



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Hugo dos Santos Figueiras

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS NOS ÍMANES
PERMANENTES DE UM PMSM DE SEIS FASES**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Área de Especialização em Energia, orientada pelo Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz e coorientada pelo Mestre Pedro Filipe da Costa Gonçalves, apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Outubro de 2021



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

UNIVERSIDADE DE COIMBRA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS NOS ÍMANES
PERMANENTES DE UM PMSM DE SEIS FASES**

HUGO DOS SANTOS FIGUEIRAS

Júri:

Prof. Dr. Aníbal Traça de Carvalho Almeida (presidente)

Prof. Dr. Sérgio Manuel Ângelo da Cruz (orientador)

Prof. Dr. André Manuel dos Santos Mendes (vogal)

Coimbra, outubro de 2021

Agradecimentos

Em primeiro lugar, expresso o meu sincero agradecimento ao Prof. Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz, por todo o trabalho de orientação nesta dissertação. Desde o início da escrita do projeto de dissertação, foi bastante presente e disponível, não esquecendo a transmissão de conhecimento científico, metodologias de trabalho e a abertura existente para a realização em simultâneo de um programa de *trainees*, um desafio adicional, que foi superado.

Agradeço ao Mestre Pedro Gonçalves, por toda a dedicação e ajuda em todos os momentos, principalmente no desbloqueio de alguns entraves durante o processo. Obrigado por todo o conhecimento transmitido e profissionalismo que dedicaste à dissertação, desejando-te os maiores sucessos académicos e profissionais. Ao meu colega de laboratório, Valdemar Abril, agradeço também pelo espírito de entreajuda e amizade.

Ao IT – Instituto de Telecomunicações e ao DEEC-UC - Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra, agradeço a disponibilidade e utilização dos equipamentos disponíveis no LSEM – Laboratório de Sistemas Eletromecânicos, que foram necessários para a realização desta dissertação.

À minha família, na pessoa do meu pai, Mário Fernando Figueiras da Silva, que infelizmente a vida não permitiu que visse de perto o concretizar de mais uma conquista que tanto lhe concerne. Desde os esforços realizados por todos para eu conseguir alcançar todas as realizações académicas, desportivas e associativas, à aprendizagem do valor da vida, sempre com uma postura de humildade e respeito, na luta por objetivos concretos e ambiciosos. São o pilar de quem sou hoje.

A dois grupos de grandes amigos que marcaram os meus tempos académicos e desportivos, a Team Eletro e a Velha Guarda, não esquecendo duas entidades que me apoiaram direta ou indiretamente, a FPC - Federação Portuguesa de Canoagem e o GDUC - Gabinete do Desporto da Universidade de Coimbra.

À CapWatt – Sonae Capital, pela oportunidade que me foi dada de estagiar durante 9 meses com a dissertação a decorrer, pela disponibilidade e ajuda demonstrada e pelo imensurável conhecimento adquirido.

A todos, um grande bem-haja!

Hugo Figueiras

Resumo

O Mundo está em grande mudança. Existe atualmente uma clara viragem do ponto de vista energético. A crescente aposta em energias renováveis, eficiência energética, mobilidade elétrica, entre outros, faz com que a inovação e desenvolvimento nestes setores esteja em alto crescimento. Obviamente que para isto, existe uma simbiose entre a indústria e a ciência. As publicações nestas áreas multiplicam-se e esta dissertação surgiu com o intuito de colmatar referências na área das máquinas elétricas, nomeadamente das Máquinas Multifásicas de Ímanes Permanentes.

O trabalho realizado teve como objetivo principal perceber o estado da arte quanto aos métodos de diagnóstico de falhas nos ímanes permanentes de máquinas multifásicas de ímanes permanentes e, a partir de simulações criadas para o efeito, avaliar a possibilidade da criação de novas abordagens relativamente ao diagnóstico desta falha.

O Capítulo 1 menciona o enquadramento do tema da dissertação, bem como qual a motivação para a elaboração deste documento.

O Capítulo 2 aborda quais os tipos de falha que se podem encontrar nas máquinas em estudo, apresentando as falhas elétricas, mecânicas e magnéticas. É apresentado também uma revisão geral dos métodos de diagnóstico já existentes, onde são abordados os diversos sinais já estudados e quais as conclusões retiradas para as máquinas em estudo, terminando com uma comparação entre eles.

O Capítulo 3 inicia a descrição da máquina estudada, bem como qual foi o procedimento adotado para a realização das diversas simulações e análises aos diferentes estados simulados. Primeiramente, são descritas as duas falhas induzidas na máquina, desmagnetização de um conjunto de ímanes de um polo e a sua totalidade, referindo qual o método utilizado para a criação de ambas. Numa segunda fase, são estudados cinco sinais: tensão do estator, tensão de neutros, corrente i_{dq} , fluxo encadeado e os erros de predição de corrente.

O Capítulo 4 conclui este trabalho, enunciando as vantagens e desvantagens dos vários métodos, sumarizando as conclusões obtidas no Capítulo 3 relativas à variação dos métodos estudados com a velocidade da máquina, regime de carga e a severidade da falha, essencialmente. Por fim, são apontados quais os métodos que apresentam melhores características quanto ao diagnóstico de falha por desmagnetização dos ímanes

permanentes para a máquina estudada, avaliação da tensão entre neutros e os erros de predição de corrente.

Palavras-Chave: Desmagnetização de ímanes permanentes, diagnóstico de falhas, Máquinas multifásicas de ímanes permanentes, Acionamentos elétricos.

Abstract

The world is undergoing great change. There is currently a clear shift from an energy point of view. The growing bet on renewable energies, energy efficiency, electric mobility, amongst others means that innovation and development in these sectors are booming. Due to this, there is a symbiosis between industry and science. There are numerous publications in this area and this dissertation aims to add more knowledge in the field of electrical machines, namely multiphase permanent magnet machines.

The main objective of the work carried out was to understand the state-of-the-art methods regarding diagnosing damage in the permanent magnets of permanent magnet multiphase machines and, based on simulations created for this purpose, to try to understand the possibility of creating new approaches regarding this malfunction.

Chapter 1 mentions the framework and motivation that led us to carry out this dissertation, as well as the objectives outlined initially.

Chapter 2 begins by addressing the types of malfunctions we can find in the machine's understudy, then referring to a general review of existing diagnostic methods, ending with a comparison between them based on various aspects.

Chapter 3 begins with a complete description of the machine that we studied and what was the procedure adopted to carry out the different simulations and analyzes the different simulated states. Firstly, we describe the two faults that we induced in the machine, the demagnetization of a set of magnets from a pole and its entirety, referring to the method used to create both. In a second phase, four signals are studied: stator voltage, the voltage between neutrals, i_{dq} current, chained flux, and current prediction errors.

Chapter 4 concludes this work, listing the advantages and disadvantages of the different methods, summarizing the conclusions obtained in Chapter 3 regarding the variation of the studied methods with the machine speed, load regime, and failure severity. Finally, it is pointed out which methods have the best characteristics regarding the fault diagnosis by demagnetization of the permanent magnets for the studied machine, evaluation of the neutral voltage, and current prediction errors.

Keywords: Permanent magnet demagnetization, fault diagnosis, Multi-phase permanent magnet synchronous machine, Electric machines.

“Believe you can and you’re halfway there”

Theodore Roosevelt

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Índices e Expoentes	xxi
Abreviaturas	xxi
CAPÍTULO 1 – Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Objetivos do Estudo	2
CAPÍTULO 2 - Estado da Arte Sobre os Métodos de Diagnóstico de Falhas em PMSMs	3
2.1 Tipos de Falhas em PMSMs.....	3
2.1.1. Falhas Elétricas.....	4
2.1.2. Falhas Mecânicas.....	4
2.1.3. Falhas Magnéticas	4
2.2 Métodos de Diagnóstico de Falhas nos Ímanes Permanentes	7
2.2.1. Análise das Correntes do Estator.....	7
2.2.1.1. Análise do Espectro das Correntes do Estator (MD1).....	7
2.2.1.2. Análise do Conteúdo Harmónico no Domínio Tempo-Frequência das Correntes do Estator (MD2)	7
2.2.1.3. Análise do Espectro das Correntes de Sequência Nula (MD3)	8
2.2.2. Análise de Tensões	8
2.2.2.1. Variação da Tensão Induzida (MD4)	8
2.2.2.2. Análise da Componente Fundamental de Sequência Nula da Tensão (MD5)	9
2.2.3. Análise de Grandezas Magnéticas.....	9
2.2.3.1. Análise da Curva B-H dos Ímanes Permanentes do Rotor (MD6).....	9

2.2.4. Análise da Temperatura.....	10
2.2.4.1. Análise da Temperatura dos Ímanes Permanentes (MD7).....	10
2.3. Métodos de Diagnóstico de Outros Tipos de Falhas em PMSMs.....	11
2.3.1. Análise do Espectro das Correntes das 3 Fases (MD8).....	11
2.3.2. Análise do Espectro da Densidade de Fluxo Magnético (MD10).....	11
2.4. Comparação dos Métodos de Diagnóstico.....	12
CAPÍTULO 3 – Simulação de Desmagnetização dos Ímanes Permanentes	13
3.1. Descrição do Sistema.....	13
3.2. Modelo Matemático e Estratégia de Controlo.....	15
3.3. Modelo de Co-Simulação.....	17
3.4. Resultados Obtidos.....	20
3.4.1. Análise das Tensões.....	20
3.4.1.1. Tensão u_s	20
3.4.1.2. Tensão u_{n1n2}	25
3.4.2. Análise da Corrente i_{dq}	29
3.4.3. Análise do Fluxo Encadeado.....	30
3.4.4. Análise dos Erros de Predição de Corrente.....	33
3.5. Comparação entre os Métodos de Diagnóstico Estudados.....	39
CAPÍTULO 4 – Conclusões e Sugestões para Trabalho Futuro.....	41
4.1. Conclusões.....	41
4.2. Sugestões para Trabalho Futuro.....	42
Referências	45
Anexos.....	49
Anexo A – Imagens da Máquina Existente no LSEM.....	49
Anexo B – Parâmetros da Máquina.....	50

Índice de Figuras

Figura 1 – Classificação dos diferentes tipos de falha [7],[14].	3
Figura 2 – Distribuição da densidade de fluxo magnético: (a) em estado normal; (b) em estado de falha provocado por desmagnetização [6].	5
Figura 3 – Áreas de desmagnetização parcial em máquina multifásica: (a) motor original; (b) três-fases; (c) seis fases; (d) nove fases [3].	6
Figura 4 – Esquema de ligação de um PMSM trifásico com o inversor, enrolamentos do estator, e série de resistências utilizadas para criação de um neutro artificial [9].	9
Figura 5 – Curva B-H a 300°C do material VACOMAX 225 HR [3].	10
Figura 6 – Curva B-H do material dos ímanes permanentes do motor: N33UH [29].	14
Figura 7 – Distribuição dos ímanes permanentes no rotor da máquina em estudo.	14
Figura 8 – Fluxograma da estratégia de controlo da máquina em estudo [30].	16
Figura 9 – Modelo em elementos finitos do PMSM de 6 fases.	17
Figura 10 – Modelo de ligações do motor e componentes elétricos.	18
Figura 11 – Modelo de construção do motor e identificação do conjunto de ímanes desmagnetizados em 2D.	18
Figura 12 – Modelo de construção do motor e identificação de um polo inteiramente desmagnetizado em 2D.	19
Figura 13 – Espectro da tensão us no subespaço dq , com a máquina a funcionar como motor, com $i_{qs} = 4.8$ A a 1500 rpm, em estado saudável e em falha.	21
Figura 14 – Amplitude da componente dc da tensão us , no subespaço dq , em função do regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em falha.	22
Figura 15 – Amplitude da componente dc da tensão us , no subespaço dq , em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em falha.	23
Figura 16 – Amplitude de $(us(dc)/\omega r)$, no subespaço dq , em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em falha.	24
Figura 17 – Espectro da tensão us , no subespaço dq , com 1/3 do polo desmagnetizado e com 3/3 do polo desmagnetizado, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.	25
Figura 18 – Espectro da tensão un_1n_2 , com a máquina em estado saudável e em falha, a funcionar como motor e com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.	26

Figura 19 – Amplitude do terceiro harmónico da tensão un_1n_2 , em função do regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em estado de falha.	26
Figura 20 – Amplitude do terceiro harmónico da tensão un_1n_2 , em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.	27
Figura 21 – Amplitude do terceiro harmónico de $un_1n_2/3 * \omega r$, em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.	28
Figura 22 – Espetro da corrente idq , no subespaço dq , em estado saudável e em estado de falha, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.	30
Figura 23 – Espetro do fluxo encadeado, no subespaço dq , na situação saudável e com falha, com a máquina a funcionar como motor e com $i_{qs} = 4.8$ A a 1500 rpm.	31
Figura 24 – Amplitude da componente dc do fluxo encadeado em função do regime de carga, no subespaço dq , com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em estado de falha.	31
Figura 25 – Amplitude da componente dc do fluxo encadeado com a variação da velocidade, no subespaço dq , com a máquina a funcionar como motor com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.	32
Figura 26 – Espetro do fluxo encadeado com 1/3 do polo desmagnetizado e com todo o polo desmagnetizado, no subespaço dq , com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.	33
Figura 27 – Espetro dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , na situação saudável e com falha, com a máquina a funcionar como motor e com $i_{qs} = 4.8$ A a 1500 rpm.	34
Figura 28 – Amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , em função do regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em estado de falha.	35
Figura 29 – Amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , em função da velocidade, com a máquina a funcionar como motor com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.	36
Figura 30 – Espetro dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , com 1/3 do polo desmagnetizado e com 3/3 do polo desmagnetizado, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.	37

Figura 31 – Espectro dos erros de predição de corrente, com 1/3 do polo desmagnetizado e com alteração do valor de Ldq e Lxy em +20%, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.	38
Figura 32 – Enrolamentos do estator da máquina em construção.	49
Figura 33 – Implementação dos ímanes permanentes na máquina.	49
Figura 34 – Rotor e veio da máquina.	49
Figura 35 – Máquina no LSEM.....	50

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Critérios definidos para comparação dos diferentes métodos de diagnóstico analisados no estado da arte.....	12
Tabela 2 – Compilação dos métodos de diagnóstico abordados no estado da arte.	12
Tabela 3 – Características principais da máquina em estudo.	13
Tabela 4 – Variação da amplitude da componente dc de u_s nos dois estados, a diferentes regimes de carga.	22
Tabela 5 – Variação da amplitude da componente dc de u_s nos dois estados, a diferentes velocidades.	23
Tabela 6 – Variação da amplitude da componente dc de $u_s/\omega r$ nos dois estados, a diferentes velocidades.....	24
Tabela 7 – Variação da amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} nos dois estados, a diferentes regimes de carga.....	27
Tabela 8 – Variação da amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} nos dois estados, a diferentes velocidades.....	27
Tabela 9 – Amplitude do terceiro harmónico de $u_{n1n2}/3 * \omega r$, nos dois estados, a diferentes velocidades.....	28
Tabela 10 – Variação da amplitude da componente dc do fluxo encadeado nos dois estados, a diferentes regimes de carga.....	32
Tabela 11 – Variação da amplitude da componente dc do fluxo encadeado nos dois estados, a diferentes velocidades.....	32
Tabela 12 – Variação da amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente, a diferentes regimes de carga e com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm.....	35
Tabela 13 – Variação da amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente nos dois estados, a diferentes velocidades.....	36
Tabela 14 – Critérios definidos para comparação dos diferentes métodos de diagnóstico abordados nas simulações realizadas.....	40
Tabela 15 – Compilação dos métodos de diagnóstico abordados nas simulações realizadas.	40
Tabela 16 – Parâmetros do M-PMSM em estudo controlado com uma estratégia de controlo preditiva de corrente.....	50

Lista de Símbolos

α_{cu}	Coeficiente de temperatura do cobre	
α_{mag}	Coeficiente de temperatura do íman permanente	
B_r	Indução magnética pré-falha	T
B'_r	Indução magnética pós-falha	T
d_{mag}	Rácio de desmagnetização	
e_s	Vetor da tensão induzida no estator	V
e_{normal}	Fase da tensão induzida em estado saudável	
e_{falha}	Fase da tensão induzida em estado de falha	
η	Rendimento da máquina	%
f_n	Frequência nominal de alimentação da máquina	Hz
f_{demag}	Componente espectral da desmagnetização da máquina	Hz
f_e	Componente fundamental da desmagnetização da máquina	Hz
I_n	Corrente nominal da máquina	A
I_s	Corrente dos enrolamentos estáticos	A
i_{ds}	Corrente do estator no eixo d	A
i_{qs}	Corrente do estator no eixo q	A
i_{xs}	Corrente do estator no eixo x	A
i_{ys}	Corrente do estator no eixo y	A
i_s^{k+h}	Predição para o instante $k + h$ da corrente das componentes dq e $x'y'$	A
I_6	Matriz identidade 6*6	
i_s	Vetor de corrente do estator	A
J	Momento de inércia do rotor da máquina	$Kg.m^2$
k	Grau de desmagnetização	
L_s	Indutância dos enrolamentos do estator da máquina	H

