

Desenvolvimento de um Sistema Inteligente para Diagnóstico Avançado de Avarias no Estator de Motores Síncronos de Ímanes Permanentes Diretamente Ligados à Rede

**Development of an Intelligent System for Advanced Fault Diagnosis
in the Stator of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors**

Maria Teresa Rei Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2^o ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António João Marques Cardoso
Co-orientador: Doutor Khaled Laadjal

Março de 2025

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, Maria Teresa Rei Santos, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12408 de Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 19 /03 /2025

(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente
assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)

Folha em branco

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Cristina, ao meu pai, José Francisco, à minha irmã Maria Francisca, à minha sobrinha, Maria Benedita e ao meu namorado, Luís Andrade.

Folha em branco

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor António João Marques Cardoso, pela supervisão do meu trabalho, proporcionando os meios e condições para a realização do mesmo.

Em segundo lugar, quero expressar a minha gratidão ao Doutor Khaled Laadjal pelo apoio incansável e pela disponibilidade constante ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Adicionalmente, quero agradecer também ao CISE - Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos, pelos meios e auxílio que me foram disponibilizados.

Por fim, um agradecimento a todos os meus amigos, à minha família e namorado que me apoiaram e incentivaram para a realização e conclusão desta etapa, um obrigado.

Folha em branco

Resumo

Os motores síncronos de ímanes permanentes, diretamente ligados à rede (LS-PMSMs) foram desenvolvidos para atender a requisitos rigorosos de eficiência e são capazes de arrancarem, diretamente a partir da rede elétrica, tornando-os substitutos ideais para motores de indução. Devido ao seu uso generalizado e importância em aplicações industriais, os LS-PMSMs têm sido foco de avanços tecnológicos significativos. No entanto, as avarias no enrolamento do estator, responsáveis por aproximadamente 36% das avarias nos motores de corrente alternada, continuam a ser uma preocupação crítica, particularmente, as avarias de curto-circuito entre espiras (ITSCF). Estas avarias estão entre as avarias mais prejudiciais no LS-PMSM, podendo levar a interrupções operacionais graves se não forem detetadas.

Em resposta a este desafio, este estudo apresenta uma metodologia inovadora de diagnóstico de avarias com o objetivo de mitigar os riscos associados aos ITSCFs. A abordagem proposta usa uma técnica baseada em sinais para analisar grandezas elétricas, como correntes de fase do estator, utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Além disso, é desenvolvida uma estratégia de detecção de avarias em tempo real, que utiliza o método Short-Time Least Square Prony's (STLSP) para estimar as componentes simétricas nas correntes e tensões dos enrolamentos do estator. Esta estrutura de diagnóstico robusta e abrangente detecta e compensa, efetivamente, os ITSCFs, mesmo nas fases iniciais de desenvolvimento da avaria ou em diferentes cenários de avaria entre fases.

Dois novos indicadores de avaria - Fator de tensão zero (ZVF) e Fator de impedância zero (ZIF) - são introduzidos, com resultados experimentais confirmando a sua elevada sensibilidade às condições de avaria. Entre estes, o ZVF demonstrou uma fiabilidade superior numa ampla gama de cenários operacionais. Testes extensivos sob diferentes severidades de avarias e condições de carga validam a eficácia do método proposto, evidenciando as suas capacidades aprimoradas de detecção de avarias. Esta pesquisa melhora, significativamente, a fiabilidade e a integridade operacional dos LS-PMSMs em aplicações de elevada potência, avançando as técnicas de detecção de avarias em motores e contribuindo para um melhor desempenho em ambientes industriais críticos.

Palavras-chave

Avaria de curto-circuito entre espiras; Motores síncronos de ímanes permanentes, diretamente ligados à rede (LS-PMSMs); Transformada Rápida de Fourier (FFT); Short-Time Least Square Prony's (STLSP); Componentes Simétricas; Fator de tensão zero (ZVF); Fator de impedância zero (ZIF)

Folha em branco

Abstract

Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors (LS-PMSMs) have been developed to meet stringent efficiency requirements and are capable of starting directly connected to the grid, making them ideal replacements for induction motors. Due to their widespread use and importance in industrial applications, LS-PMSMs have been the focus of significant technological advancements. Nevertheless, stator winding faults accounting for approximately 36% of AC motor failures remain a critical concern, particularly inter-turn short circuit faults (ITSCFs). These faults are among the most hazardous LS-PMSM failures, potentially leading to severe operational disruptions if left undetected.

In response to this challenge, this study presents an innovative fault diagnosis methodology aimed at mitigating the risks associated with ITSCFs. The proposed approach employs a signal-based technique for analyzing electrical quantities, such as stator-phase currents, using the Fast Fourier Transform (FFT). Additionally, a real-time fault detection strategy is developed, leveraging the Short-Time Least Squares Prony's (STLSP) method to estimate the symmetrical components in the stator windings currents and voltages. This robust and comprehensive diagnostic framework effectively detects and compensates for ITSCFs, even in the early stages of fault development or in different fault scenarios across phases.

Two novel fault indicators — Zero Voltage Factor (ZVF) and Zero Impedance Factor (ZIF) — are introduced, with experimental results confirming their high sensitivity to fault conditions. Among these, ZVF demonstrated superior reliability across a wide range of operating scenarios. Extensive testing under varying fault severities and load conditions validates the efficacy of the proposed method, showcasing its enhanced fault detection capabilities. This research significantly improves the reliability and operational integrity of LS-PMSMs in high-power applications, advancing motor fault detection techniques and contributing to improved performance in critical industrial environments.

Keywords

Inter-Turn Short-Circuit Fault, Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors (LS-PMSMs), Fast Fourier Transform (FFT), Short-Time Least Square Prony's (STLSP), Symmetrical Components, Zero Voltage Factor (ZVF), Zero Impedance Factor (ZIF)

Folha em branco

Índice

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Motor Síncrono de Ímanes Permanentes com Arranque Direto à Rede (LS-PMSM)	2
1.1.1 Descrição do LS-PMSM	2
1.1.2 Princípio de funcionamento do LS-PMSM	4
1.1.3 Modelo Matemático	4
1.1.4 Análise comparativa: LS-PMSM e IM	6
1.2 Avarias	7
1.2.1 Diferentes tipos de avarias no LS-PMSM	7
1.3 Diagnóstico de avarias	9
1.3.1 Diagnóstico de avarias em técnicas baseadas em modelo	10
1.3.2 Diagnóstico de avarias baseados em métodos de processamento de sinais ...	11
1.3.3 Diagnóstico de avarias baseados em métodos de Inteligência Artificial	12
Capítulo 2	14
Método proposto e diagnóstico do LS-PMSM com a presença de avarias no estator através de simulação	14
2.1 Modelo de simulação	14
2.1.1 Comportamento do LS-PMSM em condição de funcionamento normal	15
2.1.2 Comportamento do LS-PMSM em condição de funcionamento em avaria ...	17
2.2 Método Proposto	20
2.2.1 Transformada de Fourier (FFT)	20
2.2.2 FFT da corrente I_a	22
2.2.3 Método de Short-time Least Square Prony's	25
2.2.4 Transformada de Fortescue	32
2.2.5 Resultados obtidos em simulação com o Método proposto	34
Capítulo 3	38
Diagnóstico do LS-PMSM com a presença de avarias no estator através de estudos experimentais	38
3.1 Configuração experimental	38
3.2 Comportamento do LS-PMSM em funcionamento normal e defeituoso	41
3.2.1 Resultados obtidos através do FFT na corrente I_a	42
3.2.1.1 Análise da corrente de sequência zero	45
3.2.2 Resultados obtidos através do Método de <i>Prony</i>	48
Capítulo 4	56
Conclusão e sugestões para trabalhos futuros	56
4.1 Conclusão	56
4.2 Sugestões para trabalhos futuros	57
Bibliografia	58

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Secção transversal de um motor trifásico LS-PMSM [19].	3
Figura 1.2 - Configurações dos PM: (a) Circunferencial-tipo, (b) Radial-tipo, (c) J-tipo, (d) U-tipo, e) V-tipo, f) W-tipo [24].	3
Figura 1.3 - (a) Desequilíbrio resistivo; (b) Curto-circuito entre espiras; (c) Avaria fase aberta [41].	8
Figura 1.4 - Descamação da superfície de um rolamento [45].	8
Figura 1.5 - Tipos de avarias no LS-PMSM.	9
Figura 1.6 - Métodos de diagnóstico.	10
Figura 1.7 - Estrutura da abordagem de diagnóstico baseado em modelo.	11
Figura 1.8 - Classificação das técnicas de processamento de sinal.	12
Figura 1.9 - Métodos de diagnóstico de ITSCF baseados em IA.	13
Figura 2.1 - Modelo computacional utilizado na simulação em Simulink do LS-PMSM.	14
Figura 2.2 - Velocidade do motor para funcionamento normal, com diferentes cargas.	16
Figura 2.3 - Diferentes cargas aplicadas no motor em funcionamento normal.	16
Figura 2.4 - Corrente do motor para diferentes cargas, em funcionamento normal.	17
Figura 2.5 - Tensão do motor em funcionamento normal.	17
Figura 2.6 - Velocidade do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.	18
Figura 2.7 - Binário do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.	18
Figura 2.8 - Corrente do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.	19
Figura 2.9 - Tensão do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.	19
Figura 2.10 - Diagrama de entrada-saída da FFT.	21
Figura 2.11 - Espectro da corrente do estator para funcionamento normal.	22
Figura 2.12 - Espectro das correntes do estator para curto-circuito entre 7 espiras.	22
Figura 2.13 - Espectro das correntes do estator para curto-circuito entre 14 espiras.	23
Figura 2.14 - Espectro das correntes do estator para curto-circuito entre 30 espiras.	23
Figura 2.15 - Gráfico da evolução da avaria para o terceiro harmónico e diferentes níveis de severidade.	24
Figura 2.16 - Sinal gerado no domínio do tempo.	27
Figura 2.17 - Espectro gerado ($F_s=60\text{Hz}$).	28

Figura 2.18 - Frequência e amplitude estimadas pelo método de Prony.....	29
Figura 2.19 - Sinal de regime transitório.	29
Figura 2.20 - Frequência e amplitude estimadas do sinal de regime transitório.....	30
Figura 2.21 - Padrão temporal do sinal gerado.	30
Figura 2.22 - Espectro gerado pelo sinal.	31
Figura 2.23 - Diferentes frequência e amplitude estimadas do sinal gerado.	31
Figura 2.24 - Descrição da técnica on-line proposta.	33
Figura 2.25 - Impedância do enrolamento do estator na fase a, em funcionamento normal com diferentes cargas e com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.....	34
Figura 2.26 - Impedância do enrolamento do estator na fase b, em funcionamento normal com diferentes cargas e com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.....	34
Figura 2.27 - Impedância do enrolamento do estator na fase c, em funcionamento normal com diferentes cargas e com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.....	35
Figura 2.28 - Indicador NCF para funcionamento normal e funcionamento com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.	35
Figura 2.29 - Indicador ZVF para funcionamento normal e funcionamento com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.	36
Figura 3.1 - Bancada de testes utilizada.	39
Figura 3.2 - Esquema de enrolamento de fase por fase do LS-PMSM utilizado.	40
Figura 3.3 - Corrente da fase-a com diferentes severidades de curto-circuito entre espiras.	41
Figura 3.4 - Espectro das correntes do estator para diferentes níveis de severidade do curto-circuito e para uma carga 0 Nm.	42
Figura 3.5 - Espectro das correntes do estator para diferentes níveis de severidade do curto-circuito e para uma carga 5 Nm.	42
Figura 3.6 - Gráfico da evolução da avaria para as frequências 25, 75 e 250 Hz com diferentes níveis de severidades.....	44
Figura 3.7 - Gráfico da evolução da avaria para as frequências 25, 75 e 250 Hz com diferentes níveis de severidades.....	44
Figura 3.8 - Descrição da obtenção da ZSC.	45
Figura 3.9 - Gráfico espectral associado aos harmônicos da corrente de sequência zero para diferentes severidades, carga 0 Nm.	45
Figura 3.10 - Gráfico espectral associado aos harmônicos da corrente de sequência zero para diferentes severidades, carga 5 Nm.	46

Figura 3.11 - Gráfico da evolução da avaria no Terceiro Harmónico para a corrente de sequência zero.....	47
Figura 3.12 - Gráfico da evolução da avaria no Terceiro Harmónico para a corrente de sequência zero.....	47
Figura 3.13 - Descrição do método proposto para a extração dos indicadores.	49
Figura 3.14 - A evolução temporal dos indicadores propostos: (a) ZVF; (b) NVF; (c) ZIF com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.	50
Figura 3.15 - A evolução temporal de (a) ZVF; (b) NVF; (c) ZIF com a presença de 13 espiras em curto-circuito-.....	52
Figura 3.16 - Evolução temporal das impedâncias de fase: (I) para diferentes severidades; (II) 13 espiras em curto-circuito em diferentes fases.	52
Figura 3.17 - Evolução temporal de (a) ZVF; (b) ZIF com a presença de 13 espiras em curto-circuito com diferentes valores de carga.....	54
Figura 3.18 - Evolução temporal das impedâncias de fase com a presença de 13 espiras em curto-circuito com diferentes valores de carga.....	54

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Parâmetros de simulação do LS-PMSM.....	15
Tabela 2.2 - Valores obtidos no FFT.....	24
Tabela 2.3 - A amplitude e frequência estimadas pelos métodos de Prony e FFT.	28
Tabela 2.4 - Valores quantitativos dos indicadores propostos de avaria com 0 Nm.	36
Tabela 2.5 - Valores quantitativos dos indicadores propostos com 7 Nm.....	37
Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do LS-PMSM.....	39
Tabela 3.2 - Valores obtidos através dos espectros da FFT.....	43
Tabela 3.3 - Valores obtidos através dos espectros da FFT.....	43
Tabela 3.4 - Valores obtidos através dos espectros da FFT de I_o	46
Tabela 3.5 - Análise quantitativa dos indicadores propostos no estado saudável e com avaria, com diferentes níveis de severidade curto-circuito entre espiras.	53
Tabela 3.6 - Análise quantitativa dos indicadores propostos no estado saudável e de avaria em diferentes fases do LS-PMSM.	53
Tabela 3.7 - Análise quantitativa dos indicadores propostos no estado saudável e de avaria sob condições de carga variáveis.....	55

Folha em branco

Lista de Acrónimos

FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
FT	<i>Fortescue Transform</i> – Transformada de Fortescue
IM	<i>Induction Motor</i> – Motor de Indução
ITSCF	<i>Inter-Turn Short Circuit Fault</i> – Avaria de Curto-Circuito entre Espiras
LS-PMSM	<i>Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor</i> – Motor Síncrono de Ímanes Permanentes, diretamente ligado à Rede
NCF	<i>Negative Current Factor</i> – Fator de Corrente Negativo
NVF	<i>Negative Voltage Factor</i> – Fator de Tensão Negativo
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> – Motor Síncrono de Ímanes Permanentes
STLSP	<i>Short-Time Least Square Prony's</i>
ZCF	<i>Zero Current Factor</i> – Fator de Corrente Zero
ZIF	<i>Zero Impedance Factor</i> – Fator de Impedância Zero
ZSC	<i>Zero Sequence Current</i> – Corrente de Sequência Zero
ZVF	<i>Zero Voltage Factor</i> – Fator de Tensão Zero

Folha em branco

Capítulo 1

1. Introdução

Presentemente, tem-se observado um rápido aumento das aplicações das máquinas elétricas, não só em áreas como a automação industrial e a robótica, mas também em áreas que remetem a todo o tipo de transportes (comboios, navios, aviões, etc...) e na produção de energia de fontes renováveis.

As máquinas elétricas podem ser divididas em máquinas rotativas e estáticas. A sua classificação reflete-se na função que exercem. A máquina rotativa pode transformar energia mecânica em energia elétrica e é denominada de gerador. Por outro lado, se transformar energia elétrica em energia mecânica denomina-se de motor [1], [2]. A máquina estática refere-se aos transformadores que, por sua vez, transformam tensão ou corrente elétrica. As máquinas rotativas podem ainda subdividir-se em máquinas síncronas ou máquinas assíncronas, ambas alimentadas por corrente alternada [3], [4]. Ambas as máquinas rotativas são constituídas por um estator (parte fixa) e um rotor (parte móvel), no entanto a principal diferença entre estas reside no facto de que na máquina síncrona o rotor gira a uma velocidade constante e em sintonia com a frequência de alimentação enquanto o rotor da máquina assíncrona gira a uma velocidade inferior à velocidade do campo magnético rotativo do estator [5].

Atualmente, os motores mais utilizados na indústria incluem os motores de indução (IM) e os motores síncronos de ímanes permanentes (PMSM) [6], [7]. Os motores de indução destacam-se pelo seu baixo custo e pela elevada robustez perante perturbações, enquanto que os PMSMs contribuem com um elevado rendimento e eficiência [8], [9]. Contudo, com os avanços na tecnologia, emerge uma alternativa viável ao IM e ao PMSM, o motor síncrono de ímanes permanentes com arranque direto à rede (LS-PMSM). O LS-PMSM combina a eficiência dos ímanes permanentes com a capacidade de arranque direto, dispensando a necessidade de conversores de potência e oferecendo melhor desempenho em métricas como eficiência, binário e densidade de potência [10], [11].

Todavia, como outra máquina elétrica, o LS-PMSM pode sofrer avarias ao longo do tempo, como avarias nas chumaceiras, curto-circuitos entre espiras no estator e, em casos mais específicos, avarias nos ímanes do rotor [12]. Estas avarias podem ser resultado de períodos prolongados de operação, ambientes desfavoráveis ou condições de sobrecarga, o que acelera o desgaste dos componentes do motor [13], [14]. Dado ao aumento dos motores síncronos de ímanes permanentes com arranque direto à rede, a deteção precoce, a identificação, o isolamento e a tolerância a falhas tornam-se fundamentais para a confiabilidade e continuidade do sistema [15].

Neste sentido, o presente trabalho foca-se no estudo do comportamento do LS-PMSM perante avarias no estator, como o curto-circuito entre espiras, por meio de uma técnica de diagnóstico *on-line* abrangente e eficiente. O objetivo principal é detetar a falha numa fase inicial e avaliar o comportamento da máquina em condições normais e em condições de avaria, proporcionando uma visão clara sobre a integridade do sistema e a eficácia do diagnóstico.

Este trabalho está estruturado em quatro partes distintas. No Capítulo 1, são abordados os aspetos construtivos do motor, o seu princípio de funcionamento, as suas diferenças relativas ao motor de indução, os diversos tipos de avarias a que o motor pode ser sujeito e os diferentes métodos de diagnóstico.

No capítulo 2, é explicitado o método de diagnóstico proposto para o motor em estudo. Em seguida, é apresentado o modelo de simulação implementado em ambiente computacional, acompanhado dos resultados obtidos tanto para o motor em condição normal quanto em situação de avaria. Por fim, realiza-se uma análise comparativa detalhada entre os resultados obtidos nos dois cenários.

No capítulo 3, detalham-se os estudos experimentais relacionados com o diagnóstico de avarias no estator. Primeiramente, é descrita a configuração da montagem experimental e em seguida são representados os comportamentos do motor em condições normais e defeituosas. Adicionalmente, são apresentados os diferentes parâmetros e indicadores para realizar o diagnóstico. Por fim, realiza-se uma avaliação e conclusão dos resultados obtidos.

No capítulo 4, efetua-se um balanço do trabalho conduzido, destacando-se as conclusões finais. Neste capítulo, são sugeridos também possíveis trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

1.1 Motor Síncrono de Ímanes Permanentes com Arranque Direto à Rede (LS-PMSM)

1.1.1 Descrição do LS-PMSM

Os motores de corrente alternada podem ser divididos em dois tipos de categorias, motores de indução e motores de ímanes permanentes [16]. Os motores de indução são os motores mais comuns utilizados a nível industrial como também doméstico devido à sua simplicidade, baixa manutenção e à possibilidade de se poderem ligar diretamente a uma fonte de alimentação de corrente alternada [17]. Por outro lado, podemos referir os motores de ímanes permanentes que se apresentam como uma solução alternativa aos IM devido à sua elevada eficiência e desempenho. No entanto, estes necessitam de inversores para o arranque e, juntamente com o valor dos ímanes permanentes, tornam-se pouco económicos [18], [19]. Tendo isto em conta, foram introduzidos no mercado os LS-PMSM que se baseiam, tecnicamente, na junção de um

motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM) com um motor de indução (IM) [20]. No caso do LS-PMSM, ilustrado na Figura 1.1, este tem a capacidade de se ligar diretamente à rede elétrica como um IM e, ao mesmo tempo, apresenta o mesmo desempenho que um PMSM [18], [21], [22].

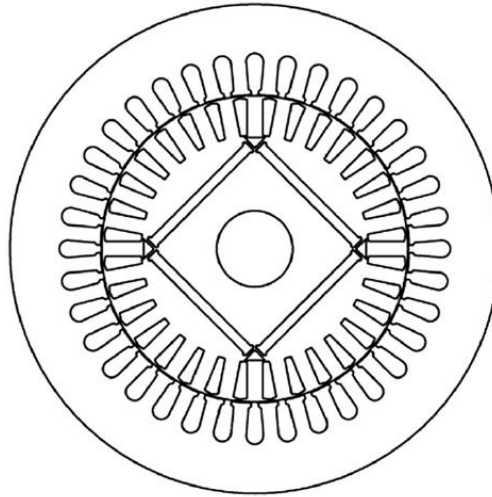


Figura 1.1 - Secção transversal de um motor trifásico LS-PMSM [19].

O motor LS-PMSM é constituído por um estator monofásico ou polifásico e por um rotor híbrido de gaiola de esquilo [22]. Ambos estes componentes são constituídos por finas chapas de material ferromagnético que possuem ranhuras de forma a introduzir-se o enrolamento estatórico e rotórico. Na estrutura do rotor encontram-se inseridos os ímanes permanentes. Conforme o posicionamento destes ímanes e da geometria e local dos polos por estes gerados, podemos ter diferentes tipologias do mesmo motor, como podemos observar na Figura 1.2 [18], [19], [23].

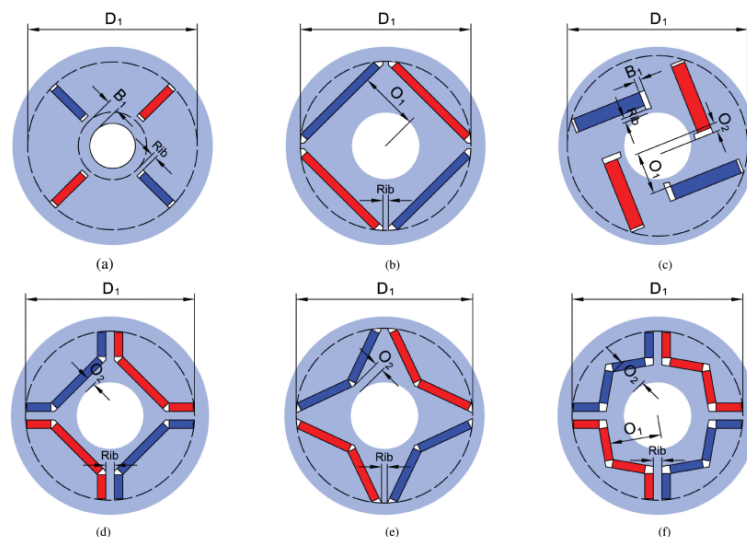


Figura 1.2 - Configurações dos PM: (a) Circunferencial-tipo, (b) Radial-tipo, (c) J-tipo, (d) U-tipo, (e) V-tipo, (f) W-tipo [24].

Respetivamente, as duas primeiras configurações, (a) e (b), envolvem ímanes magnetizados circumferencialmente e radialmente. Devido à sua simplicidade, são ambas as topologias mais utilizadas. Todas as outras configurações, são variações das duas primeiras. Com mais algum detalhe é possível referir que as topologias (d), (e), (f) têm disposições muito complexas tornando-as difícil de produzir. Uma das características importantes neste motor é a profundidade das ranhuras do rotor para conseguir superar o binário que é gerado pelos ímanes permanentes no arranque do motor. Desta forma, a predisposição das ranhuras permitem que o rotor consiga atuar de forma eficiente, facilitando a produção de torque para o início da rotação.

1.1.2 Princípio de funcionamento do LS-PMSM

Num período transitório, o arranque do motor comporta-se como o de um motor de indução devido à resultante de dois componentes do binário, o binário de gaiola e o binário dos ímanes permanentes [19], [25], [26]. Através do binário produzido pela gaiola de indução do rotor, o LS-PMSM tenta deslocar a carga exercida no motor até uma velocidade próxima da velocidade síncrona. Se a carga em movimento e a inércia estiverem dentro dos limites que o motor pode suportar, o binário dos ímanes permanentes do rotor é suficiente para ocorrer a sincronização, ou seja, o rotor desloca-se à mesma velocidade que o campo magnético girante [18], [23]. No estado síncrono, nenhuma corrente de Foucault flui para as barras da gaiola, exceto as correntes de campo harmónicas e dois componentes de binário, uma componente de binário de relutância e uma componente de binário síncrono, que provocam o movimento do motor [19]. Além disso, em regime síncrono, como deixam de ser induzidas correntes no rotor, as perdas totais e a temperatura de funcionamento do motor é menor [25].

1.1.3 Modelo Matemático

Um motor síncrono de ímanes permanentes com arranque direto à rede (LS-PMSM) combina características de motores de indução e de motores síncronos de ímanes permanentes [19]. O LS-PMSM arranca utilizando a tensão da rede e sincroniza-se com a frequência de alimentação através dos ímanes incorporados, garantindo uma elevada eficiência e um desempenho robusto com aplicações industriais [27]. O modelo elétrico, que incorpora os enrolamentos do estator e os ímanes permanentes, é descrito pelas seguintes equações diferenciais que regem a tensão, a corrente e as ligações de fluxo magnético.

Considerando os circuitos do estator e do rotor, obtêm-se as seguintes equações [25]:

$$[V_{abc}^s] = [r_s] \cdot [i_{abc}^s] + \frac{d}{dt} [\Psi_{abc}^s] + [e_{abc}] \quad (1.1)$$

$$[V_{abc}^r] = [r_r'] \cdot [i_{abc}^r] + \frac{d}{dt} [\Psi_{abc}^r] = 0 \quad (1.2)$$

A velocidade mecânica baseada no equilíbrio mecânico do veio é dada por [19], [25]:

$$\omega_m = \int \frac{T_{em} - T_l - T_{fv} - B\omega}{J} \quad (1.3)$$

Matrizes do estator e do rotor:

$$[r_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$[r_r'] = \begin{bmatrix} r_r' & 0 & 0 \\ 0 & r_r' & 0 \\ 0 & 0 & r_r' \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

A força contra-eletromotriz é definida por [25]:

$$[e_{abc}] = \sqrt{2} \cdot k\Psi_{pm} \cdot \omega_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

O modelo dinâmico de uma LS-PMSM representado num referencial de quadratura-direta (dqO) simplifica a análise, transformando as grandezas trifásicas em duas componentes ortogonais.

Desta forma, é possível escrever as equações das tensões nos enrolamentos do estator:

$$V_d = R_s I_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega \lambda_q \quad (1.7)$$

$$V_q = R_s I_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - \omega \lambda_d \quad (1.8)$$

Semelhantemente, conseguimos obter as equações de ligação de fluxo:

$$\lambda_d = L_d I_d + \lambda_f \quad (1.9)$$

$$\lambda_q = L_q I_q \quad (1.10)$$

A equação seguinte representa o binário eletromagnético:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (1.11)$$

Deste modo, a equação mecânica traduz-se como:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_e - T_L \quad (1.12)$$

1.1.4 Análise comparativa: LS-PMSM e IM

Ao comparar o motor síncrono de ímãs permanentes com arranque direto à rede (LS-PMSM) com o motor de indução (IM), verificamos diferenças significativas nas suas estruturas e no modo de operação de ambos, que impactam, diretamente, o seu desempenho e a sua eficiência [28]. O LS-PMSM combina características de motores síncronos e de indução, onde utiliza ímãs permanentes no rotor e uma gaiola semelhante à de um motor de indução, permitindo que, inicialmente, o LS-PMSM opere como um IM e, após atingir a velocidade próxima da síncrona, funcione como um motor síncrono. Por outro lado, o motor de indução depende, exclusivamente, do princípio de indução eletromagnética para gerar binário [29], [30].

