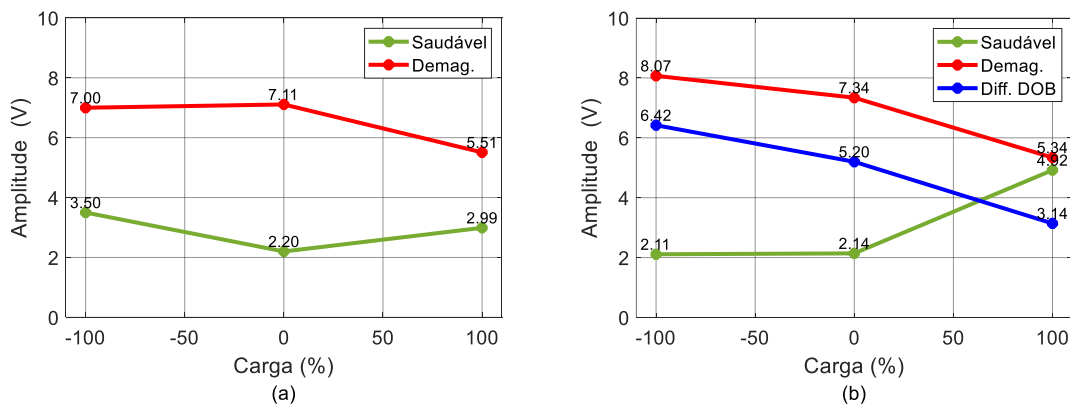
De forma a se poder verificar a capacidade de detecção de desmagnetização deste indicador de falha com a ocorrência de outras falhas, realizaram-se ensaios experimentais em que o PMSM apresenta desmagnetização e um curto-circuito de 7 espiras na fase  $a_1$ . Para estes ensaios seguiu-se a mesma lógica de varrer vários regimes de carga para uma determinada velocidade. Por questões de simplicidade de análise e prova de conceito, escolheram-se duas velocidades, 1200 e 600 rpm, e os extremos de carga: carga nominal, como motor; em vazio; carga nominal, como gerador.

O curto-circuito é feito colocando uma resistência variável entre a tomada de 7 espiras e um terminal da bobina da fase considerada. Esta resistência foi ajustada de forma a ter-se uma corrente de curto-circuito considerável, em torno de 15 A pico, para 1200 rpm, e 7 A pico, para 600 rpm, como representado na Figura 4.14.



**Figura 4.14** – Forma de onda da corrente de curto-circuito, para 7 espiras: (a) a 1200 rpm; (b) a 600 rpm.

Os resultados obtidos para a evolução do 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão e da saída do DOB, são apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16. Para o DOB foi feita na mesma a subtração entre os sinais do DOB com a desmagnetização e o curto-circuito e os sinais do DOB em estado saudável.



**Figura 4.15** – Variação do 6º harmónico de sequência positiva, em eixos  $x'y'$ : (a) da tensão, com compensação do tempo morto, a 1200 rpm; da saída do DOB, a 1200 rpm.