L_{dq}	Indutância equivalente em eixos dq	H
L_{xy}	Indutância equivalente em eixos $x'y'$	H
l	Número inteiro	
m	Número de fases da máquina	
$n_{efetivo}$	Total de ímanes permanentes efetivos da máquina	
n_{total}	Total de ímanes permanentes da máquina	
n_m	Velocidade nominal de rotação do rotor da máquina	rad/s
p	Número de pares de polos da máquina	
q	Número de ranhuras por polo e por fase	
$R_{s(T_0)}$	Resistência do estator da máquina a alta frequência	Ω
$\sum R_{(T_s, T_r)}$	Média da resistência total a alta frequência	Ω
R_s	Resistência do estator	Ω
T_r	Temperatura dos ímanes permanentes do rotor estimada	$^{\circ}\text{C}$
T_0	Temperatura ambiente	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura da resistência da máquina a alta frequência	$^{\circ}\text{C}$
T_{em}	Binário eletromagnético desenvolvido pela máquina	N.m
u_s	Tensão dos enrolamentos estatóricos	V
u_{n1n2}	Tensão entre neutros	V
u_{ds}	Tensão do estator no eixo d	V
u_{qs}	Tensão no estator no eixo q	V
ψ_{ds}	Fluxo estatórico no eixo d	Wb
ψ_{qs}	Fluxo estatórico no eixo q	Wb
ψ_s	Vetor do fluxo encadeado no estator	Wb
$\psi_{s,PM}$	Vetor do fluxo encadeado no estator devido aos PMs	Wb
$\psi_{s,PMq}$	Amplitude do harmónico do fluxo encadeado no eixo q	Wb
ϕ_q	Fase do harmónico do fluxo encadeado no eixo q	Wb

ω_r	Velocidade angular elétrica do rotor da máquina	rad/s
θ_m	Posição angular elétrica do rotor da máquina	rad
τ_c	Ângulo correspondente ao passo da bobina	rad

Índices e Expoentes

dq	Relativo a grandezas expressas no subespaço dq
$\alpha\beta$	Relativo a grandezas expressas no subespaço $\alpha\beta$
$z1z2$	Relativo a grandezas expressas no subespaço $z1z1$
r	Relativo a grandezas do rotor

Abreviaturas

DEEC-UC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
HFI	<i>High Frequency Injection</i>
IPM	<i>Interior Permanent Magnet</i> – Íman permanente interior
IT	Instituto de Telecomunicações
LSEM	Laboratório de Sistemas Eletromecânicos
M-PMSM	<i>Multi-phase Permanent Magnet Synchronous Machine</i> – Motor síncrono de ímanes permanentes multifásico
MD	Método de diagnóstico
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> – Motor síncrono de ímanes permanentes
PCC	Controlo preditivo de corrente
PM	<i>Permanent Magnet</i> – Íman permanente
SPM	<i>Surface Permanent Magnet</i> – Íman permanente de superfície
ZSVC	<i>Zero-sequence voltage component</i> – Componente de sequência nula da tensão

CAPÍTULO 1 – Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

A utilização de máquinas elétricas multifásicas de ímanes permanentes (M-PMSM) na atualidade é uma realidade bem patente devido ao elevado número de vantagens que estas apresentam [1]. Tanto na indústria automóvel [2], caso dos motores de tração elétrica [1],[3],[4],[5], como na geração eólica [3],[5],[6], a utilização destas máquinas é a escolha preferida quando se necessita de um elevado desempenho [3], o que apenas se torna possível devido a determinadas características, tais como:

1. Elevada eficiência [1],[4],[5],[7],[8],[9];
2. Elevada densidade de potência [4],[7],[9],[10],[11];
3. Alta capacidade de resposta dinâmica [8];
4. Estrutura física simples e baixo peso, facilitando assim os processos de manutenção, em comparação com os motores de indução [7],[8],[10],[12];
5. Baixo ruído [8].

Além destas características, destaca-se ainda a capacidade de tolerância a falhas dos M-PMSMs em comparação com os clássicos PMSMs trifásicos [4],[13],[14],[15], revelando-se assim essencial o estudo dos vários tipos de falha que possam ocorrer e afetar o estado normal de funcionamento de um M-PMSM.

Sabendo que os M-PMSMs são uma opção relativamente recente no mercado dos motores elétricos, existe uma clara carência de estudos e métodos de diagnóstico de falhas neste tipo de motores, em relação aos PMSM clássicos. É conhecido que as falhas podem provocar uma degradação no desempenho do motor [1],[3], nomeadamente na diminuição e/ou oscilação do binário eletromagnético, como também no aumento do ruído acústico, vibrações da carcaça, aumento da temperatura, diminuição do rendimento, entre outros [3],[4],[16].

Uma vez que este tipo de motores são utilizados em aplicações críticas, como na aviação [17], torna-se essencial o aumento dos estudos neste campo. Neste sentido, o que nos moveu foi combater esta lacuna de referências no campo dos métodos de diagnóstico (MD) de falhas, testando experimentalmente alguns dos métodos já estudados, propondo melhorias e possivelmente novas formas de diagnóstico.

Em particular, pretendeu-se desenvolver e aplicar métodos de diagnóstico capazes de diagnosticar falhas de desmagnetização dos ímanes permanentes de um M-PMSM de seis fases sujeito a uma estratégia de controlo preditivo de corrente (PCC).

1.2. Objetivos do Estudo

A execução desta dissertação teve como objetivo principal, pesquisar o estado da arte relacionado com os métodos de diagnóstico de falhas num M-PMSM, com especial destaque para as falhas relacionadas com os ímanes permanentes.

Mediante os resultados obtidos na análise prévia, o objetivo centrou-se em desenvolver um processo de simulação, com recurso a um modelo de co-simulação já existente, para testar e simular várias falhas nos ímanes permanentes de um M-PMSM, de forma a validar métodos de diagnóstico já estudados, possibilitando eventualmente, a aplicação de novas abordagens neste tema.

CAPÍTULO 2 - Estado da Arte Sobre os Métodos de Diagnóstico de Falhas em PMSMs

Este capítulo apresenta como missão basilar, a exposição dos vários tipos de falhas que normalmente ocorrem em PMSMs, e quais os principais e melhores métodos de diagnóstico de falhas abordados até hoje, nesse domínio.

2.1 Tipos de Falhas em PMSMs

É de grande importância perceber e distinguir os vários tipos de falhas que podem ocorrer em PMSMs. As diferentes falhas são classificadas em três tipos distintos: **elétricas**, **mecânicas** e **magnéticas** [3],[8],[17],[18]. Estas últimas são de maior importância para este estudo, sendo que ainda são categorizadas com mais detalhe na Figura 1 [17]. De seguida é realizada uma descrição detalhada dos três tipos de falhas.

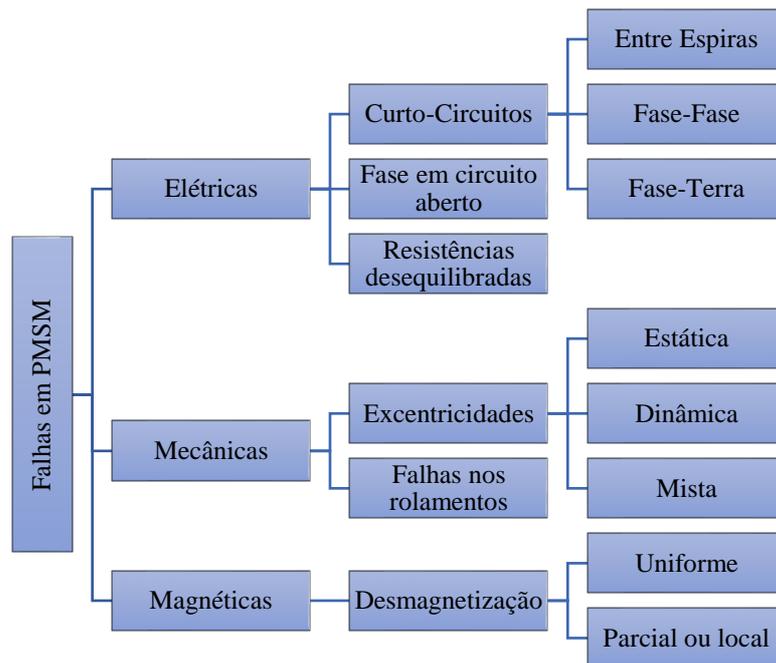


Figura 1 – Classificação dos diferentes tipos de falha [7],[14].

2.1.1. Falhas Elétricas

As falhas elétricas são categorizadas em três tipos distintos, como se verifica pela análise da Figura 1: **curtos-circuitos**, **fase em circuito aberto** e **ligações de alta resistência** [17],[19]. Estes tipos de falhas, como por exemplo o curto-circuito entre espiras [7],[12], estão essencialmente relacionados com defeitos no isolamento dos enrolamentos estatóricos [8],[12],[20]. Temos ainda outros exemplos, como o curto-circuito na saída do barramento dc ou o curto-circuito no condensador dc [12].

2.1.2. Falhas Mecânicas

Ao nível das falhas mecânicas, estas distribuem-se essencialmente em dois diferentes grupos: **excentricidades** e **falhas nos rolamentos** [8],[17].

As falhas relacionadas com a excentricidade subdividem-se ainda em três tipos: **estática**, **dinâmica** e **mista** [9],[17]. Estas poderão ser provocadas por diversos fatores, como por exemplo imperfeições durante o processo de fabrico ou montagem inadequada [9], podendo levar a um desequilíbrio magnético, resultando assim em vibração, ruído, desgaste dos rolamentos ou mesmo contacto entre o rotor e o estator, provocado pelas assimetrias [9].

As falhas do foro dos rolamentos, são essencialmente associadas ao desgaste dos rolamentos, muitas vezes explicados pela excentricidade do rotor [9], mas também pelo desgaste resultante da normal operação do motor, devido a fadiga, contaminação, etc [12].

2.1.3. Falhas Magnéticas

As falhas magnéticas estão em grande parte relacionadas com a **desmagnetização dos ímanes permanentes**. Estas podem ser ainda uma desmagnetização **uniforme** ou **parcial/local** [6],[8]. A parcial afeta apenas parte de um ou de vários ímanes, enquanto a uniforme afeta todos os ímanes de forma simétrica. Além desta classificação, podemos ainda falar de desmagnetização **reversível** e **irreversível** [8].

Este tipo de falha pode ser provocada por diversos fatores, tais como fissuras nos ímanes permanentes [12], causando assim uma diminuição do fluxo [21], criação de ruído e vibrações, perda de eficiência [22], podendo levar a uma desintegração do rotor em última instância [12]. Também os esforços térmicos [1],[9],[23], a inversão de campos magnéticos [1] ou mesmo a corrosão/oxidação dos ímanes [9],[21], podem levar a uma falha deste tipo. No caso da Figura 2, pode ver-se o resultado de uma falha por desmagnetização, ao nível da densidade de fluxo magnético.

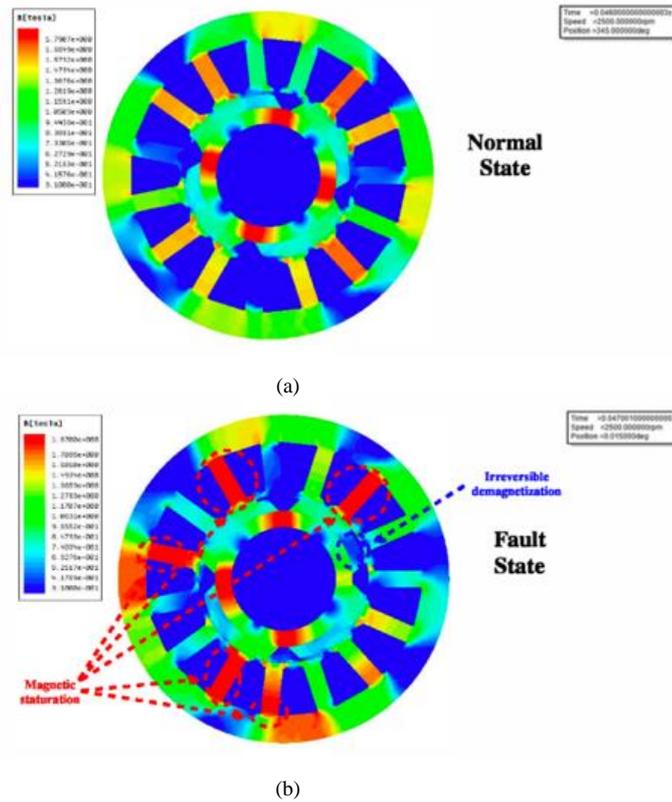


Figura 2 – Distribuição da densidade de fluxo magnético: (a) em estado normal; (b) em estado de falha provocado por desmagnetização [6].

Na Figura 3 é possível verificar as áreas de desmagnetização provocadas por uma falha numa máquina multifásica, neste caso por inversão do vetor de tensão, onde se observa que o nível de desmagnetização parcial irreversível é superior quando a máquina está em condição de nove fases [4].

Relativamente a este tipo de falha, destaca-se também que a incidência é superior quando se fala em máquinas com ímanes à superfície do rotor (SPM), dado que estão expostos diretamente ao entreferro, em comparação com as máquinas com ímanes no interior do rotor (IPM), onde estão mais protegidos por outros materiais [24].

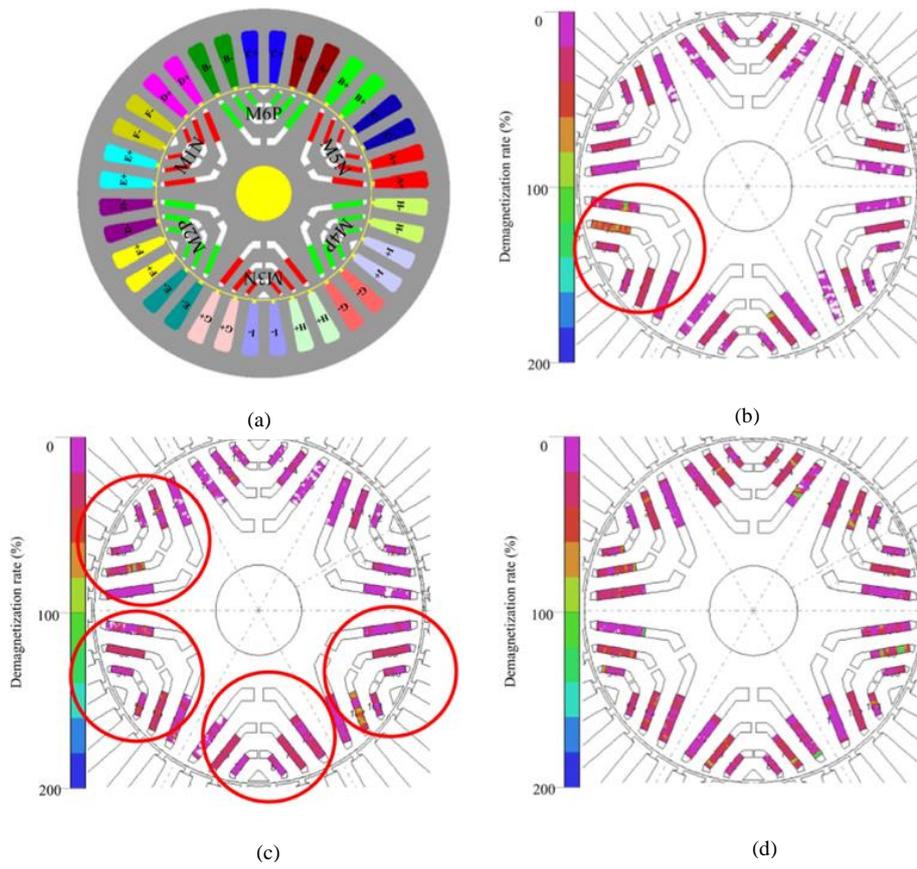


Figura 3 – Áreas de desmagnetização parcial em máquina multifásica: (a) motor original; (b) três-fases; (c) seis fases; (d) nove fases [3].

2.2 Métodos de Diagnóstico de Falhas nos Ímanes Permanentes

2.2.1. Análise das Correntes do Estator

2.2.1.1. Análise do Espectro das Correntes do Estator (MD1)

O método mais utilizado para diagnóstico de falhas é a análise dos harmônicos no espectro da corrente do estator [25], através do uso da *FFT (Fast Fourier Transform)* [12]. Conclui-se desta técnica que a altas velocidades (3000 a 6000 rpm), se assiste a diferenças consideráveis entre a situação de magnetização normal e a situação da máquina estar a várias percentagens de magnetização dos ímanes, no termo fundamental 1 e 5, que varia entre 0.6x e 5x. Para uma gama média de velocidades (1500 a 3000 rpm), consegue-se observar diferenças ao nível dos harmônicos 13 e 17, com rácios superiores ao dobro da situação normal. A baixas velocidades (300 a 1500 rpm), são nos harmônicos 6 e 9 do espectro da corrente do estator onde se visualizam diferenças notáveis. Também aquando da existência de falhas locais nos ímanes permanentes, assiste-se a um aumento do conteúdo harmónico, nomeadamente dos harmónicos pares, concluindo-se que o padrão destas alterações pode habilitar a deteção deste tipo de falhas [7].