Entre as diversas diferenças destes motores podemos referir o arranque, a operação sem deslizamento, o desempenho em regime permanente e o fator de potência [31]. A nível do arranque, o motor de indução é otimizado por um arranque direto à rede e, por essa razão, tem uma resposta inicial mais rápida possibilitando uma aceleração constante. Além disso, com a ausência dos ímãs permanentes e apenas com o processo de indução, é proporcionado um arranque mais eficiente [32]. Por outro lado, devido à presença de ímãs permanentes no rotor, é gerado no LS-PMSM, um binário de travagem que introduz resistência no início da sua aceleração e, ao mesmo tempo, este motor também sofre pela dependência da tensão de entrada e do momento de inércia do veio [33]. Todas estas componentes provocam um arranque mais lento e uma possível falha e dificuldade na sincronização [34], [35], [36]. Relativamente ao regime permanente, o LS-PMSM atinge o estado de sincronismo onde opera sem deslizamento ($s=0$), evitando-se portanto perdas no rotor, pois já não há a necessidade de induzir correntes neste para gerar binário e eliminam-se os problemas associados com o deslizamento, resultando na melhoria da eficiência e do fator de potência. Ao mesmo tempo, com a redução da corrente do estator, devido à diminuição da corrente de magnetização, as perdas de cobre também diminuem no LS-PMSM e obtém-se um aumento da densidade do binário [37]. Todavia, o motor de indução funciona com um pequeno deslizamento, pois é necessário para a contínua produção de binário, no entanto este deslizamento causa perdas no rotor devido à circulação de correntes induzidas, que aquecem o motor e reduzem a sua eficiência [18], [32], [38]. Com relação ao fator de potência, no LS-PMSM é mais elevado, uma vez que este motor não necessita de uma elevada corrente reativa para magnetizar o rotor pois tem o apoio dos ímãs permanentes. Ao contrário, o IM tem um fator de potência inferior, visto que requer uma corrente reativa de magnetização maior, reduzindo a sua eficiência [18]. Por fim, as perdas do cobre do estator e da gaiola do rotor no LS-PMSM são menores que as perdas do IM. Isto deve-se à diminuição da corrente de entrada que por sua vez reduz a corrente de magnetização, permitindo perdas totais menores. Além disso, a

componente de deslizamento, no IM resulta em perdas adicionais que não ocorrem no LS-PMSM [18], [38], [39].

1.2 Avarias

A avaria em motores elétricos é predominante, devido ao ambiente de trabalho onde estão inseridos e também à exposição a frequentes mudanças de carga e tensões e ao constante uso e intensivo da máquina. Estas avarias podem comprometer a fiabilidade e a segurança do motor e de todo o sistema de produção, provocando perdas significativas e danos graves aos materiais e equipamentos envolvidos no processo. Por conseguinte, é importante e necessário uma monitorização do estado do motor e diagnóstico de avarias, de forma a evitar paragens abruptas e ocorrências inesperadas [40], [41], [42], [43].

1.2.1 Diferentes tipos de avarias no LS-PMSM

No motor síncrono de ímanes permanentes com arranque direto à rede, as avarias podem ocorrer no rotor, no estator e nos componentes mecânicos do motor, podendo estas avarias serem classificadas em três diferentes categorias: elétricas, mecânicas e magnéticas [40], [41], [42], [43], [44].

Avarias elétricas

As avarias elétricas estão, geralmente, relacionadas com ligações incorretas nos enrolamentos, com curto-circuitos na fase do estator, erros na ligação à terra, circuito aberto de uma fase completa e com desequilíbrio resistivo [41]. A avaria de curto-circuito pode ocorrer de três formas diferentes: entre espiras, entre fases ou entre fase-terra. Entre estas o curto-circuito entre espiras nos enrolamentos do estator é a avaria mais frequente do PMSM e do LS-PMSM e, normalmente, é causada por degradação do isolamento dos enrolamentos [41], [42]. A deterioração do isolamento pode surgir devido a diferentes fatores, nomeadamente: picos de tensão transitórios durante o arranque, longos períodos de funcionamento com temperaturas elevadas, condições adversas e stresses mecânicos [41]. Este tipo de curto-circuito é bastante crítico, uma vez que provoca a circulação de correntes elevadas no circuito curto-circuitado, resultando em sobreaquecimento. Esta avaria quando não é detetada e corrigida rapidamente pode levar a um comprometimento maior do isolamento e alastrar-se para outros enrolamentos do estator, originando outros curto-circuitos e até a desmagnetização dos ímanes permanentes [40].

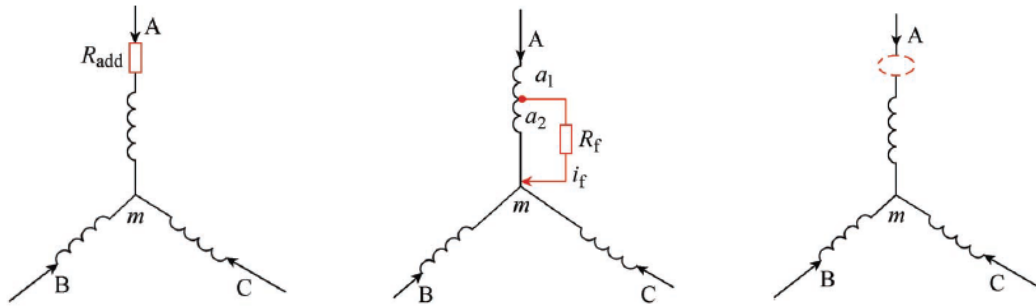


Figura 1.3 - (a) Desequilíbrio resistivo; (b) Curto-circuito entre espiras; (c) Avaria fase aberta [41].

Avárias mecânicas

As avarias mecânicas no LS-PMSM sucedem devido a avarias nos rolamentos, excentricidade, desalinhamento e desbalanceamento do motor. As avarias nos rolamentos constituem a maioria das avarias nos motores [42]. As principais razões desta são a montagem incorreta, lubrificação inadequada, sobrecarga no motor e envelhecimento natural dos componentes [40], [42], [43]. O desgaste dos rolamentos ao longo do tempo, leva a que surjam pequenas fissuras na sua superfície e possivelmente à perda de pequenos fragmentos de metal, deixando marcas ou pequenas descamações. Por outro lado, a excentricidade ocorre quando há variação desigual no entreferro e pode ser causada por erros de instalação, desalinhamentos no eixo, expansão térmica assimétrica do rotor, entre outros. Podemos dividir a excentricidade em três tipos: estática, dinâmica e mista. Esta avaria pode provocar variações no campo magnético conduzindo a vibrações e ruído [44].

O desbalanceamento do rotor e o desalinhamento do motor provocam alterações no campo magnético do motor, o que leva à deterioração das propriedades dinâmicas da máquina, gerando também vibrações e oscilações no binário [42].



Figura 1.4 - Descamação da superfície de um rolamento [45].

Avarias magnéticas

As avarias magnéticas são uma avaria característica PMSM e do LS-PMSM pois estão relacionadas com os ímanes permanentes. A desmagnetização dos ímanes pode ser uniforme, em que todo o íman desmagnetiza de forma homogénea ou parcial, onde apenas algumas partes do íman perdem as suas propriedades magnéticas. Os principais fatores que contribuem para este tipo de avaria são: temperaturas de operação elevadas devido por exemplo a elevado binário, a correntes de curto-circuito produzidas pelas avarias no estator, envelhecimento dos ímanes permanentes e ainda à possível corrosão dos ímanes [40], [41]. Com a desmagnetização, consequentemente, o binário da máquina diminui e por isso as correntes do estator aumentam para continuar a produzir a mesma quantidade de binário suscitando o aumento de perdas de cobre significativamente, diminuindo ainda mais a eficiência do motor [42].

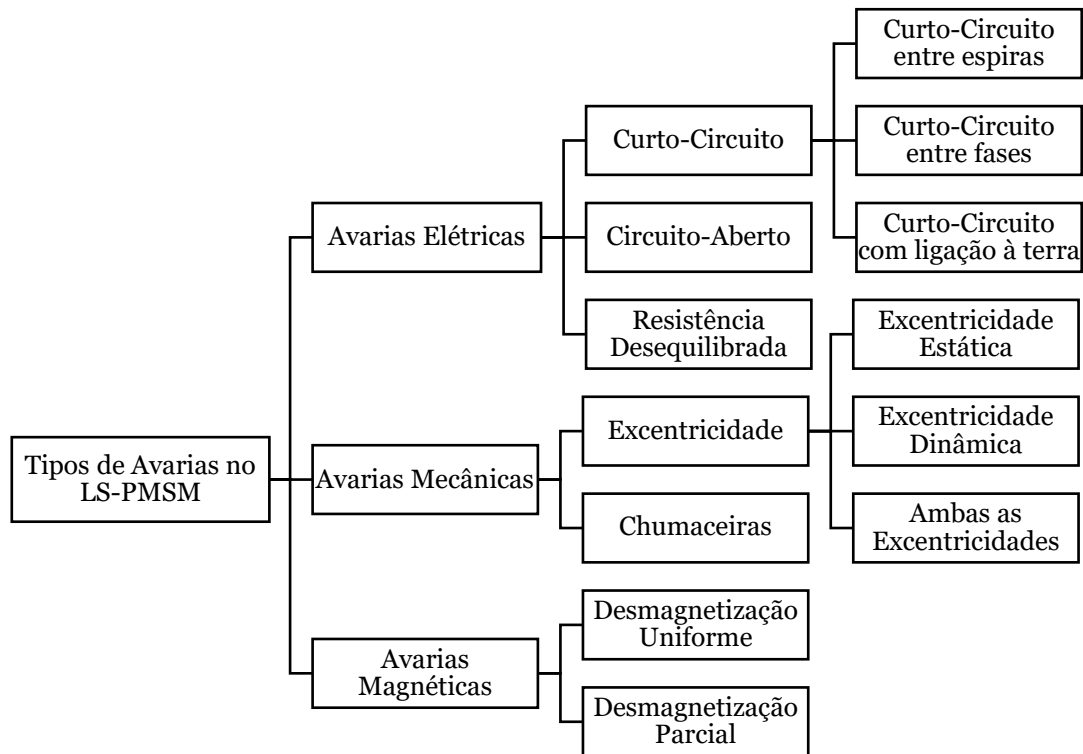


Figura 1.5 - Tipos de avarias no LS-PMSM.

Neste trabalho, a avaria que se está a diagnosticar é o curto-circuito entre espiras no circuito estatórico no LS-PMSM.

1.3 Diagnóstico de avarias

Alterações verificadas nos parâmetros do estado saudável da máquina são determinados através de métodos de diagnóstico de avarias que se baseiam na determinação, isolamento, identificação e estimativa de avarias. A determinação verifica que existe uma avaria através dos desvios no comportamento do sistema. O isolamento permite definir o local onde a avaria está a ocorrer. A

identificação indica que tipo de avaria que estamos perante e a estimativa avalia a magnitude da avaria [40], [44]. Dentro dos métodos de diagnóstico destacam-se três abordagens principais: diagnósticos de avarias baseados em modelos, processamento de sinais e em técnicas de inteligência artificial.

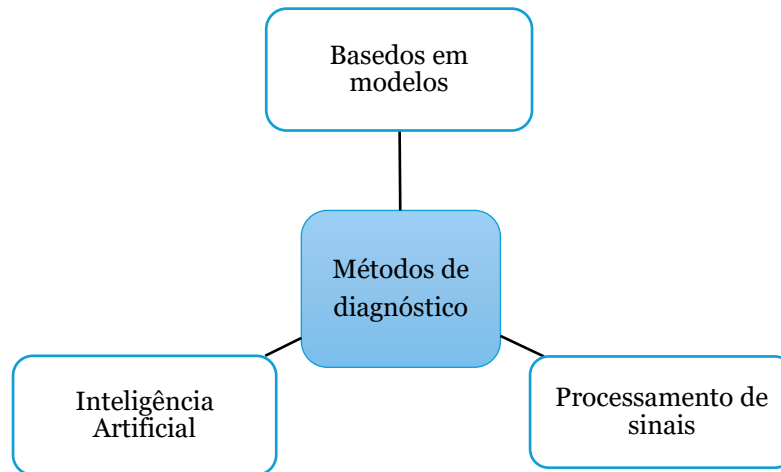


Figura 1.6 - Métodos de diagnóstico.

1.3.1 Diagnóstico de avarias em técnicas baseadas em modelo

Os métodos baseados em modelo têm como objetivo construir um modelo matemático com uma determinada avaria, baseando-se em equações matemáticas e princípios físicos. O modelo obtido através deste processo é comparado com o modelo real do motor, de forma a verificar se ocorreu avaria ou não. As vantagens deste tipo de diagnóstico incluem a capacidade de detetar falhas em fases iniciais e a aptidão para isolar, analiticamente, cada avaria uma das outras. No âmbito deste diagnóstico podemos referir quatro tipos de técnicas diferentes: observadores de estado, estimativa de parâmetros, Filtro de *Kalman* e análise de elementos finitos.

Os observadores de estado permitem detetar avarias ao comparar estimativas dos estados internos da máquina, com as medições reais do sistema. Se houver alguma discrepância significativa entre o estado estimado e o real, podemos estar na presença de uma avaria [46], [47], [48]. Em [44] é utilizado um método que compara a corrente medida com a corrente estimada, utilizando um observador saudável do motor. Neste caso, quando um curto-circuito ocorre, o vetor de corrente residual (VCR), que é obtido através da diferença entre a corrente real e a corrente estimada do estator, indica a ocorrência de uma anomalia.

Para a estimativa de parâmetros, parte-se do princípio de que as avarias afetam os parâmetros do sistema, tendo em conta a estrutura do modelo [49]. A lógica por trás do método de deteção consiste em identificar, em tempo real, os parâmetros do sistema em operação e que está a ser monitorizado e compará-los com os valores de referência obtidos, anteriormente, em condições normais [50], [51].

Outra técnica de diagnóstico, é o filtro de *Kalman* que é um algoritmo que permite prever o estado de um sistema dinâmico a partir de medições que possam conter ruído ou incertezas [52], [53], [54], [55]. Este filtro atualiza continuamente as suas estimativas com base em medições anteriores e novas entradas, reduzindo o erro de previsão [56], [57]. Uma aplicação deste filtro encontra-se em [58] onde é usado para estimar o número de espiras curto-circuitadas.

Por fim, a análise de elementos finitos é bastante aplicada para detetar diferentes avarias, nomeadamente, a desmagnetização e o curto-circuito entre espiras. Este método permite modelar o circuito magnético da máquina por uma malha de pequenos elementos, conseguindo determinar vários parâmetros importantes como a indutância, densidade do fluxo e binário, com o intuito de analisar o estado do motor [40], [59]. Em [59] é simulado um PMSM com curto-circuito entre espiras através da aplicação dos elementos finitos. Analisados os resultados obtidos, é concluído que é possível detetar-se a presença de avaria e que com o aumento do número de espiras curto-circuitadas, ou seja, da severidade, e que as amplitudes das correntes de fase são afetadas.

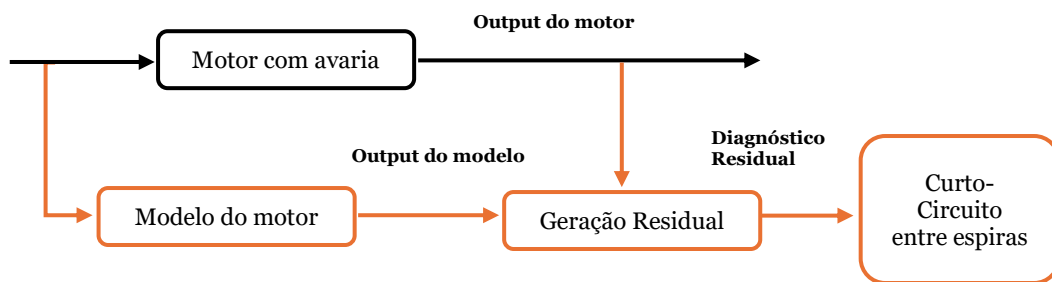


Figura 1.7 - Estrutura da abordagem de diagnóstico baseado em modelo.

1.3.2 Diagnóstico de avarias baseados em métodos de processamento de sinais

Outro método utilizado na deteção de avarias é o processamento de sinais, que possibilita extrair e analisar características dos sinais obtidos provenientes do motor. Esta abordagem permite a deteção de avarias ao decompor o sinal em três domínios principais: domínio do tempo, domínio de frequência e domínio de tempo-frequência [40].

No domínio do tempo, o sinal é analisado, de forma a observar-se diretamente a variação dos valores ao longo do tempo, muitas vezes baseando-se em análises estatísticas. Este método usa determinados parâmetros como por exemplo valores de RMS [60], [61], [62], [42]. Este tipo de análise é, particularmente, útil para identificar mudanças rápidas ou tendências no comportamento do sistema. No entanto, este método não é muito comum pois as avarias nos motores geram harmónicos na corrente do sinal, que são dificilmente detetadas por este domínio [43].

O domínio da frequência é utilizado para detetar modificações ou avarias da análise espectral, ou seja, o sinal de avaria é analisado com base nas componentes de harmónicos e frequências características, identificando padrões associados a diferentes tipos de avarias [51]. A transformada rápida de Fourier (FFT) é um dos principais métodos neste tipo de análise pois permite obter a distribuição das frequências do sinal, onde a amplitude e a frequência dos componentes harmónicos funcionam como indicadores de avarias [63], [64]. No entanto, o FFT requer que o sinal seja estacionário (as características de frequência necessitam de ser constantes ao longo do tempo) e precisa de várias medições para obter resultados precisos [42].

O domínio do tempo-frequência permite identificar componentes de frequências ao longo do tempo. Este método é, particularmente, útil para identificar avarias em sistemas dinâmicos, onde as anomalias podem surgir de forma intermitente ou variar com a carga ou com o tempo. Inserido neste domínio podemos salientar diferentes técnicas como a *Short-Time Fourier Transform* (STFT), *Wavelet Transform* (WT), *Hilbert-Huang Transform* (HHT) e a *Wigner-Ville Distribution* (WVD) [41], [44], [51], [65], [66]. A STFT é uma extensão da Fast Fourier Transform que consegue analisar sinais não estacionários. Esta técnica segmenta o sinal em pequenas “janelas” de sinal fixas, ao deslocar estes segmentos ao longo do tempo, é possível obter o conteúdo de frequência do sinal em diferentes períodos [67], [68]. No caso da *Wavelet Transform* é decomposto o sinal em diferentes escalas ou resoluções, possibilitando capturar variações transitórias e localizadas no tempo que ocorrem no momento da avaria [69]. A HHT combina a decomposição empírica de modos (EMD), que separa o sinal em componentes mais simples. De seguida, é aplicada a transformada de *Hilbert* a cada componente para obter uma representação detalhada tempo-frequência [70], [71]. Por outro lado, a WVD oferece uma alta resolução do domínio tempo-frequência, utilizando o sinal completo para calcular a energia em cada faixa de frequência [40], [44], [66].

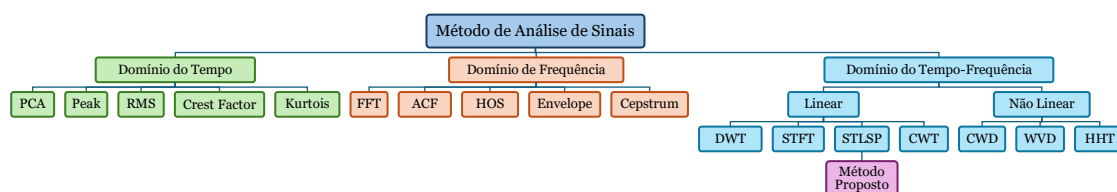


Figura 1.8 - Classificação das técnicas de processamento de sinal.

1.3.3 Diagnóstico de avarias baseados em métodos de Inteligência Artificial

Outro conjunto de métodos de diagnóstico de avarias utilizam técnicas de inteligência artificial, entre as mais variadas aplicadas no diagnóstico de curto-circuito entre espiras, podemos referir a “*artificial neural network*”, “*convolutional neural network*” e “*support vector machine*” [72], [73], [74], [75], [76], [77].

As redes neurais são treinadas com dados de operação normal e dados de operação com avaria, de modo a conseguir diferenciar os dois estados [78]. Em [79] é extraído a componente de sequência zero das correntes trifásicas como indicador de avarias no enrolamento do estator de um PMSM. As características desta componente são usadas como input na rede neural artificial que ao correlacionar os dados obtidos, identifica o tipo de curto-circuito nos enrolamentos.

Na referência [80] é apresentada uma abordagem para desenvolver uma ferramenta de monitorização de curto-circuito entre espiras para LS-PMSM com base numa rede neural convulacional 2D (2DCNN). Primeiramente, através de um modelo matemático e de um ambiente experimental é estudado a influência de curto-circuito entre espiras nas correntes do estator. São recolhidos dados destas correntes em regime permanente sob diferentes condições como por exemplo variações de carga. Com estes dados é projetado uma 2DCNN que, posteriormente, é treinada, de forma a relacionar os padrões das correntes do estator com diferentes severidades de avaria.

A máquina vetorial de suporte (SVM), uma técnica de *machine learning*, realiza a classificação de dados em diferentes classes ao identificar o hiperplano que melhor separa esses conjuntos. Cada classe agrupa dados com características similares, permitindo o SVM identificar padrões distintos e atribuir novos dados à classe correspondente, seja ela normal ou de avaria, com base nos padrões previamente conhecidos [81], [82].

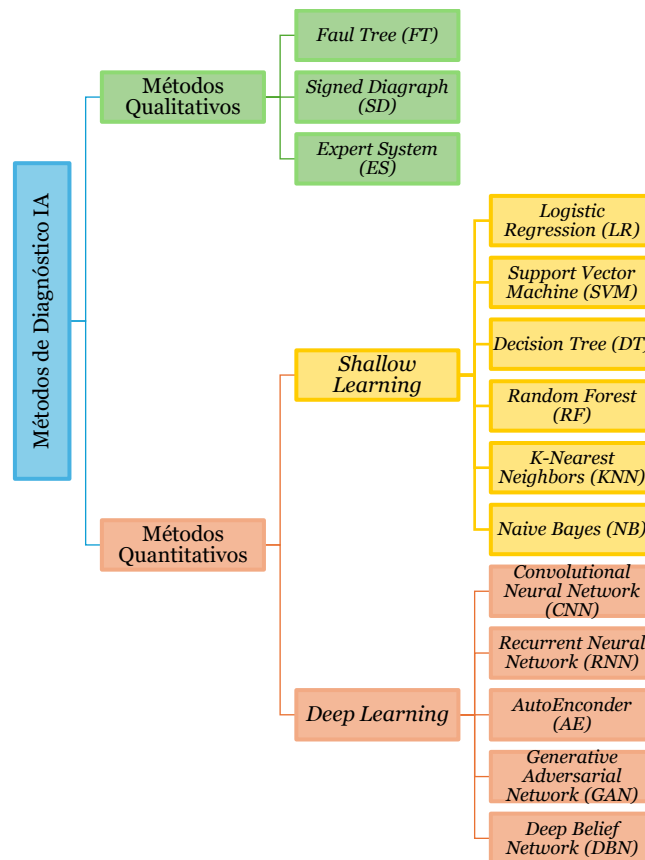


Figura 1.9 - Métodos de diagnóstico de ITSCF baseados em IA.

Capítulo 2

2. Método proposto e diagnóstico do LS-PMSM com a presença de avarias no estator através de simulação

Neste capítulo, é apresentado o modelo de simulação do LS-PMSM desenvolvido em ambiente Simulink MATLAB, onde é demonstrado o comportamento elétrico e mecânico do motor sob condições saudáveis e de avaria, especificamente, na presença de avarias de curto-circuito entre espiras (ITSCFs). Seguidamente, na segunda parte do capítulo, é retratado, detalhadamente, o método proposto para o diagnóstico do curto-circuito entre espiras no estator, que envolve a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analisar o sinal do estator do motor em ambos os cenários de operação. Adicionalmente, a técnica *online* proposta estima os componentes simétricos do motor, utilizando o método Short-Time Least Square Prony's (STLSP) que viabiliza uma análise eficaz do espectro não estacionário do sinal.

2.1 Modelo de simulação

O modelo de simulação do motor é desenvolvido em ambiente Simulink MATLAB, conforme ilustrado na Figura 2.1. Como é possível observar-se, o modelo é composto por vários blocos, interligados entre si, que simulam, coletivamente, o comportamento do motor síncrono de ímãs permanentes, com arranque direto à rede (LS-PMSM). Entre estes pode salientar-se, o bloco relativo às fases do sistema que simula a fonte de alimentação trifásica e a sua interação com o motor, múltiplos blocos que correspondem a osciloscópios que são usados para monitorizar e visualizar grandezas elétricas críticas, tais como correntes do estator, tensões e velocidade do rotor e o bloco que corresponde à representação computacional do LS-PMSM.

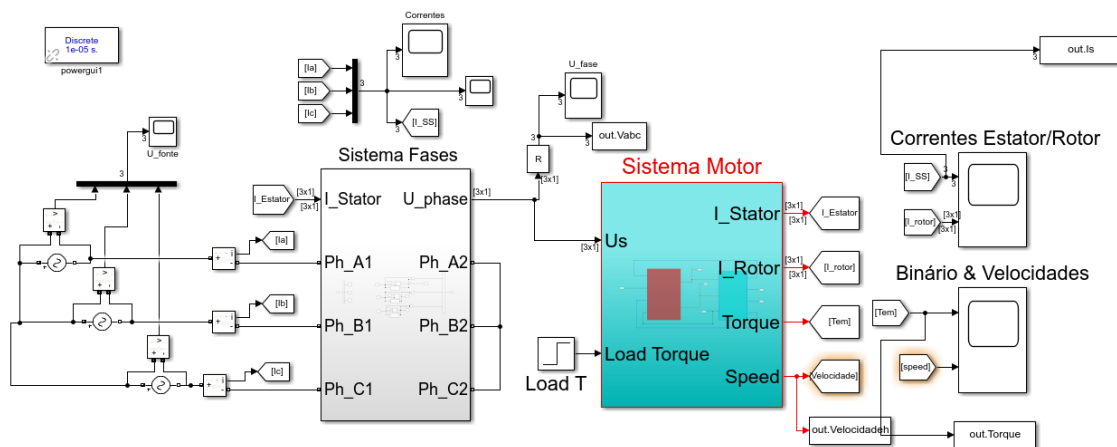


Figura 2.1 - Modelo computacional utilizado na simulação em Simulink do LS-PMSM.

Os parâmetros do motor para se proceder à realização da simulação estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Parâmetros de simulação do LS-PMSM.

Parâmetros do Motor

Tempo de amostragem (s)	100000
Frequência de alimentação (H_z)	50
Resistência das perdas magnéticas (Ω)	3735
Resistência do estator (Ω)	4.2
Resistência do rotor (Ω)	3.87
Indutância de fuga da fase do estator (H)	$17.077 \cdot 10^{-3}$
Indutância de fuga da fase do rotor (H)	$17.077 \cdot 10^{-3}$
Indutância mútua (H)	$179 \cdot 10^{-3}$
Momento de inércia ($k_g m^2$)	0.005
Número de pólos	2
Binário ($N \cdot m$)	0 – 14

2.1.1 Comportamento do LS-PMSM em condição de funcionamento normal

Com o objetivo de analisar o comportamento elétrico do LS-PMSM, foram realizadas simulações do motor tanto em condições operacionais saudáveis quanto de avaria. As Figuras 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 apresentam os resultados das simulações correspondentes às variáveis principais: velocidade, binário, corrente e tensão, respetivamente, considerando diferentes níveis de carga aplicados à fase-a durante condições normais de operação. Estes resultados fornecem informações importantes sobre a resposta dinâmica e as características de desempenho do motor com cargas variadas.

A Figura 2.2 ilustra a resposta da velocidade do motor à medida que a carga aplicada aumenta. O gráfico mostra que quando o motor opera sem carga (0 Nm) ou com uma carga leve (5 Nm) este atinge a sua velocidade de regime permanente mais rapidamente. Por outro lado, quando o motor é submetido a uma carga mais elevada (14 Nm), o motor experimenta um estado transitório mais longo antes de se estabilizar. Apesar do período transitório prolongado sob carga pesada, o motor consegue alcançar a velocidade de regime permanente, de 1500 rpm, em todas as situações, demonstrando a sua capacidade de manter um desempenho consistente em diferentes condições de carga.

