

Manutenção Preditiva e Tags RFID Industriais

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica

Autor

Rúben Alexandre Gonçalves Mota

Orientadores

Doutor José Manuel Torres Farinha

Doutor Inácio de Sousa Adelino da Fonseca

Instituição

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, junho, 2019

Agradecimentos

Ao longo dos meses decorridos para a elaboração do presente documento várias pessoas estiveram envolvidas, quer para aconselhamento a nível técnico e académico, quer para me motivar a nível social. Dedico então esta parte a essas pessoas que me apoiaram e às quais fico perpetuamente agradecido.

Dirijo os meus agradecimentos primeiramente ao professor Inácio Fonseca e ao professor Torres Farinha, responsáveis por me elucidar sobre os vários conhecimentos técnicos aqui apresentados e pelas conversas desafiantes e motivadoras que me levaram à execução deste trabalho.

Ao professor Carlos Coelho pela grande ajuda nos ensaios experimentais efetuados no Laboratório de Máquinas Elétricas do ISEC e no esclarecimento de algumas dúvidas.

Aos meus colegas que me acompanharam durante este percurso académico, desde o início da licenciatura em Engenharia Eletromecânica até ao fim do mestrado, Hiuram Antunes, Bernardo Silva, Filipe Prata, Sté, Luth e André Santos.

E fundamentalmente à minha família por todo o carinho demonstrado durante esta fase, em especial aos meus pais por todo o esforço feito para me proporcionarem a melhor educação possível. Ao meu irmão, avós e à Inês.

De uma forma ou de outra, todos foram essenciais. A todos um muito obrigado!

Resumo

Ao longo deste documento serão expostas as diversas fases do projeto de desenvolvimento de um sistema de identificação de componentes em máquinas industriais e de um sistema de monitorização e acompanhamento da condição de motores de indução trifásicos. A primeira parte do projeto é relativa ao desenvolvimento de um sistema capaz de identificar de forma exclusiva componentes integrantes de máquinas industriais. Recorreu-se para isso à incorporação de *tags* RFID embutidas nos componentes em identificação, energizadas via ondas rádio por antenas ligadas a leitores RFID de modo a enviarem o código único e identificador do componente a que estão afixadas. Deste modo o sistema é informado da presença da peça original, sabendo assim que determinado componente não foi substituído por outro. Quando a tentativa de obtenção dos códigos identificadores das várias peças em monitorização não é bem-sucedida, deverá ser emitido um alerta numa *interface* gráfica, acessível através de um display tátil que permite a interação com o utilizador.

A segunda parte do projeto consiste no desenvolvimento de um sistema de acompanhamento da condição de motores de indução trifásicos. Atualmente já existem no mercado alguns sistemas de acompanhamento da condição de motores de indução, no entanto, a abordagem pretendida com este sistema é inovadora. Pretende-se neste projeto desenvolver um sistema de monitorização com equipamentos de baixo custo, recorrendo apenas a *software open-source*, em que o processo de monitorização seja automático, iniciando-se na aquisição de sinais do motor, mostrando-os ao utilizador e que, em caso de falha detetada, seja emitido um alarme na aplicação desenvolvida. Primeiramente foram estudadas diversas técnicas de diagnóstico de falhas e selecionadas as mais relevantes e de fácil implementação para o diagnóstico de barras rotóricas quebradas e curto-circuitos em enrolamentos estatóricos. Com base nas características técnicas pretendidas para o sistema, foram selecionados sensores e transdutores capazes de colmatar as propriedades necessárias, com vista a adquirir os sinais de interesse. Para a parte de aquisição de dados optou-se por um módulo de aquisição com uma grande capacidade de amostragem que permite a conversão dos sinais analógicos para digital. Os sinais adquiridos são recebidos por uma placa de desenvolvimento onde serão processados em algoritmos de diagnóstico de falhas, que tratam os dados e retiram as informações importantes, podendo emitir diversos alarmes e diagnosticar falhas em estado incipiente.

Palavras-chave: identificação de componentes; *tags* RFID; monitorização de motores de indução trifásicos; acompanhamento da condição de funcionamento

Abstract

Throughout this document will be exposed the various phases of a development project of a system of identification of components in industrial machines and of a system for monitoring the condition of three-phase induction motors. The first part of the project concerns the development of a system capable of uniquely identifying component parts of industrial machines. In order to correctly identify the wanted components, RFID tags should be embedded in the parts in identification. Energized via radio waves, emitted by RFID antennas, an RFID tag can send their unique code and identifier of the component to which it is fixed, telling to the system that a certain component has not been replaced by another. When the attempt to obtain the identifying codes of the various parts under monitoring is not successful, an alert should be issued on a graphical interface running on a development board that will be linked to a tactile display that allows interaction with the user.

The second part of the project consists in the development of a condition monitoring system for three-phase induction motors. There are already on the market some systems that properly track the condition of induction motors, however, the intended approach with this system is innovative. The main goal of this project is to develop a monitoring system relying on low-cost equipments and open-source *software*, in which all the monitoring process need to be automatic. Starting with the acquisition of signals from the motor, showing them to the user and, in case of failure detection, an alarm will be issued to the developed application. Firstly, were chosen all the necessary equipments, such as sensors and transducers in order to acquire the desired signals. For the acquisition process, an acquisition module with a large sampling capacity was chosen, allowing the conversion of a big set of analogue signals to digital. The acquired signals are received by a development board where they will be processed in fault diagnosis algorithms, which treat the data and extract the important information, being able to emit several alarms and diagnose faults in an incipient state.

Key-words: components identification; RFID tags; three-phase induction motors; condition monitoring

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Abreviaturas	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação e contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do documento.....	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Autenticação de produtos.....	5
2.2 Acompanhamento da condição de funcionamento	6
3 Motores de indução trifásicos.....	9
3.1 Introdução.....	9
3.2 Constituição.....	10
3.2.1 Rotor em gaiola de esquilo.....	11
3.3 Princípio de funcionamento do MIT.....	12
3.4 Características funcionais do MIT.....	14
3.4.1 Perdas no motor	14
3.4.2 Ligação das fases do MIT	15
3.4.3 Alimentação por inversor de frequência	16
3.4.4 Aquecimento	19
3.4.5 Regimes de serviço	21
3.4.6 Vibração	23
4 Falhas em motores de indução	25
4.1 Introdução.....	25
4.2 Falhas associadas ao MIT	27
4.2.1 Falhas associadas ao Estator	29
4.2.2 Falhas associadas ao Rotor.....	31