Por sua vez, verifica-se que as novas componentes harmónicas na corrente do estator, causados por uma assimetria nos ímanes permanentes da máquina, para alguns tipos de máquina, seguem o seguinte padrão [10]:

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

onde f_{demag} e f_e são as componentes espectrais da desmagnetização e fundamental, respetivamente, l é um número inteiro e p é o número de pares de polos da máquina [10].

2.2.1.2. Análise do Conteúdo Harmónico no Domínio Tempo-Frequência das Correntes do Estator (MD2)

A partir deste método de diagnóstico e do uso da transformada de onduleta, é realizada uma decomposição do sinal da corrente do estator: alta frequência e baixa frequência [26]. Sendo o sinal de alta frequência o mais usado neste tipo de diagnóstico, é possível retirar informação importante acerca da desmagnetização, nomeadamente a partir do nível oitavo de banda de alta frequência.

Conclui-se que sendo mais difícil detetar o conteúdo harmónico no domínio do tempo, com a variação da carga e do binário, esta análise no domínio do tempo-frequência

apresenta-se como uma técnica efetiva e de maior eficácia no diagnóstico de desmagnetização em PMSMs [26].

2.2.1.3. Análise do Espectro das Correntes de Sequência Nula (MD3)

A partir da análise das correntes de sequência nula torna-se possível detetar a desmagnetização dos ímanes permanentes para baixas e altas velocidades com um correto grau de precisão [12]. As conclusões retiradas indicam que o 3º harmónico para baixas e altas velocidades e o 6º, 12º e 15º harmónicos para velocidades médias/altas, apresentam variações de amplitude consideráveis e que tornam possível determinar a falha por desmagnetização. A menor variação apresenta-se quando a velocidade é inferior [12].

2.2.2. Análise de Tensões

2.2.2.1. Variação da Tensão Induzida (MD4)

Este método de diagnóstico assenta na avaliação da redução e distorção do fluxo magnético da máquina, concluindo-se que a tensão induzida apresenta uma redução significativa quando existe falha nos ímanes permanentes, como a desmagnetização [4]. É possível estimar o valor da força eletromotriz em situação de falha, a partir da equação 2.2:

$$e_{falha}(t) = \frac{n_{efetivo}}{n_{total}} e_{normal}(t) = k e_{normal}(t) \quad (2.2)$$

onde e_{normal} e e_{falha} são a amplitude da tensão induzida, com a máquina sem falha e com falha, respetivamente. n_{total} é o número total de ímanes permanentes da máquina e $n_{efetivo}$ o valor de ímanes permanentes efetivos da máquina (ímanes em funcionamento após a falha). k é o grau de desmagnetização, obtido através da monitorização e comparação dos valores de amplitude da tensão induzida entre o estado normal e estado de falha.

De forma a avaliar a extensão do nível de desmagnetização em cada íman podemos ainda utilizar o rácio de desmagnetização d_{mag} , definido por [4]:

$$d_{mag} = \frac{B_r - B'_r}{B_r} \times 100\% \quad (2.3)$$

onde B_r é a indução magnética pré-falha e B'_r representa a indução magnética pós-falha.

Já ao nível do conteúdo harmónico, e dependendo da configuração dos enrolamentos, poderão aparecer diferentes números de harmónicos [10].

2.2.2.2. Análise da Componente Fundamental de Sequência Nula da Tensão (MD5)

A ZSVC (*Zero-sequence voltage component*) é um sinal muito popular no que toca ao diagnóstico de falhas, tendo como base os valores obtidos na medição, através da diferença de potencial entre o ponto neutro dos enrolamentos estatóricos e um neutro criado com um conjunto de resistências situadas na alimentação do motor [10].

Em caso de falha nos ímanes permanentes, a componente fundamental de sequência nula da tensão sofre uma redução à medida que o grau de falha aumenta. Na Figura 4, é possível verificar o esquema de ligações utilizado para a execução deste método.

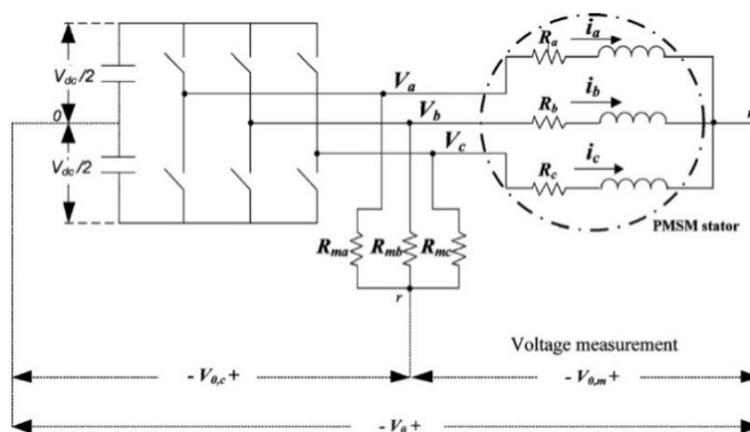


Figura 4 – Esquema de ligação de um PMSM trifásico com o inversor, enrolamentos do estator, e série de resistências utilizadas para criação de um neutro artificial [9].

2.2.3. Análise de Grandezas Magnéticas

2.2.3.1. Análise da Curva B-H dos Ímanes Permanentes do Rotor (MD6)

Neste método de diagnóstico é possível avaliar a distribuição de uma possível desmagnetização, o desempenho no pós-desmagnetização, bem como possíveis reduções na força eletromotriz e no binário eletromagnético. Uma vez que o joelho da curva nos mostra o ponto onde a relação B-H deixa de ser linear, é possível detetar a desmagnetização dos ímanes permanentes [10], sendo que a desmagnetização irreversível move o ponto de operação [10]. Também a temperatura é um fator a ter em conta neste

método de diagnóstico, uma vez que determinadas temperaturas para diversos materiais constituintes dos ímanes permanentes conduzem para uma região abaixo do joelho da curva [4], dado que uma desmagnetização irreversível poderá ocorrer quando o campo magnético e/ou a temperatura se altera consideravelmente, como também a máquina estar em funcionamento com carga elevada [23],[27].

Na Figura 5, podemos ver um exemplo de uma curva B-H para o material VACOMAX225 HR, a 300°C, evidenciando o comportamento da curva e o ponto onde a relação B-H deixa de ser linear

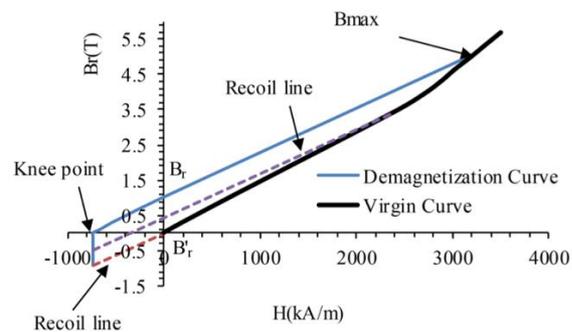


Figura 5 – Curva B-H a 300°C do material VACOMAX 225 HR [3].

2.2.4. Análise da Temperatura

2.2.4.1. Análise da Temperatura dos Ímanes Permanentes (MD7)

Este método de diagnóstico tem como base a estimativa da temperatura dos ímanes permanentes do rotor do motor em estudo, utilizando para isso a técnica de HFI (Injeção de sinais de alta frequência) [28]. Assim, e sabendo que a temperatura não é uniforme nos momentos em que o motor se encontra com falha, podemos retirar daqui algumas conclusões de forma a detetar a desmagnetização dos ímanes permanentes [28].

Para que tal aconteça, podemos estimar a temperatura nos ímanes permanentes tendo em conta que [28]:

$$T_r = T_0 + \frac{\sum R_{(T_s, T_r)} - R_r(T_0) - R_s(T_0)[1 + \alpha_{cu}(T_0 - T_s)]}{R_r(T_0)\alpha_{mag}} \quad (2.4)$$

onde T_r é a temperatura dos ímanes permanentes do rotor estimada, T_0 a temperatura ambiente, T_s a temperatura da resistência da máquina a alta frequência, $R_s(T_0)$ a resistência do estator da máquina a alta frequência, $R_r(T_0)$ a resistência do rotor da máquina a alta

frequência, $\sum R_{(T_s, T_r)}$ a média da resistência total a alta frequência e α_{cu} e α_{mag} o coeficiente de temperatura do cobre e do íman permanente, respectivamente [28].

2.3. Métodos de Diagnóstico de Outros Tipos de Falhas em PMSMs

2.3.1. Análise do Espectro das Correntes das 3 Fases (MD8)

Um processo válido para análise de falhas é proceder à análise do espectro da corrente das três fases [7]. Conclui-se que, quando um curto-circuito entre espiras ocorre verifica-se um aumento da amplitude na corrente das três fases, além do acréscimo do seu conteúdo harmónico. É tida em conta a fase C, verificando-se que a amplitude da componente fundamental das correntes aumenta cerca de 4.72x. Os harmónicos 3, 5 e 7, surgem na situação de falha, notando-se um maior aumento de amplitude no harmónico 5, como referido em [7].

2.3.2. Análise do Espectro da Densidade de Fluxo Magnético (MD10)

Através da análise da distribuição da densidade de fluxo magnético, é possível verificar em situação de falha, nomeadamente de curto-circuito nas espiras, que o espectro da densidade de fluxo magnético no entreferro (sem carga) adquire harmónicos adicionais, levando à existência de ruídos, vibrações e a quebras de *performance* do motor, com queda na amplitude da sua componente fundamental. É possível verificar um acréscimo significativo da amplitude nos harmónicos 2, 4 e 6 e nos inter-harmónicos: 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 e 5.5 [7]. Nesta base, assiste-se a uma clara diferença quando analisamos a densidade de fluxo magnético no rotor e a respetiva FFT, entre uma máquina com curto-circuito entre espiras e em estado normal [9].

2.4. Comparação dos Métodos de Diagnóstico

Após a leitura das diversas referências contidas neste estudo, é importante compilar e estabelecer uma comparação entre os vários métodos de diagnóstico.

Na Tabela 1, são enumerados os sete critérios utilizados para estabelecer comparação entre os diferentes meios de diagnóstico, bem como, a respetiva descrição para cada um destes.

Tabela 1 – Critérios definidos para comparação dos diferentes métodos de diagnóstico analisados no estado da arte.

CRITÉRIO	DESIGNAÇÃO
A1	O método não é invasivo
A2	O método é aplicável com a máquina em serviço
A3	O método foi validado experimentalmente
A4	O método é independente da temperatura
A5	O método é independente dos parâmetros do motor
A6	O método é independente da ligação dos enrolamentos do estator

Na Tabela 2, é possível verificar a comparação entre os dez métodos de diagnóstico mencionados, com os critérios estabelecidos na tabela 1. O símbolo (+) representa que cumpre o critério definido, o símbolo (–) representa que não cumpre o critério definido e o símbolo (*) representa que não foram apuradas conclusões acerca desse critério ou não se aplicam ao método de diagnóstico em questão.

Tabela 2 – Compilação dos métodos de diagnóstico abordados no estado da arte.

MÉTODO	CRITÉRIO					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
MD1	+	+	+	+	+	-
MD2	+	+	-	+	*	-
MD3	+	+	+	*	*	-
MD4	+	+	+	-	*	+
MD5	+	+	+	*	+	-
MD6	+	+	+	*	*	*
MD7	+	*	+	-	*	*
MD8	+	+	+	*	*	*
MD9	+	*	-	-	*	+
MD10	+	+	-	*	*	*

CAPÍTULO 3 – Simulação de Desmagnetização dos Ímanes Permanentes

Neste capítulo é descrito qual o processo adotado no trabalho de simulação e análise de resultados, desde a máquina escolhida, o modelo matemático e de co-simulação utilizado, abordando as diversas simulações realizadas e terminando com a análise dos resultados obtidos.

3.1. Descrição do Sistema

A máquina escolhida para os testes de simulação trata-se de um M-PMSM de seis fases. A decisão de escolha foi influenciada pelo estado da arte e pelas razões acima mencionadas no Capítulo 1, não esquecendo o facto de o modelo de simulação ser o mesmo de uma máquina existente no Laboratório de Sistemas Eletromecânicos (LSEM), inserido no Instituto de Telecomunicações (IT), localizado no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra (DEEC-UC). Algumas imagens da máquina podem ser consultadas no Anexo A.

A máquina tem a potência nominal de 4 kW, tem quatro polos, é utilizado um enrolamento distribuído com 2 ranhuras por cada polo/fase e são usadas bobinas com um passo encurtado de 5/6 do passo polar. Os conjuntos de enrolamentos trifásicos são ligados em estrela com os dois pontos neutros isolados. As principais características são resumidas na Tabela 3, sendo possível consultar mais parâmetros no Anexo B.

Tabela 3 – Características principais da máquina em estudo.

Parâmetro	Valor
Potência nominal (P_s)	4 (kW)
Tensão nominal (U_{dc})	340 (V)
Corrente nominal (I_s)	4.8 (A)
Pares de polos (p)	2
Velocidade nominal (n_m)	1500 (rpm)
Ranhuras por polo/fase (q)	2

Relativamente aos ímanes permanentes, o material utilizado é o NdFeB (neodímio-ferro-boro). A curva B-H deste material é a traçada na Figura 6 [29], onde é possível verificar para uma gama variada de temperaturas o ponto de operação onde se

pode provocar a desmagnetização permanente do íman. O material utilizado nas chapas ferromagnéticas é o M400-50A (aço).

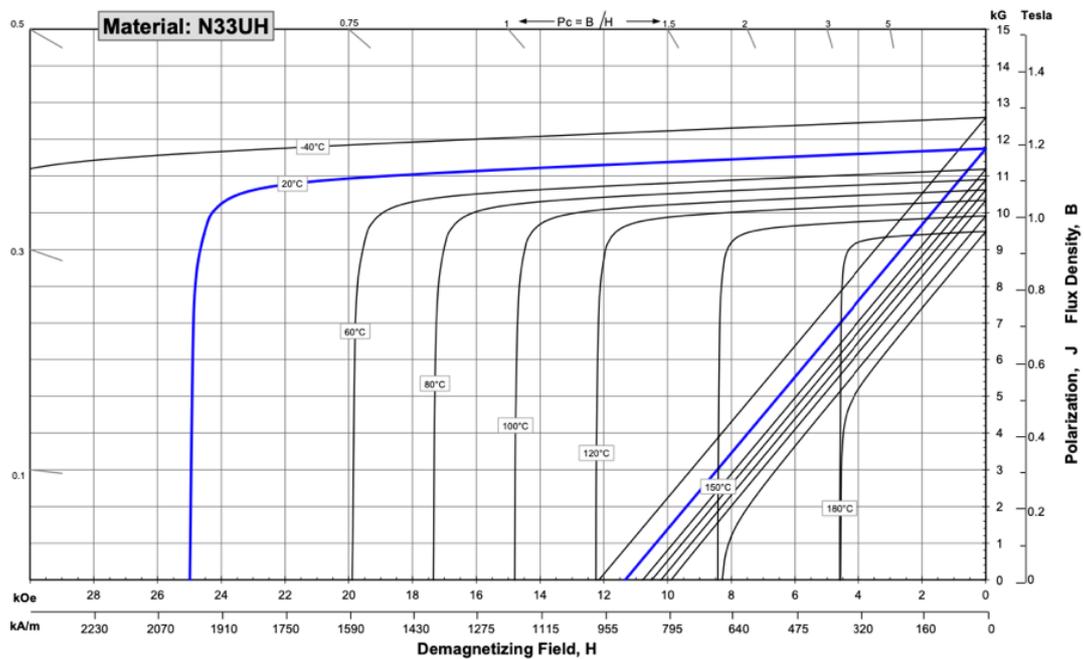


Figura 6 – Curva B-H do material dos ímanes permanentes do motor: N33UH [29].

Na Figura 7 é visível a distribuição dos quatro polos da máquina em estudo, cada um constituído por uma configuração de 3 * 3 ímanes permanentes.

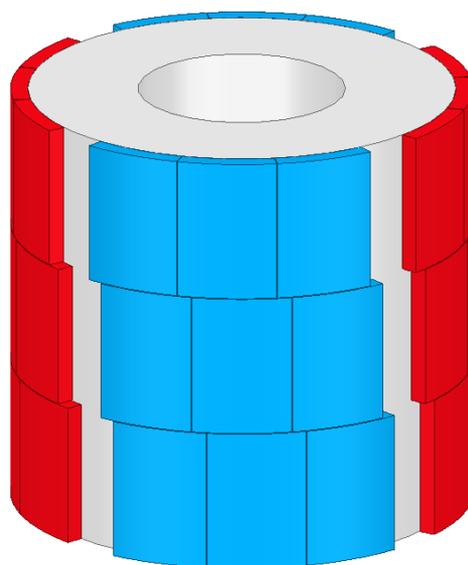


Figura 7 – Distribuição dos ímanes permanentes no rotor da máquina em estudo.