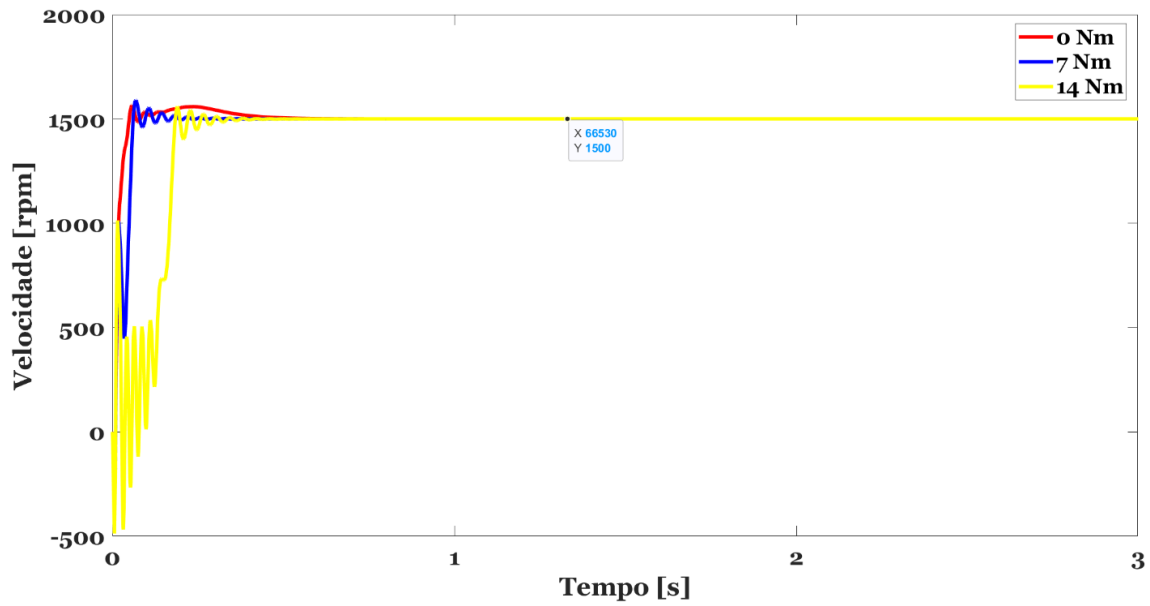


Figura 2.2 - Velocidade do motor para funcionamento normal, com diferentes cargas.

Na Figura 2.3, é avaliado o comportamento de diferentes cargas sob o binário, observando-se que não existem variações na amplitude do binário, correspondendo a uma condição saudável.

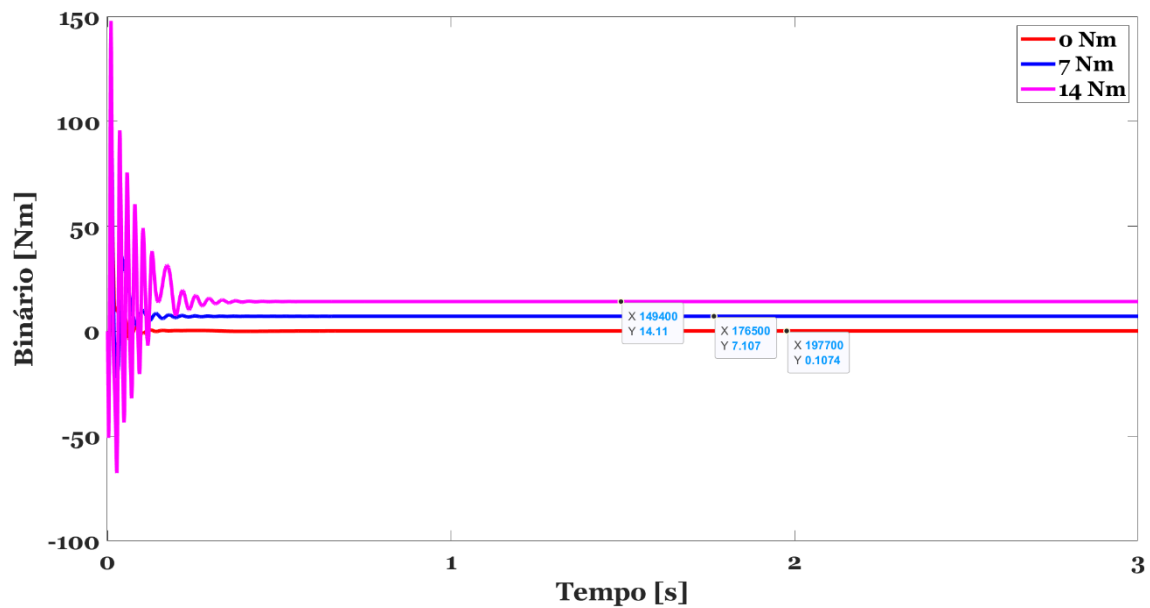


Figura 2.3 - Diferentes cargas aplicadas no motor em funcionamento normal.

Na Figura 2.4, os testes realizados tiveram como foco a variação da corrente para diferentes cargas em funcionamento normal. Perante os resultados obtidos, é possível inferir que com o aumento da carga a amplitude da corrente aumenta consideravelmente.

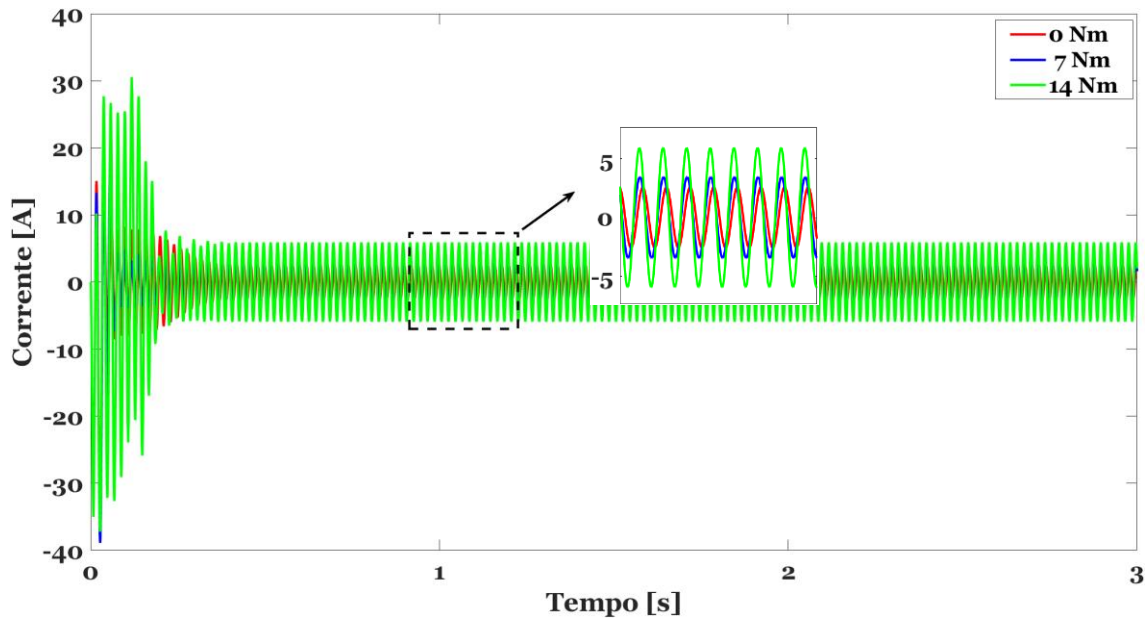


Figura 2.4 - Corrente do motor para diferentes cargas, em funcionamento normal.

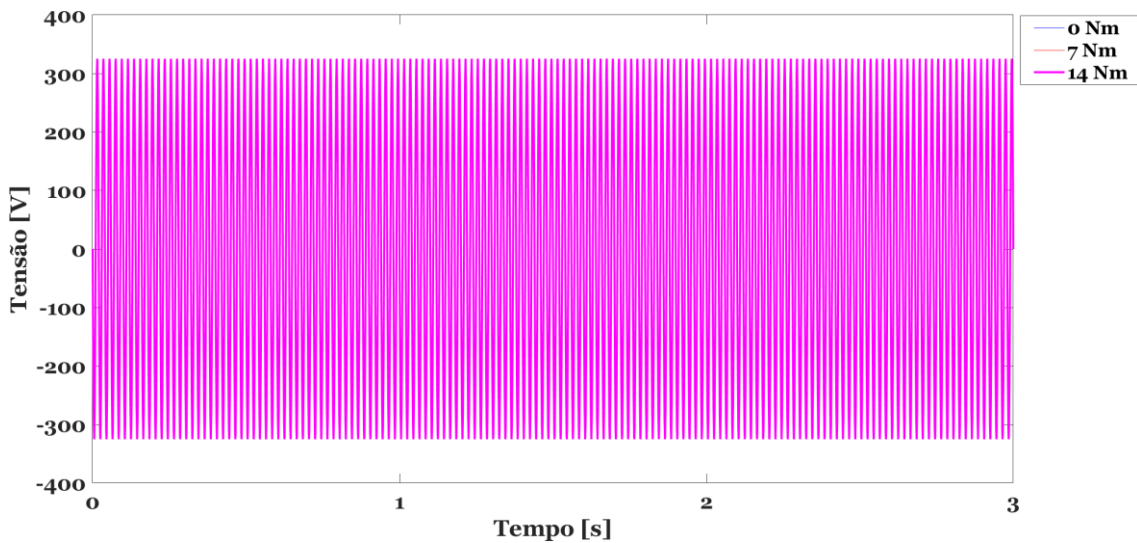


Figura 2.5 - Tensão do motor em funcionamento normal.

Na Figura 2.5 é apresentado o gráfico da tensão, no entanto, como o ambiente é de simulação, e a tensão é gerada pela fonte de alimentação no MATLAB, o valor da tensão será fixo. A tensão, portanto, mantém o valor.

2.1.2 Comportamento do LS-PMSM em condição de funcionamento em avaria

Paralelamente, são apresentadas as simulações realizadas para o motor em operação sob condição de avaria. As Figuras 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 ilustram os gráficos correspondentes às variáveis de velocidade, binário, corrente e tensão, respetivamente. Estas análises foram conduzidas

considerando uma carga nula (0 Nm) e diferentes níveis de severidade de avaria, representados por 7, 14 e 30 espiras em curto-circuito, na fase-a.

A Figura 2.6 exibe o comportamento da velocidade para as diferentes severidades. Através da análise do gráfico, é possível concluir que, com o aumento da severidade da avaria, a oscilação na amplitude da velocidade torna-se mais evidente.

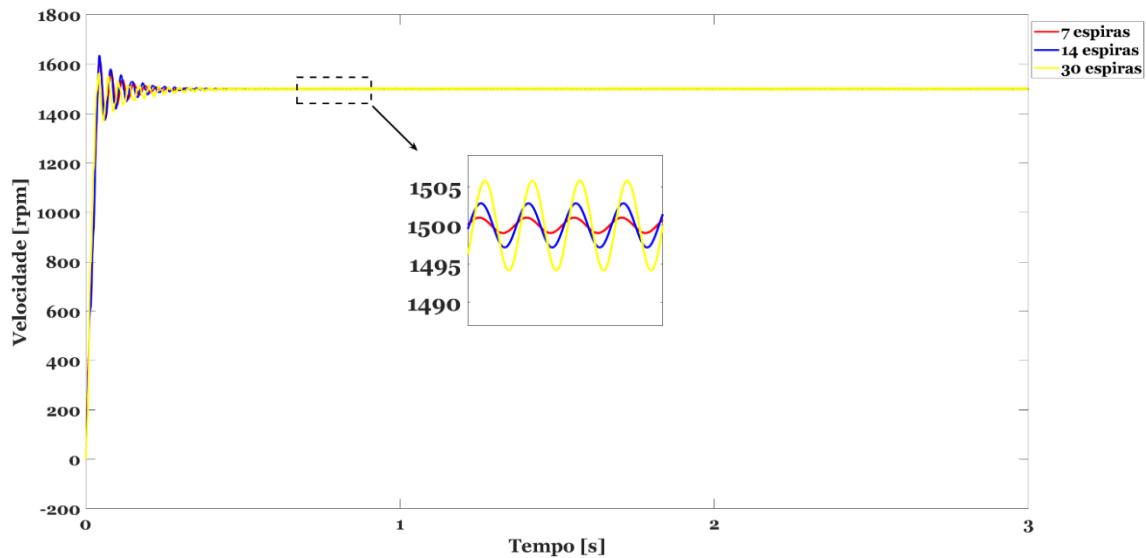


Figura 2.6 - Velocidade do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.

Na Figura 2.7 é apresentado o gráfico do binário para uma carga de 0 Nm. Observa-se que, mesmo na ausência de carga externa, a presença desta avaria induz oscilações significativas no binário, cuja amplitude aumenta com a severidade.

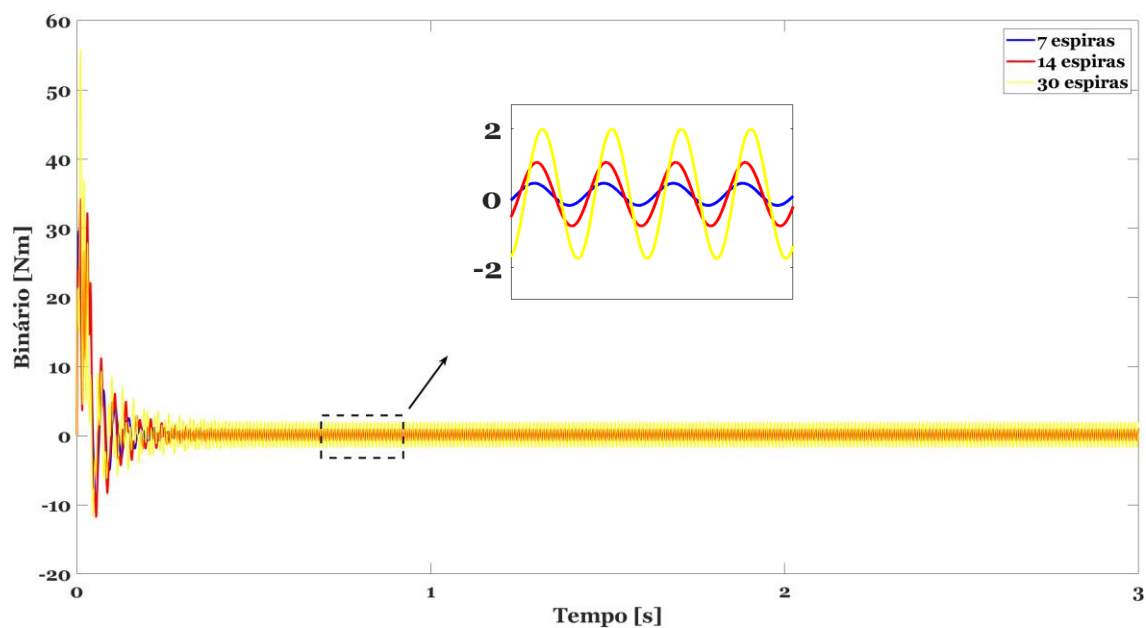


Figura 2.7 - Binário do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.

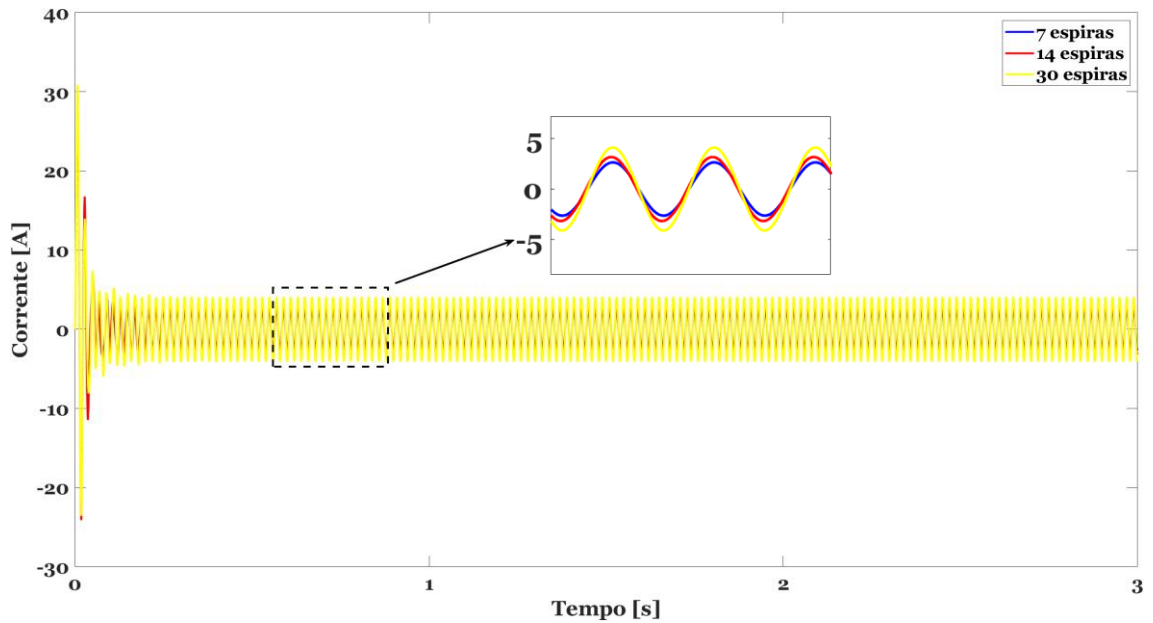


Figura 2.8 - Corrente do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.

Na Figura 2.8, que corresponde ao gráfico da corrente, verifica-se o mesmo comportamento observado na Figura 2.6 e na Figura 2.7. A Figura 2.9 corresponde ao gráfico da tensão, onde não se verificam alterações no seu valor, uma vez que é gerada por uma fonte de alimentação no MATLAB sendo por esta razão um valor fixo.

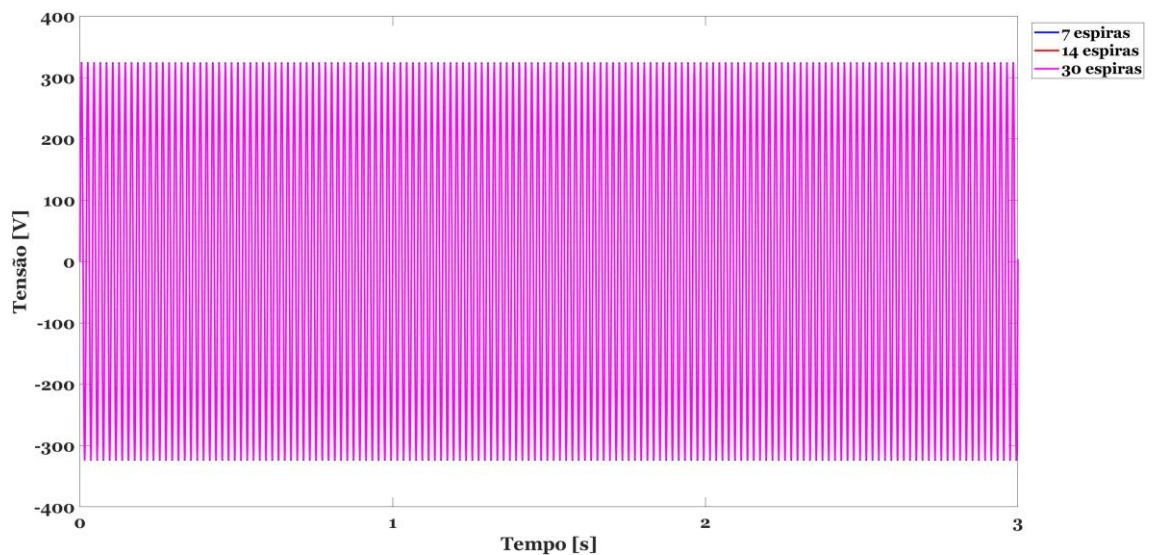


Figura 2.9 - Tensão do motor com avaria de curto-circuito entre espiras e com diferentes severidades, carga 0 Nm.

2.2 Método Proposto

Para diagnosticar a ocorrência do curto-circuito entre espiras é implementada a FFT, utilizada na análise do sinal do estator do motor em estado saudável e de avaria, possibilitando identificar alterações no espectro do sinal associados à presença de avarias. Por outro lado, da mesma forma, procede-se ao uso de outra técnica, o método de Prony (MP) que viabiliza a consideração do espectro não estacionário do sinal. Neste caso, é utilizada uma versão modificada deste método, STLSP que permite avaliar o sinal da corrente e tensão das três fases, e onde, a partir do espectro obtido, esta estima e rastreia as amplitudes e ângulos de fase das componentes fundamentais, fornecendo uma representação de amplitude em tempo linear com resolução de alta frequência e resolução de tempo ajustável. Com a extração da frequência e amplitude, é adicionada, posteriormente, a Transformada de Fortescue (FT), que calcula as componentes simétricas das tensões e correntes trifásicas, proporcionando a determinação dos indicadores propostos de avaria.

2.2.1 Transformada de Fourier (FFT)

A FFT é uma técnica amplamente utilizada para analisar sinais no domínio da frequência e tem como base a transformada discreta de Fourier (DFT). A DFT é caracterizada por transformar um sinal discreto no tempo, com comprimento finito, em um número finito (ou discreto) de frequências [83]. Para uma sequência finita de comprimento $\{x(n) \leq n \leq N - 1\}$ a transformada de Fourier no tempo discreto é dada pela Equação 2.1. No entanto, como a frequência é contínua, é realizada a discretização desta, obtendo-se para o DFT a Equação 2.2, que possui um comprimento de sequência finito e é repetido periodicamente $\{x(n) = 0, N \leq n \leq L - 1\}$ [84].

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (2.1)$$

$$X(k) = X(e^{j\omega})_{\omega=\frac{2\pi k}{L}} = \sum_{n=0}^{L-1} \frac{L-1}{n} x(n)e^{-\frac{j2\pi nk}{L}} \quad (2.2)$$

A inversa da DFT é obtida a partir da Equação 2.2:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{L-1} X(k)e^{\frac{j2\pi nk}{L}} \quad (2.3)$$

Portanto, a transformada rápida de Fourier traduz-se como um algoritmo otimizado que permite calcular a transformada discreta de Fourier, de forma mais rápida, reduzindo o tempo de processamento. A FFT decompõe um sinal em uma combinação de várias ondas sinusoidais, tornando possível visualizar a distribuição das frequências presentes no sinal. A análise das amplitudes e frequências extraídas permitem detectar a presença de avaria. No caso do curto-circuito de espiras no enrolamento do estator, além do aumento na amplitude da frequência

fundamental, ocorre um crescimento na amplitude dos harmônicos de alta frequência da corrente [83], [85]. Contudo, como a FFT é uma técnica *offline*, os dados do sinal são inicialmente adquiridos e armazenados, sendo a análise e o processamento realizados posteriormente em um ambiente computacional separado.

Considerando f_s como a frequência da fonte de alimentação, k como um número inteiro positivo e p_p como o número de pares de pólos, as componentes de frequência, ou seja, as amplitudes que aumentam como resultado da avaria, podem ser calculadas a partir da Equação 2.4 [42]:

$$f_{itsc1} = f_s \left(1 \pm \frac{k}{p_p} \right) \quad (2.4)$$

Por outro lado, através da Equação 2.5, também é possível ter o aumento dos harmônicos associados às ranhuras do estator:

$$f_{itsc2} = f_s \left(1 \pm k \frac{N_{ss}}{p_p} \right) \quad (2.5)$$

Onde N_{ss} , representa o número de ranhuras no estator.

Na Figura 2.10, verificam-se os inputs necessários e os outputs obtidos pela FFT.

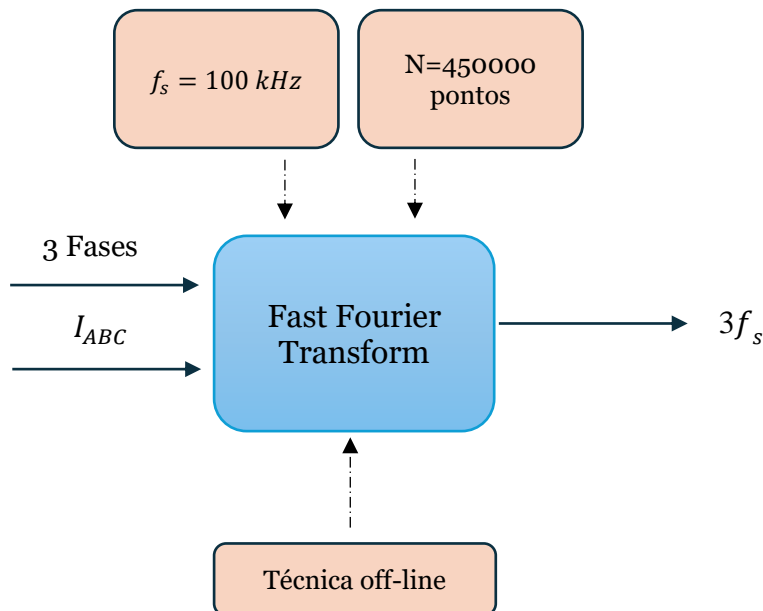


Figura 2.10 - Diagrama de entrada-saída da FFT.

2.2.2 FFT da corrente I_a

Neste subcapítulo, portanto, de forma, a compreender o impacto do curto-circuito entre espiras, são analisados os sinais de curto-circuito adquiridos por meio da Fast Fourier Transform. Neste contexto, através das Figuras 2.12, 2.13, 2.14 e 2.15 são apresentados os espectros resultantes do motor em condições normais de operação, bem como em situação de avaria, considerando diferentes níveis de severidade e cargas aplicadas.

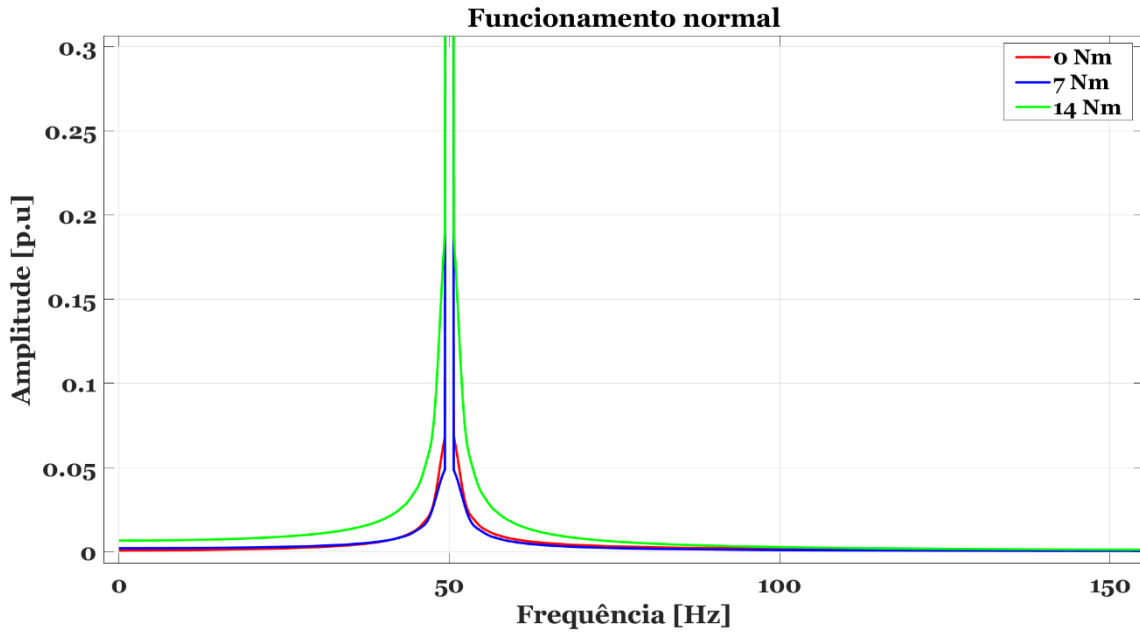


Figura 2.11 - Espectro da corrente do estator para funcionamento normal.