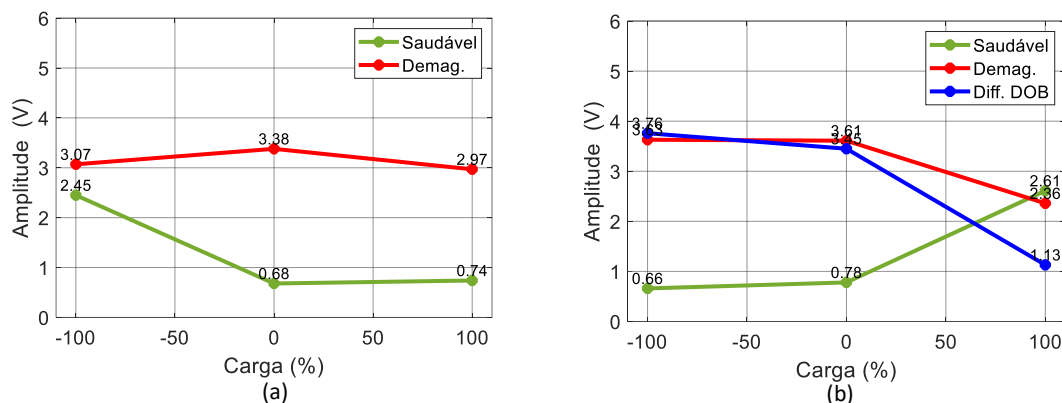


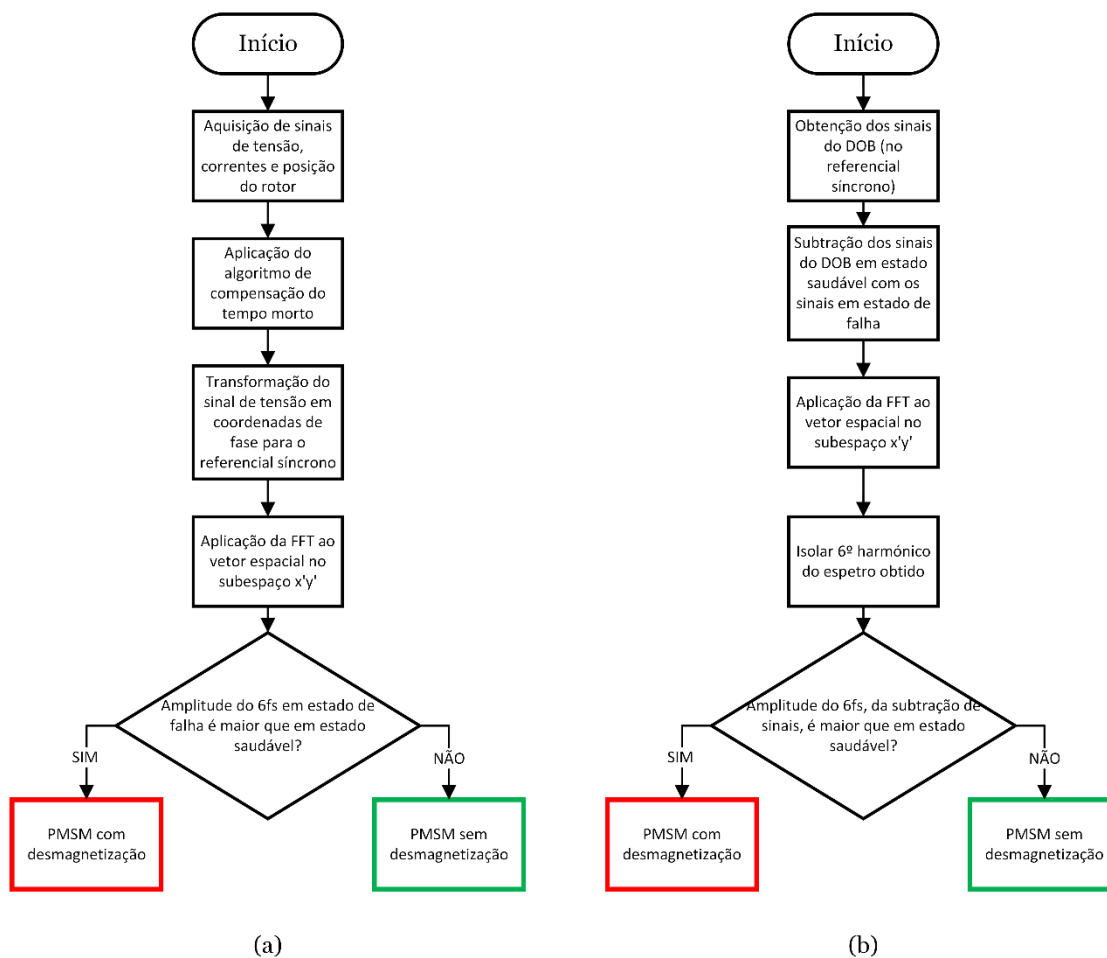
Figura 4.16 – Variação do 6º harmônico, de sequência positiva, em eixos  $x'y'$ : (a) da tensão, com compensação do tempo morto, a 600 rpm; (b) da saída do DOB, a 600 rpm.

Embora apenas sejam apresentados dados de duas velocidades, é possível verificar que, mesmo com a ocorrência de um curto-circuito numa das fases, a variação da amplitude do indicador de falha escolhido é evidente. Embora para o caso da tensão esta distinção de estado saudável para estado de falha seja mais evidente, o DOB também consegue fornecer informação da ocorrência de desmagnetização. No entanto, verifica-se que a realização da subtração dos sinais do DOB, obtidos com desmagnetização, com os sinais do DOB obtidos em estado saudável, deixa de ser uma vantagem, pois nesta situação a distinção entre o estado saudável e o de falha torna-se difícil. Isto deve-se ao facto de que a existência de um curto-circuito no PMSM gera uma assimetria no estator, o que claramente irá ser compensado pelo DOB, alterando o comportamento desta componente espectral em estudo.

### 4.3 Considerações sobre as estratégias de diagnóstico desenvolvidas

As secções 4.1 e 4.2 permitiram fornecer uma visão das capacidades de deteção da ocorrência de desmagnetização num PMSM multifásico, através o 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão e do vetor espacial da saída do DOB, ambos em eixos  $x'y'$ .