3.2. Modelo Matemático e Estratégia de Controle

O modelo matemático do PMSM de seis fases em estudo, no referencial do rotor, é descrito por [30],[31]:

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

$$e_s = \omega_r J \psi_{PM} + \frac{d\psi_{PM}}{dt} \quad (3.2)$$

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

onde R_s representa a resistência elétrica dos enrolamentos do estator e i_s , u_s , e_s , ψ_s e $\psi_{s,PM}$ são os vetores de corrente, tensão, tensão induzida, fluxo encadeado e fluxo encadeado devido aos PMs, respetivamente. A matriz J é dada por:

$$J = \frac{1}{\omega_r} \left[\frac{dR^{-1}}{dt} \cdot R \right] \quad (3.4)$$

onde ω_r é a velocidade angular elétrica do rotor. A matriz de indutâncias da máquina é definida como:

$$L_s = \text{diag} \{L_{dq}, L_{dq}, L_{xy}, L_{xy}, L_{z1s}, L_{z2s}, \}, \quad (3.5)$$

onde $\{L_{dq}, L_{xy}, L_{z12}\}$ são os parâmetros e indutância equivalente nos subespaços dq , $x'y'$ e $z1z2$, respetivamente.

O fluxo encadeado criado pelos ímanes permanentes do rotor cria determinados harmónicos na tensão induzida segundo o eixo q , considerando-se o 5º e 7º harmónico em ψ_{PM} . Tendo em conta que o 15º e 17º harmónicos poderão induzir harmónicos de corrente desprezáveis da mesma ordem, devido à baixa impedância no subespaço $x'y'$, o vetor e_s é reduzido a [30]:

$$e_s = \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_{s,PM1} \\ -5\psi_{s,PM5} \sin(6\theta - \phi_5) - 7\psi_{s,PM7} \sin(6\theta + \phi_7) \\ 5\psi_{s,PM5} \cos(6\theta + \phi_5) - 7\psi_{s,PM7} \cos(6\theta + \phi_7) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde $\psi_{s,PMh}$ e ϕ_h são a amplitude e fase do harmónico do fluxo encadeado devido aos PMs.

Discretizando as equações usando o método de Euler, as predições para o instante $k + h$ das componentes da corrente em eixos dq e $x'y'$ são dadas por [30]:

$$i_s^{k+h} = (I_6 - T_s R_s L_s^{-1} - \omega_r T_s J) * i_s^{k+h-1} - T_s L_s^{-1} * e_s^{k+h-1} + T_s L_s^{-1} * u_s^{k+h-1} \quad (3.7)$$

onde I_6 é uma matriz de identidade $6 * 6$ e h é o horizonte de predição, que foi definido como $h = 2$ de forma a ter em consideração o atraso de execução da estratégia de controlo [30].

A estratégia de controlo utilizada é **preditiva de corrente**, baseada em vetores de tensão virtuais, uma estratégia que resultou de uma melhoria do controlo de corrente clássico, que como ponto negativo tinha o facto de, para os dois objetivos de controlo (fluxo e binário), o seguimento da referência de corrente em ambos os espaços (fundamental $\alpha\beta$ e secundário xy) não poder ser realizado simultaneamente [30]. O fluxograma desta estratégia de controlo é referido em [30], sendo o indicado na Figura 8.

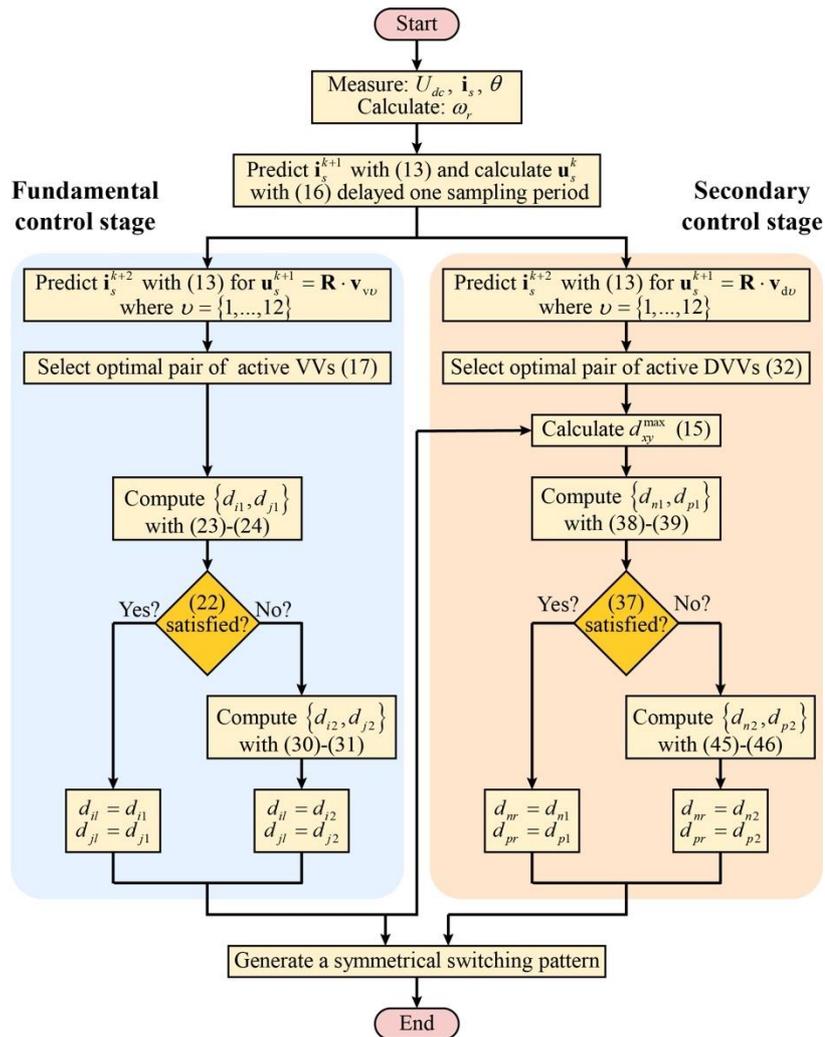


Figura 8 – Fluxograma da estratégia de controlo da máquina em estudo [30].

3.3. Modelo de Co-Simulação

Tendo em vista a realização das simulações de falha nos ímanes permanentes, a solução encontrada consistiu numa co-simulação da máquina em estudo, já realizada anteriormente, cujo projeto foi publicado em [32]. A máquina foi modelizada no *Ansys Maxwell*, um *software* de elementos finitos, tendo em conta as dimensões internas da máquina e características dos materiais usados. Para além disso, foi também utilizado o *Ansys Simplorer* para integrar o modelo da máquina com o circuito de alimentação e a estratégia de controlo, que foi programada em *Matlab/Simulink*. A utilização destes dois *softwares* permite obter uma co-simulação da máquina de grande exatidão. Nas Figuras 9 e 10, são visíveis o modelo de simulação da máquina e o esquemático, respetivamente.

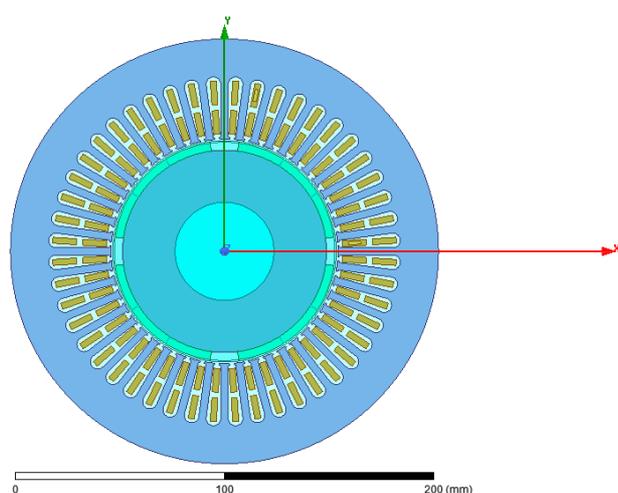


Figura 9 – Modelo em elementos finitos do PMSM de 6 fases.

Neste caso em específico, a máquina foi alimentada por fontes de tensão em vez da eletrónica de potência. Por forma a utilizar conversores de potência seria necessário usar um tempo de amostragem muito mais baixo que o período de controlo, para que o modulador tivesse resolução suficiente para gerar a tensão de referência. Assim, por forma a reduzir os tempos de simulação, que tipicamente são bastante longos em simulações de elementos finitos, foram usadas fontes de tensão que aplicam à máquina a tensão média do período de controlo. Desta forma, a co-simulação corre com um período de amostragem coincidente com o período de controlo que é de $100 \mu\text{s}$.

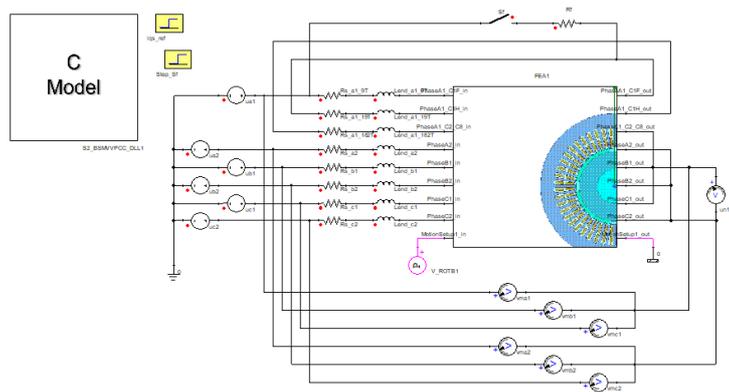


Figura 10 – Modelo de ligações do motor e componentes elétricos.

Com recurso à co-simulação criada, foi utilizado o software *Ansys Electromagnetics Suite 19.2* para obter os dados relativos às simulações com a máquina saudável e com falhas nos ímanes permanentes, em diversos regimes de carga, velocidades e de funcionamento. A introdução de falhas nos ímanes permanentes foi realizada a partir da redução do valor da indução remanescente dos mesmos, sendo assim possível seleccionar qual o íman permanente que se pretende desmagnetizar e com que percentagem de redução, face ao valor inicial. Nesta dissertação e como forma de optimização, dado o elevado tempo de espera para obtenção de dados, optou-se por simular e analisar apenas desmagnetizações locais. Sendo assim, ou o íman se encontra 100% ou 0% desmagnetizado. Na Figura 11 é possível verificar, na zona seleccionada, um conjunto de três ímanes distintos ao longo da direcção axial desmagnetizados, dado que estamos em 2D, num total de nove existentes em cada polo, sendo este o local escolhido para fazer a maior parte das simulações realizadas.

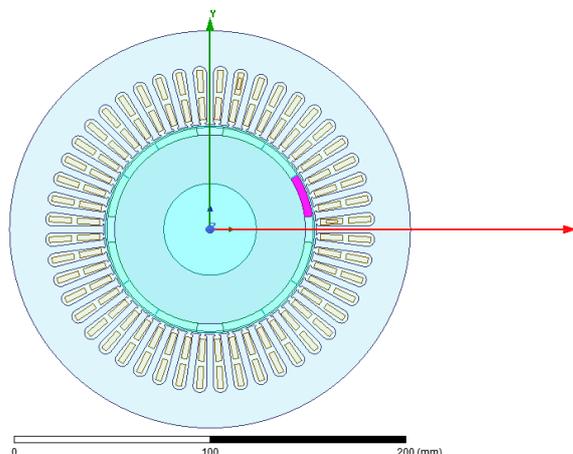


Figura 11 – Modelo de construção do motor e identificação do conjunto de ímanes desmagnetizados em 2D.

Para além desta simulação, embora existam inúmeras formas de induzir falhas nos vários conjuntos de ímanes, para se poder concluir como se comportam os diferentes métodos de diagnóstico analisados com a severidade da falha, simulou-se ainda a desmagnetização total (100%), de um polo completo, como se observa na Figura 12.

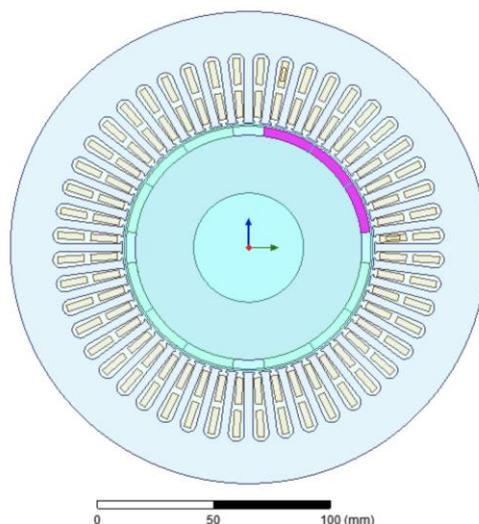


Figura 12 – Modelo de construção do motor e identificação de um polo inteiramente desmagnetizado em 2D.

Relativamente à alteração do regime de carga, foi realizada a partir da variação do valor de i_{qs} , podendo oscilar entre 0% ($i_{qs} = 0 A$) e 100% ($i_{qs} = 4.8 A$). De forma a alternar o tipo de funcionamento da máquina, foi também feita a alteração no valor de i_{qs} , estando a máquina a funcionar como motor no caso em que $0 A < i_{qs} < 4.8 A$ e como gerador quando $-4.8 A < i_{qs} < 0 A$. Novamente, dado o elevado tempo de espera para a obtenção de resultados, embora tenham sido realizadas algumas simulações, a maior parte das simulações obtidas e analisadas no decorrer deste Capítulo, foram feitas com a máquina em funcionamento como motor.

Outra alteração que foi realizada no modelo de co-simulação da máquina, foi a variação do valor das indutâncias L_{dq} e L_{xy} , de forma a realizarmos as simulações presentes em 3.4.4, sendo que estas foram realizadas diretamente no ficheiro *Matlab* de parâmetros da máquina.

3.4. Resultados Obtidos

Após a realização de diversas simulações, foi realizado o tratamento dos dados obtidos, dados estes que são exportados do *software* de co-simulação *Ansys* em ficheiros .csv, para cada sinal medido. Os valores exportados de cada simulação foram obtidos todos com o mesmo tempo de amostragem, tanto no modelo de elementos finitos como no *simplorer*.

De forma a tratar e analisar os resultados obtidos, foi utilizado o *software Matlab R2021a*. Foi criado um código *Matlab* de forma a realizar as leituras dos diferentes ficheiros obtidos nas simulações e apresentar os resultados. Foram analisadas várias grandezas no domínio do tempo, mas essencialmente no domínio da frequência, a partir da FFT dos vários sinais escolhidos para análise. A função FFT utilizada recebe um vetor linha com o tempo, seguido de outro vetor linha com o sinal a analisar. A saída da função é do tipo: vetor de frequência, vetor com as amplitudes e o vetor com as fases das diferentes componentes do sinal.

Os métodos utilizados foram a análise do sinal da tensão do estator (u_s), tensão de neutros (u_{n1n2}), corrente do estator no subespaço dq (i_{dq}), fluxo encadeado e os erros de predição de corrente.

3.4.1. Análise das Tensões

3.4.1.1. Tensão u_s

De forma a identificar possíveis harmónicos na tensão do estator (u_s) que levem a identificar uma falha por desmagnetização, procedeu-se à simulação já descrita neste documento. Os resultados obtidos, são válidos para funcionamento como motor e como gerador. O vetor espacial da tensão (u_s) no subespaço dq , é definido por:

$$u_s = u_{ds} + ju_{qs} \quad (3.8)$$

onde u_{ds} representa a tensão do estator no eixo d e u_{qs} a tensão do estator no eixo q .

É possível verificar, pela análise da Figura 13, que excetuando o harmónico fundamental (componente dc), não existe nenhum harmónico adicional para diagnóstico da falha em estudo. Salienta-se que dado que se está no referencial síncrono, o termo fundamental das tensões aparece como componente dc.

Estabelecendo uma comparação da máquina em estado saudável e estado de falha (1/3 do polo desmagnetizado), quanto à componente dc, podemos afirmar que existe uma diminuição da sua amplitude entre os dois estados, que para a simulação presente na Figura 13 se situa numa redução de 4,1%.

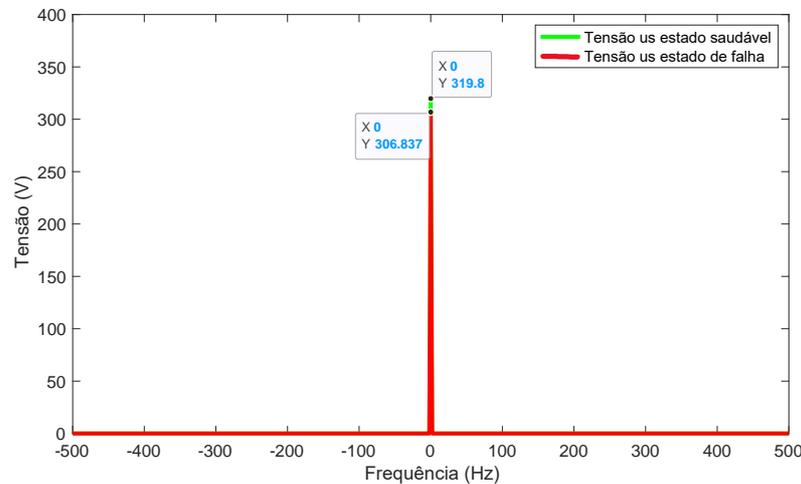


Figura 13 – Espectro da tensão u_s no subespaço dq , com a máquina a funcionar como motor, com $i_{qs} = 4.8$ A a 1500 rpm, em estado saudável e em falha.