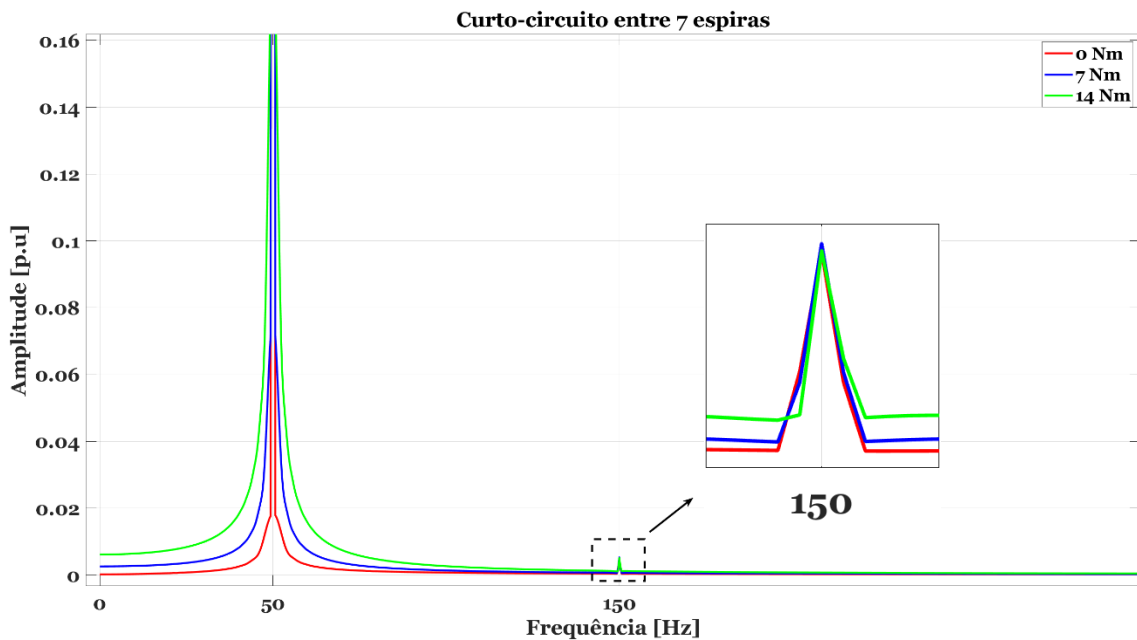


Figura 2.12 - Espectro das correntes do estator para curto-circuito entre 7 espiras.

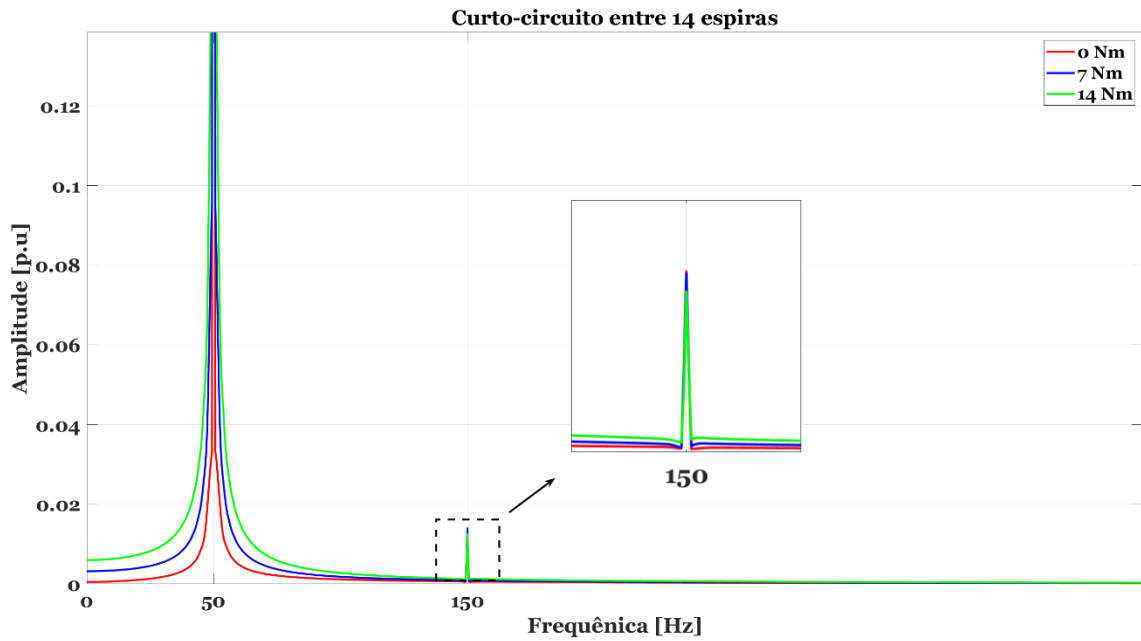


Figura 2.13 - Espectro das correntes do estator para curto-circuito entre 14 espiras.

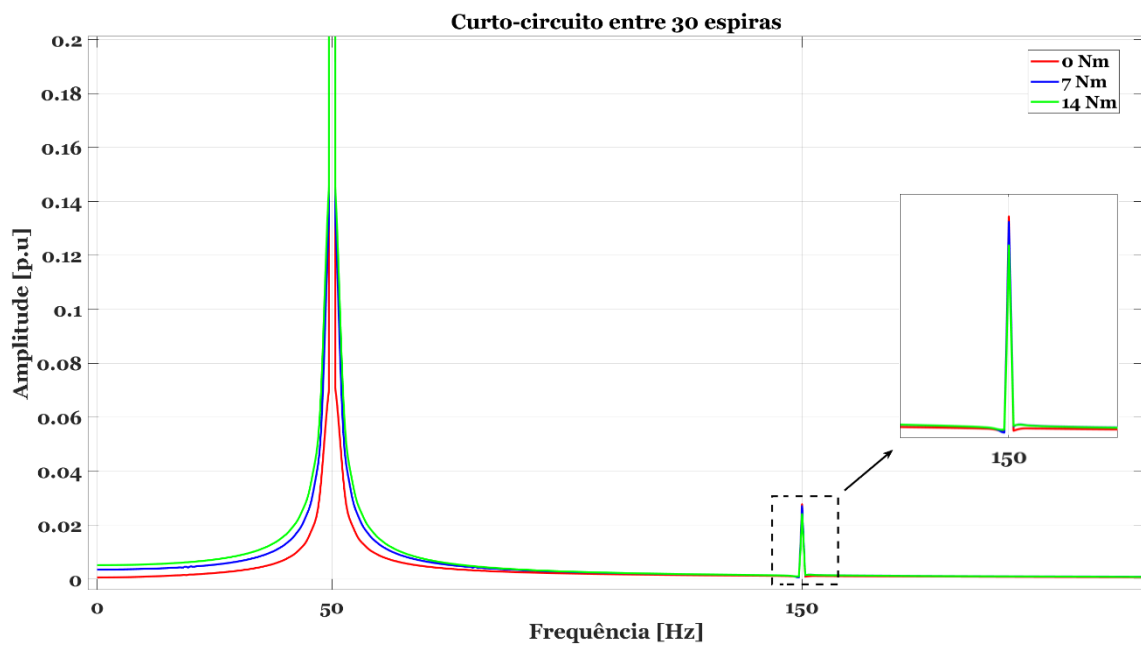


Figura 2.14 - Espectro das correntes do estator para curto-circuito entre 30 espiras.

A frequência sensível identificada na presença de curto-circuito entre espiras é o 150Hz. Os resultados apresentados avaliam essa frequência em diferentes níveis de severidade e em condição de carga variada. Assim, as Figuras 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 e a Tabela 2.2 mostram que o terceiro harmônico é impactado pelo curto-circuito, podendo ser utilizado de forma confiável para o diagnóstico.

Tabela 2.2 - Valores obtidos no FFT.

	Frequência (Hz)	Condição Saudável	7 Espiras	14 Espiras	30 Espiras	Taxa de variação (%)		
						7	14	30
150 Hz	0	0	0,005137	0,01404	0,02782	0,5%	1,4%	2,7%
	7	0	0,005317	0,01389	0,02714	0,5%	1,4%	2,7%
	14	0	0,005149	0,01253	0,02419	0,5%	1,2%	2,4%

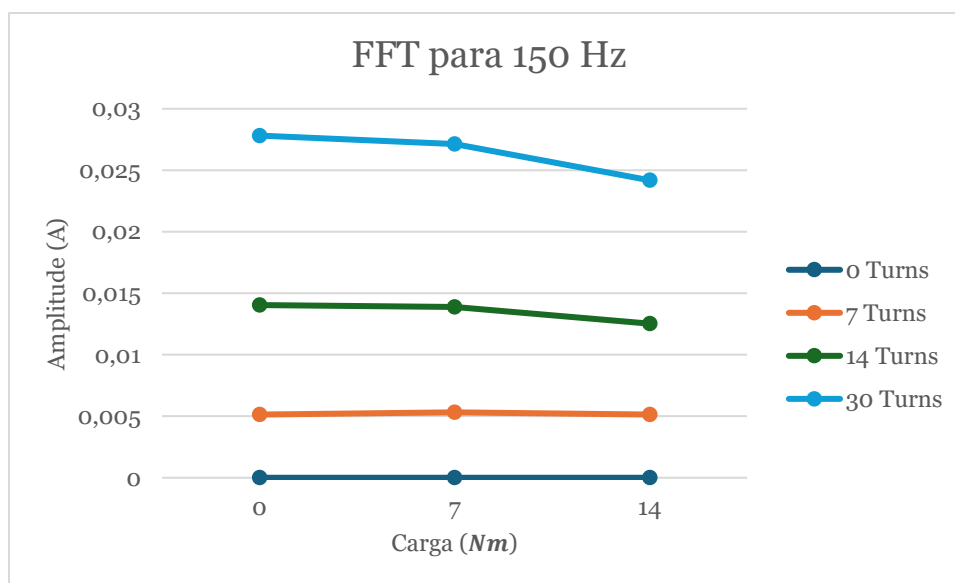


Figura 2.15 - Gráfico da evolução da avaria para o terceiro harmónico e diferentes níveis de severidade.

Na Figura 2.15, observa-se o aumento da sensibilidade da corrente na frequência de 150 Hz, com o aumento da severidade de avaria. Isto destaca a forte correlação entre a severidade da avaria e do conteúdo harmónico na corrente do estator. Especificamente, para avarias de curto-circuito entre espiras (ITSCFs), a característica distinta é o surgimento e amplificação da componente $3f_s$, como confirmado pelos resultados apresentados nas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14. Estas figuras evidenciam, claramente, que o harmónico associado à avaria torna-se mais pronunciado, com o aumento da severidade da avaria. Complementarmente, ao examinar-se a Figura 2.15 em conjunto com a Tabela 2.2, pode observar-se que a amplitude harmónica aumenta consistentemente com níveis de avaria mais elevados. Além disso, a Tabela 2.2 fornece dados acerca do efeito das variações de carga (0 Nm, 7Nm e 14 Nm) no espectro da corrente I_a . Desta forma, pode concluir-se, a partir dos resultados obtidos, que as variações de carga não influenciam, particularmente, o espectro harmónico, indicando que os harmónicos relacionados com a avaria permanecem relativamente estáveis em diferentes condições de carga. Isto sugere que o método de diagnóstico proposto é robusto e fiável mesmo sob cargas operacionais variadas.

2.2.3 Método de Short-time Least Square Prony's

O método de Prony utiliza uma combinação linear de termos exponenciais para analisar um sinal. Este permite estimar características deste sinal, nomeadamente, a amplitude, a frequência, o fator de amortecimento e o ângulo de fase, através de equações lineares. Este método parte do sinal $x(t)$, que pode representar grandezas como corrente ou tensão em função do tempo e utiliza o número de amostras N . Com base nesses dados, o método aproxima o sinal $x(t)$ por meio de uma combinação linear de funções exponenciais complexas P , permitindo modelar e analisar o comportamento dos dados amostrados [86], [87].

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1} \quad (2.6)$$

$$h_k = A_k e^{j\phi_k} \quad (2.7)$$

$$z_k = e^{(a_k + j2\pi f_k)T_s} \quad (2.8)$$

Na Equação (2.6), os parâmetros desconhecidos A_k e ϕ_k correspondem, respetivamente, à amplitude e ao ângulo de fase. Já na Equação (2.7) os parâmetros desconhecidos a_k , f_k e T_s representam o fator de amortecimento, a frequência e o tempo de amostragem. A Equação (2.8) caracteriza-se como uma equação não linear de resolução complexa, sendo solucionada por meio do MP [86], [88]. Deste modo, assumindo que $a_0 = 1$ e através do MP, a Equação (2.6) pode ser traduzida através da equação linear:

$$\sum_{k=0}^P a_k x[n-k] = 0 \quad (2.9)$$

O número de amostras disponíveis assume-se como sendo igual ao dos parâmetros do modelo, expressando-se, desta forma, a Equação 2.9 na matriz (2.10):

$$X \cdot A = -Y \quad (2.10)$$

$$\text{Onde, } X = \begin{bmatrix} x[P] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[2P-1] & \cdots & x[P] \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \text{ e } Y = \begin{bmatrix} x[P+1] \\ \vdots \\ x[2P] \end{bmatrix}$$

O conjunto de equações da matriz em (2.10) permite determinar o vetor desconhecido a_k . Seguidamente o método de Prony's define o polinómio que possui os expoentes z_k como raízes:

$$F(z) = \sum_{k=0}^P a_k z^{P-k} \quad (2.11)$$

Deste modo, o fator de amortecimento e a frequência podem ser determinados, diretamente, a partir das raízes z_k em (2.11).

$$a_k = \frac{\ln|z_k|}{T_s} \text{ e } f_k = \frac{1}{2\pi T_s} \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(z_k)}{\text{Re}(z_k)} \right] \quad (2.12)$$

Por fim, as raízes z_k são utilizadas para formar um número de equações P , da Equação (2.6), criando-se a matriz (2.13);

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{P-1} & z_2^{P-1} & \dots & z_P^{P-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(P) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Os parâmetros complexos de h_k são obtidos resolvendo a Equação (2.13). A partir destes valores, as amplitudes A_k e os ângulos de fase φ_k podem ser calculados através da Equação (2.7), onde estas variáveis estão diretamente relacionadas com h_k .

$$A_k = |h_k| \text{ e } \varphi_k = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(h_k)}{\text{Re}(h_k)} \right] \quad (2.14)$$

É importante destacar que o método de Prony apresenta instabilidade quando os dados do sinal contêm ruído, uma vez que o modelo não tem em conta a presença de erros. Contudo, os sinais reais obtidos, geralmente, possuem algum nível de ruído. Com o intuito de resolver este problema, é necessário ajustar a Equação (2.7), sendo o erro do modelo calculado para cada ponto de dados.

$$x[n] = \hat{x}[n] + \varepsilon[n] = \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1} + \varepsilon[n] \quad (2.15)$$

Assim, $\varepsilon[n]$ representa o erro de aproximação entre as amostras de dados originais $x[n]$ e a aproximação linear $\hat{x}[n]$. Relativamente ao problema de estimação dos parâmetros, este fundamenta-se na minimização do erro quadrático ao longo das N amostras.

$$E = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2 = \sum_{n=1}^N \left(x[n] - \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1} \right)^2 \quad (2.16)$$

Na prática, como o número de amostras de dados é maior que o número de parâmetros desconhecidos ($N > 2P$), a Equação (2.9) é alterada para:

$$\sum_{k=0}^P a_k x[n-k] = \varepsilon[n] \quad (2.17)$$

A Equação (2.17) pode ser transformada na seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} x[P] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-1] & \cdots & x[N-P] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x(P+1) \\ \vdots \\ X(N) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

O vetor dos parâmetros desconhecidos a_k é utilizado para reduzir o quadrado do erro associado à previsão linear. Essa minimização pode ser realizada pelo método LS (Least Square). Além disso, o cálculo dos parâmetros complexos h_k também é ajustado para seguir um procedimento linear usando o mesmo método. Neste contexto, o sistema de Equações lineares em (2.13) tem de ser reformulado para a Equação (2.19) [86], [88].

$$Z \cdot H = C \quad (2.19)$$

$$\text{Com, } Z = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & \cdots & z_p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} \text{ e } C = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix}$$

Por fim, resolvendo a Equação (2.19) pelo método dos mínimos quadrados, consegue-se determinar A_k e k .

Para averiguar este método, é estimada a amplitude e frequência do sinal gerado, pelo algoritmo de *Prony* implementado em MATLAB. Esta técnica é testada a partir de um gerador de sinais. Na Figura 2.16, observa-se o sinal gerado e, na Figura 2.17, averigua-se o espectro gerado pelo sinal.

O sinal gerado é definido por:

$$x(t) = 20 \times \sin(2\pi \times 60 \times t), \text{ com:}$$

Frequência de amostragem (f_e) = 10000 H_z

Número de amostras (N_e) = 6 amostras

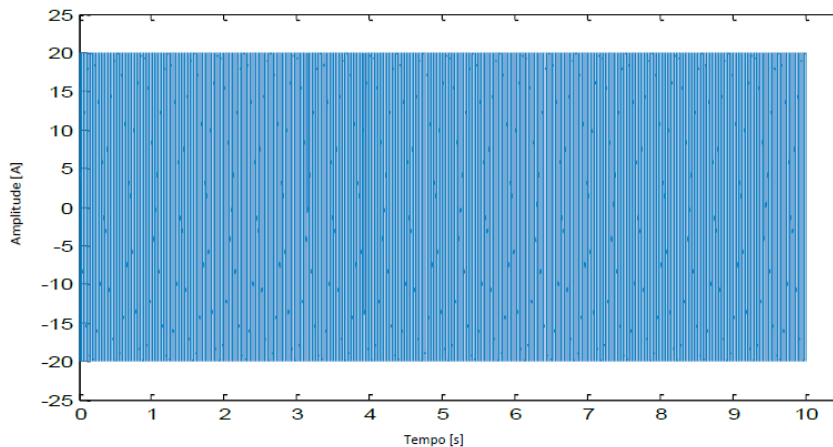


Figura 2.16 - Sinal gerado no domínio do tempo.

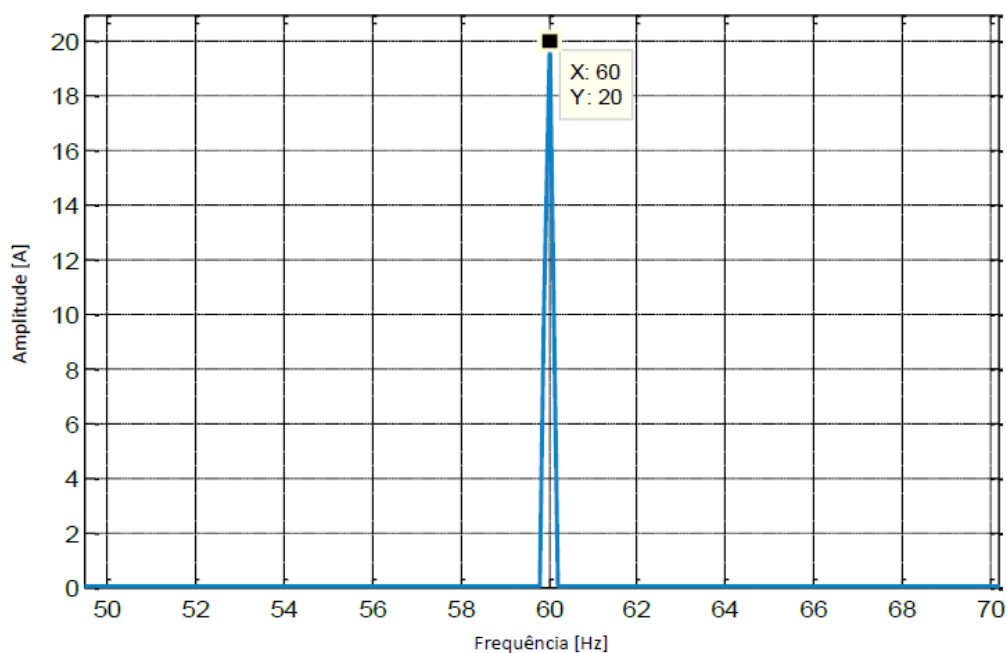


Figura 2.17 - Espectro gerado ($F_s=60\text{Hz}$).

Tabela 2.3 - A amplitude e frequência estimadas pelos métodos de Prony e FFT.

		Valor real	Valor estimado	Erro	Número de amostras
Método de Prony	Amplitude	20	20	0	6
	Frequência	60	60	0	
Método de FFT	Amplitude	20	20	0	100000
	Frequência	60	60	0	

A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos através da aplicação do Método de Prony e da Transforma Rápida de Fourier. Verifica-se que o MP consegue obter os mesmos resultados que o FFT, mas apenas com 6 amostras. O FFT necessita de mais amostras uma vez que a sua precisão depende diretamente da resolução de frequência que, por sua vez, está relacionado com a quantidade de dados disponíveis. Contudo, o Método de Prony tem dificuldades em analisar sinais transitórios e, conseqüentemente, rastrear as propriedades harmônicas. Por esta razão, é implementada uma versão do MP, o método Short-Time Least Square Prony (STLSP). Desta forma, o sinal é dividido em janelas de tempo curtas que se sobrepõem parcialmente e onde, posteriormente, cada uma das janelas é analisada pelo método original. Este processo possibilita uma melhor resolução de frequência, mesmo em janelas curtas e uma melhor resolução do tempo com o aumento da sobreposição das janelas [86].

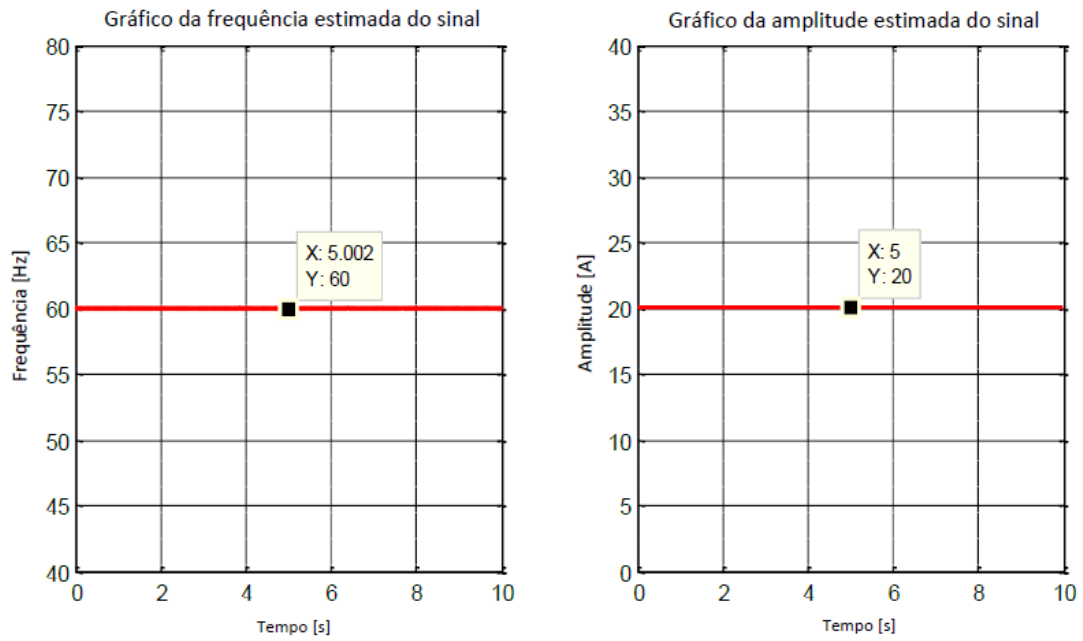


Figura 2.18 - Frequência e amplitude estimadas pelo método de Prony.

A Figura 2.18, demonstra a estimativa da frequência e da amplitude ao longo do tempo através do STLSP. Por outro lado, para verificar a precisão deste mesmo método em um sinal com um regime transitório é realizado um outro teste. Deste modo, este sinal é definido por:

$$x(t) = 10 \times \sin(2\pi \times 60 \times t)$$

O sinal (Figura 2.19), inicialmente, tem uma amplitude correspondente a 10 A e uma frequência de 60 Hz. No regime transitório a amplitude é de 5 A e a frequência de 50 Hz. O intervalo de tempo definido é [0.5 s : 1 s].

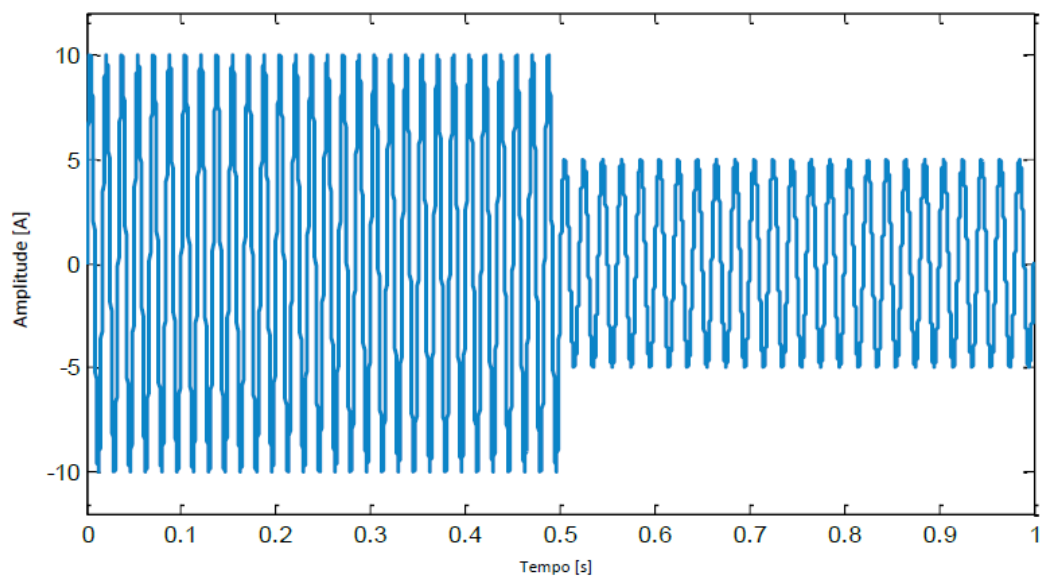


Figura 2.19 - Sinal de regime transitório.

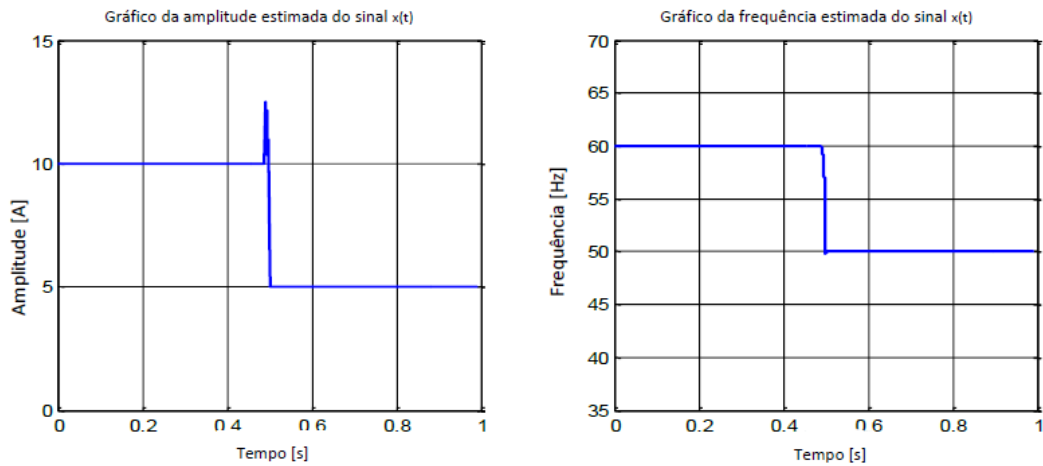


Figura 2.20 - Frequência e amplitude estimadas do sinal de regime transitório.