5	Processamento de sinal e Identificação de falhas	35
5.1	Introdução.....	35
5.2	Técnicas de processamento de sinal	35
5.2.1	Domínio do Tempo	36
5.2.2	Análise no Domínio da Frequência	38
5.2.3	Análise no Domínio Tempo-Frequência.....	42
5.3	Métodos convencionais de identificação de falhas.....	47
5.3.1	Análise espectral das correntes do estator	47
5.3.2	Análise espectral das vibrações.....	49
5.3.3	Análise espectral do fluxo axial	50
5.3.4	Extended Park's Vector Approach (EPVA).....	51
5.3.5	Método das componentes simétricas	53
6	Sistema experimental desenvolvido.....	55
6.1	Parte I - Sistema de Identificação de Componentes	56
6.1.1	Solução técnica 1	56
6.1.2	Solução técnica 2	60
6.1.3	Solução técnica 3	61
6.2	Parte II – Sistema de monitorização e acompanhamento da condição.....	61
6.2.1	Aquisição de dados	63
6.2.2	Cálculo de parâmetros de funcionamento	64
6.2.3	Acompanhamento da condição e diagnóstico de falhas	65
6.2.4	Interface de utilizador	67
7	Ensaio Experimentais e Resultados Obtidos	69
7.1	Detalhes do equipamento de teste.....	69
7.2	Trabalho prático.....	70
7.2.1	Teste 1 – Motor 1 em vazio diretamente ligado à rede.....	72
7.2.2	Teste 2 – Motor 2 em vazio ligado ao inversor	74
7.2.3	Teste 3 – Motor 3 em vazio ligado ao inversor	76
7.2.4	Teste 4 – Motor 3 acoplado em vazio ligado ao autotransformador	78
7.2.5	Teste 5 – Motor 3 a meia carga alimentado por autotransformador.....	80
7.2.6	Teste 6 – Motor 3 a 92 % carga alimentado por autotransformador	81

7.2.7	Resultados obtidos	84
8	Conclusões e perspectivas futuras	85
8.1	Conclusões	85
8.2	Perspetivas futuras	86
9	Referências bibliográficas	87

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Sistema de verificação da condição de motores de indução, comumente utilizado em bancadas experimentais	2
Figura 2.1 - Alguns dos tipos de <i>tags</i> RFID existentes, [8]	6
Figura 2.2 - Ferramenta de acompanhamento da condição de motores de indução - SKF <i>Dynamic Motor Analyser</i> EXP4000 [9].....	7
Figura 2.3 - Dispositivo de monitorização ABB <i>Ability Smart Sensor</i> , adaptado de [40].....	7
Figura 3.1 - Aspeto físico de um Motor de Indução Trifásico [10].....	9
Figura 3.2 - Elementos constituintes de um Motor de Indução Trifásico, adaptado de [11] ...	10
Figura 3.3 – Representação de um motor de indução trifásico com um par de pólos (dois pólos), adaptado de [11]	10
Figura 3.4 - Estator alojado na carcaça, à direita e rotor à esquerda, [12].....	11
Figura 3.5 - Constituição de um rotor em gaiola de esquilo, adaptado de [13]	12
Figura 3.6 - Bobina em curto-circuito num campo magnético girante, adaptado de [14]	13
Figura 3.7 - Ligação dos enrolamentos em estrela, adaptado de [11].....	16
Figura 3.8 - Ligação dos enrolamentos em triângulo, adaptado de [11].....	16
Figura 3.9 - Gráficos da relação de parâmetros de motores de indução alimentados por inversor de frequência, a) relação Tensão/Frequência b) relação Potência/Frequência, [15]	17
Figura 3.10 - Gráfico da relação Binário/Frequência, [15]	18
Figura 3.11 - Blocos constituintes de um inversor de frequência, [15]	18
Figura 3.12 - Distribuição da temperatura ao longo de uma linha radial do motor [15]	20
Figura 3.13 - Gráficos representativos dos regimes de serviço a) Regime S1, b) Regime S2, c) Regime S3, d) Regime S4, e) Regime S5, f) Regime S6, g) Regime S7, h) Regime S8, i) Regime S9, j) Regime S10 [17].....	22
Figura 3.14 - Posições recomendadas para efetuar a medição de vibrações em motores de indução, baseados na norma ISO 10816 [19].....	24
Figura 4.1 - Falhas passíveis de ocorrerem em máquinas elétricas consoante a causa: a) Devido a causas internas, b) Devido a causas externas, [20]	27
Figura 4.2 – Distribuição das falhas em máquinas de indução: a) Thomson, 2001 [23] b) Bonnet, 2008 [24]	28
Figura 4.3 - Estator ligado em estrela, evidenciando diferentes modos de ocorrências de falhas nos enrolamentos estatóricos, [25].....	30

Figura 4.4 - Excentricidades do entreferro: a) motor sem excentricidade, b) motor com excentricidade estática, c) motor com excentricidade dinâmica, d) motor com excentricidade mista, adaptado de [26]	33
Figura 5.1 - Diagrama exemplo de um possível processo de monitorização da condição e identificação de falhas, adaptado de [27]	35
Figura 5.2 - HT do sinal de corrente $x(t)$ para obtenção do envelope modulador [4]	38
Figura 5.3 - Relação entre as amostras de $x(t)$ e $X(\omega)$, adaptado de [30]	40
Figura 5.4 - Exemplo da aplicação da janela de Hanning a um sinal adquirido e ao seu espectro, [31]	41
Figura 5.5 - Procedimento adotado na metodologia de desmodulação de sinal, adaptado de [2]	42
Figura 5.6 - Processo de janelamento do sinal, efetuado pela TW, [4]	43
Figura 5.7 - Exemplo de função Wavelet da família Morlet, [4]	44
Figura 5.8 - Processo de decomposição do sinal, efetuado pela DWT, [4]	45
Figura 5.9 - Decomposição em três níveis de um sinal amostrado a 5 kHz [4]	46
Figura 5.10 - Evolução da amplitude da componente de frequência característica de BQ, $frede*(1-2s)$, no espectro de frequências de um motor de indução ($s = 3.33\%$): a) Rotor saudável b) Rotor com 1 BQ c) Rotor com 4 BQ contíguas, [32]	48
Figura 5.11 - Componente $2*frede$ do espectro EPVA de um motor com $s = 3.33\%$ para: a) Estator saudável b) 3 espiras em CC c) 5 espiras em CC d) 36 espiras em cc, [33]	52
Figura 5.12 - Componente $2s*frede$ do espectro EPVA de um motor com $s = 3.33\%$ para: a) Rotor saudável b) Rotor com 1 BQ c) Rotor com 4 BQ contíguas, [32]	52
Figura 6.1 - Esquema de ligações da solução técnica 1 para o sistema de identificação de componentes	56
Figura 6.2 - Leitor RFID escolhido para a solução técnica 1, ThingMagic Sargas [34]	57
Figura 6.3 - Tags RFID, Xerafy Dot In XS [35]	58
Figura 6.4 - Antena RFID, da marca Mobilemark modelo PN6-868LCP [36]	58
Figura 6.5 - Raspberry Pi Model 3B [37]	60
Figura 6.6 - Leitor proposto para a solução técnica 2 - ThingMagic USB Pro [38]	60
Figura 6.7 - Dispositivo leitor RFID proposto para a solução técnica 3 - ThingMagic <i>Micro LTE Carrier Board</i> [39]	61
Figura 6.8 - Esquema do sistema de monitorização e acompanhamento da condição desenvolvido	62
Figura 6.9 - Diagrama geral do processo de diagnóstico de falha	63
Figura 6.10 - Ligação das resistências de medida, RL	64