Quando se varia o regime de carga da máquina, concluiu-se que à medida que o mesmo diminui (100, 75, 50 e 25%), comparando os dois estados da máquina, a diminuição da amplitude da componente dc é semelhante, como é visível na Figura 14. Podemos concluir também que este método de diagnóstico é independente do regime de carga, dado que a variação das amplitudes entre os dois estados é semelhante para cada regime de carga simulado, com valores compreendidos entre -4% a -6%, como é possível verificar através da análise da Tabela 4, bem como, entre regimes de carga distintos a variação não passa dos -5.1%.

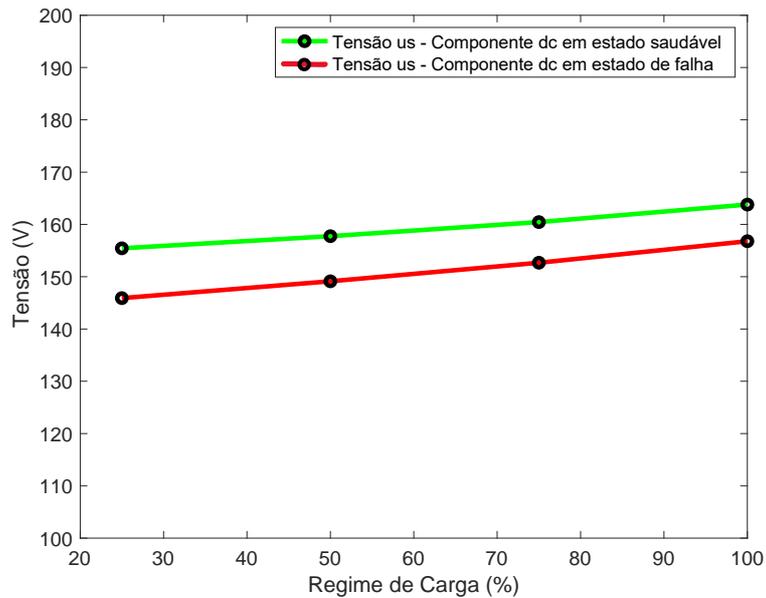


Figura 14 – Amplitude da componente dc da tensão u_s , no subespaço dq , em função do regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em falha.

Tabela 4 – Variação da amplitude da componente dc de u_s nos dois estados, a diferentes regimes de carga.

REGIME DE CARGA (%)	100	75	50	25
MÁQUINA SAUDÁVEL	163.79 V	160.44 V	157.75 V	155.43 V
MÁQUINA COM FALHA	156.79 V	152.66 V	149.12 V	145.90 V
Δ (DELTA)	-4.3%	-4.9%	-5.5%	-6.1%

Com a variação da velocidade, foi possível apurar que à medida que a velocidade decresce, a amplitude da componente dc também decresce, visível na Figura 15, embora com alterações pouco significativas, quando comparados os dois estados da máquina, saudável e em falha. Como se pode observar pela Tabela 5, os valores de variação para a mesma velocidade situam-se entre os -4.1% e -5.5%.

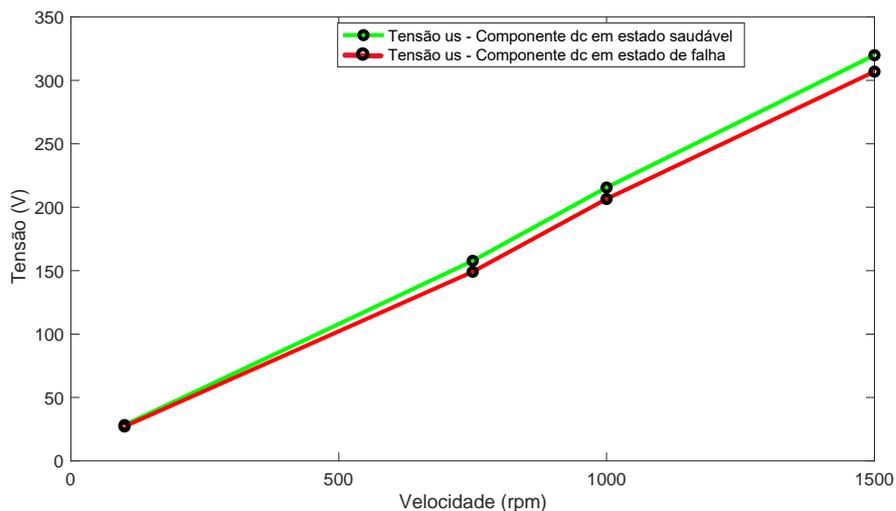


Figura 15 – Amplitude da componente dc da tensão u_s , no subespaço dq , em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em falha.

Tabela 5 – Variação da amplitude da componente dc de u_s nos dois estados, a diferentes velocidades.

VELOCIDADE (rpm)	100	750	1000	1500
MÁQUINA SAUDÁVEL	28.3 V	157.8 V	215.5 V	319.8 V
MÁQUINA COM FALHA	27.2 V	149.1 V	206.5 V	306.8 V
Δ (DELTA)	-3.9%	-5.5%	-4.2%	-4.1%

De forma a se poder avaliar a independência deste método de diagnóstico com a variação da velocidade, foi possível traçar também o gráfico da Figura 16, que representa a divisão da tensão pela velocidade angular elétrica do rotor (u_s/ω_r) sendo que esta é definida por:

$$\omega_r = \left(\frac{n}{60}\right) * 2\pi * p \quad (3.9)$$

onde n representa a velocidade mecânica da máquina em rpm e p o número de pares de polos.

É possível verificar, através da Figura 16 e da Tabela 6, que não existem variações significativas quando se compara o estado de falha e o estado saudável, para a mesma velocidade de operação da máquina, situando-se em média nos -4.4%. Em termos da variação entre as várias velocidades simuladas, conclui-se que o valor da amplitude da componente dc de u_s/ω_r varia com a velocidade, podendo assim concluir-se que este método de diagnóstico não é independente da velocidade de operação da máquina.

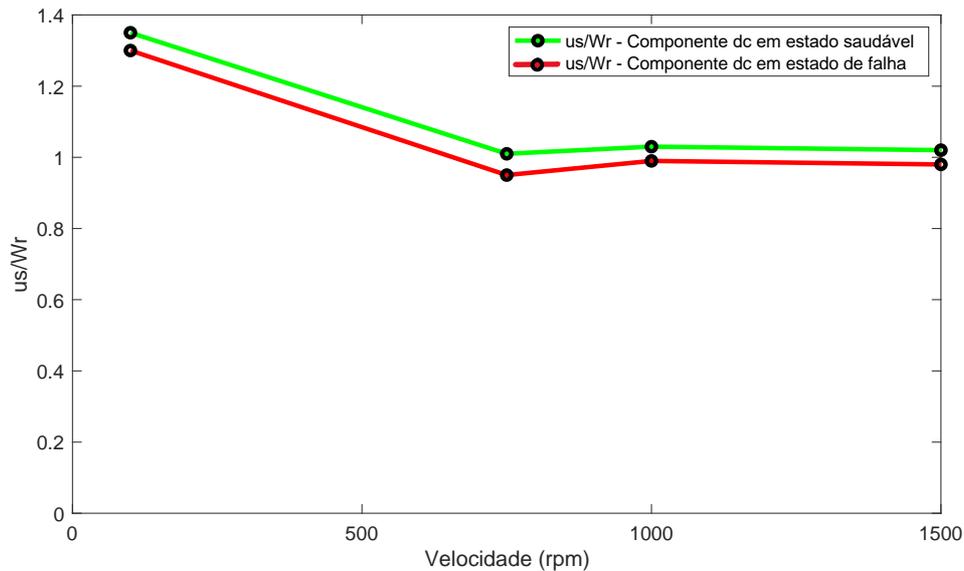


Figura 16 – Amplitude de $(u_s(dc)/\omega_r)$, no subespaço dq , em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em falha.

Tabela 6 – Variação da amplitude da componente dc de u_s/ω_r nos dois estados, a diferentes velocidades.

VELOCIDADE (rpm)	100	750	1000	1500
MÁQUINA SAUDÁVEL	1.30	0.95	0.99	0.98
MÁQUINA COM FALHA	1.35	1.01	1.03	1.02
Δ (DELTA)	3.89%	5.51%	4.18%	4.07%

Assim, conclui-se que para esta falha não existe nenhum harmónico adicional em estado de falha que permita diagnosticar a desmagnetização em causa, embora exista uma diminuição da componente dc do sinal, do estado saudável para o estado de falha, sendo que este sinal é independente do regime de carga e dependente da velocidade de operação.

Para além desta análise, foi possível perceber que com o aumento da severidade da falha, a amplitude da componente dc sofre uma maior diminuição, de 20.3% como é possível verificar pela análise da Figura 17, quando desmagnetizamos um polo completo. À medida que a severidade da falha aumenta, torna-se mais fácil detetar a falha de desmagnetização dos ímanes permanentes com recurso a este método.

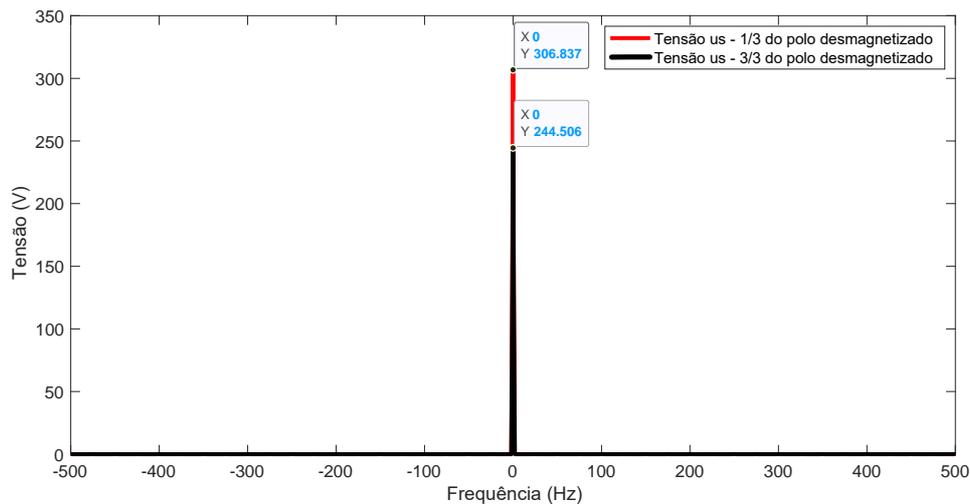


Figura 17 – Espectro da tensão u_s , no subespaço dq , com 1/3 do polo desmagnetizado e com 3/3 do polo desmagnetizado, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.

Para a análise no subespaço $x'y'$, não se obtiveram resultados significativos que ajudem a concluir a existência de falha por desmagnetização dos ímanes permanentes, a partir da análise da tensão u_s .

3.4.1.2. Tensão u_{n1n2}

Um dos métodos utilizados para identificar falhas nos ímanes permanentes de um M-PMSM, foi a medição da tensão entre neutros.

Numa primeira análise, tanto com a variação de carga ou de velocidade, verificou-se uma queda considerável na amplitude do terceiro harmónico da tensão entre neutros, entre o estado de falha (1/3 do polo desmagnetizado) por comparação com o estado saudável e com falha como é possível verificar na Figura 18, com a variação a se situar nos 40%. As simulações aqui representadas, dizem respeito ao funcionamento da máquina como motor.

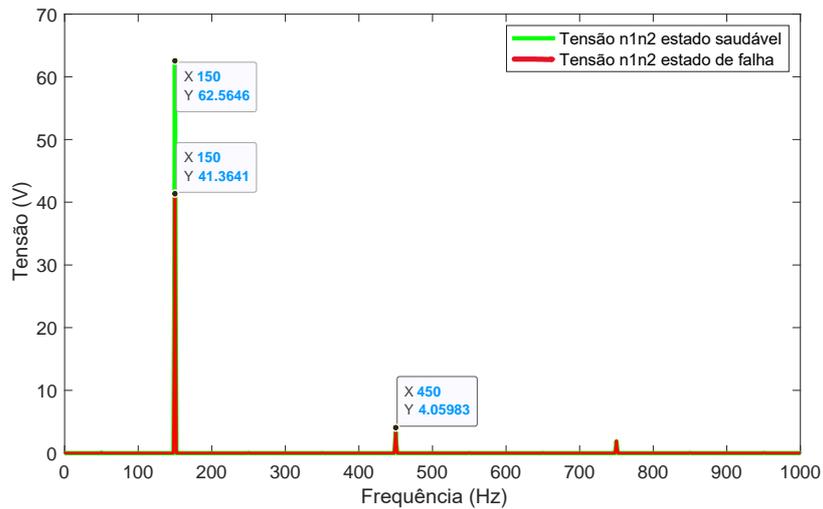


Figura 18 – Espectro da tensão u_{n1n2} , com a máquina em estado saudável e em falha, a funcionar como motor e com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.

Com a variação do regime de carga, a amplitude do terceiro harmónico da tensão não sofre alterações significativas dentro dos quatro regimes de carga simulados (100, 75, 50 e 25%), fazendo com que a diferença entre os dois estados estudados, saudável e com falha, seja semelhante em todos os regimes, como é possível verificar pela análise da Figura 19. Estas variações, situaram-se entre os -29% e os -34%, como se pode concluir pela análise da Tabela 7. Quando comparamos os vários regimes de carga entre si, a variação situa-se na ordem dos 8%, levando-nos a concluir que embora existam diferenças, a análise deste sinal como método de diagnóstico é relativamente independente do regime de carga. Estas simulações foram realizadas considerando uma velocidade da máquina de 750 rpm.

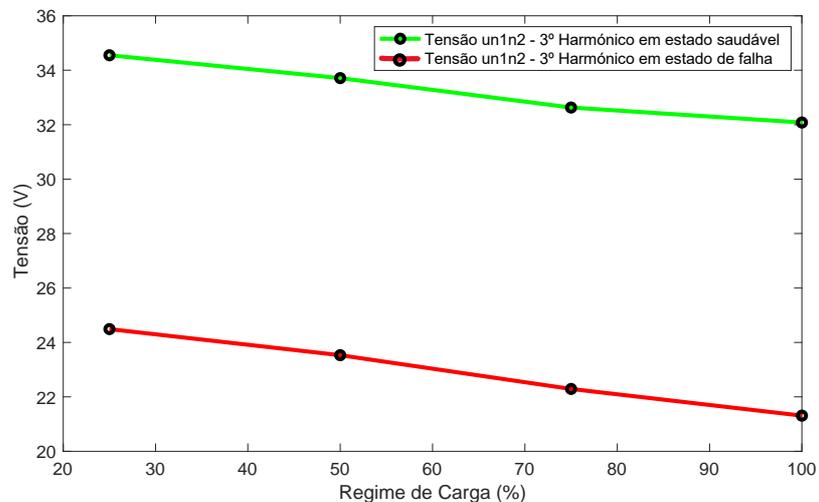


Figura 19 – Amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} , em função do regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em falha.

Tabela 7 – Variação da amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} nos dois estados, a diferentes regimes de carga.

REGIME DE CARGA (%)	100	75	50	25
MÁQUINA SAUDÁVEL	32.08 V	32.63 V	33.71 V	34.54 V
MÁQUINA COM FALHA	21.31 V	22.29 V	23.53 V	24.49 V
Δ (DELTA)	-33.6%	-31.7%	-30.2%	-29.1%

Quando se varia a velocidade, dentro dos casos estudados (1500, 1000, 750 e 100 rpm), é possível verificar pela Figura 20, que existem variações dependentes da velocidade de operação da máquina, como é visível também nos dados presentes na Tabela 8. Esta variação tende a ser inferior, à medida que a máquina funciona a velocidades mais reduzidas (100 rpm), diminuindo dos -33.9% a 1500 rpm para -18.5% a 100 rpm.

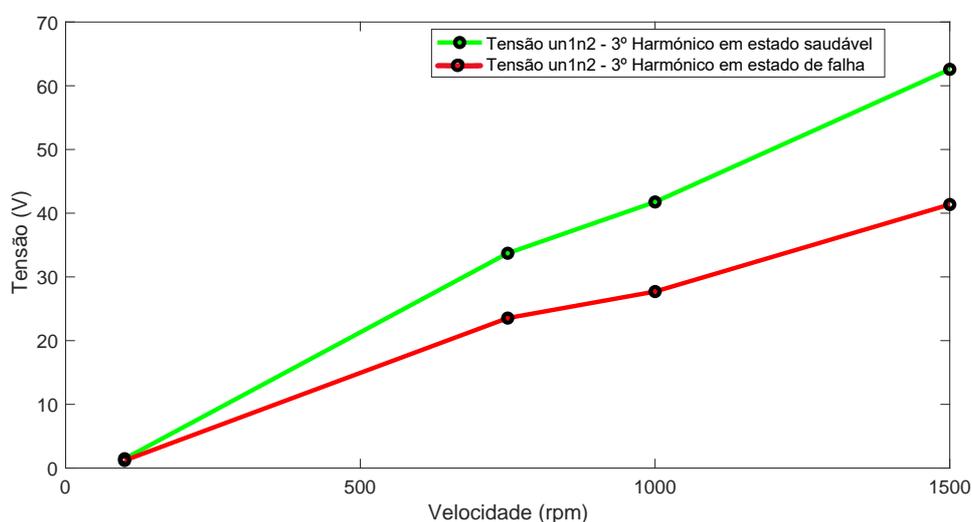


Figura 20 – Amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} , em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.