A partir da Figura 2.20 é possível afirmar que este método consegue garantir a capacidade de estimar e rastrear as frequências e amplitudes também para sinais de regime transitório. Da mesma forma, foi realizado outros testes, mas para um sinal mais complexo (Figura 2.21). Este sinal contém 3 harmónicos, como é possível concluir-se pela Figura 2.22 e é definido por:

$$x(t) = x_1 = 10 \sin(2\pi 50t) + 2 \sin(2\pi 48t) + 3 \sin(2\pi 52t)$$

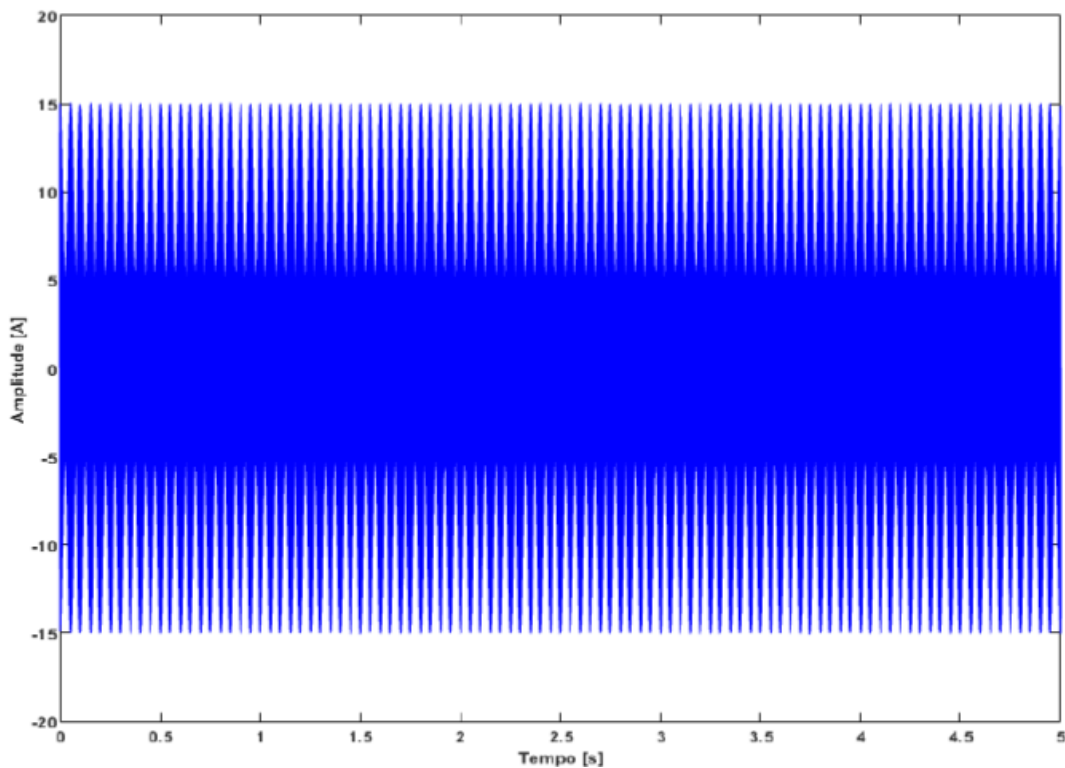


Figura 2.21 - Padrão temporal do sinal gerado.

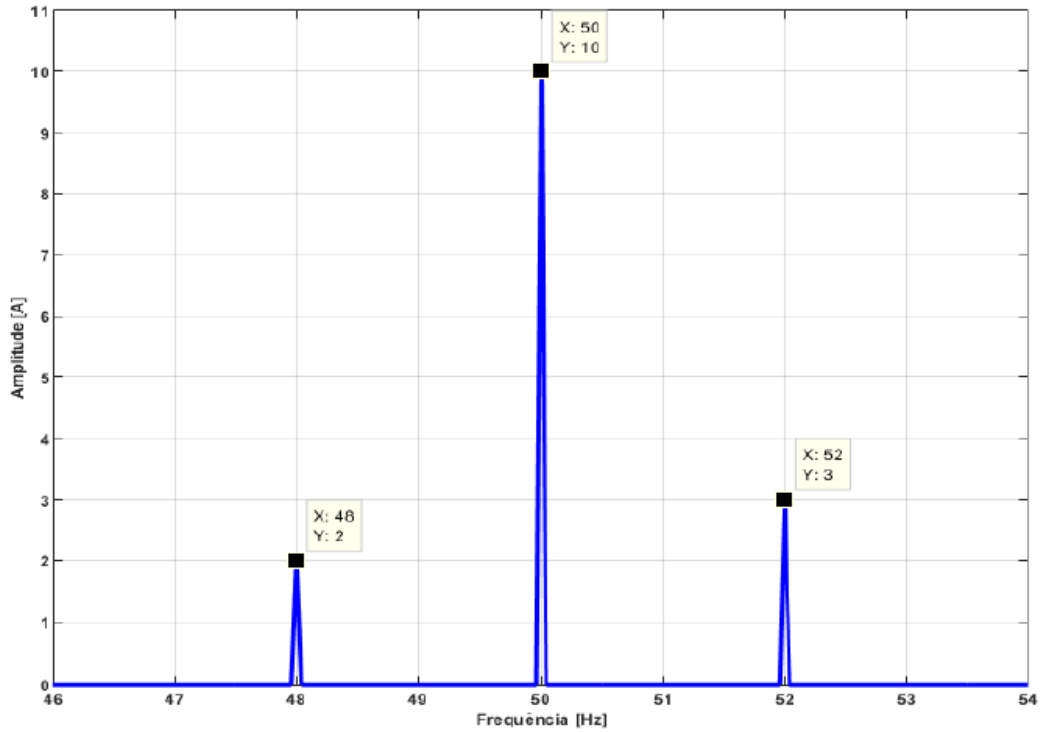


Figura 2.22 - Espectro gerado pelo sinal.

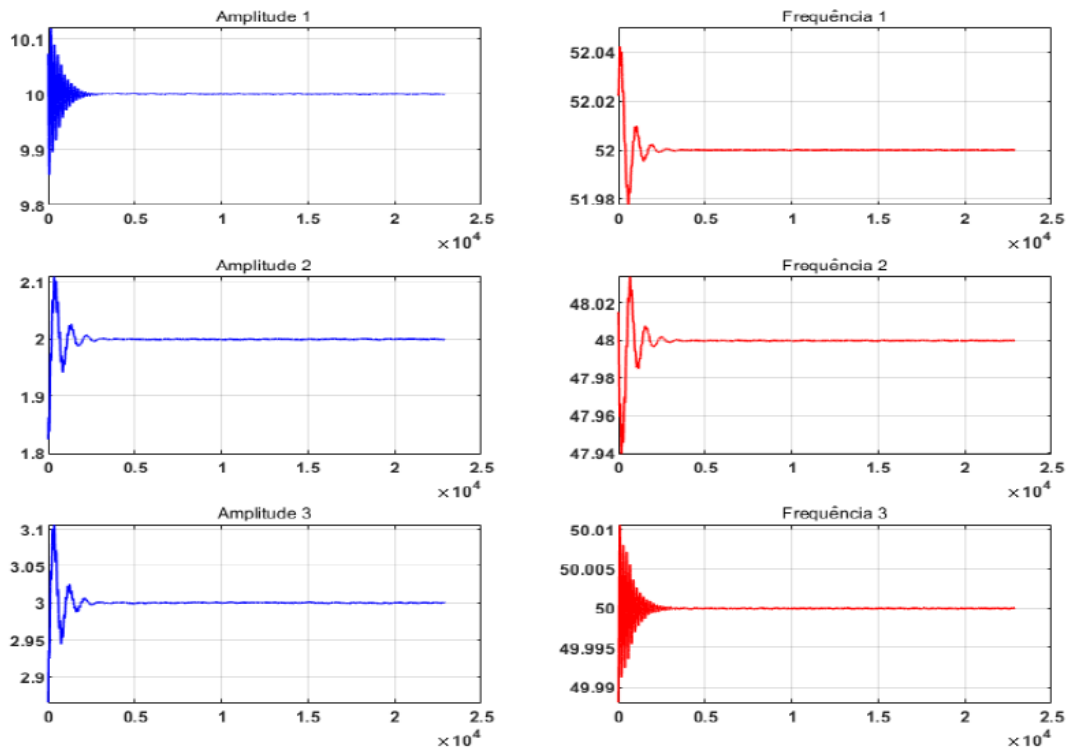


Figura 2.23 - Diferentes frequência e amplitude estimadas do sinal gerado.

Através da Figura 2.23, é possível observar que apesar de o sinal conter diferentes harmónicos, consegue-se obter a amplitude e frequência destes com uma elevada precisão.

2.2.4 Transformada de Fortescue

A Transformada de Fortescue baseia-se, neste caso, na decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas equilibrados e independentes: dois sistemas de sequência de fase (positiva e negativa) e um sistema de sequência de fase zero. Esta abordagem possibilita identificar desequilíbrios nas tensões e correntes do estator causados, por exemplo, pelo curto-circuito entre espiras [89], [90], [91]. Esta avaria gera assimetrias no sistema, que podem ser detetadas por meio da análise dos componentes simétricos. Desta forma, é possível calcular os indicadores específicos para a identificação e avaliação da avaria. Portanto, a aplicação da FT em tensões trifásicas (v_{abc}) de um motor síncrono de ímãs permanentes com arranque à rede, resulta em três componentes simétricos: positivo V_p , negativo V_N e zero V_0 . Portanto, as tensões trifásicas para o LS-PMSM em condição saudável, são apresentadas através da Equação 2.20 [91]:

$$\begin{cases} v_a(t) = V_m \sin(\omega_s t) \\ v_b(t) = V_m \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = V_m \sin(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.20)$$

Com o apoio da Transformada de Fortescue, são calculadas as componentes simétricas observadas na Equação 2.21:

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_N \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

onde, $a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$.

Para um sistema saudável, apenas a sequência positiva é obtida, enquanto que a sequência negativa e zero são nulas.

$$|V_p| = V_m \quad (2.22)$$

Deste modo, define-se o indicador ZVF pela Equação 2.23:

$$ZVF = \frac{|V_0|}{|V_p|} \quad (2.23)$$

Como o curto-circuito afeta também as tensões nas outras fases, a Equação 2.20 é revisada para a Equação 2.24:

$$\begin{cases} v_a(t) = V_{m-SC}^a \sin(\omega_s t) \\ v_b(t) = V_{m-SC}^b \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c(t) = V_{m-SC}^c \sin\left(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.24)$$

Onde V_{m-SC}^a , V_{m-SC}^b e V_{m-SC}^c representam as novas magnitudes das três tensões entre fase e neutro após a ocorrência do curto-circuito entre espiras.

Com a presença da avaria, torna-se possível calcular a componente de sequência zero da tensão, conforme a Equação 2.25:

$$|V_0| = \frac{1}{3}(V_{m-sc}^a - V_{m-sc}^b) \quad (2.25)$$

Consequentemente, o valor do indicador ZVF vai ser diferente de zero. Este pode ser expresso pela Equação 2.26:

$$ZVF = \frac{|V_0|}{|V_P|} = \frac{1}{3V_m}(V_{m-sc}^a - V_{m-sc}^b) \quad (2.26)$$

Posteriormente, para efetuar o cálculo do Fator de Tensão Zero ou Zero Voltage Factor (ZVF) e o Fator de Corrente Negativo ou Negative Current Factor (NCF), são utilizadas as Equações 2.27 e 2.28, respetivamente:

$$ZVF = \frac{V_{1fs}^0}{V_{1fs}^P} \quad (2.27)$$

$$NCF = \frac{I_{1fs}^N}{I_{1fs}^P} \quad (2.28)$$

Em resumo, o objetivo proposto foca-se na estimativa e no acompanhamento dos harmónicos fundamentais das tensões e correntes, com fim a determinar os componentes simétricos necessários. Estes componentes, serão depois utilizados para o cálculo dos diferentes fatores. Desta forma, podemos condensar este processo na Figura 2.24:

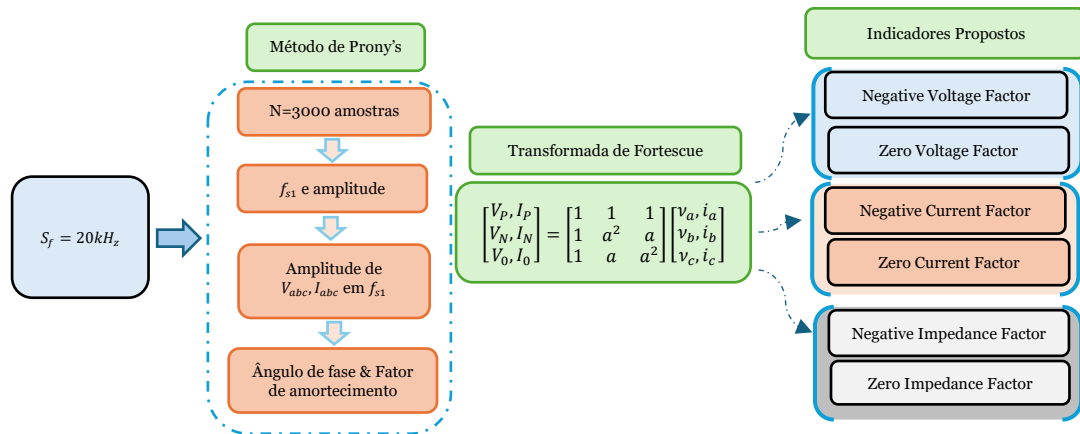


Figura 2.24 - Descrição da técnica on-line proposta.

2.2.5 Resultados obtidos em simulação com o Método proposto

Os indicadores propostos são extraídos do sistema com base nos dados analisados das correntes e tensões do estator e também dos componentes simétricos obtidos a partir da transformada de Fortescue. A utilização do algoritmo *STLSP* permite obter o espectro dos sinais e apenas a componente fundamental de cada sinal é considerada. Deste modo, como resultado são obtidas as seguintes figuras.

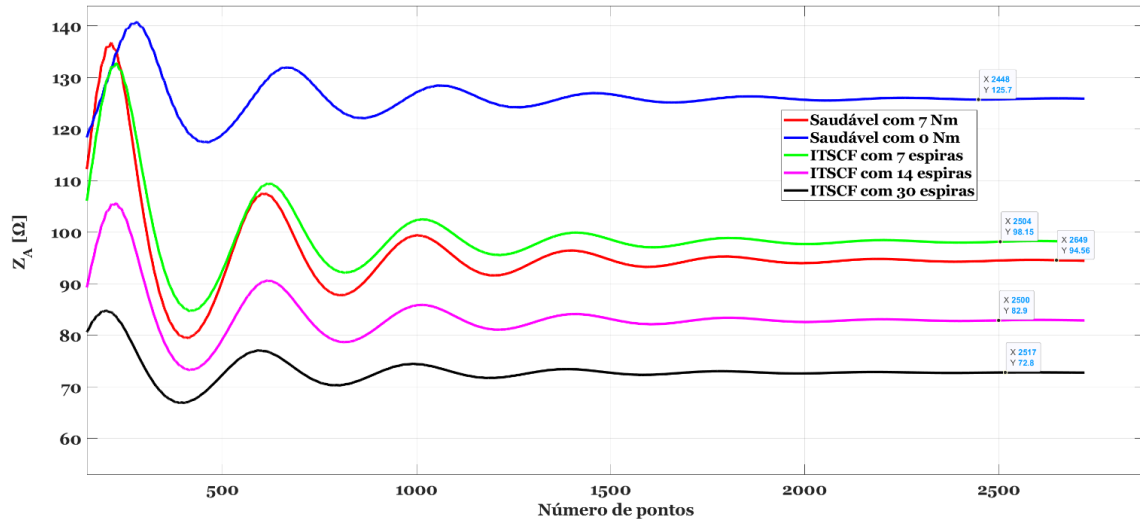


Figura 2.25 - Impedância do enrolamento do estator na fase-a, em funcionamento normal com diferentes cargas e com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.

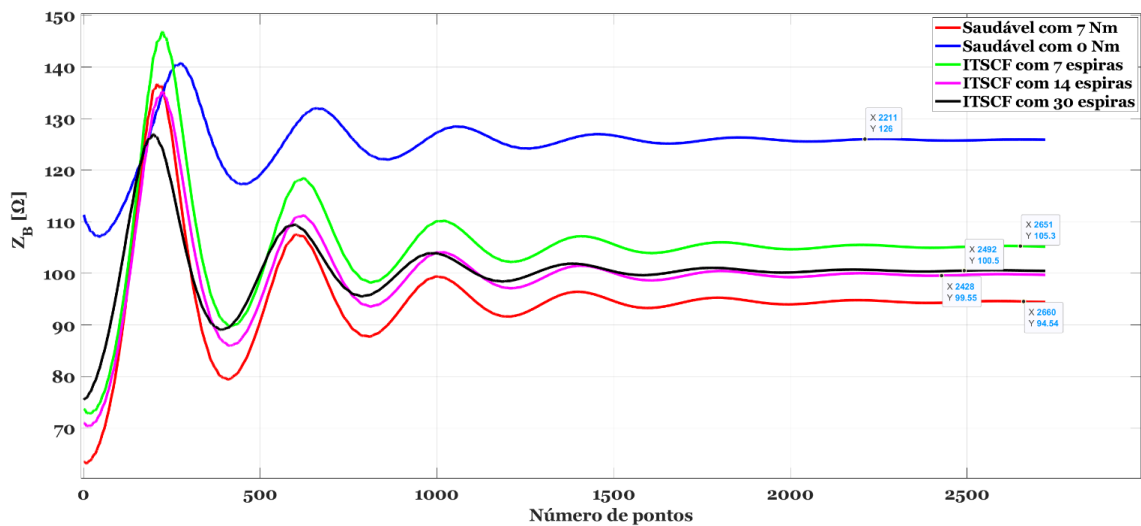


Figura 2.26 - Impedância do enrolamento do estator na fase-b, em funcionamento normal com diferentes cargas e com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.

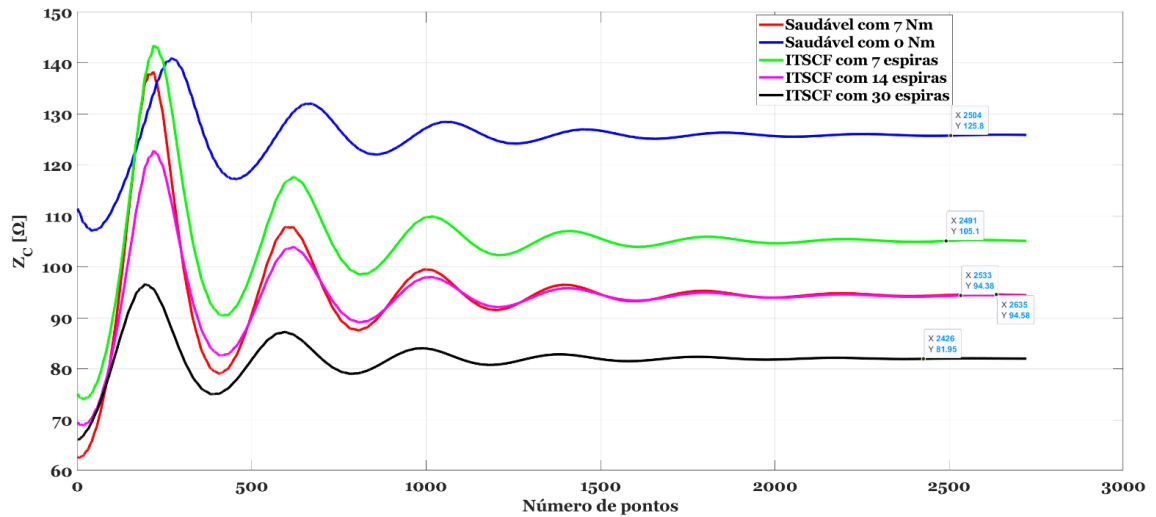


Figura 2.27 - Impedância do enrolamento do estator na fase-c, em funcionamento normal com diferentes cargas e com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.

Com a aplicação desta técnica, fica evidente nas Figuras 2.25, 2.26 e 2.27 que as impedâncias calculadas derivadas dos componentes de tensão e corrente exibem variações perceptíveis quando diferentes níveis de carga são aplicados. Estas variações indicam um grau de sensibilidade às mudanças de carga. Além disso, aquando a ocorrência de uma avaria de curto-circuito entre espiras, verifica-se que as mesmas figuras apresentam variações adicionais nos valores de impedância, com a magnitude dessas variações aumentando à medida que a severidade da avaria se intensifica. Apesar destas observações, pode concluir-se que as impedâncias de fase, Z_{abc} , não servem como indicadores confiáveis para a deteção de avarias, pois são influenciadas pelas variações de carga, tornando difícil isolar as alterações relacionadas com a avaria com aquelas causadas por flutuações normais de carga.

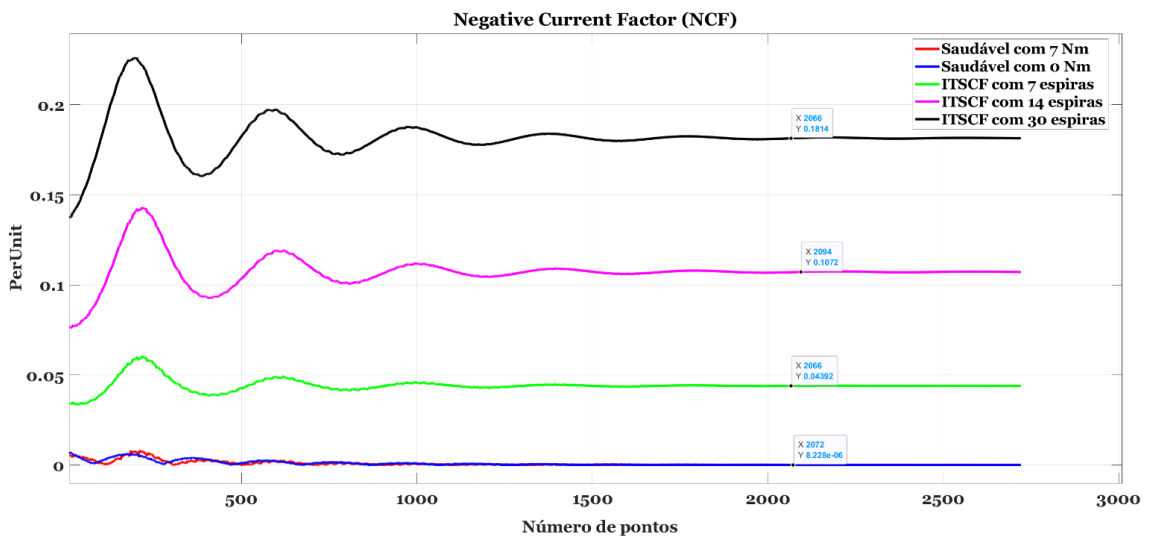


Figura 2.28 - Indicador NCF para funcionamento normal e funcionamento com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.

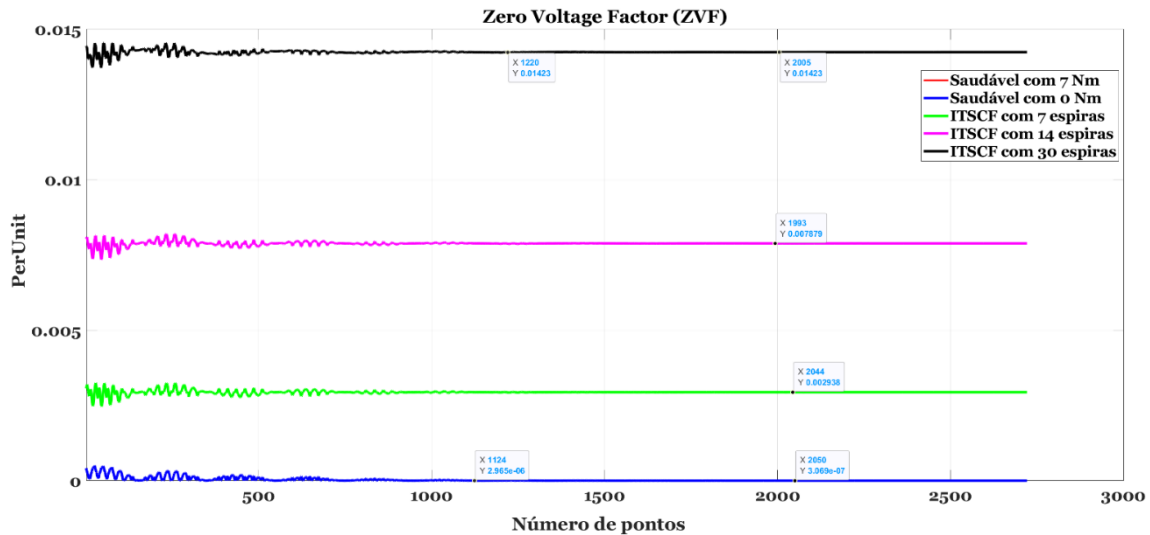


Figura 2.29 - Indicador ZVF para funcionamento normal e funcionamento com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.

Nas tabelas 2.4 e 2.5 é apresentada a taxa de variação de saudável para avaria para o funcionamento normal e para a avaria de curto-circuito entre espiras com diferentes severidades, para uma carga de 0 Nm e de 7 Nm, respetivamente. Em ambas as tabelas, verifica-se que não existem variações significativas para diferentes condições de carga, demonstrando a robustez da técnica perante estas variações. No entanto, é evidente a disparidade dos valores nos parâmetros NCF , ZVF e Z_{abc} para diferentes severidades de avaria (7 espiras, 14 espiras e 30 espiras).

Tabela 2.4 - Valores quantitativos dos indicadores propostos de avaria com 0 Nm.

	Condição saudável	7 espiras	14 espiras	30 espiras	Taxa de variação (%)		
					7	14	30
ZVF	0,0000000 4921	0,00293 8	0,007879	0,01423	>>1000%	>>1000%	>>1000%
NCF	0,0000474 7	0,04392	0,1072	0,1814	>>1000%	>>1000%	>>1000%
ZA	94,56	98,15	82,9	72,8	4%	-12%	-23%
ZB	94,49	105,2	99,84	100,4	11%	6%	6%
ZC	94,58	105,1	94,38	81,95	11%	0,2%	-13%

Tabela 2.5 - Valores quantitativos dos indicadores propostos com 7 Nm.

	Condição saudável	7 espiras	14 espiras	30 espiras	Taxa de variação (%)		
					7	14	30
ZVF	0,0000003069	0,002938	0,007879	0,01423	>>1000%	>>1000%	>>1000%
NCF	0,000008228	0,04392	0,1072	0,1814	>>1000%	>>1000%	>>1000%
ZA	125,7	98,15	82,9	72,8	-16%	-21%	-20%
ZB	125,7	105,2	99,84	100,4	-22%	-34%	42%
ZC	125,8	105,1	94,38	81,95	-16%	-35%	-35%

Para validar a fiabilidade da técnica proposta para a identificação da avaria estudada, é fundamental avaliar a sua robustez que, por sua vez, depende de dois critérios: invariabilidade para diferentes variações de carga e sensibilidade à ocorrência de avaria. A invariabilidade implica que os parâmetros devem permanecer estáveis ou sofrer pequenas variações quando submetidos a diferentes condições de carga, enquanto a sensibilidade refere-se à capacidade de os parâmetros exibirem alterações significativas na presença da avaria. Ao analisar-se as Figuras 2.28 e 2.29, fica claro que a técnica proposta satisfaz ambos os critérios. Os parâmetros permanecem consistentes em diferentes condições de carga, demonstrando invariância, enquanto os indicadores NCF e ZVF apresentam variações significativas e consistentes com o aumento da severidade da avaria, assegurando a sua elevada sensibilidade a avarias de curto-circuito entre espiras (ITSCFs). Portanto, é validado a eficácia e fiabilidade dos indicadores NCF e ZVF na deteção de curto-circuitos entre espiras, tornando esta técnica uma solução robusta para o diagnóstico de avarias.

Capítulo 3

3. Diagnóstico do LS-PMSM com a presença de avarias no estator através de estudos experimentais

No capítulo 3, é descrito a configuração experimental utilizada para a aquisição de dados do motor e são analisados os comportamentos da corrente e dos indicadores propostos para identificar a avaria de curto-circuito entre espiras, sob diferentes condições de operação do motor, adotando a técnica FFT e o MP.

3.1 Configuração experimental

A estrutura de acionamento do motor utilizada nos testes e a configuração detalhada do teste está ilustrada na Figura 3.1. Os ensaios experimentais foram conduzidos utilizando um LS-PMSM configurado em conexão estrela, cujos parâmetros estão listados na Tabela 3.1. O LS-PMSM tem uma potência nominal de 1.1 kW conforme apresentado na Figura 3.1. Consideravelmente, este motor pode ser ligado, diretamente, a uma fonte de alimentação tornando-o adequado para diversas aplicações industriais que exigem uma solução de motor robusta e eficiente. O sistema de acionamento do motor inclui o LS-PMSM e foi projetado para lidar com vários cenários operacionais para avaliar a eficácia dos indicadores de curto-circuito entre espiras. Um gerador síncrono de ímanes permanentes é utilizado para impor o binário de carga, garantindo condições de teste consistentes e precisas.