Figura 6.11 - Diagrama do processo de diagnóstico de falhas do SMAC	66
Figura 6.12 - Interface gráfica desenvolvida.....	68
Figura 7.1 - Motores de indução trifásicos utilizados nos ensaios experimentais: Motor 1 – 2.2 kW; Motor 2 – 0.25 kW; Motor 3 e 4 – 0.75 kW cada	69
Figura 7.2 – Montagem experimental utilizada para a aquisição de dados dos diferentes motores	71
Figura 7.3 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 1 ($s = 0.13\%$)	72
Figura 7.4 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o Teste 1	72
Figura 7.5 - Gráfico do vetor de Park obtido para o ensaio 1 ($s = 0.13\%$)	73
Figura 7.6 - Espectro EPVA obtido no teste 1 ($s = 0.13\%$)	73
Figura 7.7 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 2 ($s = 0.13\%$)	74
Figura 7.8 - Dados obtidos pelo sistema e gráfico do domínio temporal das correntes do estator para o teste 2.....	74
Figura 7.9 - Espectro EPVA teste 2 ($s = 0.13\%$).....	75
Figura 7.10 - Gráfico do vetor de Park do teste 2.....	75
Figura 7.11 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 ($s = 0.13\%$)	76
Figura 7.12 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o teste 3	76
Figura 7.13 - Gráfico do vetor de Park do teste 3 ($s = 0.13\%$).....	77
Figura 7.14 - Espectro EPVA obtido para o teste 3 ($s = 0.13\%$)	77
Figura 7.15 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o teste 4	78
Figura 7.16 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 no teste 4 ($s = 0.20\%$)	78
Figura 7.17 - Espectro EPVA teste 4 ($s = 0.20\%$).....	79
Figura 7.18 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o Teste 5	80
Figura 7.19 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 no teste 5 ($s = 1.47\%$)	80
Figura 7.20 - Espectro EPVA teste 5 ($s = 1.47\%$).....	81
Figura 7.21 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 no teste 6 ($s = 3.53\%$)	82
Figura 7.22 - Dados obtidos pelo sistema e o gráfico domínio temporal das correntes do estator para o teste 6.....	82
Figura 7.23 - Espectro EPVA teste 6 ($s = 3.53\%$).....	83

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características técnicas do equipamento SKF <i>Dynamic Motor Analyser</i> EXP400.	7
Tabela 3.1 - Classes térmicas dos materiais isolantes, adaptado de [16].....	21
Tabela 3.2 - Limites da magnitude de vibração máxima em deslocamento, velocidade e aceleração (RMS) consoante a altura do veio H [18]	23
Tabela 4.1 - Distribuição das falhas na máquina de indução de rotor em curto-circuito, em função do elemento onde ocorrem [20]	29
Tabela 5.1 - Limites de velocidade baseados na ISO 10816 [28]	37
Tabela 5.2 - Limites de severidade de barras rotóricas, adaptado de [3].....	49
Tabela 6.1 - Características principais do leitor RFID, ThingMagic Sargas	57
Tabela 6.2 - Características principais tags RFID, Xerafy Dot In XS.....	58
Tabela 6.3 - Características técnicas da antena RFID Mobilemark, PN6-868LCP.....	59
Tabela 6.4 - Características técnicas leitor ThingMagic USB Pro	60
Tabela 6.5 – Principais características, módulo leitor RFID, ThingMagic <i>Micro LTE Carrier Board</i>	61
Tabela 6.6 - Parâmetros calculados com base nos valores adquiridos e as suas respetivas fórmulas.....	65
Tabela 7.1 - Tabela resumo dos ensaios práticos realizados	84

Abreviaturas

API – *Application Programming Interface*

BLE – *Bluetooth Low Energy*

BQ – Barras quebradas

CC – Curto Circuito

FFT – *Fast Fourier Transform*

GPIO – *General Purpose Input Output*

HT – *Hilbert Transform*

LLRP – *Low Level Reader Protocol*

MI – Motor de Indução

MIT – Motor de Indução Trifásico

NFC – *Near Field Communication*

PCB – *Printed Circuit Board*

RFID – *Radio Frequency IDentification*

RPi – Raspberry Pi

SMAC – Sistema de Monitorização e Acompanhamento da Condição

SPI – *Serial Peripheral Interface*

SSH – *Secure Shell Protocol*

URA – *Universal Reader Assistant*

1 Introdução

1.1 Motivação e contexto

Nos últimos dez anos, foram várias as iniciativas com vista a promover a existência de instalações de produção mais eficientes através do uso da tecnologia. Iniciativas como a Indústria 4.0, inicialmente concebida pelo governo alemão, foram adotadas por outras nações como um modelo a seguir por empresas e organizações com vista a melhorar globalmente a sua produtividade e eficiência globais. Antigamente os equipamentos eram apenas reparados após já se encontrarem avariados, causando uma diminuição da velocidade das linhas de produção ou até mesmo a sua paragem. O objetivo da manutenção preditiva é prevenir e prever estes problemas antes que ocorram, através da análise de grandes quantidades de dados. Qualquer falha de um equipamento ou paragem não planeada terá um efeito adverso nas operações de uma fábrica, pois qualquer operação de reparação custa tempo e dinheiro.

Juntamente com diferentes tipos de sensores físicos monitorizando valores como vibração, temperatura, pressão, tensão, entre outros, sistemas modernos podem utilizar a análise de dados de funcionamento e históricos de reparações para prever quando um equipamento deixará de satisfazer as suas condições aceitáveis de utilização, indicando uma possível falha em estado incipiente. Possuindo estes dados é possível agendar uma ação de manutenção antes de uma avaria ocorrer, tendo um impacto mínimo na linha de produção. Trata-se de um método que tem demonstrado o seu valor em reduzir gastos de material e na minimização de tempos de paragem.

A utilização de componentes e equipamentos de elevada fiabilidade em máquinas industriais no contexto produtivo, associada a um correto acompanhamento da condição dessas mesmas máquinas é fundamental para que se atinjam bons níveis de disponibilidade. Com vista a atingir esses mesmos níveis é necessário que as máquinas responsáveis pela produção trabalhem com peças de elevada qualidade. Para isso, de modo a garantir que as peças de substituição instaladas nas máquinas após reparação são originais e de elevada fiabilidade pretende-se desenvolver um sistema que identifique de forma exclusiva componentes fulcrais de uma máquina industrial e verifique a sua autenticidade. Deste modo, é garantido um funcionamento seguro e duradouro, sendo assim menos provável a ocorrência de avarias, visto que se pretende uma utilização contínua de componentes de alta qualidade. É, portanto, um sistema que visa manter o nível de funcionamento de uma máquina em condições ótimas.

Os motores elétricos são atualmente um dos principais consumidores de eletricidade, sendo responsáveis por cerca de 70 % do consumo elétrico na indústria e de cerca de 30 % do consumo elétrico no Comércio e Serviços. Analisando o consumo elétrico dos motores por tipo de utilização, cerca de 60 % advém de compressores, bombas e ventiladores [1]. O tipo de motor mais comumente utilizado na indústria é o Motor de Indução Trifásico (MIT), devido ao fato de ser economicamente mais viável distribuir energia elétrica em corrente alternada, devido a ser possível alternar o nível de tensão com um transformador de associado. Além disso o seu

modo de funcionamento simplista é adequado a servir a maioria das aplicações práticas. É caracterizado como sendo um motor robusto, com um tempo de vida útil longo, de baixo custo, de fácil ligação e controlo, e de grande versatilidade no funcionamento em casos onde se requer uma velocidade estável independentemente da carga que lhe está a ser aplicada [2].