Tabela 8 – Variação da amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} nos dois estados, a diferentes velocidades.

VELOCIDADE (rpm)	100	750	1000	1500
MÁQUINA SAUDÁVEL	1.46 V	33.71 V	41.76 V	62.56 V
MÁQUINA COM FALHA	1.19 V	23.53 V	27.70 V	41.36 V
Δ (DELTA)	-18.5%	-30.2%	-33.7%	-33.9%

À semelhança da análise realizada para a tensão u_s , para avaliar a independência deste método de diagnóstico com a variação da velocidade, obteve-se o gráfico presente na Figura 21, que representa a divisão da tensão u_{n1n2} pela velocidade angular elétrica do

rotor, definida em (3.9), tendo em conta o terceiro harmónico ($u_{n1n2}/3 * \omega_r$). Conclui-se que a variação para a mesma velocidade está compreendida entre os -19% e -40% e que para velocidades distintas existe variação da amplitude do terceiro harmónico da tensão u_{n1n2} , como é possível verificar pela Tabela 9. Assim, conclui-se que este método não é independente da velocidade de operação.

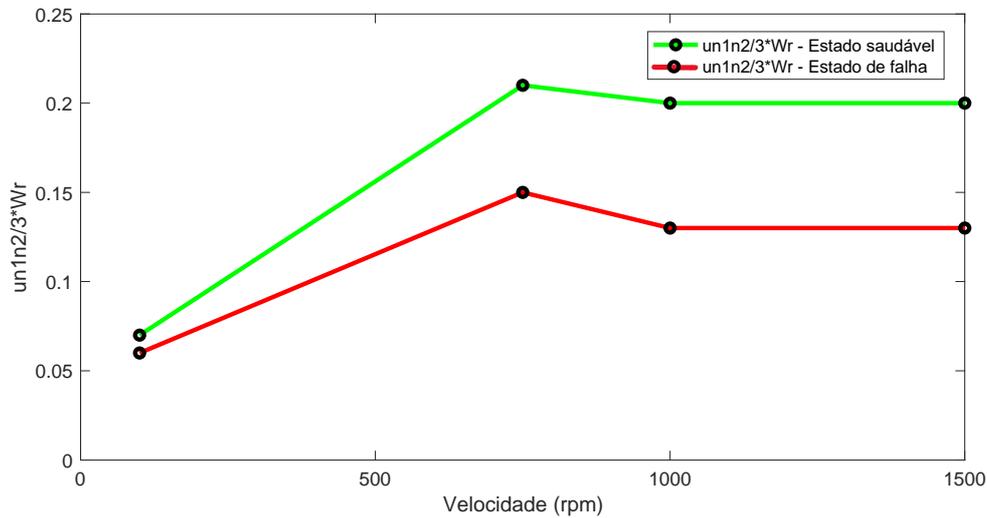


Figura 21 – Amplitude do terceiro harmónico de $u_{n1n2}/3 * \omega_r$, em função da velocidade, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.

Tabela 9 – Amplitude do terceiro harmónico de $u_{n1n2}/3 * \omega_r$, nos dois estados, a diferentes velocidades.

VELOCIDADE (rpm)	100	750	1000	1500
MÁQUINA SAUDÁVEL	0.07	0.21	0.20	0.20
MÁQUINA COM FALHA	0.06	0.15	0.13	0.13
Δ (DELTA)	-18.5%	-30.2%	-33.7%	-33.9%

Assim, não tendo em conta outros tipos de falhas que possam provocar um efeito semelhante, para a falha por desmagnetização em estudo, a análise do espectro da tensão u_{n1n2} pode ser considerada. A desvantagem principal de utilizar este sinal como método de diagnóstico de falha, numa ótica de funcionamento no terreno, é a necessidade da montagem de um sensor de tensão entre os dois neutros.

Conclui-se que este método nos oferece garantias quanto ao diagnóstico de falhas nos ímanes permanentes da máquina em estudo, dado que para as falhas aqui simuladas, existem variações consideráveis na amplitude do terceiro harmónico da tensão entre

neutros, anteriormente referidas. O método é praticamente independente do regime de carga e dependente da velocidade.

3.4.2. Análise da Corrente i_{dq}

Um dos métodos de diagnóstico mencionado no estado da arte, está relacionado com a análise das correntes do estator, mais propriamente o espectro destas correntes, de forma a ser possível encontrar um padrão de conteúdo harmónico que indique uma falha por desmagnetização [25]. Realizaram-se as simulações necessárias e posterior análise para as correntes em eixos dq . O vetor espacial da corrente i_{dq} no subespaço dq , é definido por:

$$i_{dq} = i_{ds} + j i_{qs} \quad (3.10)$$

onde i_{ds} é a corrente do estator no eixo d e i_{qs} é a corrente do estator no eixo q .

Concluiu-se que não existem alterações significativas no conteúdo harmónico destas correntes, quando comparando a máquina em funcionamento como motor, em situação saudável e situação de falha (1/3 do polo desmagnetizado), como é possível verificar pela análise da Figura 22. Esta variação ficou na ordem dos 1.8%, tendo a amplitude da componente dc do sinal sido superior no estado de falha (4.92 A em estado de falha e 4.83 A em estado saudável.). Estes resultados vão de encontro às referências estudadas, dado que estando sob estratégias de controlo de corrente, como é o caso, não irão aparecer reflexos da falha no conteúdo harmónico das correntes da máquina, uma vez que os mesmos vão ser atenuados pelo sistema de controlo.

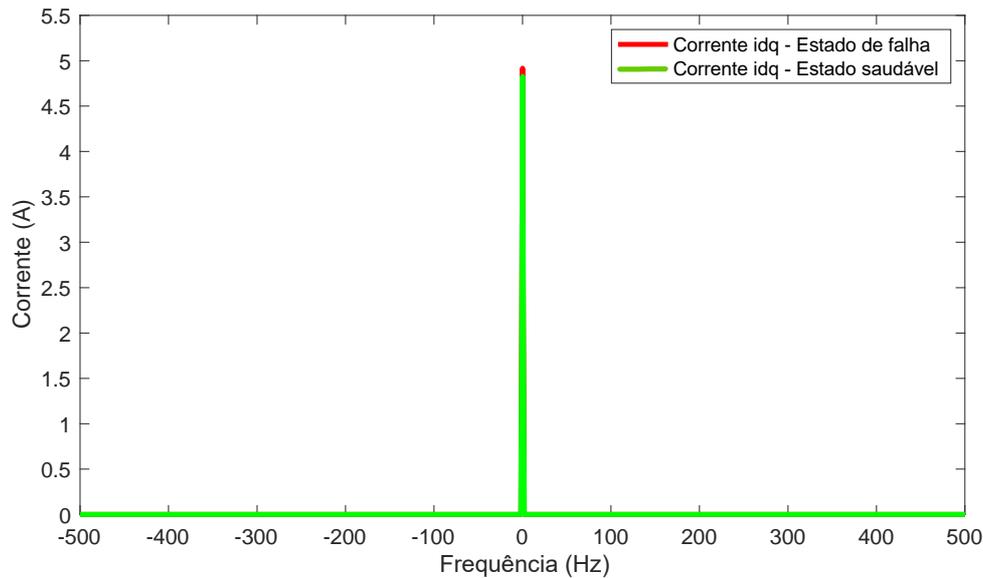


Figura 22 – Espectro da corrente i_{dq} , no subespaço dq , em estado saudável e em estado de falha, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.

Em [33] foi realizada uma abordagem idêntica a esta mas num PMSM trifásico. Embora seja um método que não necessita de sensores adicionais, qualquer falha ou assimetria na máquina resulta numa alteração da velocidade e do binário, conduzindo numa respetiva variação da corrente. Conclui-se também em [33], a par das conclusões obtidas no decorrer deste trabalho, que para desmagnetizações locais, como as simuladas e estudadas neste documento, não implica a geração de novas componentes harmónicas, dependendo também muito das configuração de ligação dos enrolamentos do estator [33].

Dentro do que foi verificado também em [34], conclui-se que este método oferece mais garantias quando a máquina funciona a maiores velocidades, dado que a falha é mais perceptível.

3.4.3. Análise do Fluxo Encadeado

Quando analisado o espectro do fluxo encadeado da máquina no subespaço dq , definido em (3.3), pode-se concluir que não se verifica o aparecimento de qualquer harmónico adicional, quando comparado o estado saudável com o estado de falha (1/3 do polo desmagnetizado), sendo possível apenas verificar um ligeiro decréscimo na amplitude da componente dc, de 4.1%, para a falha em questão, como se pode verificar pela Figura 23.

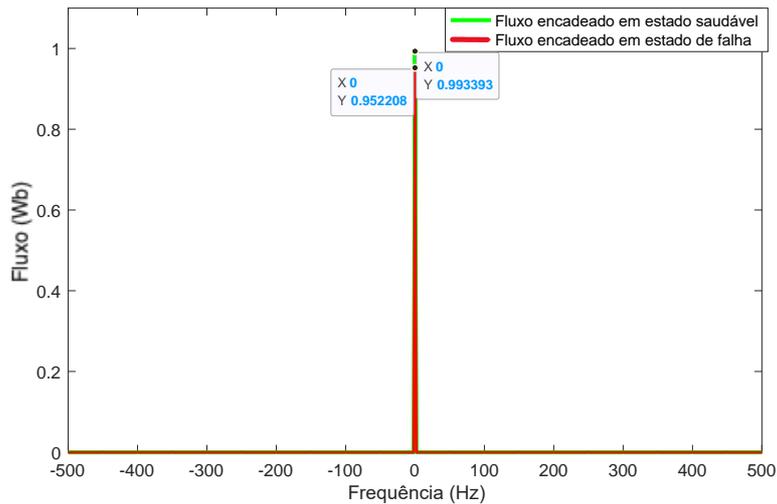


Figura 23 – Espectro do fluxo encadeado, no subespaço dq , na situação saudável e com falha, com a máquina a funcionar como motor e com $i_{q_s} = 4.8$ A a 1500 rpm.

Com a variação do regime de carga, neste caso para 75% e 100% de carga, conclui-se que existe um decréscimo da mesma ordem, em cerca de -4% / -5% quando comparada a situação saudável com a situação de falha, para o mesmo ponto de operação, como se pode verificar na Figura 24 e na Tabela 10. Também através da análise dos mesmos elementos, concluímos que entre os dois pontos de operação simulados, existe uma pequena variação, na ordem de 1%, levando a concluir que a análise deste sinal é independente do regime de carga.

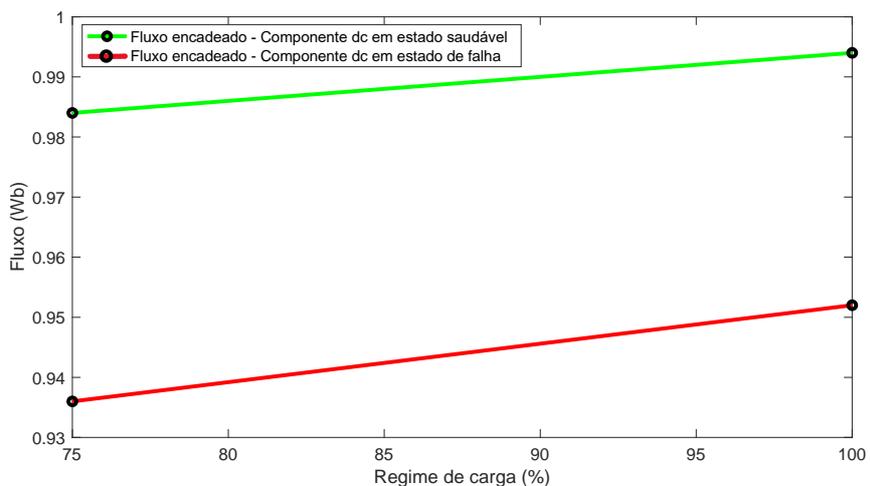


Figura 24 – Amplitude da componente dc do fluxo encadeado em função do regime de carga, no subespaço dq , com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em estado de falha.

Tabela 10 – Variação da amplitude da componente dc do fluxo encadeado nos dois estados, a diferentes regimes de carga.

REGIME DE CARGA (%)	100	75
MÁQUINA SAUDÁVEL	0.994 Wb	0.985 Wb
MÁQUINA COM FALHA	0.951 Wb	0.936 Wb
Δ (DELTA)	-4.3%	-5.0%

Por semelhança, quando analisado o comportamento da amplitude da componente dc do fluxo encadeado com a variação da velocidade, conclui-se que existe um decréscimo entre o estado saudável e o estado de falha constante, como se pode observar na Figura 25. As variações dentro dos valores de velocidade simulados situam-se entre os -4.3% e os -4.9%, como consta dos dados presentes na Tabela 11. Relativamente às diferenças entre os vários pontos de operação simulados a velocidades distintas, não se notam variações significativas, tal como é possível verificar pela análise da Figura 25.

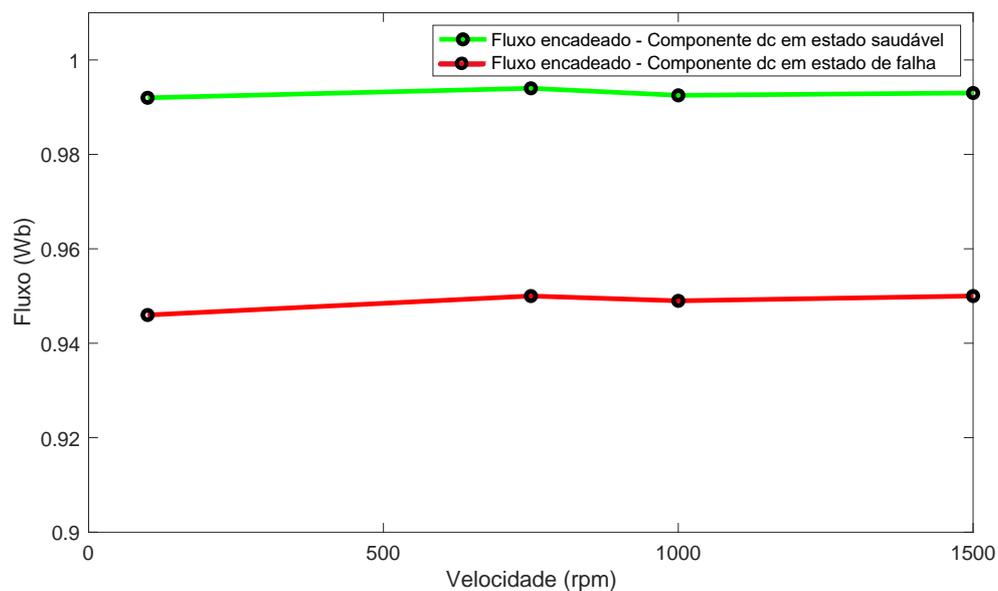


Figura 25 – Amplitude da componente dc do fluxo encadeado com a variação da velocidade, no subespaço dq , com a máquina a funcionar como motor com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.

Tabela 11 – Variação da amplitude da componente dc do fluxo encadeado nos dois estados, a diferentes velocidades.

VELOCIDADE (rpm)	100	750	1000	1500
MÁQUINA SAUDÁVEL	0.992 Wb	0.994 Wb	0.993 Wb	0.993 Wb
MÁQUINA COM FALHA	0.946 Wb	0.951 Wb	0.950 Wb	0.952 Wb
Δ (DELTA)	-4.9%	-4.5%	-4.5%	-4.3%

Estas duas análises levam a concluir que para o caso da análise do espectro do fluxo encadeado, tanto a variação da velocidade como a variação do regime de carga, não alteram os resultados obtidos.

Por último, tal como se pode verificar pela análise da Figura 26, quando se aumenta a severidade da falha, de 1/3 do polo desmagnetizado para a totalidade (3/3 do polo desmagnetizado), conclui-se também que a variação de amplitude da componente dc do fluxo encadeado entre os dois casos aumenta consideravelmente, em 21%, tornando assim esta análise um método de diagnóstico mais viável quando temos maior percentagem de ímanes desmagnetizados. Como referido em [1] este efeito é o esperado, dado que os ímanes permanentes desmagnetizados criam menor fluxo do que ímanes permanentes em estado normal.

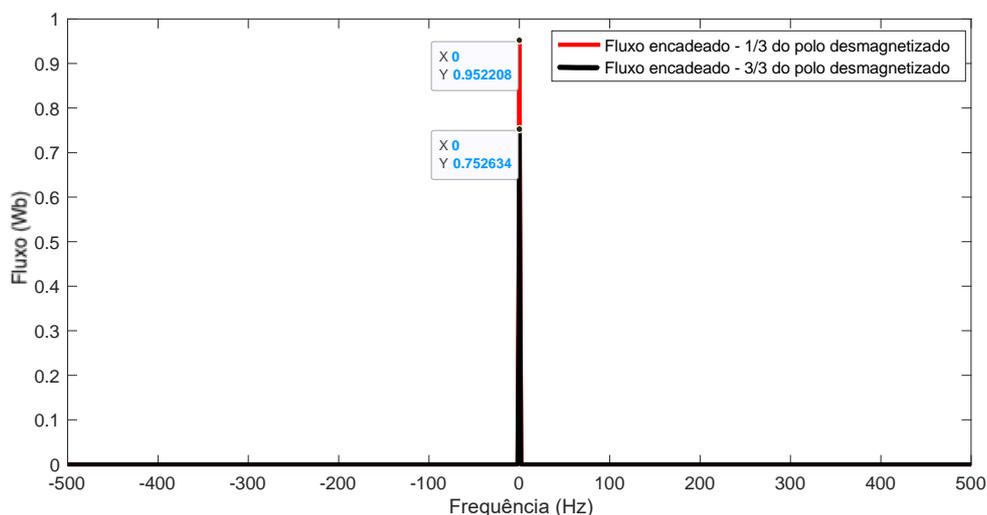


Figura 26 – Espectro do fluxo encadeado com 1/3 do polo desmagnetizado e com todo o polo desmagnetizado, no subespaço dq , com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.