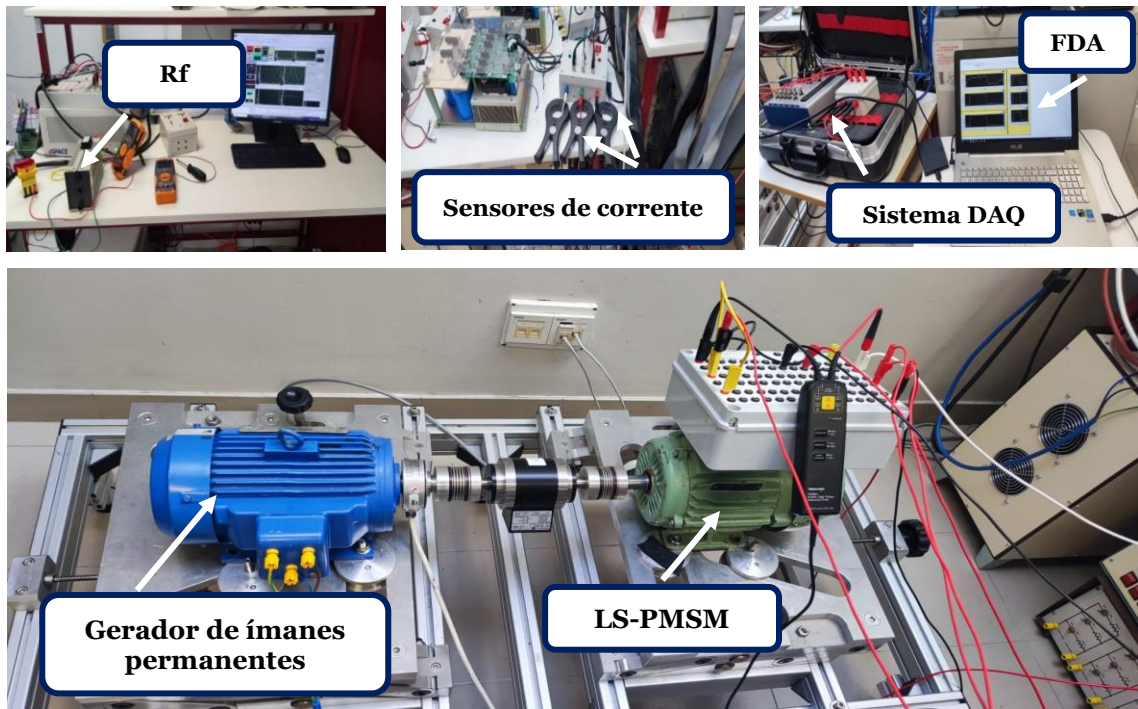


Figura 3.1 - Bancada de testes utilizada.

Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do LS-PMSM.

Parâmetros do Motor

Potência (kW)	1.1
p	4
ω_m (rpm)	1460
R_s (Ω)	4.2
R_r (Ω)	3.87
Auto-Indutância da fase do estator (L_A, L_B, L_C)(mH)	119.33
Indutância de fuga da fase do estator ($L\delta_s$)(mH)	17.077
Auto-Indutância da fase do rotor (L_A, L_B, L_C)(mH)	119.33
Indutância de fuga da fase do rotor ($L\delta_r$)(mH)	17.077
Indutância mútua entre fases do estator ($M_{AB}, M_{AC}, M_{BA}, M_{CA}, M_{BC}, M_{CB}$)(mH)	-59.66
Indutância mútua entre fases do rotor ($M_{AB}, M_{AC}, M_{BA}, M_{CA}, M_{BC}, M_{CB}$)(mH)	-59.66
Valor máximo da indutância mútua entre as fases do estator e rotor (M_{sr})(mH)	119.33

propostos, implementado através do código MATLAB, foi construído utilizando a abordagem *STLSP*. O nó de script MATLAB foi adotado na implementação do programa LabVIEW. Uma placa de aquisição de dados NI-USB-6366 foi usada para adquirir e amostrar os sinais de tensão e correntes do LS-PMSM com uma taxa de amostragem de $20kHz$. Estes processos são repetidos indefinidamente, permitindo uma triagem *online* eficaz e o acompanhamento da evolução dos indicadores propostos ao longo do tempo, bem como de outros parâmetros relevantes do motor, como tensões, correntes, impedâncias e componentes simétricos de tensão.

3.2 Comportamento do LS-PMSM em funcionamento normal e defeituoso

Da mesma forma que foi realizado no capítulo 2, neste capítulo serão apresentados os comportamentos da máquina. No entanto, neste caso, são analisados e mostrados os resultados dos testes experimentais.

A Figura 3.3 ilustra as formas de onda de corrente para a fase-a sob diferentes severidades de curto-circuito entre espiras no LS-PMSM. As formas de onda da corrente são exibidas para três severidades de avaria diferentes: 4 espiras, 9 espiras e 13 espiras.

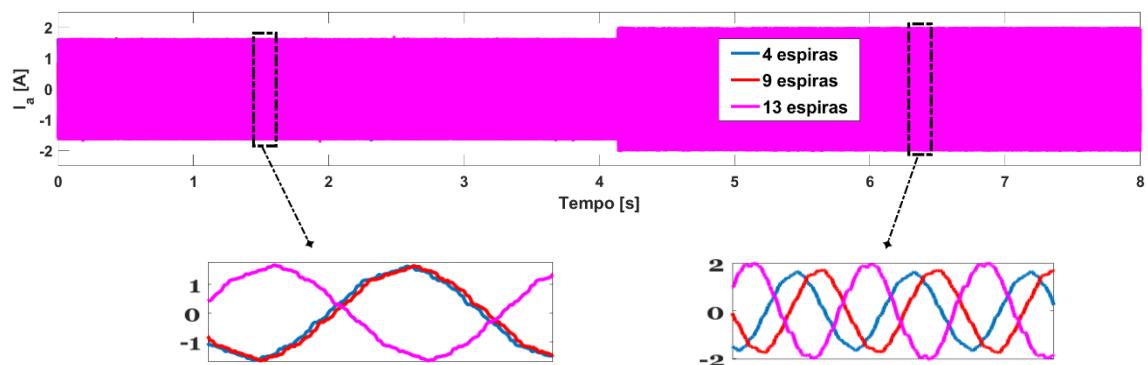


Figura 3.3 - Corrente da fase-a com diferentes severidades de curto-circuito entre espiras.

A Figura 3.3 demonstra, claramente, o impacto da severidade da avaria na corrente da fase-a do LS-PMSM. À medida que a severidade da avaria aumenta (de 4 para 13 espiras), a forma de onda da corrente torna-se cada vez mais distorcida e a magnitude da corrente aumenta. Isto destaca a importância da detecção precoce de avarias e da estimativa precisa da severidade para evitar danos adicionais e garantir a operação confiável do motor. Deste modo, para avaliar a eficácia da abordagem proposta, a investigação experimental estabelece três critérios de desempenho distintos para o LS-PMSM: sensibilidade a curto-circuito entre espiras de baixa severidade, sensibilidade em diferentes níveis de severidade de avaria, robustez na presença de curto-circuito entre espiras em diferentes fases e resistência a variações de carga.

3.2.1 Resultados obtidos através do FFT na corrente Ia

Os sinais de curto-circuito são analisados e identificados por meio da FFT. A avaliação da corrente é efetuada tendo em conta diferentes cargas, 0 Nm e 5 Nm, inserindo-se diferentes severidades de curto-circuito entre espiras. Como resultado são obtidos dois espectros, representados, respetivamente, pela Figura 3.4 e Figura 3.5.

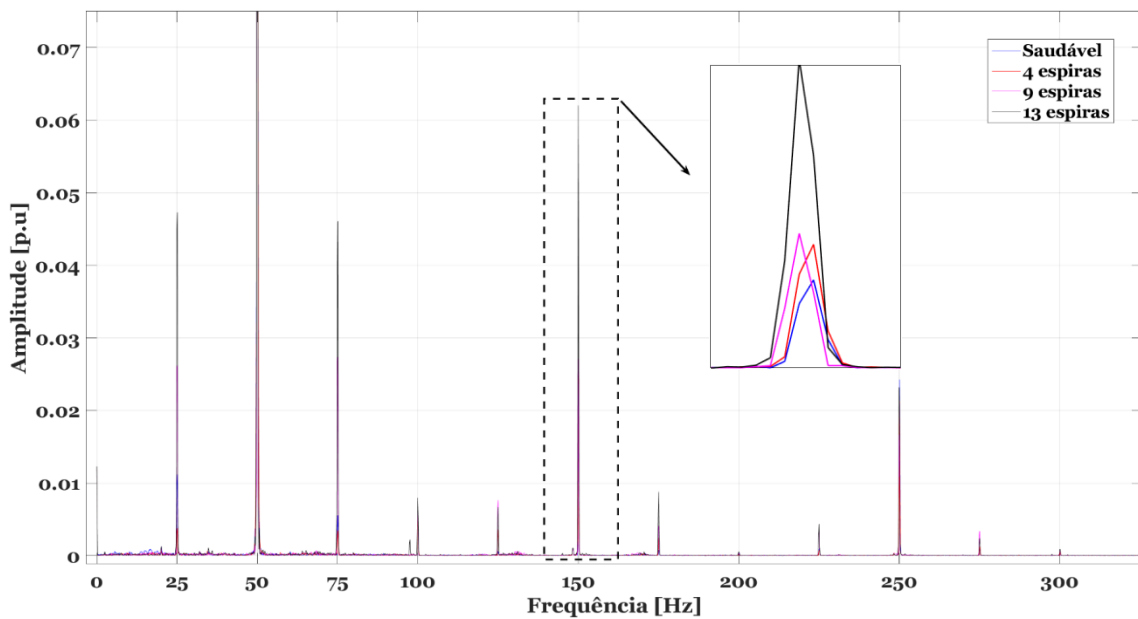


Figura 3.4 - Espectro das correntes do estator para diferentes níveis de severidade do curto-circuito e para uma carga 0 Nm.

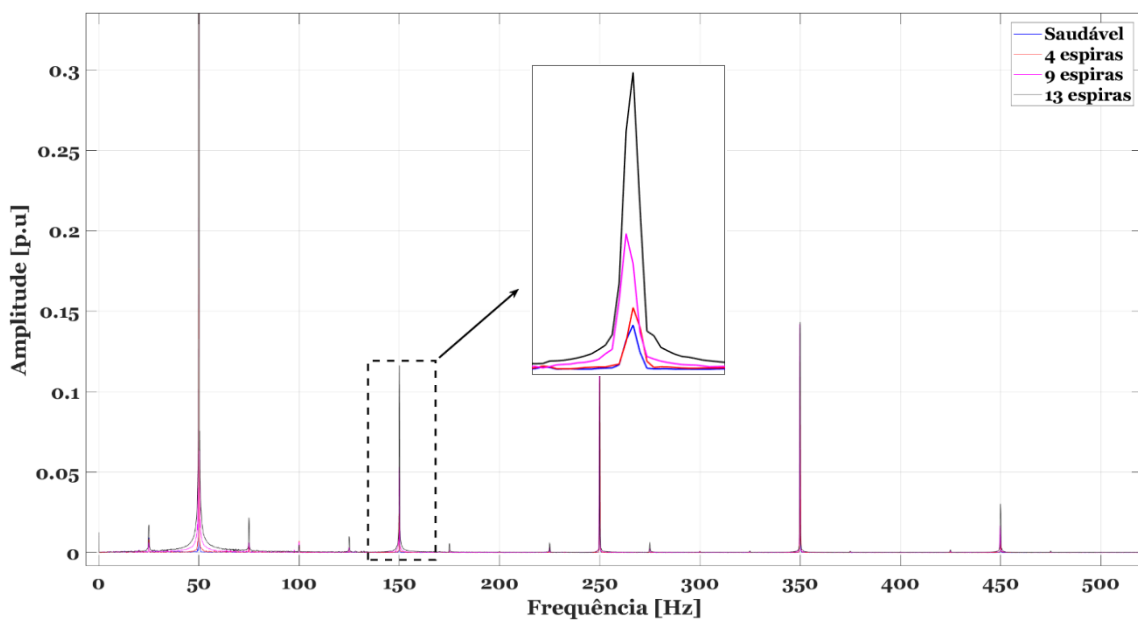


Figura 3.5- Espectro das correntes do estator para diferentes níveis de severidade do curto-circuito e para uma carga 5 Nm.

Os espectros presentes nas Figuras 3.4 e 3.5, possibilitam analisar o comportamento das componentes de frequência dos sinais obtidos. Deste modo, observa-se a presença e evolução significativa do harmônico, associado à frequência 150 Hz, com o aumento do nível de severidade. Esta frequência é característica da avaria de curto-circuito entre espiras, o que confirma a ocorrência de curto-circuito no motor analisado, podendo ser considerada para efeitos de diagnóstico. Adicionalmente, pode verificar-se também a presença de outros dois harmônicos nas frequências 25 Hz e 75 Hz. Estes harmônicos indicam outro tipo de avarias no sistema utilizado para realizar os testes experimentais. Estes harmônicos podem representar problemas associados a excentricidade no motor.

Com base nas Tabelas 3.2 e 3.3, é visível a taxa de variação do funcionamento normal para a de condição de avaria com diferentes severidades. Com atenção aos 150 Hz, é evidente o aumento da amplitude do harmônico com a evolução da severidade da avaria.

Tabela 3.2 - Valores obtidos através dos espectros da FFT.

	Frequência (Hz)	Condição Saudável	4 Espiras	9 Espiras	13 Espiras	Taxa de variação (%)		
						4	9	13
0 Nm	25	0,01122	0,003796	0,0262	0,0473	-66%	134%	322%
	75	0,005547	0,003454	0,02737	0,04608	-38%	393%	731%
	150	0,01771	0,02485	0,02706	0,06205	40%	53%	250%

Tabela 3.3 - Valores obtidos através dos espectros da FFT.

	Frequência (Hz)	Condição Saudável	4 Espiras	9 Espiras	13 Espiras	Taxa de variação (%)		
						4	9	13
5 Nm	25	0,008745	0,008255	0,004667	0,01731	-6%	-47%	98%
	75	0,003046	0,003224	0,006152	0,01792	6%	102%	488%
	150	0,01734	0,0242	0,05314	0,1163	40%	206%	571%

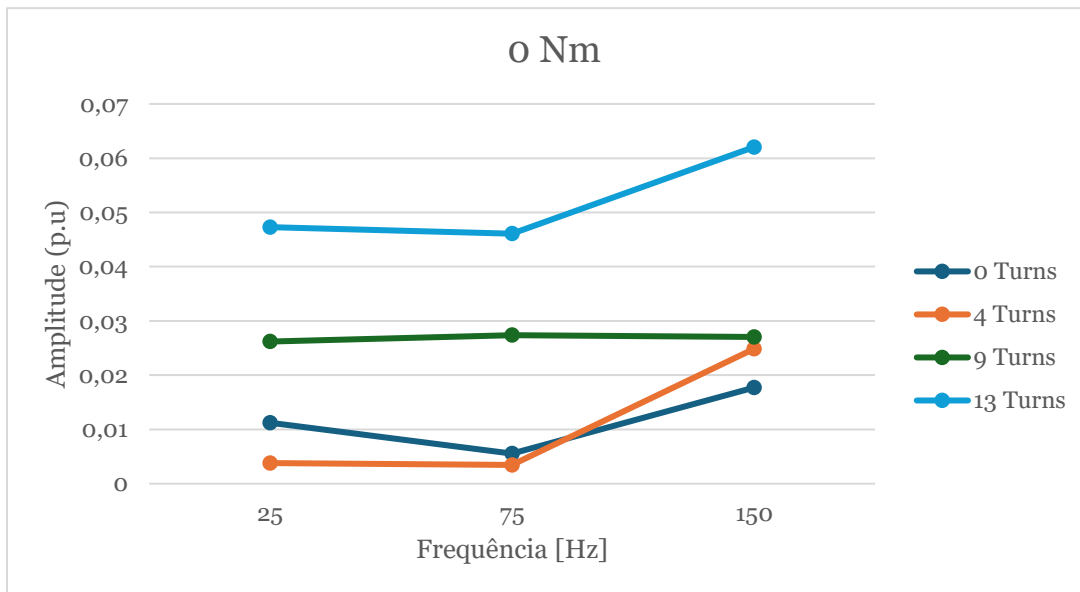


Figura 3.6 - Gráfico da evolução da avaria para as frequências 25, 75 e 250 Hz com diferentes níveis de severidades.

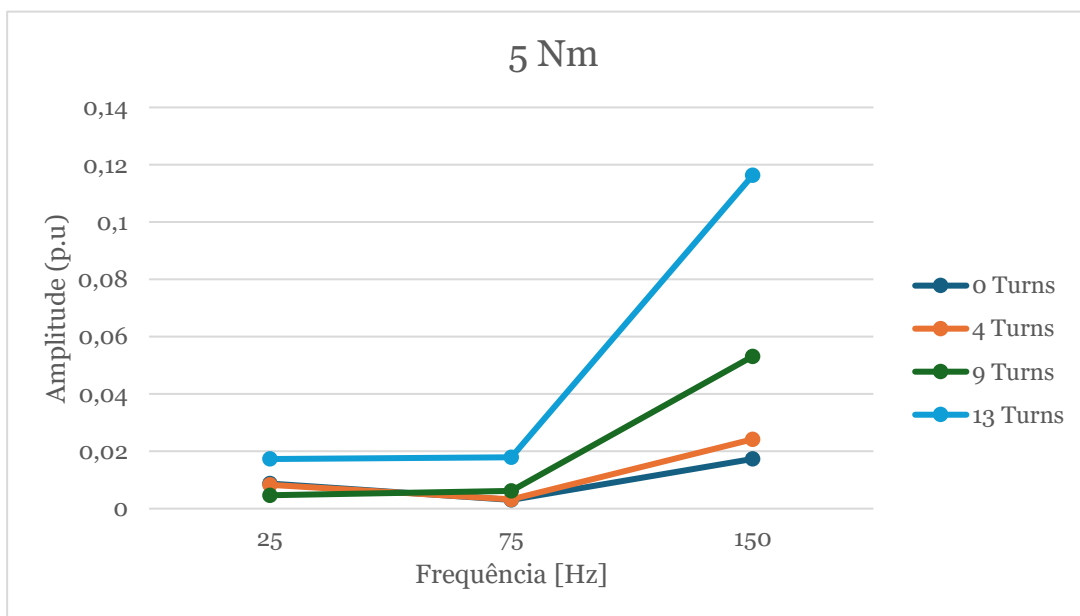


Figura 3.7 - Gráfico da evolução da avaria para as frequências 25, 75 e 250 Hz com diferentes níveis de severidades.

Tendo em conta a análise das Figuras 3.6 e 3.7, conclui-se que para as diferentes frequências (25, 75 e 150 Hz) com o aumento do nível de severidade aumenta, acentuadamente, a amplitude do harmónico, principalmente, como é evidente na Figura 3.6.

3.2.1.1 Análise da corrente de sequência zero

A componente simétrica da sequência zero é caracterizada por três fasores com módulo e ângulo de fase iguais, resultantes da Transformada de Fortescue, referida no capítulo 2. Para um sistema desequilibrado ocorrem variações na corrente de sequência zero (I_0) ou a *Zero Sequence Current* (ZSC), o que pode ser indicativo de anomalias ou avarias no sistema elétrico. A Figura 3.8 descreve o processo para a obtenção desta componente. Além disso, com o objetivo de compreender o comportamento de I_0 no sistema analisado, é realizada a análise espectral, com a aplicação da FFT, permitindo identificar os harmônicos associados a esta componente. O espectro da corrente de sequência zero encontra-se representado pelas Figuras 3.9 e 3.10.

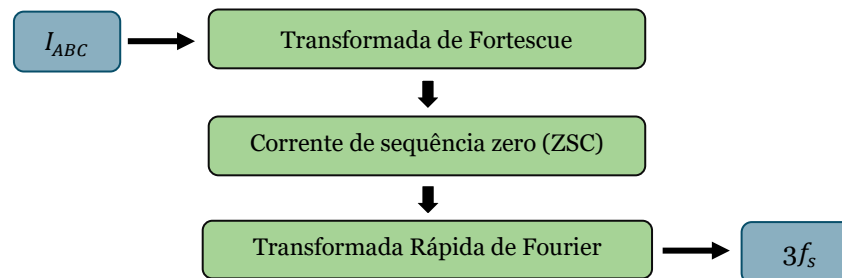


Figura 3.8 - Descrição da obtenção da ZSC.

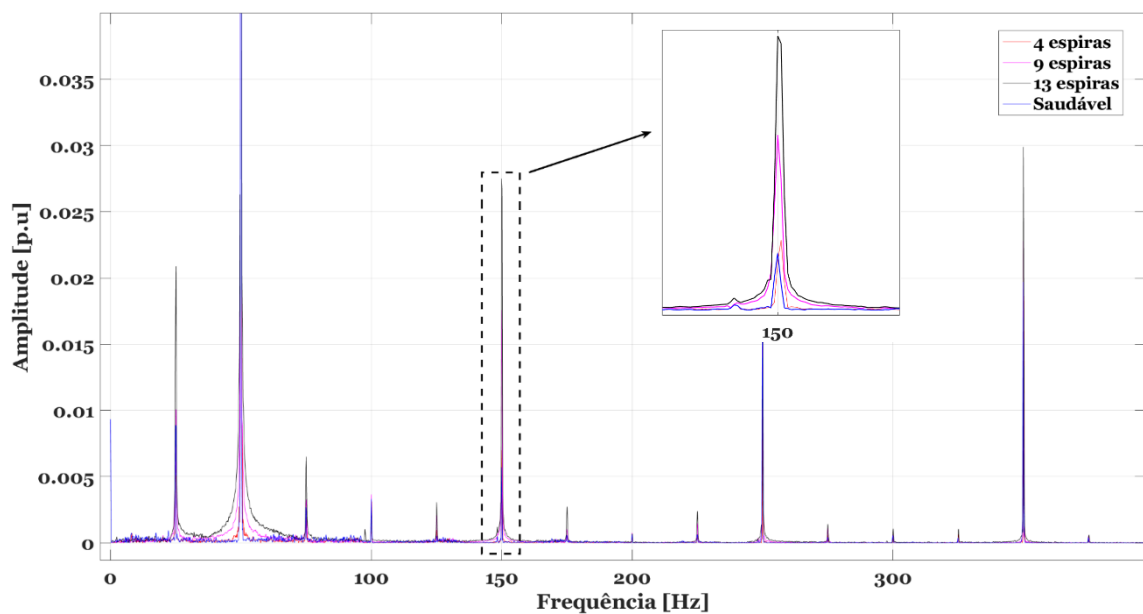


Figura 3.9 - Gráfico espectral associado aos harmônicos da corrente de sequência zero para diferentes severidades, carga 0 Nm.

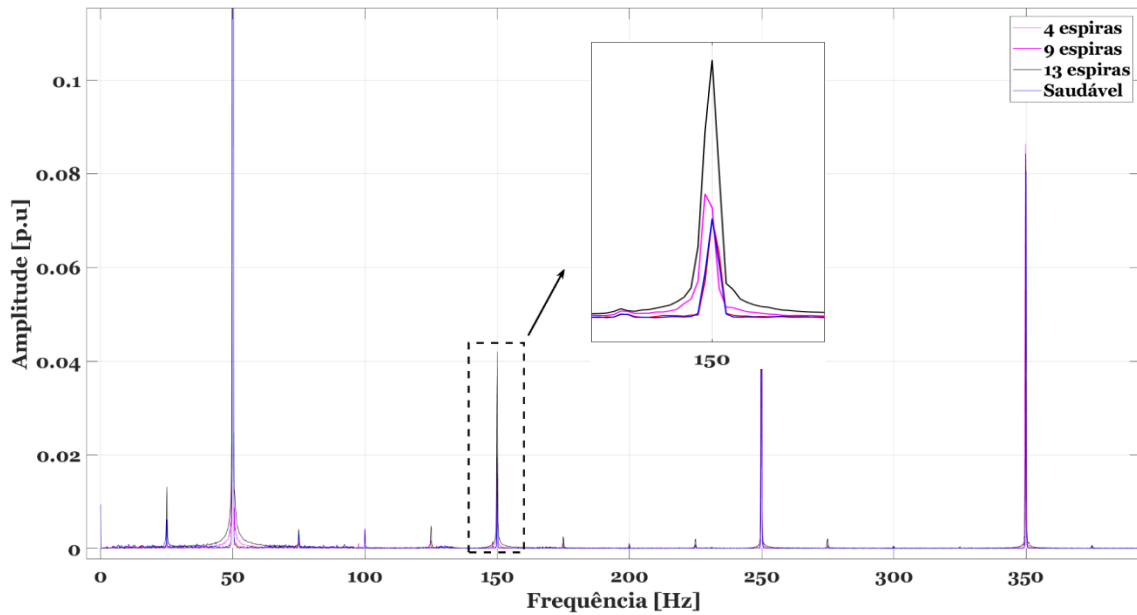


Figura 3.10 - Gráfico espectral associado aos harmônicos da corrente de sequência zero para diferentes severidades, carga 5 Nm.

Tabela 3.4 - Valores obtidos através dos espectros da FFT de I_0 .

I_0	Condição saudável	4 Espiras	9 Espiras	13 Espiras	Taxa de variação (%)		
					4	9	13
0 Nm	0,005707	0,006996	0,01757	0,02749	23%	208%	382%
5 Nm	0,01619	0,01616	0,01798	0,04208	-0,2%	11%	160%

Nas Figuras 3.9 e 3.10 é evidente a presença do terceiro harmônico no espectro da corrente da sequência zero, característica de curto-circuito entre espiras. Para a amplitude deste harmônico deteta-se a acentuação à medida que a severidade da avaria aumenta. Juntamente com a Tabela 3.4, é possível observar-se e comparar a taxa de variação de I_0 em funcionamento normal para a de condição de avaria. Para a carga, 0 Nm, a taxa de variação do sistema saudável para o sistema com curto-circuito entre 13 espiras corresponde a 382%. Por outro lado, da mesma forma, mas para uma carga de 5 Nm, a taxa de variação é de 160%.

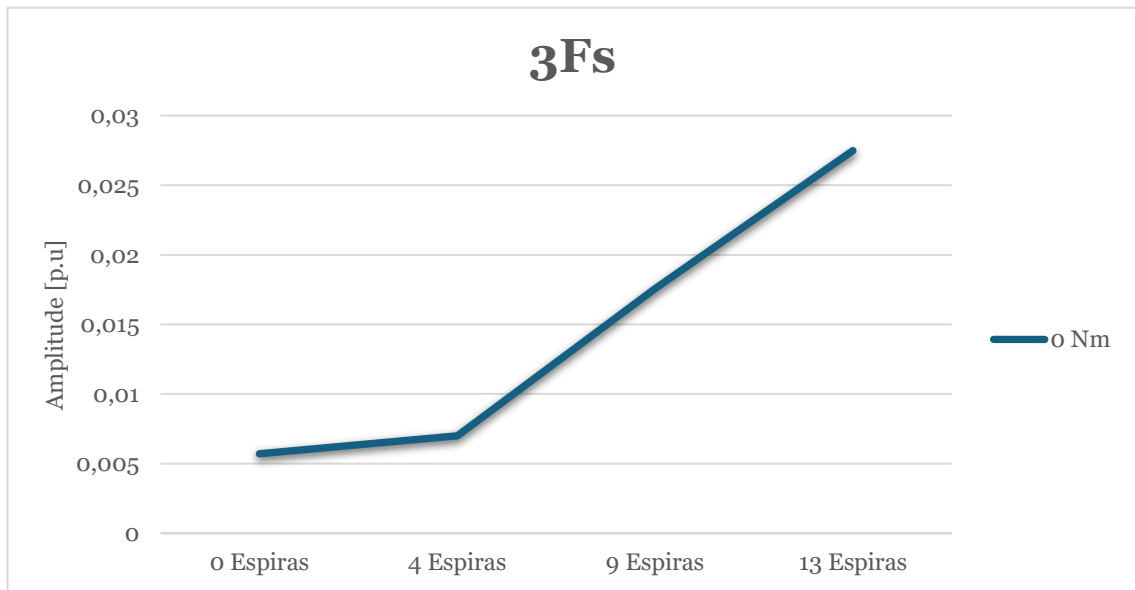


Figura 3.11 - Gráfico da evolução da avaria no Terceiro Harmônico para a corrente de sequência zero.