Os métodos de diagnóstico desenvolvidos podem ser resumidos numa árvore de decisão, apresentada na Figura 4.17, que permite averiguar a ocorrência, ou não, de desmagnetização.



**Figura 4.17** – Árvore de decisão para os métodos de diagnóstico desenvolvidos: (a) através do 6º harmónico, de sequência positiva, do vetor espacial da tensão, em eixos  $x'y'$ ; (b) através do 6º harmónico, de sequência positiva, do vetor espacial da saída do DOB, em eixos  $x'y'$ .

Embora estes métodos de diagnóstico sejam capazes de detetar a desmagnetização, os mesmos apresentam algumas limitações, como o facto de, a baixas velocidades, a variação de amplitude da componente espectral indicadora de falha não ser significativa ao ponto de se distinguir da amplitude com o PMSM em estado saudável, sendo necessário, eventualmente, outra abordagem ou técnica para realizar o diagnóstico a baixas velocidades.

Apesar de se utilizar um método de compensação de tempo morto no decorrer deste trabalho, a sua implementação é relativamente simples e de pouco esforço computacional, pelo que é uma clara vantagem na aplicação desta estratégia.

O facto de se verificarem variações em amplitude na ordem dos 100%, e por vezes mais, prova que o método de diagnóstico é eficaz para a deteção de desmagnetização.



# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas conclusões relativas aos métodos de diagnóstico desenvolvidos, assim como às suas vantagens e desvantagens. Uma abordagem relativa ao trabalho a desenvolver no futuro, baseado nos resultados obtidos nesta dissertação, também é feita, apresentando possíveis melhorias a implementar.

### 5.1 Conclusão

Com a elaboração deste trabalho foi possível proceder à detecção de desmagnetização num PMSM hexafásico, através do desenvolvimento de dois métodos de diagnóstico baseados no 6º harmónico de sequência positiva, em eixos  $x'y'$ , do vetor espacial da tensão aplicada ao M-PMSM, compensada devido ao erro de tempo morto, e do vetor espacial da saída do DOB, recorrendo a simulações e a ensaios experimentais.

Embora também se tenha estudado, em ambiente de simulação, o comportamento do 6º harmónico de sequência negativa do vetor espacial da tensão, verificou-se que este não é eficaz para a detecção da desmagnetização, uma vez que as variações em amplitude desta componente espectral com desmagnetização não se diferenciam muito de quando o M-PMSM se encontra saudável.

Os métodos de diagnóstico baseados no 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão e do vetor espacial da saída do DOB verificaram-se eficazes para a detecção da desmagnetização, uma vez que a sua variação em amplitude, entre o estado saudável e o estado de falha, permitiu distinguir claramente a ocorrência desta falha.

A aplicação de um método de compensação do erro de tensão devido ao tempo morto das pontes inversoras, em modo *offline* e para os ensaios experimentais, revelou-se eficaz e uma clara vantagem, uma vez que não trouxe esforço computacional adicional e permitiu uma análise mais clara dos resultados obtidos.

A aplicação da diferença entre a saída do DOB em estado de falha com a saída do DOB em estado saudável também se revelou eficaz, permitindo uma melhor distinção entre os dois estados de funcionamento do PMSM e até proporcionou a capacidade de

detetar a desmagnetização a velocidades mais baixas, o que com a tensão se revelou um pouco difícil, ou até impossível.

No decorrer deste trabalho, de uma forma sucinta, foram retiradas as seguintes conclusões e vantagens e desvantagens das tipologias de diagnóstico abordadas:

- A desmagnetização dos ímanes permanentes no rotor dos PMSMs tem grande impacto no seu desempenho, uma vez que a capacidade de gerar binário é afetada e o seu rendimento diminui;
- Devido ao facto de se utilizar um controlo preditivo de corrente, as correntes não podem ser utilizadas para o diagnóstico de falhas, pois são controladas pelo DOB-PCC;
- O 6º harmónico de sequência positiva do vetor espacial da tensão, ou da saída do DOB, apresenta sensibilidade para a deteção de desmagnetização, com variações em amplitude superiores a 100%, assim como imunidade à ocorrência de outras falhas, nomeadamente curtos-circuitos entre espiras;
- O método de diagnóstico desenvolvido é mais eficaz para velocidades altas e médias, sensivelmente superiores a 600 rpm, pois a variação em amplitude da componente espectral estudada é maior e mais uniforme;
- Embora para baixas velocidades o método não seja muito eficaz, a informação fornecida pelo DOB tem maior capacidade de indicar desmagnetização do que a informação fornecida pela tensão;
- Estes métodos de diagnóstico foram aplicados *offline*, mas podem claramente ser aplicados *online* através de desenvolvimento de *software* para o efeito.