Referida a importância que os MIT apresentam na indústria, é fundamental que haja uma boa manutenção desses equipamentos, evitando ao máximo possíveis danos e eventuais paragens devido à ocorrência de avarias. Nesse sentido, foi proposto o desenvolvimento de um sistema experimental de baixo custo, dotado de vários tipos de sensores capazes de adquirir dados sobre um motor de indução, de forma não invasiva, enviá-los para serem analisados e obter a sua condição atual, recorrendo a *software open-source*.

O sistema apresentado na Figura 1.1 retrata o alinhamento comumente utilizado em trabalhos envolvendo bancadas experimentais de teste de motores de indução utilizando os *softwares* LabView e MatLab. Em [3], estes foram utilizados na deteção de defeitos em MIT pela análise da assinatura elétrica da corrente, em [4], na utilização de técnicas de deteção de falhas em barras do rotor de MI com as medições dos sinais a serem comandadas pelo MatLab, e em [5] no desenvolvimento de um sistema de monitorização de vibrações em equipamentos rotativos. No entanto, este tipo de abordagem apesar de ser de montagem rápida e fácil possui algumas desvantagens, das quais se destacam as seguintes:

- Utilização de placas de aquisição de custo consideravelmente elevado;
- Uso de *software* não *open-source* (LabView e MatLab), cujas licenças para o meio profissional são bastante dispendiosas;
- Necessidade de utilização de computadores com o sistema operativo Windows, também não *open-source*;



Figura 1.1 - Sistema de verificação da condição de motores de indução, comumente utilizado em bancadas experimentais

Apesar da montagem representada na Figura 1.1 ser funcional, fiável e de grande rapidez na obtenção de valores pretendidos é uma solução dispendiosa e não é direcionada para o acompanhamento de motores de indução no seu trabalho do dia-a-dia. É usualmente utilizada em bancadas de testes experimentais, em ambiente mais ou menos controlado, de modo a se obter o estado da condição de um motor.

O sistema proposto segue o alinhamento da figura anterior, mas pretende trazer uma abordagem mais ligada ao mundo da Indústria 4.0. Partindo de um equipamento que se pretende monitorizar, neste caso um motor de indução, o primeiro passo é a sua sensorização, ou seja, a

instalação de sensores e/ou transdutores capazes de adquirir determinados sinais. A segunda etapa é a aquisição de dados relativos ao seu funcionamento e o seu envio para um sistema de análise. Após a aquisição dos dados relevantes é necessário processá-los, com vista à obtenção de informações úteis sobre o estado do motor, sendo desse modo possível prever uma avaria antes de ocorrer. Para isso, recorre-se a técnicas de processamento de sinais e de deteção e diagnóstico de falhas. Uma vez detetados eventuais indícios de falha num motor em análise constante pelo sistema, deve ser agendada uma ação de manutenção, por parte da equipa de manutenção responsável, de modo a analisar de forma mais extensiva o que realmente existe com o motor e executar medidas corretivas se necessário, num horário oportuno. Desta forma evitam-se paragens inesperadas e torna-se possível uma gestão eficiente dos motores em monitorização.

1.2 Objetivos

Um dos principais objetivos do presente projeto corresponde à deteção de peças de substituição não originais em máquinas industriais. Para isso, pretende-se desenvolver um sistema capaz de identificar de forma exclusiva peças originais integrantes de máquinas industriais, e emitir alarmes quando um desses componentes deixar de ser detetado pelo sistema.

O segundo objetivo diz respeito ao desenvolvimento de um sistema de monitorização e acompanhamento da condição de motores de indução trifásicos com recurso a equipamentos *low-cost* e recorrendo apenas a *software open-source*. Deverão ser monitorizados alguns parâmetros relativos ao funcionamento de um motor e diagnosticadas falhas quando as medições efetuadas ultrapassarem determinados limites pré-definidos. Os parâmetros deverão ser medidos recorrendo a vários sensores instalados no motor e utilizando metodologias adequadas.

Inicialmente foi necessário realizar uma pesquisa de mercado de modo a identificar equipamentos existentes que possam dar respostas aos desafios em análise. Pesquisou-se também o que há publicado sobre os temas e procedeu-se à análise de mercado referente à tecnologia necessária para a implementação de ambos os sistemas. Finalmente, o projeto foi terminado com a elaboração de toda a documentação referente ao projeto.

1.3 Organização do documento

O presente documento trata, ao longo de sete capítulos, todo o estudo, desenvolvimento, montagem experimental e testes práticos efetuados. São também expostos todos os pontos relevantes de ambos os sistemas desenvolvidos, assim como os resultados e conclusões obtidas.

Todo o enquadramento, assim como a definição dos objetivos e a estruturação do presente documento são temas apresentados no primeiro capítulo. No segundo capítulo encontra-se

exposto o Estado da Arte relativamente ao tema de Autenticação de Produtos e Acompanhamento da Condição de Funcionamento de Motores de Indução.

No Capítulo 3 é abordado o tema dos Motores de Indução Trifásicos, nomeadamente a sua constituição, princípios de funcionamento e características funcionais.

No Capítulo 4 são descritas as falhas comumente associadas aos motores de indução.

No quinto capítulo são apresentadas as técnicas de processamento de sinal e de diagnóstico de falhas mais comuns.

No sexto capítulo observam-se os pormenores construtivos de ambos os sistemas projetados, desde os equipamentos a utilizar até às suas ligações.

No Capítulo 7 estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

As conclusões finais, assim como as propostas de melhoria e trabalho futuro constituem o oitavo e último capítulo.

2 Estado da Arte

2.1 Autenticação de produtos

Mercadorias falsificadas são um desafio global em todas as indústrias, podendo resultar em perda de vendas e em má experiência de produto para o utilizador. Uma estratégia abrangente de anti falsificação de uma marca ou produto necessita de envolver controlos legais, policiais, físicos e de informação, assim como monitorização e suporte à investigação. Uma parte crítica adicional que não pode ser negligenciada é a autenticação do produto. Sem isso, uma estratégia de proteção de marca está incompleta. De modo a autenticar as mais variadíssimas marcas e produtos, várias empresas têm desenvolvido soluções que permitem integrar técnicas de autenticação em toda a sua estratégia de proteção de marca, tornando a autenticação do produto o alicerce de seu programa contra a falsificação [6].

Embutir *tags* RFID com segurança criptográfica seja em mercadorias, ativos, peças de substituição de ativos etc, tem vindo a crescer ao longo dos anos como uma das técnicas encontradas para autenticar os itens. Para além da vantagem referida anteriormente a experiência do cliente com o produto pode melhorar, aumentando a lealdade do consumidor e melhorando a funcionalidade do produto ou ativo [7].

Para maior interação com o cliente, o serviço *Trusted Tag*® da HID combina etiquetas e incrustações (*inlays*) de NFC patenteadas e à prova de clonagem com uma plataforma de autenticação em nuvem para permitir a autenticação do produto por clientes através de *smartphones* com NFC e outros dispositivos inteligentes, não sendo necessário desenvolver ou instalar qualquer aplicação. As *tags* RFID podem ser personalizadas, e embutidas num produto consumível (cartuchos, cilindros de gás e filtros) podendo depois serem lidas por um dispositivo a fim de garantir a segurança do utilizador e a configuração adequada. A tecnologia de ligação da HID Global permite também personalizar pequenas *tags* anelares ou outras formas especiais [7]. Como é possível observar na Figura 2.1, existem *tags* de diferentes formatos e diferentes tamanhos, utilizadas para as mais variadas aplicações.