3.4.4. Análise dos Erros de Predição de Corrente

Os erros de predição de corrente são calculados através da diferença entre as correntes previstas para o instante $k + 1$ e as correntes medidas em k . Como o nome indica, pode assumir-se que se trata do cálculo da diferença entre a corrente medida e prevista para o mesmo instante de tempo.

Procedeu-se à análise dos erros de predição de corrente no subespaço dq . Os erros de predição das correntes \tilde{i}_{ds} e \tilde{i}_{qs} são definidos por:

$$\tilde{i}_{ds} = \hat{i}_{ds}(k + 1) - i_{ds}(k + 1) \quad (3.11)$$

$$\tilde{i}_{qs} = \hat{i}_{qs}(k + 1) - i_{qs}(k + 1) \quad (3.12)$$

onde k representa um determinado instante de operação do motor, \hat{i}_{ds} representa o valor previsto para a corrente i_{ds} e \hat{i}_{qs} representa o valor previsto para a corrente i_{qs} .

O fasor espacial, no subespaço dq , é definido por:

$$\tilde{i}_{dqs} = \hat{i}_{dqs}(k + 1) - i_{dqs}(k + 1) \quad (3.13)$$

onde k representa um determinado instante de operação do motor, \hat{i}_{dqs} representa o valor previsto para a corrente i_{dqs} e \hat{i}_{dqs} representa o valor previsto para a corrente i_{dqs} .

Quando comparados o estado de falha (1/3 do polo desmagnetizado) com o estado saudável da máquina, é possível concluir que existe uma componente dc no espectro do sinal dos erros de predição das correntes no subespaço dq . Na Figura 27, é visível que em estado de falha, a amplitude da componente dc é largamente superior quando comparamos com a máquina em estado saudável, ambas em funcionamento como motor, quantificando uma variação de cerca de 86%.

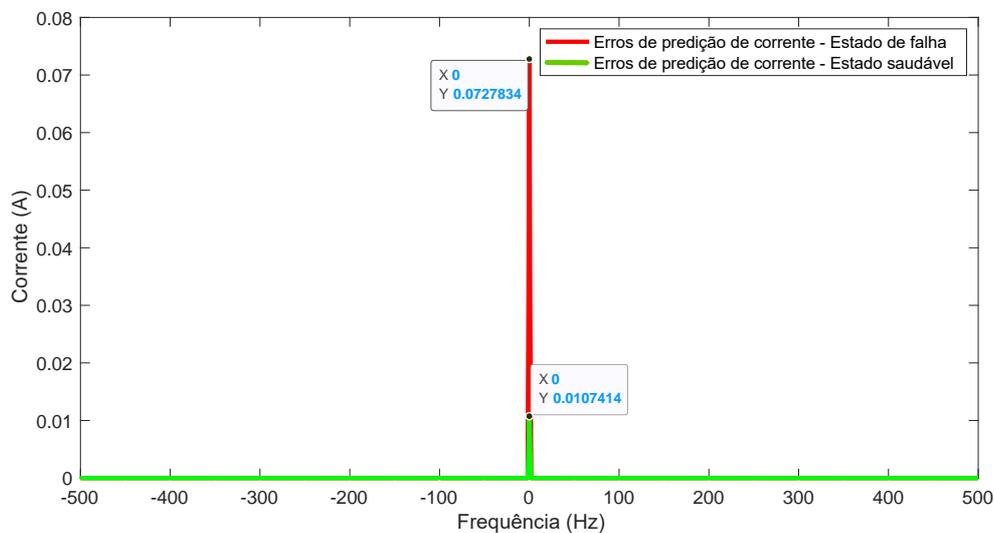


Figura 27 – Espectro dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , na situação saudável e com falha, com a máquina a funcionar como motor e com $i_{qs} = 4.8A$ a 1500 rpm.

Analisando a variação da amplitude da componente dc entre o estado saudável e o estado de falha, à medida que reduzimos o regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, conclui-se como é possível observar na Figura 28, que não existe uma mudança significativa no valor ao longo dos vários regimes e que a diferença entre

os dois estados é semelhante, variando perto de 16x, como se pode verificar na Tabela 12, entre o estado de falha e o estado saudável.

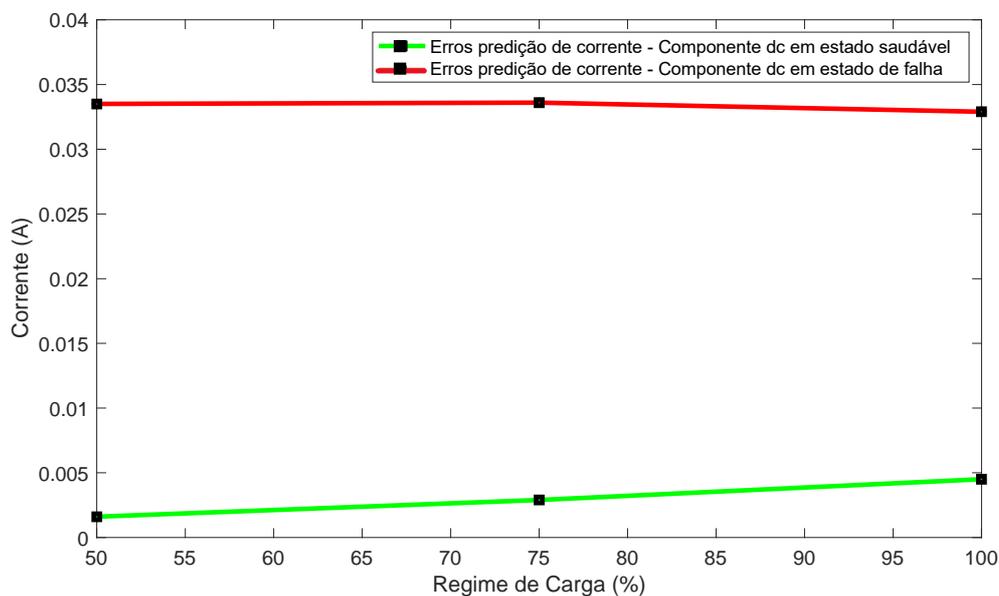


Figura 28 – Amplitude da componente dc dos erros de previsão de corrente, no subespaço dq , em função do regime de carga, com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm, em estado saudável e em estado de falha.

Tabela 12 – Variação da amplitude da componente dc dos erros de previsão de corrente, a diferentes regimes de carga e com a máquina a funcionar como motor a 750 rpm.

REGIME DE CARGA (%)	100	75	50
MÁQUINA SAUDÁVEL	0.004 A	0.003 A	0.002 A
MÁQUINA COM FALHA	0.033 A	0.034 A	0.034 A
Δ (DELTA)	+725%	+1033%	+1600%

Já quando se avalia o comportamento da amplitude da componente dc à medida que diminuimos a velocidade, conclui-se que quanto maior é o valor da velocidade maior também é a diferença entre os dois estados. Quando a máquina opera a velocidades baixas (100 rpm), a diferença de amplitudes entre os dois estados é reduzida, como é possível verificar na Figura 29. No entanto, pode-se concluir que a amplitude da diferença entre o estado de falha da máquina e o estado saudável, às várias velocidades simuladas, situa-se entre os +80% e +88%, tal como se observa na Tabela 13.

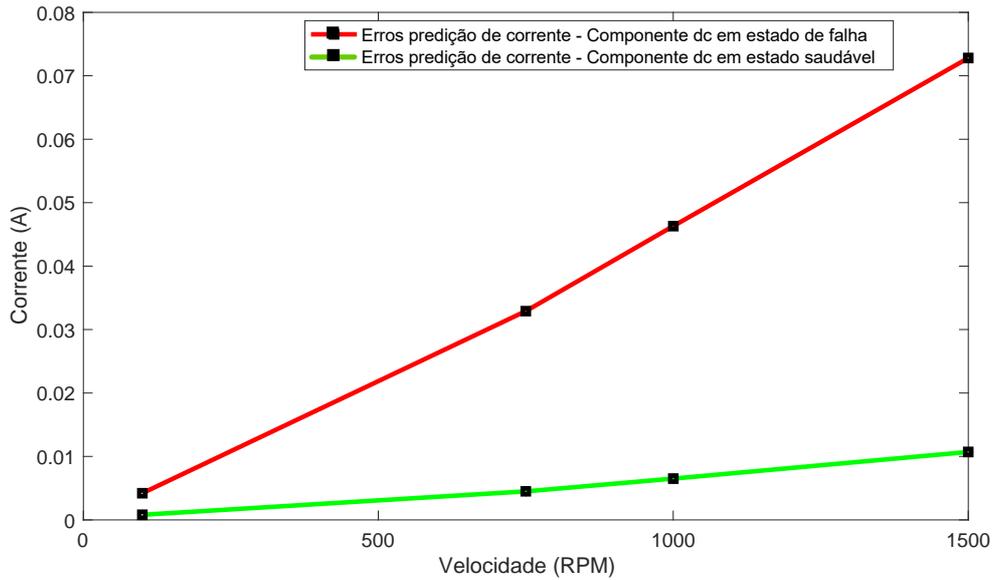


Figura 29 – Amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , em função da velocidade, com a máquina a funcionar como motor com $i_{qs} = 4.8$ A, em estado saudável e em estado de falha.

Tabela 13 – Variação da amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente nos dois estados, a diferentes velocidades.

VELOCIDADE (rpm)	100	750	1000	1500
MÁQUINA SAUDÁVEL	0.0008 A	0.004 A	0.006 A	0.011 A
MÁQUINA COM FALHA	0.004 A	0.033 A	0.046 A	0.073 A
Δ (DELTA)	+80.0%	+87.9%	+87.0%	+84.9%

Ao nível da influência da severidade da falha, conclui-se que existe um aumento de cerca de 55% da amplitude da componente dc dos erros de predição de corrente, quando comparamos a máquina com 1/3 de um polo desmagnetizado e com um polo completamente desmagnetizado. Na Figura 30, é possível validar esta análise.

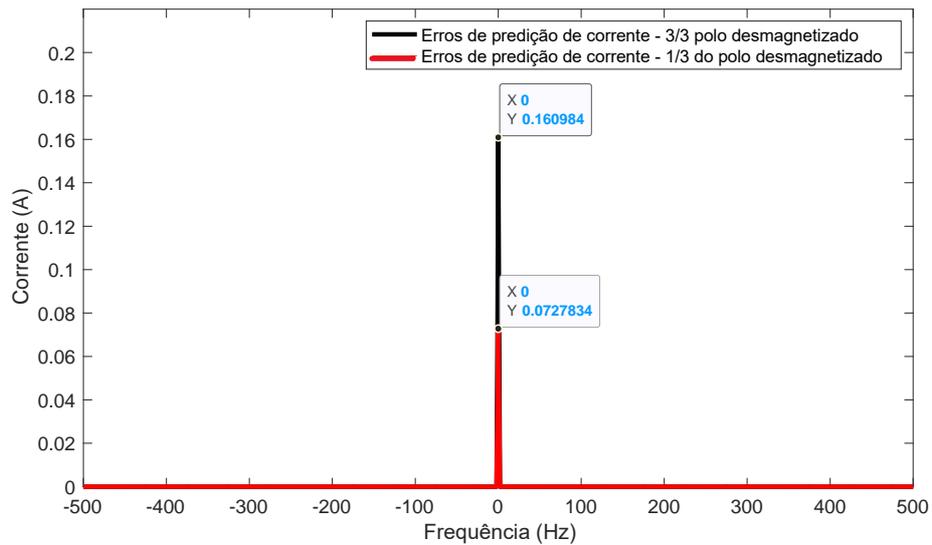


Figura 30 – Espectro dos erros de predição de corrente, no subespaço dq , com 1/3 do polo desmagnetizado e com 3/3 do polo desmagnetizado, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.

Por fim, para se tentar perceber o efeito da variação dos valores das indutâncias nas conclusões relacionadas com este método de diagnóstico, procedeu-se a uma outra simulação. Tendo em conta a primeira situação referida, máquina a funcionar como motor a 1500 rpm com $i_{qs} = 4.8$ A, simulou-se a máquina no estado saudável com uma variação do valor predefinido das indutâncias L_{dq} e L_{xy} em +20%, comparando com a máquina sujeita a falha (1/3 do polo desmagnetizado), sem alteração nos valores da indutância. Foi possível com esses dados, traçar o gráfico da Figura 31.

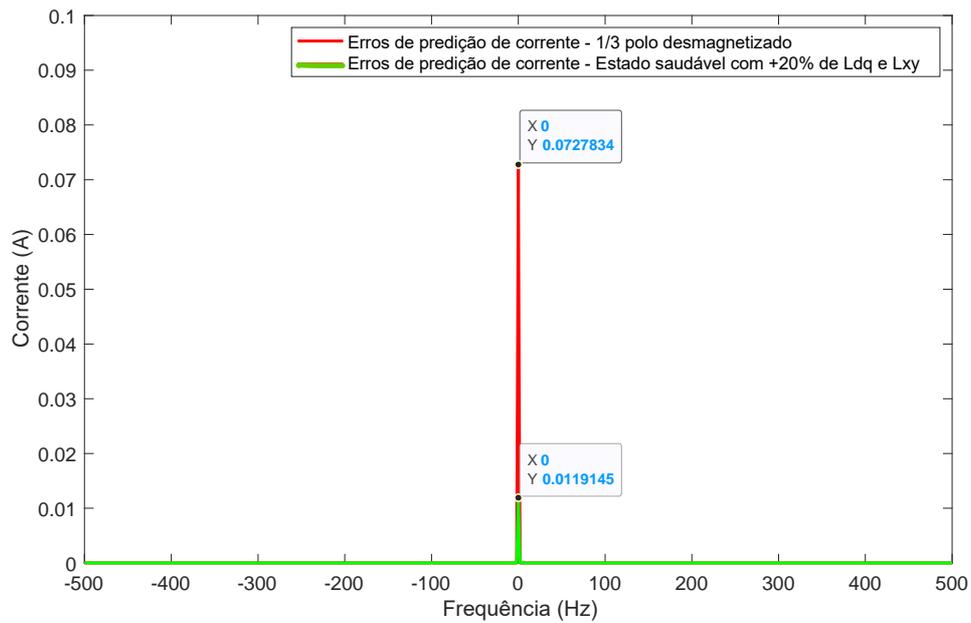


Figura 31 – Espectro dos erros de predição de corrente, com 1/3 do polo desmagnetizado e com alteração do valor de L_{dq} e L_{xy} em +20%, com a máquina a funcionar com $i_{qs} = 4.8$ A e a 1500 rpm.

Conclui-se que perante erros no valor das indutâncias L_{dq} e L_{xy} , neste caso com um acréscimo no valor de +20%, verifica-se o mesmo comportamento quando comparamos com a simulação com os valores de indutância iniciais. Existe uma pequena subida de amplitude da componente dc na máquina saudável, quando alteramos os valores das indutâncias, mas com pouco reflexo para a deteção da falha. Assim, este continua a ser um método de diagnóstico viável.

3.5. Comparação entre os Métodos de Diagnóstico Estudados

Os métodos de diagnóstico estudados no decorrer desta dissertação, podem ser resumidos tendo em conta a análise dos seguintes sinais:

- A – Tensão u_s
- B – Tensão u_{n1n2}
- C – Corrente i_{dq}
- D – Fluxo encadeado
- E – Erros de predição de corrente

Acerca do método A, foi possível concluir que embora não exista nenhum harmónico adicional em estado de falha, existe uma diminuição da amplitude da componente dc do sinal, sendo independente do regime de carga e dependente da velocidade.

Já o método B, apresenta-se como um dos métodos estudados que mais garantias oferece. Verifica-se uma clara queda na amplitude do terceiro harmónico no espectro da tensão de neutro, quando comparamos o estado saudável com o estado de falha, sendo praticamente independente da variação do regime de carga. Este método apresenta-se como dependente da velocidade de operação da máquina.

Relativamente ao método C, não foi possível obter conclusões concretas. Por contradição com algumas referências existentes, a análise das correntes no subespaço dq não demonstrou alterações significativas, motivado essencialmente pela estratégia de controlo que a máquina em estudo apresenta (PCC).

Na abordagem usando o fluxo encadeado, método D, concluiu-se que embora não exista o aparecimento de nenhum harmónico adicional, existe um ligeiro decréscimo na componente dc do sinal, sendo atenuado com a severidade da falha e independente da variação do regime de carga e da velocidade.