Tendo em conta as conclusões retiradas no decorrer deste trabalho, pode-se avançar que os métodos de diagnóstico desenvolvidos têm a capacidade de detetar desmagnetização no M-PMSM com elevada clareza.



## **5.2 Perspetivas de trabalho futuro**

A realização deste trabalho permitiu averiguar a possibilidade da realização de trabalhos futuros no mesmo campo de investigação, de forma a colmatar a escassez de referências no domínio do diagnóstico de falhas em M-PMSMs.

Alguns dos trabalhos propostos são os seguintes:

- Melhoria das técnicas desenvolvidas para aplicação a baixas velocidades;
- Aplicação das técnicas desenvolvidas a um PMSM com desmagnetização e outras falhas, de forma a estudar a imunidade deste método na presença de outras falhas;
- Desenvolvimento de uma técnica de diagnóstico que permita não só a identificação da ocorrência de desmagnetização, mas também a localização do polo onde esta ocorre.



## Referências

- [1] E. E. Ward e H. Harer, «Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor».
- [2] M. J. Duran, E. Levi, e F. Barrero, «Multiphase Electric Drives: Introduction», em *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 2017, pp. 1–26. doi: 10.1002/047134608x.w8364.
- [3] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, e A. M. S. Mendes, «Disturbance Observer Based Predictive Current Control of Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines for the Mitigation of Steady-State Errors and Current Harmonics», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, n. 1, Jan. 2022. doi: 10.1109/TIE.2021.3053885.
- [4] T. Orłowska-Kowalska *et al.*, «Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of PMSM Drives-State of the Art and Future Challenges», *IEEE Access*, vol. 10. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 59979–60024, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3180153.
- [5] J. Faiz e E. Mazaheri-Tehrani, «Demagnetization Modeling and Fault Diagnosing Techniques in Permanent Magnet Machines under Stationary and Nonstationary Conditions: An Overview», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, n. 3, pp. 2772–2785, Mai. 2017. doi: 10.1109/TIA.2016.2608950.
- [6] M. Cheng, J. Hang, e J. Zhang, «Overview of Fault Diagnosis Theory and Method for Permanent Magnet Machine», 2015.
- [7] E. A. Bhuiyan *et al.*, «A Survey on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Methodologies for Permanent Magnet Synchronous Machines», *International Journal of Automation and Computing*, vol. 17, n. 6. Chinese Academy of Sciences, pp. 763–787, 1 de Dezembro de 2020. doi: 10.1007/s11633-020-1250-3.
- [8] Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, e C. Wang, «Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors: A review», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, n. 10. MDPI AG, 1 de Maio de 2019. doi: 10.3390/app9102116.
- [9] M. Krichen, N. Ben Halima, D. Abdeljalil, N. Ben Hadj, e R. Neji, «Investigation of the combined static eccentricity and Partial demagnetization faults in PMSM», Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Jan. 2023, pp. 648–653. doi: 10.1109/sta56120.2022.10019052.

- [10] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, e A. M. S. Mendes, «Online Diagnostic Method for the Detection of High-Resistance Connections and Open-Phase Faults in Six-Phase PMSM Drives», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 58, n. 1, pp. 345–355, 2022. doi: 10.1109/TIA.2021.3120239.
- [11] T. Ishikawa, Y. Seki, e N. Kurita, «Analysis for fault detection of vector-controlled permanent magnet synchronous motor with permanent magnet defect», *IEEE Trans Magn*, vol. 49, n. 5, pp. 2331–2334, 2013. doi: 10.1109/TMAG.2013.2243135.
- [12] N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, G. Clerc, e F. Meibody-Tabar, «Real-time detection of interturn faults in PM drives using back-EMF estimation and residual analysis», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 47, n. 6, pp. 2402–2412, Nov. 2011. doi: 10.1109/TIA.2011.2168929.
- [13] A. Sarikhani e O. A. Mohammed, «Inter-turn fault detection in PM synchronous machines by physics-based back electromotive force estimation», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, n. 8, pp. 3472–3484, 2013. doi: 10.1109/TIE.2012.2222857.
- [14] X. Xiao, C. Chen, e M. Zhang, «Dynamic permanent magnet flux estimation of permanent magnet synchronous machines», em *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jun. 2010, pp. 1085–1088. doi: 10.1109/TASC.2010.2041435.
- [15] J. Yuan, D. Wen, e Y. Zhang, «Model Predictive Current Control Strategy with Reduced Computation Burden», *Math Probl Eng*, vol. 2021, 2021. doi: 10.1155/2021/6677543.
- [16] F. Wang *et al.*, «Finite Control Set Model Predictive Torque Control of Induction Machine With a Robust Adaptive Observer», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, n. 4, pp. 2631–2641, Abr. 2017. doi: 10.1109/TIE.2016.2529558.
- [17] L. Yan, F. Wang, M. Dou, Z. Zhang, R. Kennel, e J. Rodriguez, «Active Disturbance-Rejection-Based Speed Control in Model Predictive Control for Induction Machines», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, n. 4, pp. 2574–2584, Mai. 2019. doi: 10.1109/TIE.2019.2912785.
- [18] H. Yang, Y. Liu, J. Wang, e J. Yang, «Improved Multi-step FCS-MPCC with Disturbance Compensation for PMSM Drives -- Methods and Experimental Validation», Mai. 2022, [Em linha]. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2205.07213>