Existem hoje em dia vários fabricantes internacionais que possuem soluções de identificação e proteção de produtos assim como soluções de tecnologia oculta. Projetadas para manter confidenciais os mais variados recursos, protegendo-os contra falsificação e pirataria, existe atualmente no mercado uma vasta gama de soluções, desde etiquetadoras de segurança, rastreadores, códigos de barras invisíveis, impressão de segurança e microimagem. Alguns destes elementos de segurança não são perceptíveis imediatamente pelos clientes ou são até mesmo invisíveis a olho nu, podendo assim ser integrados em recursos explícitos, como por exemplo logótipos, de modo a fornecerem uma camada adicional de proteção, sendo algumas dessas soluções desenvolvidas e adaptadas exclusivamente para um único cliente [6].



Figura 2.1 - Alguns dos tipos de *tags* RFID existentes, [8]

2.2 Acompanhamento da condição de funcionamento

No que diz respeito a sistemas de acompanhamento da condição de motores de indução existem atualmente no mercado alguns equipamentos disponíveis destinados a esse fim. Um desses equipamentos é o *Dynamic Motor Analyzer – EXP4000* da fabricante SKF, representado na Figura 2.2. Trata-se de um equipamento portátil e poderoso de monitorização de motores de indução utilizado para resolução de problemas e para manutenção preditiva, preparado para operar em ambiente industrial. É uma ferramenta que auxilia o pessoal na área da manutenção a minimizar a ocorrência de falhas e a maximizar o tempo de produção. É baseado em *software* que possui algoritmos avançados de monitorização e avaliação das condições que têm impacto na saúde e desempenho de um motor de indução. A qualidade da energia de alimentação, assim como indicadores de desempenho, quantidade e condição da carga a que o motor está sujeito são parâmetros tidos em consideração por este equipamento de análise.

Os valores adquiridos da corrente elétrica consumida pelo motor são analisados, é verificada a existência de desequilíbrios de consumos obtendo assim a condição elétrica geral do sistema motor. Se a tensão de alimentação de um motor possui alguma distorção, desequilíbrios ou níveis inadequados para o motor, podem ser gerados problemas que reduzem o tempo de vida útil do motor. O equipamento em causa identifica o binário desenvolvido, analisa o espectro de frequências, executa uma monitorização contínua, faz análise transiente de vibrações e eficiência, qualidade da energia de alimentação e desempenho do motor. Os dados recolhidos são depois guardados para serem utilizados em relatórios, registos de manutenção e análise de tendências. De acordo com os motores a analisar os acessórios a ele ligados vão variando, como por exemplo a gama de medida das pinças amperimétricas.



Figura 2.2 - Ferramenta de acompanhamento da condição de motores de indução - SKF *Dynamic Motor Analyser* EXP4000 [9]

Características	
Alimentação	110-250 VAC, 50/60 HZ
Tensão máxima	1000 VAC, 500 VDC
Transformadores de Corrente	0-10 A, 0-40 A, 0-150 A, 0-400 A, 1-1000 A, 0-3000 A
Dimensões [comprimento largura altura]	44,5 cm x 29,2 cm x 22,2 cm (CxLxH)
Peso	6.8 kg

Tabela 2.1 - Características técnicas do equipamento SKF *Dynamic Motor Analyser* EXP400

Outro equipamento utilizado atualmente nesta área é o *Ability Smart Sensor* da marca ABB, apresentado na Figura 2.3. Trata-se de um dispositivo que é afixado na carcaça de motores de baixa tensão e é configurável em poucos minutos. Permite monitorizar o consumo de energia, a potência de carga, o tempo de operação, o estado de saúde do rotor, a temperatura da carcaça, excentricidades do entreferro, vibração geral, a condição dos rolamentos e da refrigeração do motor. Os dados medidos são depois enviados por *Bluetooth Low Energy* (BLE) para o *smartphone* do utilizador ou para um *gateway* ABB, seguindo daí para um servidor-*cloud* ABB onde os dados são processados nos algoritmos próprios e os resultados são enviados de volta para o *smartphone* ou para o portal web personalizado do cliente. Possui uma bateria interna que dura entre 3 a 5 anos. O raio de alcance para envio de dados por BLE é de aproximadamente 25 metros em ambiente industrial.



Figura 2.3 - Dispositivo de monitorização ABB *Ability Smart Sensor*, adaptado de [40]

3 Motores de indução trifásicos

De modo a se conseguir efetuar um correto diagnóstico de falhas em motores de indução é primeiramente crucial entender os princípios teóricos envolventes neste tipo de máquinas. Desde como funcionam, quais os seus componentes e para que servem, quais as suas características funcionais, entre outros pontos relevantes. De seguida está exposta alguma bibliografia referente a este tipo de motores, de modo a se possuir uma visão geral sobre os vários temas em que se enquadram.

3.1 Introdução

O motor de indução trifásico (*Three-Phase Induction Motor*) ou motor assíncrono trifásico (Figura 3.1) é atualmente utilizado na maioria dos acionamentos industriais. Trata-se de uma máquina robusta, de construção simples, de rendimento elevado e de baixa necessidade de manutenção. Facilmente colocada em serviço, mais barata comparada com outras e com binário de arranque que atende à maioria das aplicações.

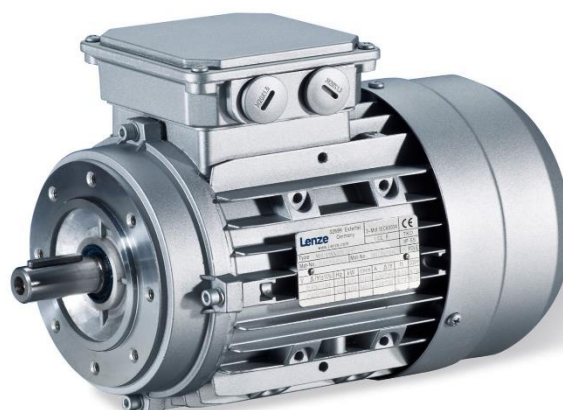


Figura 3.1 - Aspeto físico de um Motor de Indução Trifásico [10]

Sendo a distribuição de energia elétrica feita em corrente alternada e apresentando o motor de indução trifásico uma grande simplicidade, robustez e baixo custo, é por esses motivos o motor mais utilizado atualmente a nível industrial. Associado a um controlador eletrónico de velocidade, é adequado para quase todos os tipos de acionamentos industriais. Os tipos básicos de motores de indução são os trifásicos e os monofásicos. Os motores de indução monofásicos, normalmente de potências baixas, têm aplicação principalmente em acionamentos domésticos. Por outro lado, os motores de indução trifásicos são utilizados na maioria dos acionamentos industriais [11].

3.2 Constituição

O motor de indução trifásico industrial é constituído pelos elementos representados na Figura 3.2. O estator, a parte estática da máquina, é constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si de modo a reduzir as perdas por histerese e as correntes de Foucault. As chapas possuem ranhuras nas quais são colocados os enrolamentos que são alimentados por um sistema trifásico de correntes.