Por fim, no método E, a análise aos erros de predição de corrente, demonstrou ser também um método de diagnóstico fiável, tendo em conta os resultados em que nos baseamos. Os erros de predição de corrente no subespaço dq , nomeadamente a componente dc do sinal, apresenta uma clara diferença entre o estado saudável e de falha, sendo no estado de falha claramente superior, demonstrando – se independente do regime de carga e dependente da velocidade. Com a severidade da falha, conseguimos também

perceber à primeira vista, que existe um claro aumento da componente dc do sinal, bem como um eventual erro no valor das indutâncias não altera as conclusões obtidas.

De forma a resumir e enquadrar os vários métodos de diagnóstico estudados, à semelhança da análise realizada no Capítulo 1, tendo em conta a identificação dos métodos de diagnóstico acima mencionada, estabeleceram-se os critérios presentes na Tabela 14.

Tabela 14 – Critérios definidos para comparação dos diferentes métodos de diagnóstico abordados nas simulações realizadas.

CRITÉRIO	DESIGNAÇÃO
A1	O método não é invasivo
A2	O método é aplicável com a máquina em serviço
A3	O método foi validado experimentalmente
A4	O método é independente da temperatura
A5	O método é independente dos parâmetros do motor
A6	O método é independente da ligação dos enrolamentos do estator
A7	O método é independente do tipo de funcionamento da máquina
A8	O método é independente do regime de carga da máquina
A9	O método é independente da velocidade da máquina

Com isso, foi possível construir a Tabela 15, que sintetiza os métodos de diagnóstico estudados, tendo em conta os critérios estabelecidos na Tabela 14, sendo que o preenchimento tem em conta tanto os trabalhos de simulação realizados, bem como a análise do estado da arte. O símbolo (+) representa que cumpre o critério definido, o símbolo (–) representa que não cumpre o critério definido e o símbolo (*) representa que não foram apuradas conclusões acerca do mesmo.

Tabela 15 – Compilação dos métodos de diagnóstico abordados nas simulações realizadas.

CRITÉRIO									
MÉTODO	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
A	+	+	*	*	*	*	+	+	-
B	-	+	*	*	-	*	+	+	-
C	+	+	*	*	*	*	*	*	*
D	+	+	*	*	-	*	*	+	+
E	+	+	*	*	*	*	*	+	-

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

4.1. Conclusões

Esta dissertação apresenta um estudo de possíveis métodos de diagnóstico para deteção de falhas nos ímanes permanentes de uma máquina síncrona multifásica de ímanes permanentes. Surgiu com o intuito de colmatar algumas referências neste campo e de adicionar conhecimento a uma máquina já existente no LSEM.

O ponto de partida foi perceber que métodos de diagnóstico são propostos pelo estado de arte neste momento, onde foi possível concluir quais os métodos que se iriam simular na máquina em estudo, tentando aqui já propor metodologias que ainda não tenham sido referenciadas.

Após toda esta validação, surgiu a realização das simulações. Foi utilizado um modelo de co-simulação já criado anteriormente, modelo este com elevadas potencialidades, dado que a partir do mesmo é possível simular inúmeros estados da máquina e sujeito a variadíssimas falhas. Conclui-se aqui que o modelo é bastante válido, sendo um ferramenta de utilização no futuro para novas simulações.

Por outro lado, após a realização das várias simulações, foi possível organizar e analisar os dados que delas se obteve e assim poder concluir diversos pontos. Primeiramente, o facto de com a estratégia de controlo que esta máquina estava sujeita, preditiva de corrente, os resultados serem claramente influenciados, principalmente quando se analisam as correntes, sendo claro que para outras estratégias de controlo os resultados obtidos poderão ser outros.

No que diz respeito às conclusões quanto aos métodos de diagnóstico, foi possível concluir que dependendo do sinal analisado, poderão existir ou não variações com a alteração do regime de carga, velocidade e severidade da falha. Sucintamente, concluíram-se os seguintes pontos:

- Para a análise da tensão do estator existe uma diminuição da amplitude da componente dc em estado de falha, sendo este método independente do regime de carga e dependente da velocidade;

- Para a análise da tensão entre neutros, conclui-se que existe uma queda considerável do valor do terceiro harmónico em estado de falha, sendo este método independente do regime de carga e dependente da velocidade;
- Para a análise da corrente do estator no subespaço dq , foi possível concluir que não existem variações consideráveis quando se compara o estado normal da máquina com o estado de falha, principalmente motivado pela estratégia de controlo existente;
- Quanto ao fluxo encadeado, conclui-se que existe um ligeiro decréscimo da componente dc do sinal, sendo este método independente do regime de carga e da velocidade;
- Por fim, a análise aos erros de predição de corrente, demonstrou que existe uma queda considerável da componente dc do fasor espacial, demonstrando-se independente do regime de carga e dependente da velocidade.

Tendo em conta as variáveis que estes métodos estão sujeitos, pode-se concluir que dentro dos métodos de diagnóstico estudados, os que mais se enquadram e dão mais garantias, pelas razões enunciadas ao longo da dissertação são a **avaliação da tensão de neutro e os erros de predição de corrente**, para a máquina em estudo com controlo preditivo de corrente.

4.2. Sugestões para Trabalho Futuro

Como referido anteriormente, dada a escassez de referências neste tipo de máquinas, no que diz respeito às falhas por desmagnetização nos ímanes permanentes, este trabalho abre portas a uma investigação mais profunda na máquina em estudo, abordando sinais distintos na análise, como a tensão induzida, o binário, entre outros.

Por outro lado, a abordagem de métodos de diagnóstico baseados na injeção de sinais de alta frequência (corrente ou tensão), é uma das possibilidades que deve ser tida em conta, dado que são métodos que não necessitam de sensores externos. Também, a realização de mais simulações com a máquina a funcionar como gerador podem ajudar a validar ainda mais o presente estudo, bem como a associação das alterações detetadas nos vários sinais estudados, com a presença de outras falhas comuns e que também usam os mesmos indicadores aqui identificados para diagnóstico de outras falhas.

Juntamente, dado que existe no laboratório a máquina em questão, umas das abordagens a executar em breve, passará por pôr em prática as simulações realizadas e cruzar os dados obtidos nas duas, validando assim que aproximação podemos fazer com as conclusões que tiramos no decorrer deste trabalho.

Referências

- [1] S. Moon, J. Lee, H. Jeong, and S. W. Kim, ‘Demagnetization Fault Diagnosis of a PMSM Based on Structure Analysis of Motor Inductance’, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, pp. 3795–3803, Jun. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2530046.
- [2] Y. Gritli, A. Tani, C. Rossi, and D. Casadei, ‘Novel characterization of rotor magnet demagnetization in five-phase surface mounted permanent magnet machines’, in *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Tinos, Greece, Aug. 2017, pp. 147–152. doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062348.
- [3] J. I. Melecio, S. Djurović, and N. Schofield, ‘FEA model study of spectral signature patterns of PM demagnetization faults in synchronous PM machines’, *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 17, pp. 4127–4132, Jun. 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8048.
- [4] Y. Shi and J. Wang, ‘Continuous demagnetisation assessment for triple redundant nine-phase fault-tolerant permanent magnet machine’, *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 17, pp. 4359–4363, Jun. 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8177.
- [5] V. I. Patel, Jiabin Wang, and S. S. Nair, ‘Demagnetization Assessment of Fractional-Slot and Distributed Wound 6-Phase Permanent Magnet Machines’, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 6, pp. 1–11, Jun. 2015, doi: 10.1109/TMAG.2014.2380152.
- [6] Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, and C. Wang, ‘Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review’, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 10, p. 2116, May 2019, doi: 10.3390/app9102116.
- [7] C. Zhang, L. Luo, J. He, and N. Liu, ‘Analysis of the short-circuit fault characteristics of permanent magnet synchronous machines’, College of Electrical and Information Engineering Hunan University of Technology, 2015, pp. 1913–1917. doi: 10.1109/CAC.2015.7382816.
- [8] S. Saeid Moosavi, A. Djerdir, Y. AIT.Amirat, and D. A.Khaburi, Eds., ‘Demagnetization Fault Investigation in Permanent Magnet Synchronous Motor’, Piscataway, NJ, 2014, pp. 617–623. doi: 10.1109/PEDSTC.2014.6799448.
- [9] Y. Park *et al.*, ‘On-line Detection and Classification of Rotor and Load Defects in PMSMs based on Hall Sensor Measurements’, in *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, Sep. 2018, pp. 715–721. doi:

10.1109/ECCE.2018.8557899.

[10] J. Faiz and H. Nejadi-Koti, ‘Demagnetization Fault Indexes in Permanent Magnet Synchronous Motors—An Overview’, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 4, pp. 1–11, Apr. 2016, doi: 10.1109/TMAG.2015.2480379.

[11] H. Lee, H. Jeong, and S. W. Kim, ‘Diagnosis of Interturn Short-Circuit Fault in PMSM by Residual Voltage Analysis’, in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Jun. 2018, pp. 160–164. doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445207.

[12] J. A. Rosero, J. Cusido, A. Garcia, J. A. Ortega, and L. Romeral, ‘Study on the Permanent Magnet Demagnetization Fault in Permanent Magnet Synchronous Machines’, pp. 879–884, 2006, doi: 10.1109/IECON.2006.347598.

[13] C.-B. Bae, Y.-G. Kim, J.-M. Kim, and H.-C. Kim, ‘Vector control and harmonic ripple reduction with Independent Multi-phase PMSM’, in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, Sapporo, Japan, Jun. 2010, pp. 1056–1063. doi: 10.1109/IPEC.2010.5542092.

[14] M. Salehifar, M. Moreno-Eguilaz, V. Sala, and R. S. Arashloo, ‘Fault detection in multi-phase two-level inverters using Cauchy distribution of normalized phase currents’, in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria, Nov. 2013, pp. 761–766. doi: 10.1109/IECON.2013.6699230.

[15] Y. Wu, Z. Zhang, Y. Li, and Q. Sun, ‘Open-Circuit Fault Diagnosis of Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Based on Empirical Mode Decomposition Energy Entropy’, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 91137–91147, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3090814.

[16] A. Tani *et al.*, ‘Detection of magnet demagnetization and high-resistance connections in five-phase surface-mounted permanent magnet generators’, in *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Guarda, Portugal, Sep. 2015, pp. 487–493. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303734.

[17] M. Cheng, J. Hang, and J. Zhan, ‘Overview of fault diagnosis theory and method for permanent magnet machine’, *Chin. J. Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–36, Dec. 2015, doi: 10.23919/CJEE.2015.7933135.

[18] J. Hang, J. Zhang, M. Xia, S. Ding, and W. Hua, ‘Interturn Fault Diagnosis for

Model-Predictive-Controlled-PMSM Based on Cost Function and Wavelet Transform’, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 6, pp. 6405–6418, Jun. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2953269.

[19] P. F. Goncalves, S. Cruz, and 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. on Ind. Applicat.*, pp. 1–1, 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3120239.

[20] Y. Liang, ‘Diagnosis of inter-turn short-circuit stator winding fault in PMSM based on stator current and noise’, in *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Busan, South Korea, Feb. 2014, pp. 138–142. doi: 10.1109/ICIT.2014.6894927.

[21] W. Le Roux, R. G. Harley, and T. G. Habetler, ‘Detecting rotor faults in permanent magnet synchronous machines’, in *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003.*, Atlanta, GA, USA, 2003, pp. 198–203. doi: 10.1109/DEMPED.2003.1234573.

[22] J. D. McFarland and T. M. Jahns, ‘Investigation of the Rotor Demagnetization Characteristics of Interior PM Synchronous Machines During Fault Conditions’, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 50, no. 4, pp. 2768–2775, Jul. 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2294997.

[23] P. Zhou, D. Lin, Y. Xiao, N. Lambert, and M. A. Rahman, ‘Temperature-Dependent Demagnetization Model of Permanent Magnets for Finite Element Analysis’, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 1031–1034, Feb. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2011.2172395.

[24] G. Choi and T. M. Jahns, ‘Analysis and Design Recommendations to Mitigate Demagnetization Vulnerability in Surface PM Synchronous Machines’, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 54, no. 2, pp. 1292–1301, Mar. 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2775181.

[25] J. Hang, S. Ding, J. Zhang, M. Cheng, W. Chen, and Q. Wang, ‘Detection of Interturn Short-Circuit Fault for PMSM With Simple Fault Indicator’, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 4, pp. 1697–1699, Dec. 2016, doi: 10.1109/TEC.2016.2583780.

[26] K. M. Siddiqui, R. Ahmad, V. K. Giri, and K. Sahay, ‘Early, Demagnetization Diagnosis in Multiphase PMSM Machine by Advanced MCSA Technique’, in *Computing Algorithms with Applications in Engineering*, V. K. Giri, N. K. Verma, R. K.

Patel, and V. P. Singh, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 159–168. doi: 10.1007/978-981-15-2369-4_15.

[27] Y. Gritli, D. Casadei, A. Tani, C. Rossi, and G. Serra, ‘Validation of Rotor Magnets Demagnetization Detection in Six-Phase Surface-Mounted AC Permanent Magnet Synchronous Motors’, in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Jun. 2018, pp. 224–229. doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445267.

[28] D. D. Reigosa, F. Briz, P. García, J. M. Guerrero, and M. W. Degner, ‘Magnet Temperature Estimation in Surface PM Machines Using High-Frequency Signal Injection’, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 46, no. 4, pp. 1468–1475, Jul. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2049816.

[29] Arnold Magnetic Technologies, ‘Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets’. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N33UH-151021.pdf>

[30] P. F. C. Goncalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, ‘Multistage Predictive Current Control Based on Virtual Vectors for the Reduction of Current Harmonics in Six-Phase PMSMs’, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 2, pp. 1368–1377, Jun. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3055340.

[31] P. Gonçalves, S. Cruz, and A. Mendes, ‘Finite Control Set Model Predictive Control of Six-Phase Asymmetrical Machines—An Overview’, *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4693, Dec. 2019, doi: 10.3390/en12244693.

[32] P. F. C. Gonçalves, S. M. A. Cruz, and A. M. S. Mendes, ‘Design of a six-phase asymmetrical permanent magnet synchronous generator for wind energy applications’, *J. eng.*, vol. 2019, no. 17, pp. 4532–4536, Jun. 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8175.

[33] J. Faiz and E. Mazaheri-Tehrani, ‘Demagnetization Modeling and Fault Diagnosing Techniques in Permanent Magnet Machines Under Stationary and Nonstationary Conditions: An Overview’, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 53, no. 3, pp. 2772–2785, May 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2608950.

[34] C. Wang, M. Delgado Prieto, L. Romeral, Z. Chen, F. Blaabjerg, and X. Liu, ‘Detection of Partial Demagnetization Fault in PMSMs Operating Under Nonstationary Conditions’, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, Jul. 2016, doi: 10.1109/TMAG.2015.2511003.

Anexos

Anexo A – Imagens da Máquina Existente no LSEM



Figura 32 – Enrolamentos do estator da máquina em construção.



Figura 33 – Implementação dos ímãs permanentes na máquina.



Figura 34 – Rotor e veio da máquina.

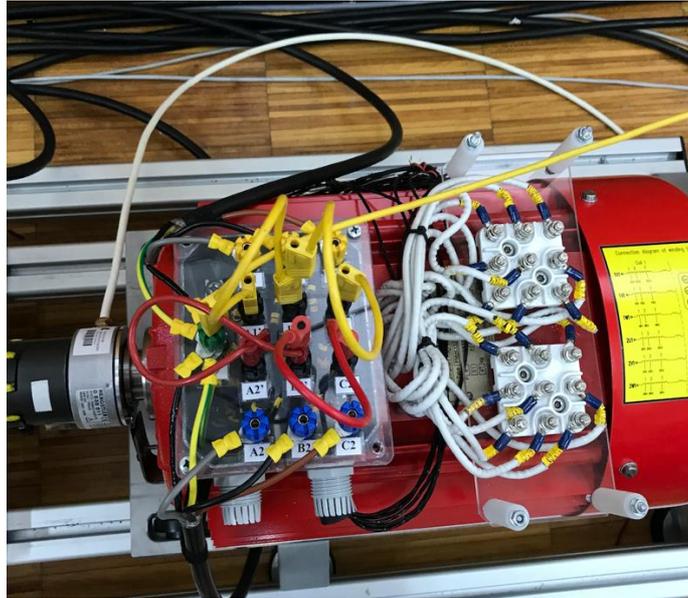


Figura 35 – Máquina no LSEM.

Anexo B – Parâmetros da Máquina

Os parâmetros do M-PMSM em estudo são os listados na Tabela 16:

Tabela 16 – Parâmetros do M-PMSM em estudo controlado com uma estratégia de controlo preditiva de corrente.

Parâmetro	Valor
Potência nominal (P_s)	4 (kW)
Tensão nominal (U_{dc})	340 (V)
Corrente nominal (I_s)	4.8 (A)
Pares de polos (p)	2
Velocidade nominal (n_m)	1500 (rpm)
Ranhuras por polo/fase (q)	2
Binário Nominal (T_n)	26.8 (N.m)
Eficiência (η)	95 %
Fases (m)	6
Passo da bobina τ_c	$5\pi/6$ (rad)
Indutância em dq (L_{dq})	52.31 (mH)
Indutância em xy (L_{xy})	1.80 (mH)
Indutância em $z12$ (L_{z12})	7.04 (mH)