- 
- [19] X. Zhang, L. Zhang, e Y. Zhang, «Model predictive current control for PMSM drives with parameter robustness improvement», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, n. 2, pp. 1645–1657, Fev. 2019. doi: 10.1109/TPEL.2018.2835835.
- [20] L. Yan, M. Dou, Z. Hua, H. Zhang, e J. Yang, «Robustness Improvement of FCS-MPTC for Induction Machine Drives Using Disturbance Feedforward Compensation Technique», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, n. 3, pp. 2874–2886, Mar. 2019. doi: 10.1109/TPEL.2018.2842743.
- [21] J. Wang, F. Wang, G. Wang, S. Li, e L. Yu, «Generalized Proportional Integral Observer Based Robust Finite Control Set Predictive Current Control for Induction Motor Systems with Time-Varying Disturbances», *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, n. 9, pp. 4159–4168, Set. 2018. doi: 10.1109/TII.2018.2818153.
- [22] J. C. Urresty, J. R. Riba, M. Delgado, e L. Romeral, «Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, n. 1, pp. 42–51, Mar. 2012. doi: 10.1109/TEC.2011.2176127.
- [23] W. le Roux, R. G. Harley, e T. G. Habetler, «Detecting rotor faults in low power permanent magnet synchronous machines», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 22, n. 1, pp. 322–328, Jan. 2007. doi: 10.1109/TPEL.2006.886620.
- [24] T. Taipei, J. Rosero, L. Romeral, J. Cusido, e J. A. Ortega, «Fault detection by means of wavelet transform in a PMSMW under demagnetization».
- [25] A. G. Espinosa, J. A. Rosero, J. Cusidó, L. Romeral, e J. A. Ortega, «Fault detection by means of Hilbert-Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, n. 2, pp. 312–318, Jun. 2010. doi: 10.1109/TEC.2009.2037922.
- [26] S. Choi *et al.*, «Fault diagnosis techniques for permanent magnet AC machine and drives-A review of current state of the art», *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, n. 2, pp. 444–463, Jun. 2018. doi: 10.1109/TTE.2018.2819627.
- [27] M. Skowron, T. Orłowska-Kowalska, e C. T. Kowalski, «Detection of Permanent Magnet Damage of PMSM Drive Based on Direct Analysis of the Stator Phase Currents Using Convolutional Neural Network», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, n. 12, pp. 13665–13675, Dez. 2022. doi: 10.1109/TIE.2022.3146557.
-

- [28] H. Lee, H. Jeong, e S. W. Kim, «Detection of Interturn Short-Circuit Fault and Demagnetization Fault in IPMSM by 1-D Convolutional Neural Network».
- [29] J. A. Rosero, J. Cusido, A. Garcia, J. A. Ortega, e L. Romeral, «Study on the Permanent Magnet Demagnetization Fault in Permanent Magnet Synchronous Machines».
- [30] J. Faiz e H. Nejadi-Koti, «Demagnetization Fault Indexes in Permanent Magnet Synchronous Motors-An Overview», *IEEE Trans Magn*, vol. 52, n. 4, Abr. 2016. doi: 10.1109/TMAG.2015.2480379.
- [31] Y. Zafari, A. H. Mazinan, e S. Shoja-Majidabad, «Demagnetization Fault Detection for Five-Phase IPMSM Through Integral Terminal Sliding Mode Flux-Linkage Observer», *IETE J Res*, vol. 65, n. 4, pp. 473–486, Jul. 2019. doi: 10.1080/03772063.2018.1436474.
- [32] P. Naderi e A. Fathi, «Fault Diagnosis/Separation of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine by Current and its Homopolar Orders Analysis», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, n. 2, pp. 1246–1256, Jun. 2023. doi: 10.1109/TEC.2022.3216686.
- [33] M. Krichen, E. Elbouchikhi, N. Benhadj, M. Chaieb, M. Benbouzid, e R. Neji, «Motor current signature analysis-based permanent magnet synchronous motor demagnetization characterization and detection», *Machines*, vol. 8, n. 3, Set. 2020. doi: 10.3390/MACHINES8030035.
- [34] D. Casadei *et al.*, «Detection of magnet demagnetization in five-phase surface-mounted permanent magnet generators», em *Proceedings - 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2012*, 2012, pp. 841–848. doi: 10.1109/PEDG.2012.6254099.
- [35] D. Casadei, F. Filippetti, C. Rossi, e A. Stefani, «Magnets faults characterization for permanent magnet synchronous motors», *2009 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2009*. doi: 10.1109/DEMPED.2009.5292770.
- [36] Y. Gritli, D. Casadei, A. Tani, C. Rossi, e G. Serra, «Validation of Rotor Magnets Demagnetization Detection in Six-Phase Surface-Mounted AC Permanent Magnet Synchronous Motors», *SPEEDAM 2018 - Proceedings: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 224–229, Ago. 2018. doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445267.
- [37] Y. Gritli, A. Tani, C. Rossi, e D. Casadei, «Detection of Rotor Magnet Demagnetization in Asymmetrical Six-Phase Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Drive», em *2018 XIII International Conference on*

- Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, Set. 2018, pp. 1809–1814. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506688.
- [38] Y. Da, X. Shi, e M. Krishnamurthy, «A new approach to fault diagnostics for permanent magnet synchronous machines using electromagnetic signature analysis», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, n. 8, pp. 4104–4112, 2013. doi: 10.1109/TPEL.2012.2227808.
- [39] D. D. Reigosa, F. Briz, P. García, J. M. Guerrero, e M. W. Degner, «Magnet temperature estimation in surface PM machines using high-frequency signal injection», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 46, n. 4, pp. 1468–1475, Jul. 2010. doi: 10.1109/TIA.2010.2049816.
- [40] P. F. C. Gonçalves, S. M. A. Cruz, e A. M. S. Mendes, «Design of a six-phase asymmetrical permanent magnet synchronous generator for wind energy applications», *The Journal of Engineering*, vol. 2019, n. 17, pp. 4532–4536, Jun. 2019. doi: 10.1049/joe.2018.8175.
- [41] P. Gonçalves, S. Cruz, e A. Mendes, «Finite control set model predictive control of six-phase asymmetrical machines - An overview», *Energies (Basel)*, vol. 12, n. 24, Dez. 2019. doi: 10.3390/en12244693.
- [42] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, e A. M. S. Mendes, «Multistage Predictive Current Control Based on Virtual Vectors for the Reduction of Current Harmonics in Six-Phase PMSMs», *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, n. 2, pp. 1368–1377, Jun. 2021. doi: 10.1109/TEC.2021.3055340.
- [43] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, e A. M. S. Mendes, «Suppression of Steady-State Errors in Predictive Current Control of Six-Phase PMSM Drives», em *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, IEEE, Set. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/SEST48500.2020.9203014.
- [44] Y. Geng, P. Han, X. Chen, R. Chen, Z. Le, e Z. Lai, «On-line dead-time compensation method for dual three phase PMSM based on adaptive notch filter», *IET Power Electronics*, vol. 14, n. 15, pp. 2452–2465, Nov. 2021. doi: 10.1049/pel2.12192.





## **Anexos**



## Anexo A. Características do M-PMSM e do MIT

Tabela A.1 – Características do M-PMSM utilizado.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência nominal	$P_n$	4	kW
Tensão nominal	$U_n$	340	V
Corrente nominal	$I_n$	4,80	A
Pares de polos	$p$	2	
Velocidade nominal	$n$	1 500	rpm
Nº de ranhuras/polo/fase	$q$	2	
Binário nominal	$T_n$	26,80	N.m
Rendimento nominal	$\eta$	95	%
Número de fases	$m$	6	
Abertura correspondente ao passo das bobinas	$\tau_c$	$5\pi/6$	rad
Indutância no subespaço $dq$	$L_{dq}$	52,31	mH
Indutância no subespaço $x'y'$	$L_{x'y'}$	1,80	mH
Indutância no subespaço $z1z2$	$L_{z1z2}$	7,04	mH