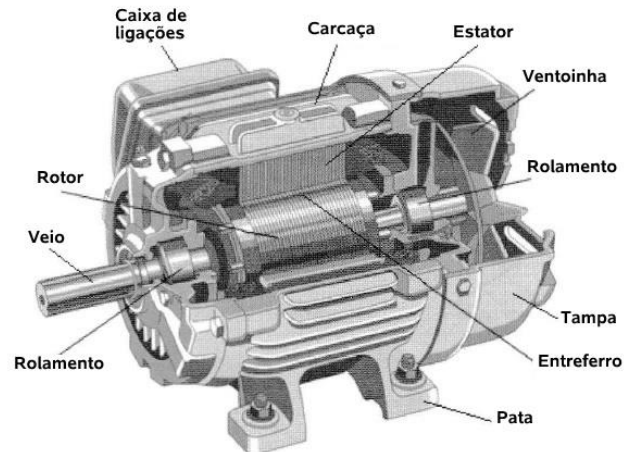


Figura 3.2 - Elementos constituintes de um Motor de Indução Trifásico, adaptado de [11]

Na sua forma mais simples, como se apresenta na Figura 3.3, o estator de um motor de indução trifásico é constituído por três enrolamentos desfasados 120° elétricos uns dos outros. Se cada fase der origem a um pólo magnético, o campo magnético girante no estator do motor, possui um par de pólos (2 pólos). Os motores trifásicos industriais usualmente utilizados possuem dois ou quatro pólos, existindo também com maior número pólos [11].

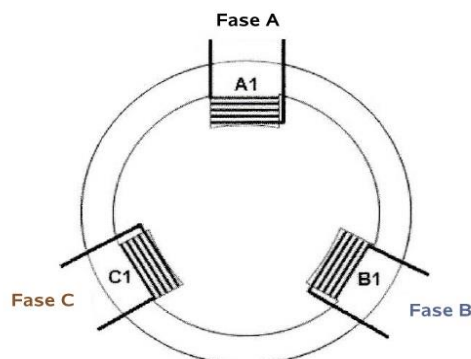


Figura 3.3 – Representação de um motor de indução trifásico com um par de pólos (dois pólos), adaptado de [11]

O rotor de um motor de indução, representado na Figura 3.4 à esquerda, é a parte móvel da máquina e é constituído, tal como o estator, por pilhas de chapas finas isoladas umas das outras e ranhuradas. É um elemento fundamental e é apoiado no veio de rotação do motor, que possui rolamentos nos extremos. Entre o estator e o rotor existe uma ligeira abertura de ar, designada de entreferro, que deve ser a mais pequena possível de modo a reduzir a relutância magnética total do circuito para que o fluxo magnético possa ser estabelecido com um mínimo de corrente de magnetização, diminuindo-se assim as perdas por efeito de Joule.

A carcaça, representada na Figura 3.4 à direita, é geralmente feita de ferro fundido, aço ou alumínio. Para além de alojar o estator e o rotor destina-se também a proteger os componentes do motor de efeitos prejudiciais do ambiente em que o mesmo opera. Os rolamentos, montados no eixo do rotor permitem que este gire. Uma ventoinha, montada também no eixo, força a refrigeração do motor. Por último, o veio transmite à carga a energia mecânica produzida.



Figura 3.4 - Estator alojado na carcaça, à direita e rotor à esquerda, [12]

3.2.1 Rotor em gaiola de esquilo

O motor de indução trifásico mais comum é o motor de indução cujo rotor é designado de rotor em gaiola de esquilo. Trata-se de um motor em que o rotor possui, dentro das ranhuras das chapas laminadas do núcleo, barras condutoras, dispostas paralelamente e ligadas mecânica e eletricamente, entre si, nas extremidades, por anéis condutores, designados anéis de curto-circuito. As barras da gaiola, geralmente de alumínio, estão dispostas com uma determinada inclinação, com o objetivo de melhorar as propriedades de arranque e diminuir os ruídos. Este tipo de rotor está representado na Figura 3.5, sendo possível visualizar de uma melhor forma a sua constituição.

Este tipo de motores (MI com rotor em gaiola de esquilo) não necessita de coletor nem de escovas, não possuindo assim contatos elétricos sujeitos a desgaste, fato que o torna mais robusto e com menor necessidade de manutenção.

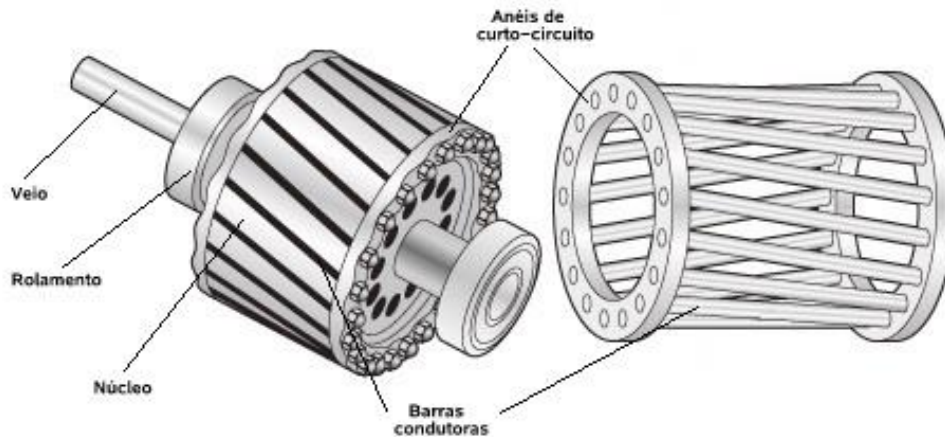


Figura 3.5 - Constituição de um rotor em gaiola de esquilo, adaptado de [13]

3.3 Princípio de funcionamento do MIT

O princípio de funcionamento do motor de indução baseia-se em leis fundamentais do eletromagnetismo: Lei de *Faraday*, Lei de *Lenz*, Lei de *Laplace* (ou de *Lorentz*).

Lei de *Faraday* (Lei Geral da Indução)

Sempre que através da superfície abraçada por um circuito tiver lugar uma variação de fluxo, gera-se nesse circuito uma força eletromotriz induzida; se o circuito for fechado, será percorrido por uma corrente induzida.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

em que ε é a força eletromotriz induzida, Φ é o fluxo magnético e t representa o tempo.

Lei de *Lenz*

O sentido da corrente induzida é tal, que pelas suas ações magnéticas tende sempre a opor-se à causa que lhe deu origem.

Lei de *Laplace* (Lei de *Lorentz*)

Sobre um condutor retilíneo, percorrido por corrente, mergulhado num campo magnético, é exercida uma força eletromagnética que é proporcional à indução magnética (B) a que ele está sujeito, à corrente (I) que o percorre e ao seu comprimento (l).

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (3.2)$$

onde, F representa a força magnética, B representa o campo de indução magnética, I representa a intensidade da corrente elétrica e l simboliza o comprimento do condutor.

Com objetivo de melhor se entender o funcionamento do motor de indução, na Figura 3.6 representam-se duas bobinas em curto-circuito, situadas num campo magnético girante originado pelas correntes i_1 e i_2 .