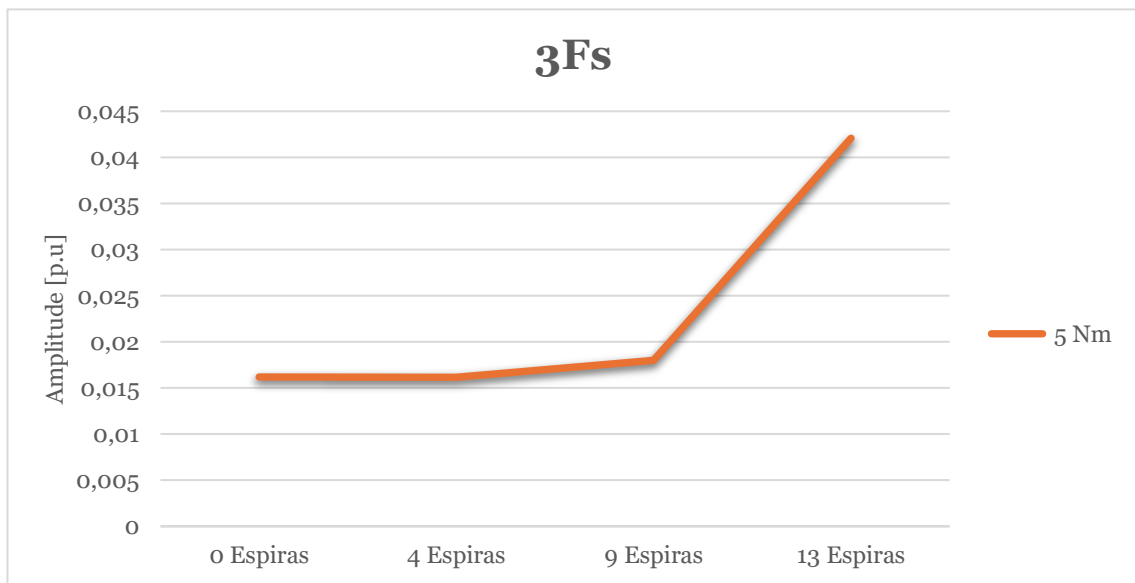


Figura 3.12 - Gráfico da evolução da avaria no Terceiro Harmônico para a corrente de sequência zero.

Com base nas Figuras 3.11 e 3.12, constata-se que, com o espectro da corrente de sequência zero, existe uma evolução essencialmente linear entre o número de espiras e a amplitude da frequência no terceiro harmônico. Deste modo, conclui-se que I_0 apresenta sensibilidade à avaria de curto-circuito entre espiras, a diferentes níveis de severidade e também robustez à presença de diferentes cargas.

3.2.2 Resultados obtidos através do Método de Prony

Portanto, ao utilizar o método *STLSP*, tratado no capítulo 2, a estratégia de diagnóstico é dividida em três passos:

Passo 1- Medição das tensões e correntes do estator recolhidas, em tempo real (*online*), onde um total de 50 amostras de dados são obtidas para cada janela de tempo. Em seguida, para cada sinal de tensão e corrente, as amplitudes e ângulos de fase do harmónico fundamental (f_s) são estimados e localizados utilizando o método *STLSP*.

Passo 2- Para os testes experimentais, procede-se ao cálculo das componentes simétricas de Fortescue inerentes às impedâncias dos enrolamentos do estator:

$$\left\{ Z_{1fs}^P = \frac{V_{1fs}^P}{I_{1fs}^P}; Z_{1fs}^N = \frac{V_{1fs}^N}{I_{1fs}^N}; Z_{1fs}^Z = \frac{V_{1fs}^Z}{I_{1fs}^Z} \right\} \quad (3.2)$$

As componentes de sequência positiva e de sequência negativa são calculadas utilizando a Transformada de Fortescue, visando construir o Fator de Tensão Negativo ou *Negative Voltage Factor* (NVF), o Fator de Tensão Zero ou *Zero Voltage Factor* (ZVF), o Fator de Corrente Negativo ou *Negative Current Factor* (NCF) e o Fator de Corrente Zero ou *Zero Current Factor* (ZCF). Os indicadores propostos são calculados como uma relação de magnitudes após a obtenção dos componentes simétricos.

Passo 3- Determinação dos fatores de impedância e também dos fatores relativos às tensões e correntes.

$$\left\{ \begin{array}{l} NVF = \frac{V_{1fs}^N}{V_{1fs}^P} \text{ Negative Voltage Factors} \\ ZVF = \frac{V_{1fs}^Z}{V_{1fs}^P} \text{ Zero Voltage Factors} \\ NCF = \frac{I_{1fs}^N}{I_{1fs}^P} \text{ Negative Current Factors} \\ ZCF = \frac{I_{1fs}^Z}{I_{1fs}^P} \text{ Zero Current Factors} \\ NIP = \frac{Z_{1fs}^N}{Z_{1fs}^P} \text{ Negative Impedance Factors} \\ ZIF = \frac{Z_{1fs}^Z}{Z_{1fs}^P} \text{ Zero Impedance Factors} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Tendo isto em conta, o método proposto pode ser descritos pela Figura 3.13.

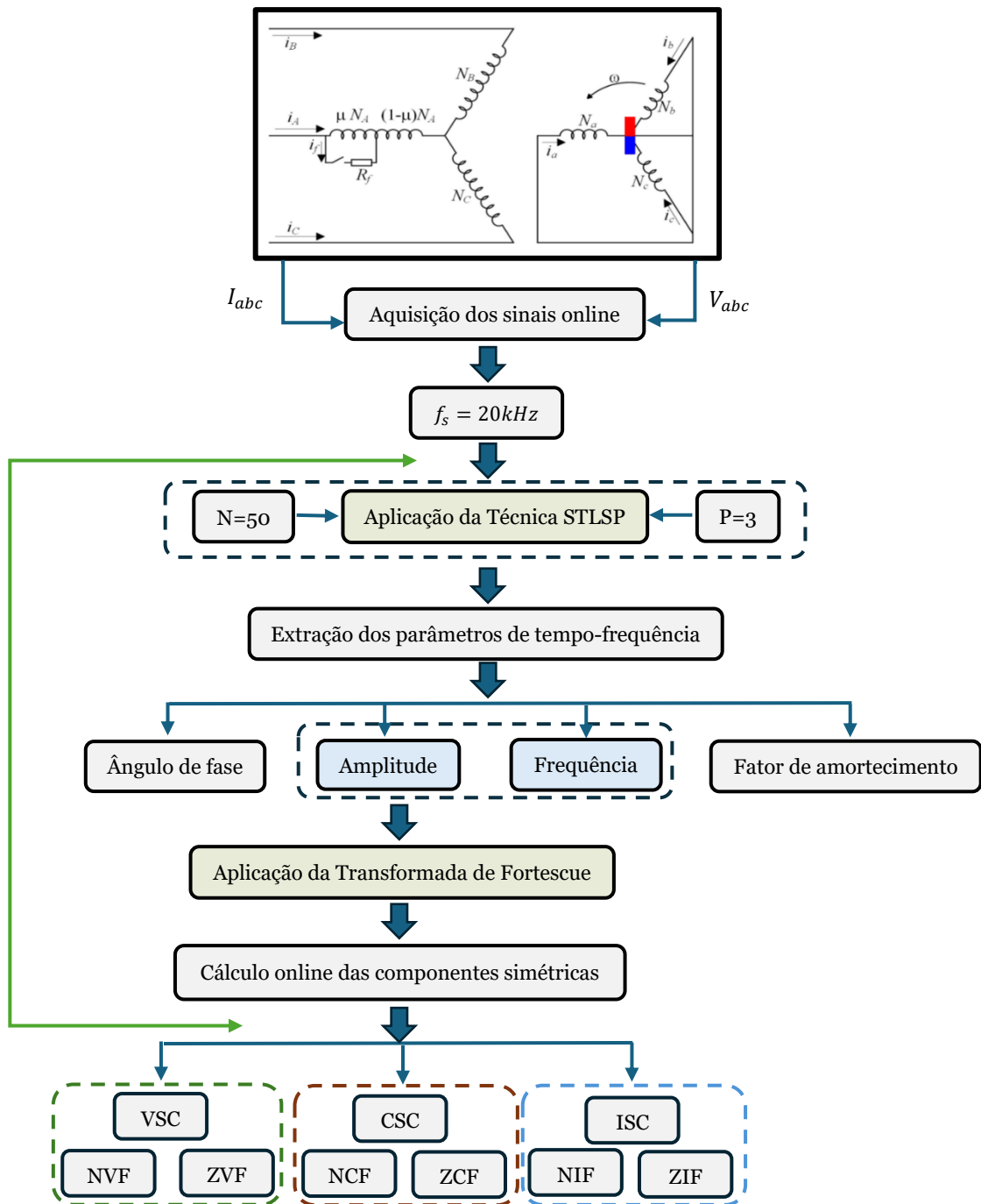


Figura 3.13 - Descrição do método proposto para a extração dos indicadores.

Portanto, na fase inicial de testes, o algoritmo proposto, analisa a presença de curto-circuito entre espiras na fase-a com diferentes graus de severidade. Os resultados no domínio do tempo analisados pelo algoritmo são apresentados na Figura 3.14. A análise quantitativa detalhada das componentes simétricas estimadas das tensões, impedâncias de fase, juntamente com os indicadores propostos são fornecidos na Tabela 3.5. A figura apresentada ilustra três fatores de diagnóstico - ZVF, NVF e ZIF - para a fase-a sob diferentes níveis de severidade de curto-circuito entre espiras no LS-PMSM. Os fatores de diagnóstico são demonstrados para três severidades de avaria distintas: 4 espiras, 9 espiras e 13 espiras. Após a introdução da avaria, é possível observar-

se um aumento significativo no ZVF, sendo este mais acentuado para severidades de avaria mais elevadas. O NVF exibe pequenas flutuações, permanecendo, no entanto, geralmente estável em todas as severidades, indicando uma operação normal. De forma semelhante ao ZVF, o ZIF também aumenta significativamente após a introdução do curto-circuito, com um aumento mais pronunciado em casos de maior severidade. Com efeito, os indicadores aumentaram, consideravelmente, de 0.0027 para 0.01983 e de 0.00098 para 0.009, implicando aumentos de 633.3% e 818.36%, respetivamente. Os fatores propostos - ZVF e ZIF- demonstram sensibilidade variável à severidade de avaria. O ZVF e o ZIF, em particular apresentam aumentos substanciais correspondentes à severidade da avaria, com valores mais elevados relativos ao curto-circuito entre 13 espiras. Estes fatores possibilitam medidas claras e quantificáveis para diagnosticar e avaliar a gravidade da avaria, auxiliando na deteção precoce e manutenção do motor. O ZIF também indica a severidade da avaria, porém com alterações menos pronunciadas em comparação com o ZVF para avarias de menor severidade. Isto é particularmente evidente pois o ZIF não apresentou mudanças perante a presença de 4 espiras em curto-circuito. No geral, é possível concluir que o sistema para a deteção da avaria é eficaz para monitorizar e avaliar a condição do LS-PMSM para diferentes níveis de severidade de avaria.

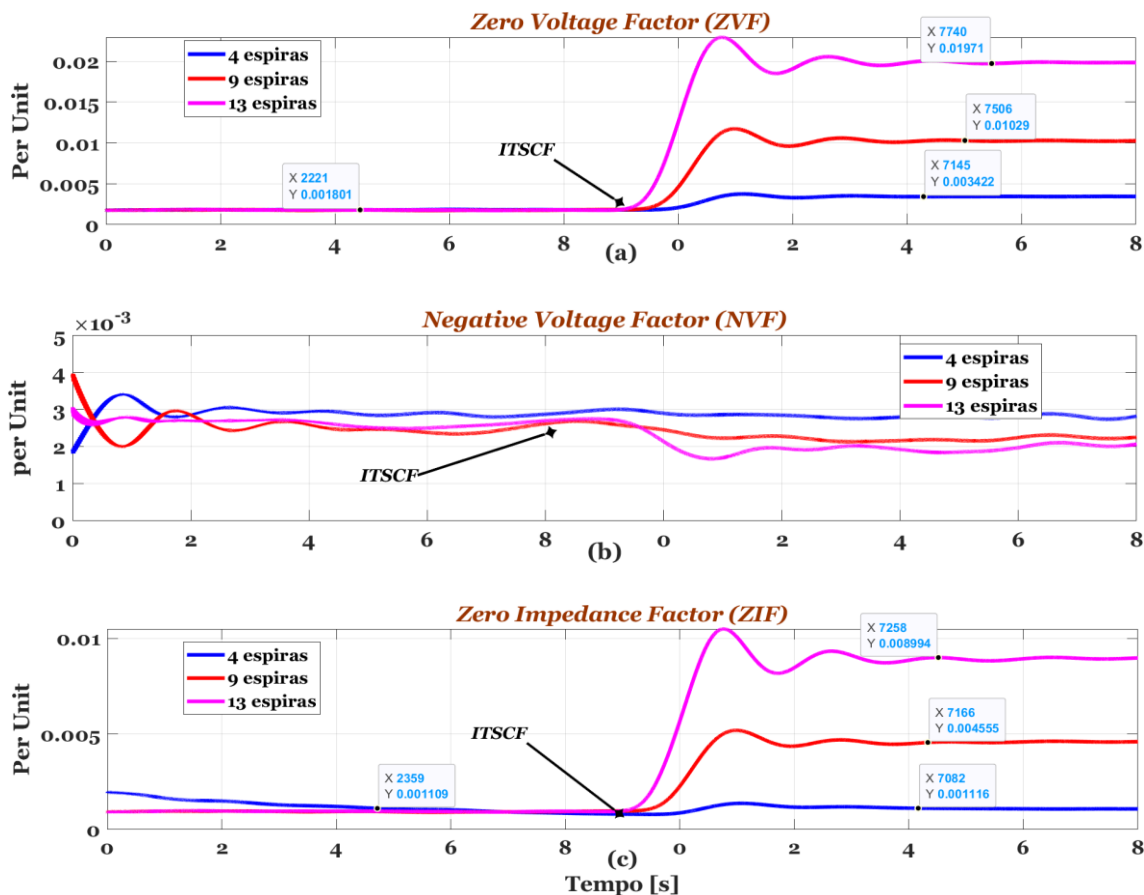


Figura 3.14 - A evolução temporal dos indicadores propostos: (a) ZVF; (b) NVF; (c) ZIF com curto-circuito entre espiras com diferentes severidades.

De seguida, foi testada a capacidade da estratégia e dos indicadores propostos para detetar o curto-circuito entre espiras em diferentes fases do LS-PMSM. A Figura 3.15 mostra o efeito da avaria em três fatores de diagnóstico - NVF (Figura 3.15 (a)), NVF (Figura 3.15 (b)) e ZIF (Figura 3.15 (c)) - para diferentes fases (fase-a, fase-b e fase-c) da máquina. As respostas desses fatores são apresentadas para as três fases durante o curto-circuito. Com a introdução da avaria, verifica-se um aumento significativo no ZVF, principalmente na fase-a.

- **Fase-a:** Exibe um aumento substancial tanto em ZVF quando em ZIF após a ocorrência do curto-circuito entre espiras, indicando um efeito pronunciado da avaria. É possível verificar, através dos indicadores, que existe um aumento considerável, de 0.0027 para 0.01983 e de 0.00098 para 0.009, representando aumentos de 633.33% e 818.36%, respetivamente.
- **Fase-b:** Mostra um aumento moderado em ZVF e ZIF, refletindo um impacto menos severo comparado à fase-a. Neste caso, os indicadores aumentaram, substancialmente, de 0.0027 para 0.01501 e de 0.00098 para 0.00645, representando aumentos de 455.92% e 558.16%, respetivamente.
- **Fase-c:** Demonstra um aumento apreciável no ZVF, mas menos pronunciado do que na fase-a, mas mais significativo do que na fase-b. Por outro lado, o indicador ZIF (Figura 3.15 (c)) na fase-c mostra um aumento maior em comparação com as fases a e b, aumentando de 0.00098 para 0.012, o que representa um aumento de 1124.48%.

Na Figura 3.15 (b), o NVF permanece relativamente estável com pequenas flutuações para todas as fases, indicando operação normal. Os resultados obtidos confirmam que os fatores propostos, ZVF e ZIF, demonstram respostas variadas ao curto-circuito entre espiras no LS-PMSM. Tanto o ZVF quanto o ZIF expressam aumentos significativos após a introdução da avaria, com a fase-a experimentando o maior aumento, indicando o impacto do curto-circuito mais severo. No entanto, em termos de quantidade e limiar, o ZVF fornece um fator mais claro e definido para detetar impactos de menor severidade e específicos a cada fase de curto-circuito.

A análise de impedâncias fornece informações importantes sobre a presença de avarias. Conforme mostrado na Figura 3.16 (I), diferentes severidades de avarias afetam, claramente, a impedância na fase onde a avaria está a ocorrer, bem como em outras fases, devido ao acoplamento magnético dentro da máquina. Embora a influência varie, ela permanece consistente em termos de ordem de fase, como ilustrado na Figura 3.16 (II). O acoplamento magnético faz com que os efeitos da avaria se propaguem por toda a máquina, evidenciando mudanças detetáveis na impedância que refletem as características da avaria. Uma análise quantitativa detalhada das variações de impedância em diferentes fases é apresentada na Tabela 3.6, proporcionando uma visão abrangente de como a avaria impacta o desempenho da máquina.

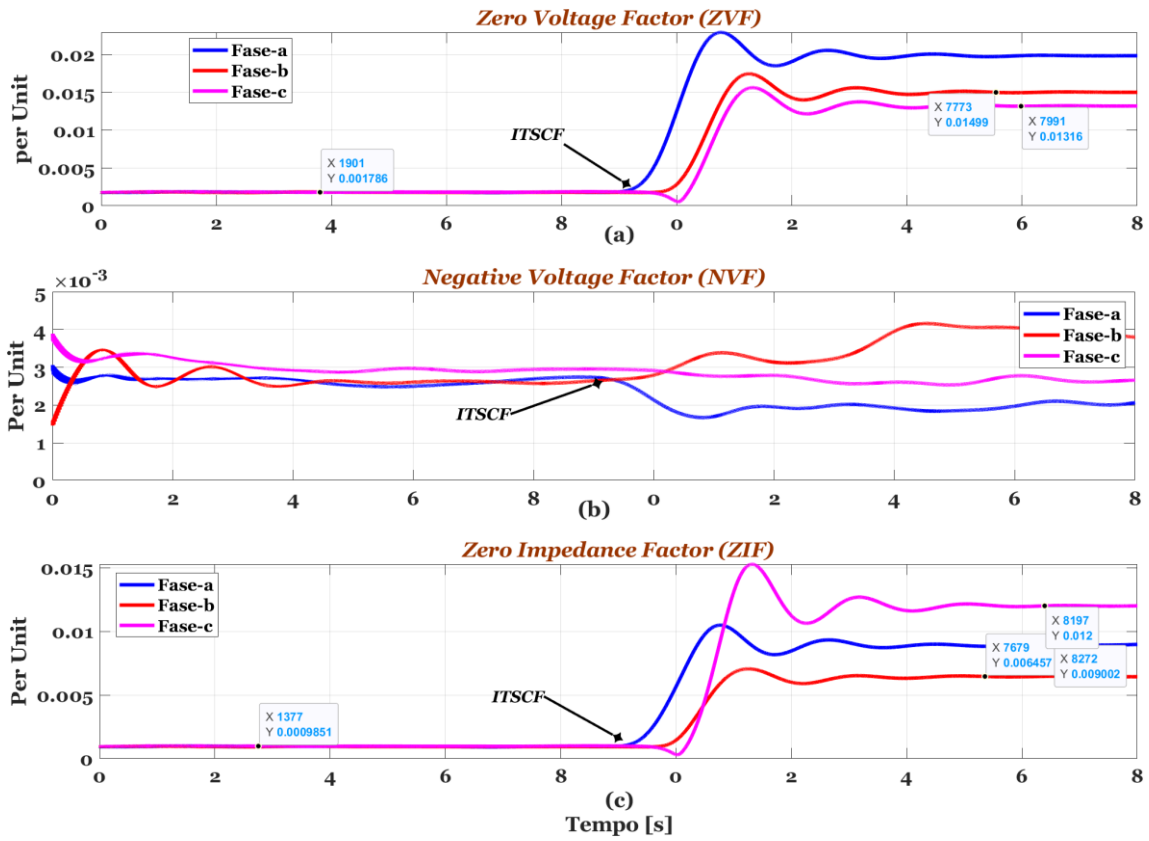


Figura 3.15 - A evolução temporal de (a) ZVF; (b) NVF; (c) ZIF com a presença de 13 espiras em curto-circuito.

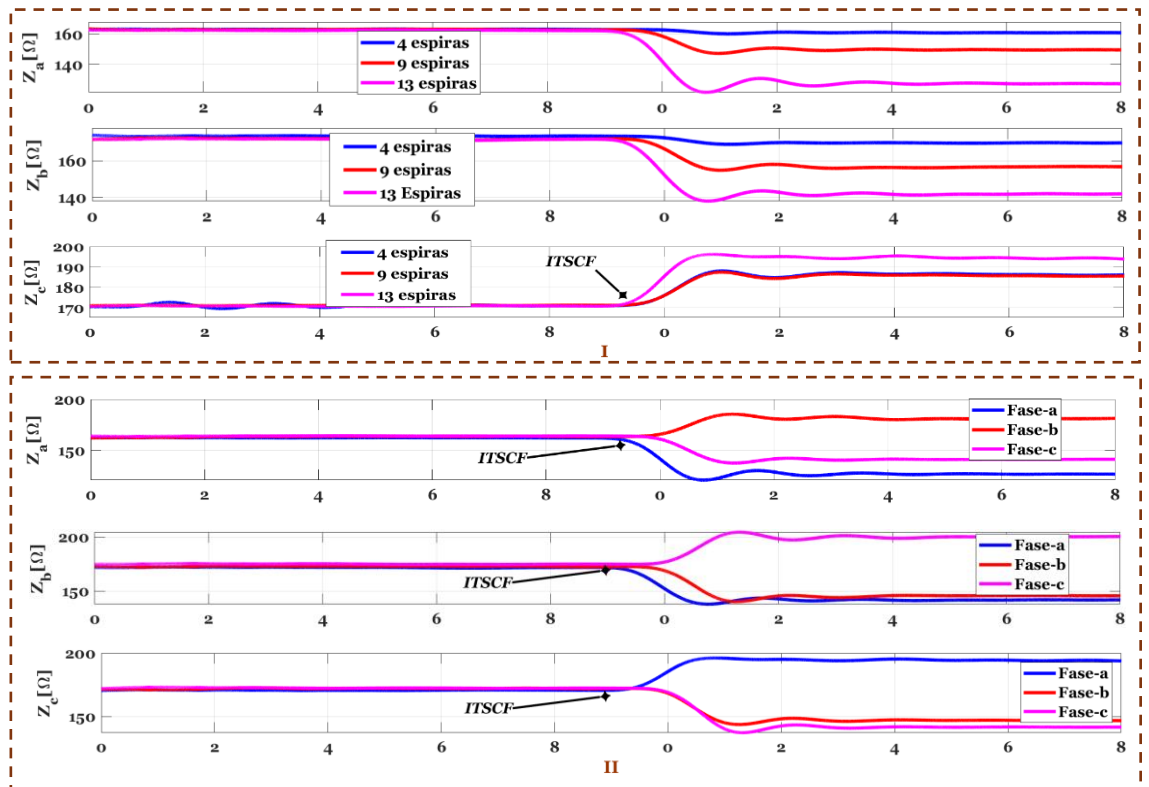


Figura 3.16 - Evolução temporal das impedâncias de fase: (I) para diferentes severidades; (II) 13 espiras em curto-circuito em diferentes fases.

Tabela 3.5 - Análise quantitativa dos indicadores propostos no estado saudável e com avaria, com diferentes níveis de severidade curto-circuito entre espiras.

Indicadores e Fatores	Condição Saudável		Condição de avaria (Fase-a)				
	1.3 Nm	4 espiras		9 espiras		13 espiras	
		Amplitude	Taxa de variação (%)	Amplitude	Taxa de variação (%)	Amplitude	Taxa de variação (%)
ZVF	0.0018	0.00342	90	0.0103	472.33	0.01971	994.44
NVF	0.0026	0.00262	0	0.00262	0	0.00262	0
ZIF	0.0011	0.0011	0	0.00455	313.63	0.00882	701.87
PSV	253.6	253.6	0	253.6	0	253.6	0
NSV	0.55	0.653	18.72	0.653	18.72	0.653	18.72
ZSV	0.45	0.87	93.33	2.605	478.88	5.035	1018.88
Za (Ω)	162.7	161	-0.80	149.4	-8.17	127	-21.94
Zb (Ω)	172	169.9	-1.22	165.4	-3.83	141.7	-17.61
Zc (Ω)	170.7	186	+8.96	186.4	+9.19	186.4	+9.19

Tabela 3.6 - Análise quantitativa dos indicadores propostos no estado saudável e de avaria em diferentes fases do LS-PMSM.

Indicadores e Fatores	Condição Saudável	Condição de avaria (13 espiras)					
		Fase-a		Fase-b		Fase-c	
		Amplitude	Taxa de variação (%)	Amplitude	Taxa de variação (%)	Amplitude	Taxa de variação (%)
ZVF	0.0027	0.01983	633.33	0.01501	455.92	0.01316	387.40
NVF	0.0026	0.0026	0	0.0026	0	0.0026	0
ZIF	0.00098	0.009	818.36	0.00645	558.16	0.012	1124.48
PSV	252.2	253.6	0.55	252.3	0.039	251.3	-0.35
NSV	0.669	0.669	0	0.669	0	0.669	0
ZSV	0.45	5.038	1019.55	3.792	742.66	3.334	640.88
Za (Ω)	164.2	126.9	-22.71	180.3	+9.80	126.9	-22.71
Zb (Ω)	175.1	141.7	-19.07	145.8	-16.73	189.9	+8.45
Zc (Ω)	172.3	195.3	+13.34	147.5	-14.39	141.9	-17.64

Por último, para testar a robustez dos indicadores, foi realizada uma análise sob condições de carga variáveis. O LS-PMSM foi, inicialmente, testado em condições saudáveis sem carga. Posteriormente, o motor foi submetido a uma condição de avaria com 13 espiras em curto-circuito e os testes foram repetidos com uma carga de 5 Nm. As respostas no domínio do tempo dos indicadores propostos para diferentes valores de carga são apresentadas na Figura 3.16 e na Tabela 3.7. A Figura 3.17 (a) demonstra, claramente, que a carga não tem efeito significativo no indicador ZVF, confirmando a robustez e eficácia do método proposto na deteção de avarias, sem ser sensível a variações de carga. Esta estabilidade indica que o ZVF continua a ser um indicador confiável para a deteção de avarias, independentemente das mudanças de carga. Por outro lado, a Figura 3.17 (b) mostra que o indicador ZIF é afetado pela carga, apresentando uma diferença superior a 200% entre os estados de avaria com e sem carga. A presente variação destaca a

sensibilidade do ZIF às condições de carga, sugerindo que, embora o ZIF seja útil para a detecção de avarias, este também requer considerações dos impactos da carga para obter diagnósticos precisos.

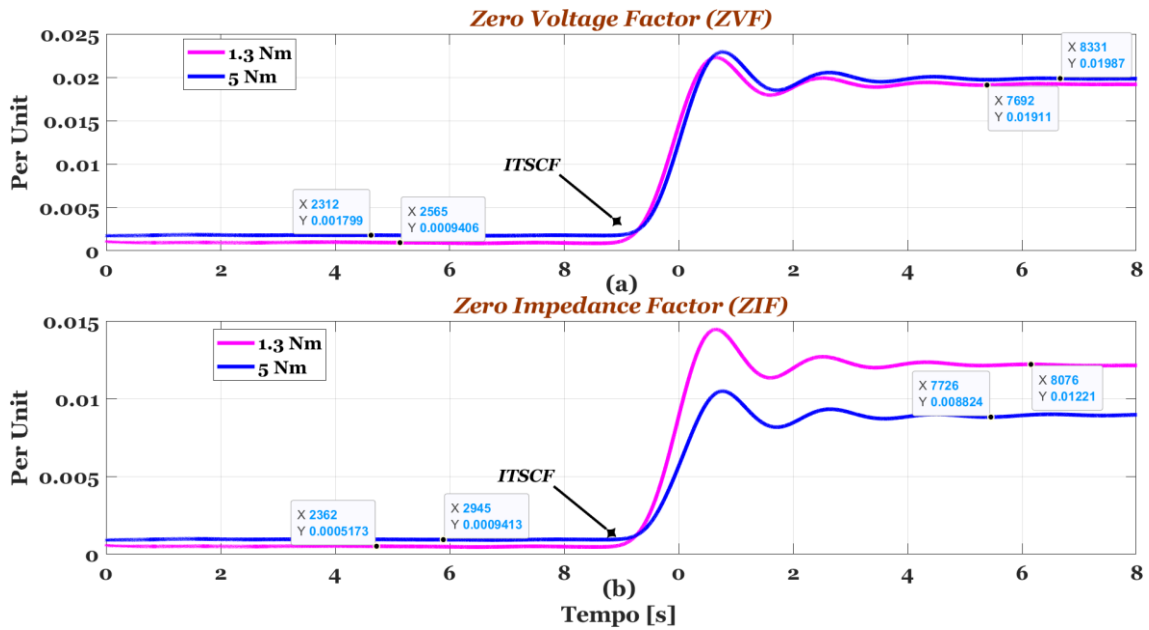


Figura 3.17 - Evolução temporal de (a) ZVF; (b) ZIF com a presença de 13 espiras em curto-circuito com diferentes valores de carga.