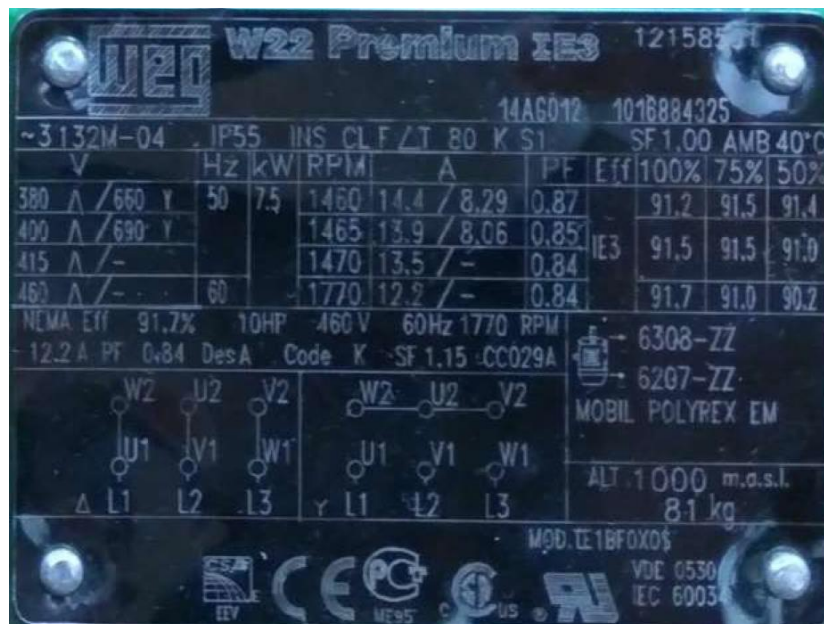


Figura A.1 – Chapa de características do MIT.

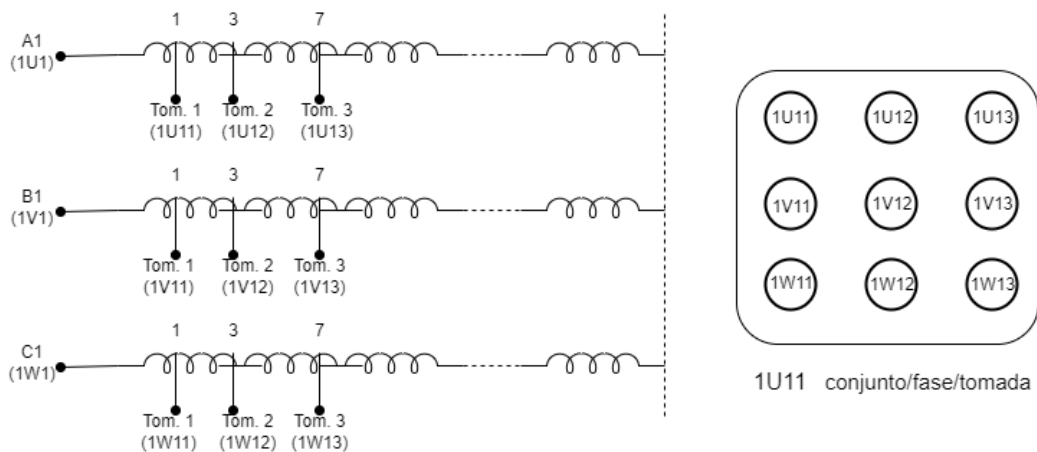
## Anexo B. Testes de medida da força contraeletromotriz no M-PMSM

Foram realizados testes em que foi possível medir a força contraeletromotriz real do M-PMSM utilizado. Para cada protótipo, o M-PMSM saudável e o M-PMSM desmagnetizado, foi colocado o rotor a rodar a 1500 rpm, através do MIT que se encontra acoplado ao mesmo, e foram medidos os seguintes valores:

**Tabela B.1** – Testes de força contraeletromotriz para o M-PMSM.

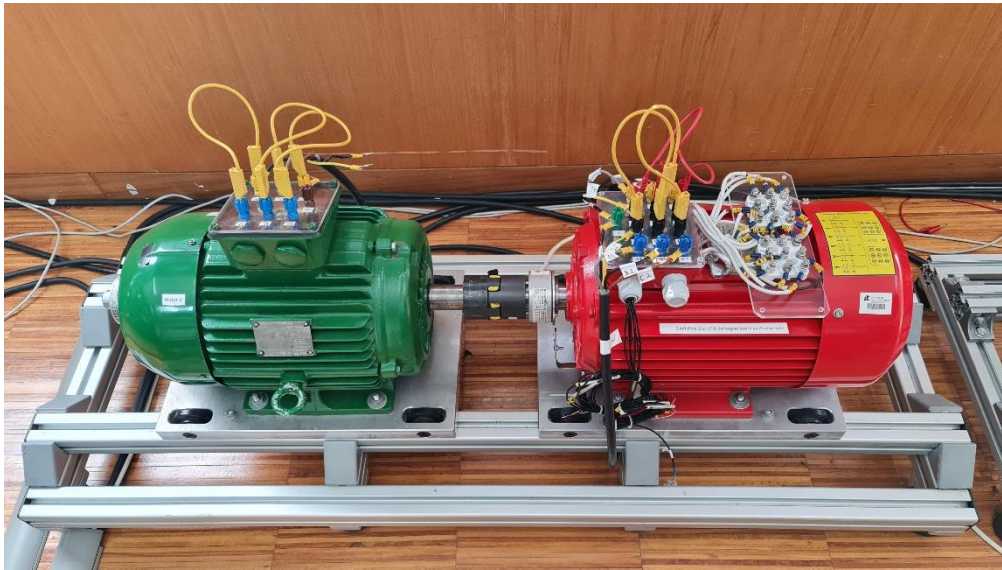
PMSM Saudável		PMSM Desmagnetizado	
Fase	Valor (V)	Fase	Valor (V)
$a_1$	218,780	$a_1$	184,300
$b_1$	218,840	$b_1$	184,180
$c_1$	218,810	$c_1$	184,210
$a_2$	218,750	$a_2$	184,300
$b_2$	218,780	$b_2$	184,250
$c_2$	218,850	$c_2$	184,140
$a_1 - 1^a$ tomada	1,052	$a_1 - 1^a$ tomada	0,885
$a_1 - 2^a$ tomada	3,177	$a_1 - 2^a$ tomada	2,679
$a_1 - 3^a$ tomada	7,430	$a_1 - 3^a$ tomada	6,269
$a_2 - 1^a$ tomada	1,053	$a_2 - 1^a$ tomada	0,885
$a_2 - 2^a$ tomada	3,179	$a_2 - 2^a$ tomada	2,676
$a_2 - 3^a$ tomada	7,430	$a_2 - 3^a$ tomada	6,263

A 1<sup>a</sup> tomada corresponde a 1 espira, a 2<sup>a</sup> tomada corresponde a 3 espiras e a 3<sup>a</sup> tomada corresponde a 7 espiras. A Figura B.1 representa, esquematicamente, como estas tomadas estão implementadas, apenas para o primeiro conjunto, sendo que o segundo segue a mesma lógica.



**Figura B.1** – Esquema de ligações das tomadas das bobinas.

## Anexo C. Imagens da montagem experimental



*Figura C.1 – M-PMSM acoplado ao MIT, montados na base.*



*Figura C.2 – M-PMSM desmagnetizado.*



Figura C.3 – Banco de condensadores do barramento DC (esquerda) e ponte inversora trifásica (direita).

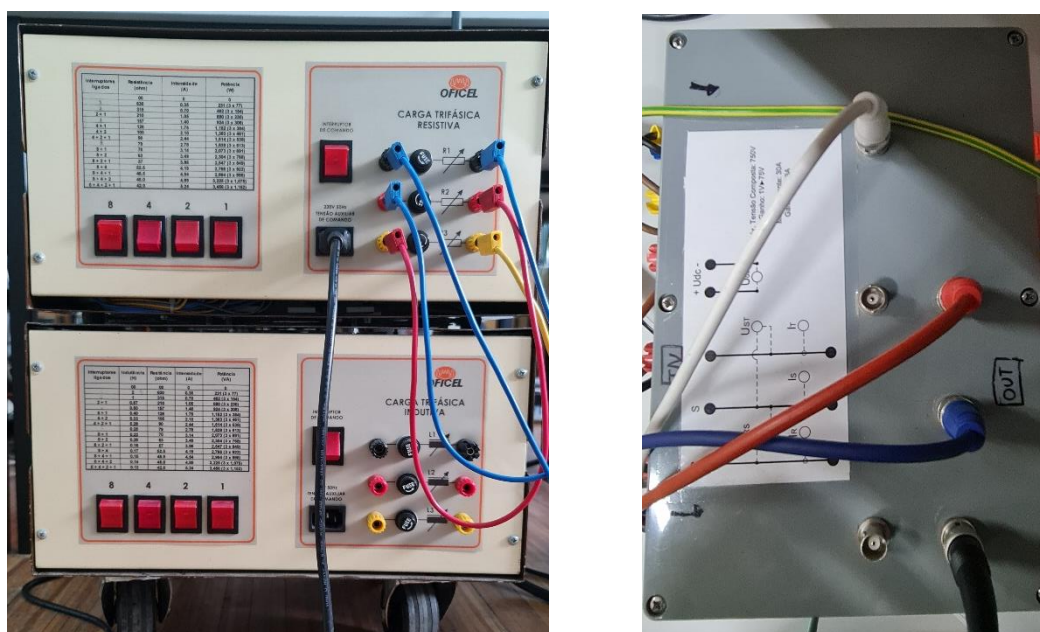


Figura C.4 – Resistências de travagem no barramento DC (esquerda) e caixa de medição de corrente (direita).



*Figura C.5 – Setup experimental em grande angular.*