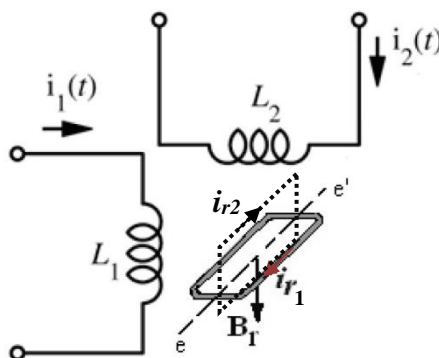


Figura 3.6 - Bobinas em curto-circuito num campo magnético girante, adaptado de [14]

Considerando primeiramente que as bobinas rotóricas estão paradas, o campo girante criado pelas correntes estatóricas dá origem a fluxos variáveis, através das seções definidas pelas bobinas, e as f.e.m induzidas por estes fluxos variáveis dão origem a correntes induzidas nas bobinas rotóricas i_{r1} e i_{r2} . Estas correntes criam um campo magnético girante B_r que acompanha o campo magnético do estator. Essas mesmas correntes rotóricas interagem com o campo magnético girante estatórico dando origem a um binário que tende a fazer rodar as bobinas em torno do eixo ee' . Se as bobinas rodarem em sincronismo com o campo girante, o fluxo criado pelo campo girante que as atravessa é constante, as correntes anulam-se, deixa de existir o binário atuante e as bobinas tendem a parar. No entanto, ao reduzir a velocidade, o fluxo através das bobinas deixa de ser constante e reaparece um binário atuante não nulo. Percebe-se assim que as bobinas só se mantêm em rotação se rodarem com uma velocidade inferior à do campo girante criado pelas correntes i_1 e i_2 . Por esse mesmo motivo designam-se estas máquinas de máquinas assíncronas, devido ao rotor não rodar em sincronismo com o campo girante das correntes do estator.

A velocidade de rotação do campo girante criado pelas correntes do estator depende da frequência das correntes e do número de pólos do estator (característica construtiva da máquina e dependente do modo como este foi bobinado).

Em resumo, o campo girante de amplitude constante, criado por um sistema de correntes trifásicas simétricas que percorrem três bobinas iguais, cujos eixos formam ângulos de 120° elétricos entre si, faz com que nos circuitos fechados do rotor se induzam f.e.m que darão origem a correntes elétricas. Os condutores do rotor são atuados por forças de *Lorentz*, referidas

em (3.2), dando origem a um binário motor, existindo apenas se a velocidade de rotação do rotor for diferente da do campo girante.

A frequência da rede, f [Hz], o número de pares de pólos, p , e a velocidade síncrona, n_s [rpm], estão relacionadas pela seguinte equação:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [rpm] \quad (3.3)$$

O escorregamento, s , é o quociente entre a diferença da velocidade de rotação síncrona, n_s , e a velocidade do rotor (velocidade do motor), n , e a velocidade síncrona. É dado pela Equação 3.4:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

A frequência induzida no rotor, f_2 , é obtida pela multiplicação do escorregamento pela frequência de rede:

$$f_2 = s \cdot f \quad (3.5)$$

3.4 Características funcionais do MIT

3.4.1 Perdas no motor

Em funcionamento como motor, a máquina absorve potência elétrica da rede e fornece potência mecânica no veio. Este é o modo de funcionamento mais comum da máquina assíncrona. As perdas que ocorrem num motor são, essencialmente, as seguintes:

- Perdas elétricas;
- Perdas magnéticas;
- Perdas mecânicas.

As perdas elétricas aumentam acentuadamente com a carga aplicada ao motor, pois a corrente aumenta e, devido ao efeito Joule, aumentam também as perdas por efeito de Joule, resultando num maior aquecimento dos condutores dos enrolamentos. Estas perdas podem ser reduzidas aumentando a secção dos condutores.

As perdas magnéticas ocorrem nas lâminas ferromagnéticas do rotor e do estator e são devidas ao efeito de histerese e às correntes de *Foucault*, variando com a densidade do fluxo e com a

frequência. Estas perdas podem ser reduzidas através do aumento da secção do ferro no estator e no rotor, através do uso de lâminas delgadas e do melhoramento dos materiais ferromagnéticos [11].

As perdas mecânicas devem-se, essencialmente, ao atrito das partes móveis: rolamentos, ventilação e perdas devido à oposição do ar. Podem ser reduzidas utilizando elementos com baixo atrito e aperfeiçoando os sistemas de ventilação.

O motor elétrico transforma a potência elétrica absorvida, P_{el} , em potência mecânica, P_{mec} , e uma pequena percentagem em perdas. As perdas, inerentes ao processo de transformação, são quantificadas através do rendimento, Equação 3.6:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} * 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

A potência elétrica, ou potência de rede, absorvida pelo motor, no MIT é no fundo a soma das potências das três fases, onde a potência de cada fase, P_f [W], é obtida através da tensão por fase V_f e da corrente por fase I_f .

$$P_{el} = 3 \cdot P_f = 3 \cdot V_f \cdot I_f \times \cos(\varphi) \quad [W] \quad (3.7)$$

3.4.2 Ligação das fases do MIT

Ligando os três sistemas monofásicos entre si, obtém-se um sistema equilibrado com as três tensões de igual valor desfasadas de igual ângulo (120°). A ligação entre fases poderá ser feita em triângulo (Δ) ou em estrela (Υ).

a) Ligação entre fases em estrela

Neste tipo de ligação, cada um dos fios de cada sistema monofásico é ligado a um ponto comum aos três, conforme a Figura 3.7:

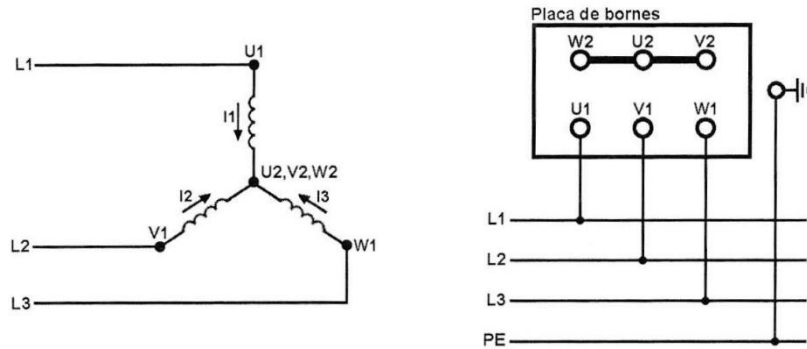


Figura 3.7 - Ligação dos enrolamentos em estrela, adaptado de [11]

As equações que regem este tipo de ligação são apresentadas de seguida:

$$\begin{cases} I_Y = I_{fase} \\ V_Y = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \end{cases} \quad (3.8)$$

b) Ligação entre fases em triângulo

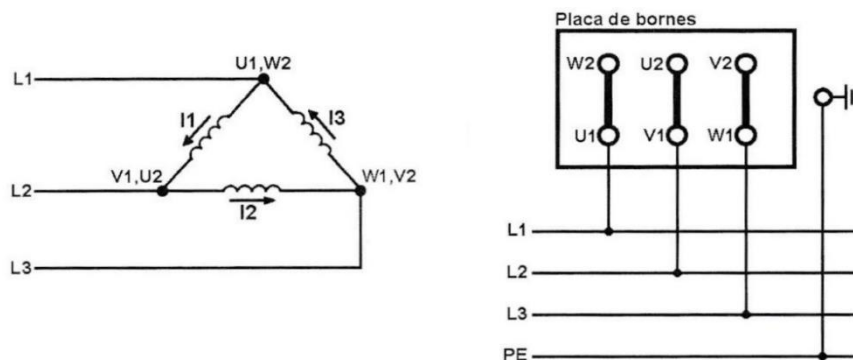


Figura 3.8 - Ligação dos enrolamentos em triângulo, adaptado de [11]

As equações que regem este tipo de ligação são apresentadas de seguida:

$$\begin{cases} I_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{fase} \\ V_{\Delta} = V_{fase} \end{cases} \quad (3.9)$$

3.4.3 Alimentação por inversor de frequência

O acionamento de motores elétricos de indução através de inversores de frequência é uma solução amplamente utilizada na indústria, e que constitui atualmente o método mais eficiente de controlo de velocidade neste tipo de motores. A sua aplicação fornece múltiplos benefícios

comparativamente a outros métodos de variação de velocidade. Benefícios tais como: redução de custos em energia elétrica, possibilidade de controlo à distância, maior versatilidade, maior facilidade de ligação, aumento de produtividade e uma melhor utilização de energia elétrica. Porém, para se verificarem as suas vantagens, é necessário um dimensionamento adequado para que possam ser efetivamente vantajosos na comparação entre eficiência energética e custos.