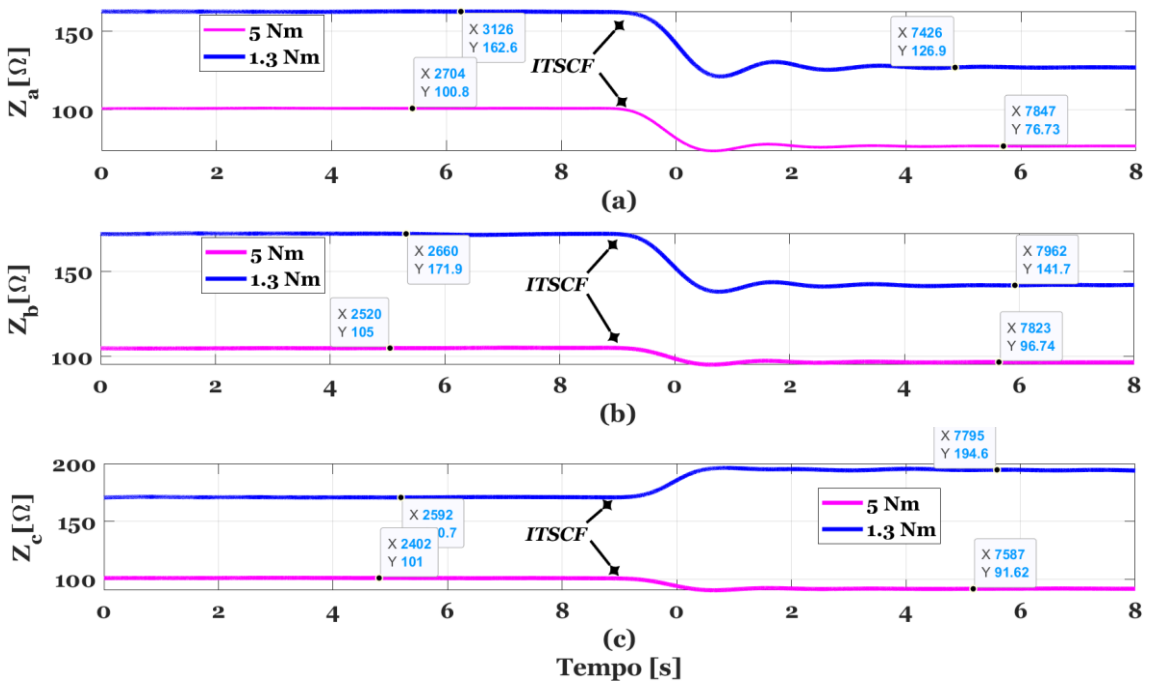


Figura 3.18 - Evolução temporal das impedâncias de fase com a presença de 13 espiras em curto-circuito com diferentes valores de carga.

Tabela 3.7 - Análise quantitativa dos indicadores propostos no estado saudável e de avaria sob condições de carga variáveis.

Indicadores	1.3 Nm		5 Nm	
	Condição saudável	13 espiras	Condição saudável	13 espiras
ZVF	0.0017	0.0198	0.00094	0.019
ZIF	0.00094	0.00882	0.000517	0.012
Za (Ω)	162.6	162.9	100	76.73
Zb (Ω)	171.7	141.7	105	96.45
Zc (Ω)	170.7	194.6	101	91.62

Em relação à impedância das três fases, sob uma carga de 5 Nm, observa-se que as fases apresentam maior estabilidade na variação da impedância quando há avarias (Figura 3.18). Esta estabilidade mais pronunciada fornece uma visão mais clara sobre as condições de avaria que afetam cada fase.

Capítulo 4

4. Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

4.1 Conclusão

Nesta dissertação, o estudo desenvolvido apresenta uma abordagem abrangente para a detecção de avarias em motores síncronos de ímanes permanentes diretamente ligados à rede (LS-PMSMs). As técnicas propostas para a detecção de avaria, utilizando a técnica *da Transformada Rápida de Fourier* (FFT), o método de Prony e análise de componentes simétricas, identificam de forma eficaz as avarias de curto-circuito entre espiras (ITSCF), mesmo na presença de uma avarias de menor severidade ou a ocorrer em diferentes fases.

Inicialmente, no capítulo 2, é aplicada a técnica FFT em modo *offline* enquanto o método de Prony foi utilizado em modo *online*. A análise FFT permitiu a identificação da componente harmónica 3Fs que emerge como uma assinatura fiável robusta para a detecção de avarias em vários cenários. Por outro lado, o método Short-Time Least Square Prony (STLSP) facilitou o cálculo dos indicadores propostos: Fator de tensão de sequência zero (ZVF) e o fator de corrente de sequência negativa (NCF). Os resultados demonstraram a eficácia destes indicadores na detecção precisa de ITSCFs, exibindo variações significativas em resposta a diferentes severidades de avarias, validando assim a sua fiabilidade na identificação de condições de funcionamento anormais.

Por último, no capítulo 3, a técnica FFT foi implementada em um ambiente experimental, no entanto ainda em modo *offline*, e os resultados sustentam aqueles obtidos por simulação no capítulo anterior. Da mesma forma, o método de Prony é aplicado e os indicadores propostos - Fator de tensão zero (ZVF) e o Fator de impedância zero (ZIF) - demonstraram elevada sensibilidade às condições de avaria. Os resultados experimentais confirmam, portanto, a capacidade e a robustez superior da abordagem de diagnóstico proposta, validando a sua aplicabilidade em cenários reais.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de se estender o trabalho desenvolvido para outras pesquisas e estudos futuros pode-se sugerir:

1. Investigar a detecção de outro tipo de avarias e também estudar diferentes configurações de enrolamentos;
2. Integrar processamento avançado de sinais e *machine learning*;
3. Desenvolver sistemas de monitorização em tempo real e habilitados para IoT;
4. Desenvolver sistemas tolerantes a avarias com redundância, de forma a aumentar a fiabilidade do sistema.

Bibliografia

1. Krishnamoorthy, S. and P.P.K. Panikkar, *A comprehensive review of different electric motors for electric vehicles application*. IJPEDS, 2024. **15**(1): p. 74-90. 10.11591/ijped.v15.i1.pp74-90
2. Cao, Z., A. Mahmoudi, S. Kahourzade, and W.L. Soong. *An overview of electric motors for electric vehicles*. in *2021 31st Australasian Universities power engineering conference (AUPEC)*. 2021. IEEE.10.1109/AUPEC52110.2021.9597739.
3. Kinoti, E., T.C. Moseithe, and A.A. Yusuff, *Multi-Criteria Analysis of Electric Vehicle Motor Technologies: A Review*. World Electric Vehicle Journal, 2024. **15**(12): p. 541.10.20944/preprints202410.2448.v1.
4. Carunaiselvane, C. and T.R. Chelliah, *Present trends and future prospects of asynchronous machines in renewable energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **74**: p. 1028-1041.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.069>.
5. Cardoso, A., *Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines*, Power Electronics and Drives. IET, London, UK, 2018.
6. Xu, W., J. Zhu, Y. Guo, S. Wang, Y. Wang, and Z. Shi. *Survey on electrical machines in electrical vehicles*. in *2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*. 2009. IEEE.10.1109/ASEMD.2009.5306667.
7. Rafaidus, P., M. Stano, S. Kocan, and M. Kovacik. *Comparison of High Speed Synchronous Motor with PM and Switched Reluctance Motor Performances*. in *2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. 2024. IEEE.10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609102.
8. Peng, Y., F. Chen, F. Chen, C. Wu, Q. Wang, Z. He, and S. Lu, *Energy-efficient Train Control: A Comparative Study based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024.10.1109/TVT.2024.3412941.
9. Özçiflikçi, O.E., M. Koç, S. Bahçeci, and S. Emiroğlu, *Overview of PMSM control strategies in electric vehicles: a review*. International Journal of Dynamics and Control, 2024. **12**(6): p. 2093-2107.
10. Sorgdrager, A., A. Grobler, and R.-J. Wang, *Design procedure of a line-start permanent magnet synchronous machine*. 2014.
11. Zöhra, B. and M. Akar, *Performance verification of novel rotor line start PMSM*. Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering, 2021. **2**(2): p. 86-95.<https://doi.org/10.21595/jmai.2021.22219>
12. Chen, X., P. Qin, Y. Chen, J. Zhao, W. Li, Y. Mao, and T. Zhao, *Inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM*. Electronics, 2022. **11**(10): p. 1576.<https://doi.org/10.3390/electronics11101576>.
13. Fonseca, D., H.R. Antunes, and A.J.M. Cardoso. *Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors Stator Fault Diagnostics Immune to Unbalanced Supply Voltages*. in *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2024. IEEE.10.1109/ICEM60801.2024.10700193.

14. Feng, X., B. Wang, C. Liu, J. Zeng, and Z. Wang, *Research on Inter-Turn Short-Circuit Fault Diagnosis Method Based on High Frequency Voltage Residual for PMSM*. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023. 7(3): p. 256-265.10.30941/CESTEMS.2023.00050.
15. He, Z., Z. Wang, C. Duan, and X. Wang, *Fault Diagnosis of Inter-turn Short Circuit Faults in Dual Three-Phase PMSM Drives*. in *2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2021. IEEE.10.1109/SDEMPED51010.2021.9605518.
16. Cai, W., X. Wu, M. Zhou, Y. Liang, and Y. Wang, *Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles*. Automotive Innovation, 2021. 4: p. 3-22.
17. Liang, X., M.Z. Ali, and H. Zhang, *Induction motors fault diagnosis using finite element method: A review*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019. 56(2): p. 1205-1217.10.1109/TIA.2019.2958908.
18. Palangar, M.F., *Design, analysis and optimization of line-start permanent-magnet synchronous motors: simultaneous electromagnetic and thermal analysis*. 2021, Flinders University, College of Science and Engineering.
19. Isfahani, A.H. and S. Vaez-Zadeh, *Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities*. Energy, 2009. 34(11): p. 1755-1763.<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.022>.
20. Maraaba, L.S., Z.M. Al-Hamouz, and M.A. Abido. *Modeling and simulation of line start permanent magnet synchronous motors with asymmetrical stator windings*. in *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2016. IEEE.10.1109/IECON.2016.7793412.
21. Yogal, N., C. Lehrmann, and M. Henke. *Comprehensive Analysis of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Machines with Explosion-Proof Capability in Explosive Atmospheres: Reviewing Standards and Guidelines*. in *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2023. IEEE.10.1109/SDEMPED54949.2023.10271447.
22. Aliabad, A.D. and F. Ghoroghchian, *Design and analysis of a two-speed line start synchronous motor: Scheme one*. IEEE Transactions on energy conversion, 2015. 31(1): p. 366-372.10.1109/TEC.2015.2481929.
23. Santos, C.M.C., *Análise e diagnóstico de avarias estatóricas em motores síncronos de ímanes permanentes com arranque direto à rede*. 2017, Universidade da Beira Interior (Portugal).
24. Pechlivanidou, M.S. and A.G. Kladas. *Comparison of alternate LSPMSM topologies considering both transient and steady-state operating characteristics*. in *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. 2019. IEEE. 10.1109/WEMDCD.2019.8887806.
25. Fonseca, D., C.M. Santos, and A.J.M. Cardoso, *Stator faults modeling and diagnostics of line-start permanent magnet synchronous motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020. 56(3): p. 2590-2599. 10.1109/TIA.2020.2979674.
26. Mingardi, D. and N. Bianchi, *Line-start PM-assisted synchronous motor design, optimization, and tests*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017. 64(12): p. 9739-9747.10.1109/TIE.2017.2711557.

27. Jedryczka, C., R.M. Wojciechowski, and A. Demenko, *Influence of squirrel cage geometry on the synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor*. IET Science, Measurement & Technology, 2015. **9**(2): p. 197-203.10.1049/iet-smt.2014.0198.
28. Niaz Azari, M. and M. Mirsalim, *Line-start permanent-magnet motor synchronisation capability improvement using slotted solid rotor*. IET Electric Power Applications, 2013. **7**(6): p. 462-469. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0042>.
29. Madichetty, S., S. Mishra, and M. Basu, *New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems*. IET Electrical Systems in Transportation, 2021. **11**(3): p. 186-199.10.1049/els2.12018.
30. Yang, G., J. Ma, J.-X. Shen, and Y. Wang. *Optimal design and experimental verification of a line-start permanent magnet synchronous motor*. in *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2008. IEEE.
31. Park, H.-J., H.-B. Hong, and K.-D. Lee, *A study on a design considering the transient state of a line-start permanent magnet synchronous motor satisfying the requirements of the IE4 efficiency class*. Energies, 2022. **15**(24): p. 9644.<https://doi.org/10.3390/en15249644>.
32. Faramarzi Palangar, M., A. Mahmoudi, S. Kahourzade, and W.L. Soong, *Simultaneous efficiency and starting torque optimization of a line-start permanent-magnet synchronous motor using two different optimization approaches*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021. **46**: p. 9953-9964.
33. Szlag, W., C. Jedryczka, and M. Baranski, *A New Method of Reducing the Inrush Current and Improving the Starting Performance of a Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor*. Energies, 2024. **17**(5): p. 1040.<https://doi.org/10.3390/en17051040>.
34. Marcic, T., B. Stumberger, G. Stumberger, M. Hadziselimovic, P. Virtic, and D. Dolinar, *Line-starting three-and single-phase interior permanent magnet synchronous motors—Direct comparison to induction motors*. IEEE Transactions on Magnetics, 2008. **44**(11): p. 4413-4416.10.1109/TMAG.2008.2001537.
35. Behbahanifard, H. and A. Sadoughi, *Line start permanent magnet synchronous motor performance and design; a Review*. Journal of World's Electrical Engineering and Technology, 2015. **4**(2): p. 58-66.
36. Aliabad, A.D., M. Mirsalim, and N.F. Ershad, *Line-start permanent-magnet motors: Significant improvements in starting torque, synchronization, and steady-state performance*. IEEE Transactions on Magnetics, 2010. **46**(12): p. 4066-4072.10.1109/TMAG.2010.2070876.
37. Sarani, E. and S. Vaez-Zadeh, *Design procedure and optimal guidelines for overall enhancement of steady-state and transient performances of line start permanent magnet motors*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017. **32**(3): p. 885-894.10.1109/TEC.2017.2694485.
38. Sadoughi, A., M. Zare, and M. Azizi, *Comparison between line start PM synchronous motor and induction motor with same nominal power and same pole pairs when fed by VF control drive*. Int. J. Electron. Commun. Comput. Eng., 2015. **6**(2): p. 240-246.
39. Fei, W., P.C.-K. Luk, J. Ma, J.-X. Shen, and G. Yang, *A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial*

- three-phase induction motor*. IEEE Transactions on Magnetics, 2009. **45**(10): p. 4724-4727.10.1109/TMAG.2009.2022179
40. Chen, Y., S. Liang, W. Li, H. Liang, and C. Wang, *Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors: A review*. Applied Sciences, 2019. **9**(10): p. 2116. <https://doi.org/10.3390/app9102116>.
 41. Cheng, M., J. Hang, and J. Zhang, *Overview of fault diagnosis theory and method for permanent magnet machine*. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015. **1**(1): p. 21-36.10.23919/CJEE.2015.7933135.
 42. Orłowska-Kowalska, T., M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tarchala, M. Krzysztofiak, and C.T. Kowalski, *Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives—state of the art and future challenges*. Ieee Access, 2022. **10**: p. 59979-60024.10.1109/ACCESS.2022.3180153.
 43. Niu, G., X. Dong, and Y. Chen, *Motor fault diagnostics based on current signatures: a review*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023. **72**: p. 1-19.10.1109/TIM.2023.3285999.
 44. Hong, J., S. Park, D. Hyun, T.-j. Kang, S.B. Lee, C. Kral, and A. Haumer, *Detection and classification of rotor demagnetization and eccentricity faults for PM synchronous motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012. **48**(3): p. 923-932.10.1109/TIA.2012.2191253.
 45. EATON. *RWRG0016 - Front Countershaft Bearing Failure*. 2015 4/01/2025; Available from: <https://www.eaton.com/us/en-us/support/warranty-returns/eaton-commercial-vehicle-warranty/warranty-information/guidelines/rwrg0016.html>.
 46. Mahmoudi, A., I. Jlassi, A.J.M. Cardoso, K. Yahia, and M. Sahraoui, *Inter-turn short-circuit faults diagnosis in synchronous reluctance machines, using the Luenberger state observer and current's second-order harmonic*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021. **69**(8): p. 8420-8429.10.1109/TIE.2021.3109514.
 47. Guezmil, A., H. Berriri, R. Pusca, A. Sakly, R. Romary, and M.F. Mimouni, *Detecting inter-turn short-circuit fault in induction machine using high-order sliding mode observer: simulation and experimental verification*. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2017. **28**: p. 532-540. 10.1007/s40313-017-0314-2.
 48. Vasilios, I.C., *Detection of PMSM Inter-Turn Short-Circuit Based on a Fault-Related Disturbance Observer*. Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol, 2020. **21**: p. 31.1-31.7.10.5013/IJSSST.a.21.02.31
 49. Yang, J., M. Dou, Z. Dai, D. Zhao, and Z. Zhang. *Modeling and fault diagnosis of inter-turn short circuit for five-phase PMSM based on Particle Swarm Optimization*. in *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2016. IEEE. 10.1109/APEC.2016.7468312.
 50. Park, J.-K., C.-L. Jeong, S.-T. Lee, and J. Hur, *Early detection technique for stator winding inter-turn fault in BLDC motor using input impedance*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014. **51**(1): p. 240-247.10.1109/TIA.2014.2330067.
 51. Gao, Z., C. Cecati, and S.X. Ding, *A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches*. IEEE transactions on industrial electronics, 2015. **62**(6): p. 3757-3767. 10.1109/TIE.2015.2417501.

52. Mansouri, B., H.J. Idrissi, and A. Venon. *Inter-turn short-circuit failure of PMSM indicator based on Kalman filtering in operational behavior*. in *Annual Conference of the PHM Society*. 2019.
53. Namdar, A., H. Samet, M. Allahbakhshi, M. Tajdinian, and T. Ghanbari, *A robust stator inter-turn fault detection in induction motor utilizing Kalman filter-based algorithm*. *Measurement*, 2022. **187**: p. 110181.<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110181>.
54. Lee, D., H.J. Park, D. Lee, S. Lee, and J.-H. Choi, *A Novel Kalman Filter-Based Prognostics Framework for Performance Degradation of Quadcopter Motors*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023.10.1109/TIM.2023.3332389.
55. Hasan, A., M. Tahavori, and H.S. Midtiby, *Model-based fault diagnosis algorithms for robotic systems*. *IEEE Access*, 2023. **11**: p. 2250-2258. 10.1109/ACCESS.2022.3233672.
56. El Sayed, W., M. Abd El Geliel, and A. Lotfy, *Fault diagnosis of PMSG stator inter-turn fault using extended Kalman filter and unscented Kalman filter*. *Energies*, 2020. **13**(11): p. 2972. <https://doi.org/10.3390/en13112972>.
57. Bishop, G. and G. Welch, *An introduction to the kalman filter*. *Proc of SIGGRAPH, Course*, 2001. **8**(27599-23175): p. 41.
58. Aubert, B., J. Regnier, S. Caux, and D. Alejo, *Kalman-filter-based indicator for online interturn short circuits detection in permanent-magnet synchronous generators*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014. **62**(3): p. 1921-1930.10.1109/TIE.2014.2348934.
59. Liu, C., L. Xiao, J. Zou, Y. Xu, and S. Li, *Analysis and monitoring method for inter-turn short circuit fault for PMSM*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023.10.1109/TMAG.2023.3294704.
60. Yang, J., Z. Li, P. Zhang, K. Zhang, and Y. Xu, *Motor Current Time-varying Quadratic Phase Coupling Analysis and its Application in Traction Motor Fault Detection under Varying-speed Condition*. *IEEE Sensors Journal*, 2024.10.1109/JSEN.2024.3371491.
61. Cai, B., K. Hao, Z. Wang, C. Yang, X. Kong, Z. Liu, R. Ji, and Y. Liu, *Data-driven early fault diagnostic methodology of permanent magnet synchronous motor*. *Expert Systems with Applications*, 2021. **177**: p. 115000.<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115000>.
62. Rojas, C., M. Melerero, M. Cabanas, J. Cano, G. Orcajo, and F. Pedrayes. *Finite element model for the study of inter-turn short circuits in induction motors*. in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. 2007. IEEE.10.1109/DEMPED.2007.4393130.
63. Ehya, H. and A. Nysveen, *Pattern recognition of interturn short circuit fault in a synchronous generator using magnetic flux*. *IEEE Transactions on industry applications*, 2021. **57**(4): p. 3573-3581.10.1109/TIA.2021.3072881.
64. Maanan, Y. *PMSM Inter-Turn Short Circuit Fault Diagnosis using EKF Observer and FFT for Sensorless Input-Output Linearization Control*. in *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)*. 2023. IEEE.10.1109/ICEEAT60471.2023.10426148.
65. Doğan, Z. and R. Selçuk, *A diagnosis of stator winding fault based on empirical mode decomposition in PMSMs*. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020. **8**(1): p. 73-80.<https://doi.org/10.17694/bajece.650484>.

66. Climente-Alarcón, V., J. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, R. Puche, L. Escobar-Moreira, P. Jover-Rodriguez, and A. Arkkio. *Diagnosis of stator short-circuits through Wigner-Ville transient-based analysis*. in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. 2009. IEEE.10.1109/IECON.2009.5414677.
67. Jung, W., S.-H. Yun, Y.-S. Lim, S. Cheong, J. Bae, and Y.-H. Park. *Fault Diagnosis of Inter-turn Short Circuit in Permanent Magnet Synchronous Motors with Current Signal Imaging and Semi-Supervised Learning*. in *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2022. IEEE.10.1109/IECON49645.2022.9968718.
68. Jeong, H., S. Moon, J. Lee, and S.W. Kim. *Inter-turn short fault diagnosis of permanent magnet synchronous machines using negative sequence components*. in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2016. IEEE.10.1109/ICIT.2016.7474745.
69. Hu, H., J. Gao, X. Zhang, X. Zhang, Y. Qu, G. Qin, and Q. Liu, *Fast Online Fault Diagnosis for PMSM Based on Adaptation Model*. *IEEE Sensors Journal*, 2024.10.1109/JSEN.2024.3414425.
70. Urresty, J.-C., J.-R. Riba, H. Saavedra, and L. Romeral. *Detection of inter-turns short circuits in permanent magnet synchronous motors operating under transient conditions by means of the zero sequence voltage*. in *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*. 2011. IEEE.
71. Xia, Y., X. Li, and Y. Luo, *Inter-turn short circuit fault detection of PMSM based on wavelet packet energy spectrum and CEEMDAN-HT*. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2024. **19**(3): p. 1379-1393.
72. Yang, B.-S., M.-S. Oh, and A.C.C. Tan, *Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference*. *Expert Systems with Applications*, 2009. **36**(2): p. 1840-1849. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.12.010>.
73. Kafeel, A., S. Aziz, M. Awais, M.A. Khan, K. Afaq, S.A. Idris, H. Alshazly, and S.M. Mostafa, *An expert system for rotating machine fault detection using vibration signal analysis*. *Sensors*, 2021. **21**(22): p. 7587. <https://doi.org/10.3390/s21227587>.
74. Okpo, E.E., P.F. Le Roux, and A.F. Nnachi. *Induction Motor Fault Identification using Support Vector Machine*. in *2023 6th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. 2023. IEEE.10.1109/REPE59476.2023.10512245.
75. Quiroz, J.C., N. Mariun, M.R. Mehrjou, M. Izadi, N. Misron, and M.A.M. Radzi, *Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests*. *Measurement*, 2018. **116**: p. 273-280. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.004>.
76. Jiang, Y., B. Ji, J. Zhang, J. Yan, and W. Li, *An Overview of Diagnosis Methods of Stator Winding Inter-Turn Short Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles*. *World Electric Vehicle Journal*, 2024. **15**(4): p. 165. <https://doi.org/10.3390/wevj15040165>.
77. Geetha, G. and P. Geethanjali, *Pattern classification of bearing faults in PMSM based on time domain feature ensembles*. *Engineering Research Express*, 2024. **6**(3): p. 035205.10.1088/2631-8695/ad5f06.

78. Mei, W., X. Wang, Y. Lu, K. Yu, and S. Li, *Learning and Current Prediction of PMSM Drive via Differential Neural Networks*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2025.10.1109/TCSII.2025.3527024.
79. Nyanteh, Y.D., S.K. Srivastava, C.S. Edrington, and D.A. Cartes, *Application of artificial intelligence to stator winding fault diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Machines*. Electric Power Systems Research, 2013. **103**: p. 201-213.<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.05.018>.
80. Maraaba, L.S., A.S. Milhem, I.A. Nemer, H. Al-Duwaish, and M.A. Abido, *Convolutional neural network-based inter-turn fault diagnosis in LSPMSMs*. iee access, 2020. **8**: p. 81960-81970.10.1109/ACCESS.2020.2991137.
81. Said, B., L. Mazouz, T.T. NAAS, Ö. Yildirim, and R.D. Mohammedi, *Broken magnets fault detection in pmsm using a convolutional neural network and SVM*. ITEGAM-JETIA, 2024. **10**(48): p. 55-62.
82. Yin, Z. and J. Hou, *Recent advances on SVM based fault diagnosis and process monitoring in complicated industrial processes*. Neurocomputing, 2016. **174**: p. 643-650.<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.081>.
83. Chen, Z. *Design of signal detection and separation device based on FFT algorithm*. in *2024 6th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI)*. 2024. IEEE.10.1109/IoTAAI62601.2024.10692821.
84. Laadjal, K., M. Sahraoui, and A.J.M. Cardoso, *On-line fault diagnosis of DC-link electrolytic capacitors in boost converters using the STFT technique*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020. **36**(6): p. 6303-6312.10.1109/TPEL.2020.3040499.
85. Rosero, J., L. Romeral, J. Cusido, A. Garcia, and J. Ortega. *On the short-circuiting fault detection in a PMSM by means of stator current transformations*. in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 2007. IEEE.10.1109/PESC.2007.4342300.
86. Sahraoui, M., A.J.M. Cardoso, and A. Ghoggal, *The use of a modified prony method to track the broken rotor bar characteristic frequencies and amplitudes in three-phase induction motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014. **51**(3): p. 2136-2147.10.1109/TIA.2014.2375384.
87. Ortbandt, C., C. Dzienis, R. Matussek, and H. Schulte. *Parameter estimation in electrical power systems using Prony's method*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. IOP Publishing.10.1088/1742-6596/659/1/012013.
88. Alloui, A., K. Laadjal, M. Sahraoui, and A.J.M. Cardoso, *Online interturn short-circuit fault diagnosis in induction motors operating under unbalanced supply voltage and load variations, using the STLSP technique*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022. **70**(3): p. 3080-3089.10.1109/TIE.2022.3172751.
89. Džafić, I., H.-T. Neisius, M. Gilles, S. Henselmeyer, and V. Landerberger, *Three-phase power flow in distribution networks using Fortescue transformation*. IEEE Transactions on Power Systems, 2012. **28**(2): p. 1027-1034.10.1109/TPWRS.2012.2213278.
90. Laadjal, K., M. Sahraoui, A. Alloui, and A.J.M. Cardoso, *Three-phase induction motors online protection against unbalanced supply voltages*. Machines, 2021. **9**(9): p. 203.<https://doi.org/10.3390/machines9090203>.
91. Laadjal, K., F. Bento, K. Henriques, A.J.M. Cardoso, and M. Sahraoui, *A novel indicator-based online diagnostics technique of interturn short-circuit faults in synchronous reluctance machines*. IEEE Journal of Emerging and Selected

Topics in Power Electronics, 2023. **11**(3): p. 3492-3501.10.1109/JESTPE.2023.3234339.