3.4.3.1 Variação da velocidade

Analisando a Equação 3.3 pode concluir-se que a melhor maneira de se variar a velocidade de rotação de um motor de indução é por meio da variação da frequência de alimentação. Os inversores de frequência transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, numa tensão de amplitude e frequência controláveis. Variando a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade mecânica do motor. Dessa forma, o inversor atua como uma fonte de frequência variável para o motor. No entanto, para que o motor possa trabalhar numa gama de velocidades, não basta variar a frequência de alimentação. Deve-se variar também a amplitude da tensão de alimentação, de maneira proporcional à variação de frequência. Assim, o fluxo e, por conseguinte, o binário eletromagnético do motor, permanecem constantes, enquanto o escorregamento é mantido. Dessa forma, como é visível na Figura 3.9 a), a relação V/f é linear até à frequência nominal de operação do motor. Acima desse valor, a tensão nominal permanece constante e há apenas a variação da frequência estatórica. Idêntico é o caso da relação P/f , ilustrada na Figura 3.9 b), em que a relação P/f é linear até à frequência nominal e após esse valor a potência nominal permanece constante existindo apenas variação da frequência estatórica, [15].

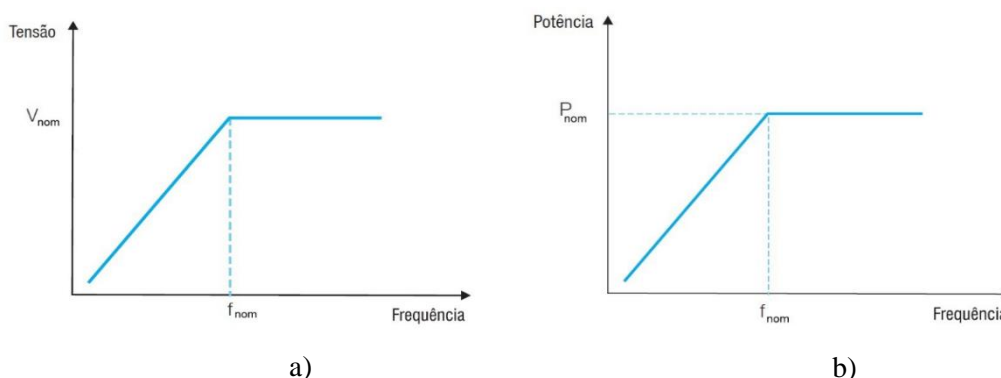


Figura 3.9 - Gráficos da relação de parâmetros de motores de indução alimentados por inversor de frequência, a) relação Tensão/Frequência b) relação Potência/Frequência, [15]

Assim, acima da frequência nominal caracteriza-se a região de enfraquecimento do campo, na qual o fluxo diminui, provocando a redução do valor do binário. Sendo este último constante até à frequência nominal, decrescendo gradualmente nas frequências de operação acima desta, como se pode observar na Figura 3.10:

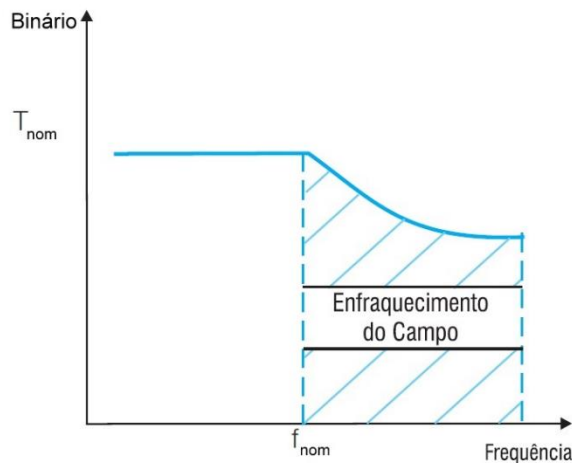


Figura 3.10 - Gráfico da relação Binário/Frequência, [15]

3.4.3.2 Características dos Inversores de Frequência

A obtenção da tensão e frequência desejadas através de inversores frequência pode ser descrita como o resultado por exemplo, de uma associação de três blocos constituintes do inversor de frequência, Figura 3.11, a saber:

1. Ponte de díodos - Retificação (conversor CA/CC) da tensão proveniente da rede de alimentação;
2. Filtro ou Link CC - Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia através de um banco de condensadores;
3. Transístores IGBT - Inversão (conversor CC/CA) da tensão do link CC por meio de técnicas de modulação por largura de pulso (PWM). Este tipo de modulação permite a variação da tensão/frequência de saída pela ação de transístores, sem afetar a tensão do link CC.

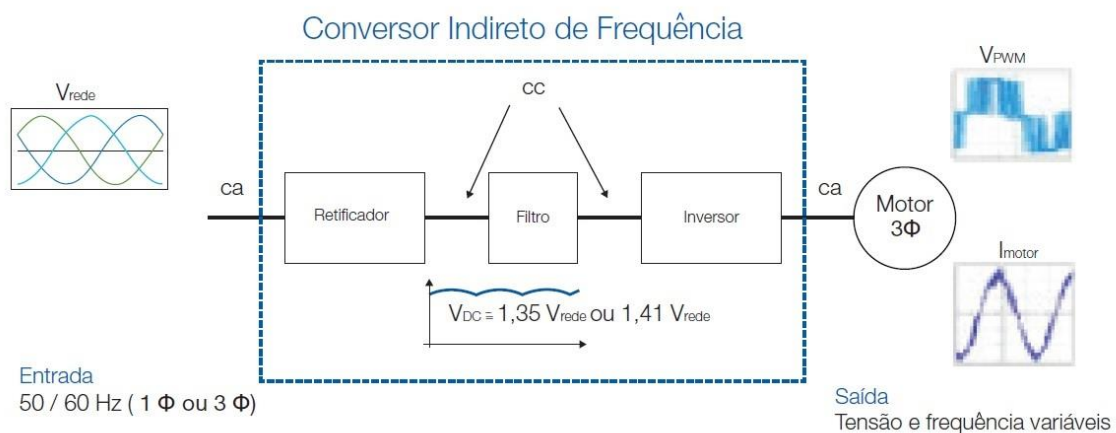


Figura 3.11 - Blocos constituintes de um inversor de frequência, [15]

3.4.3.3 Modos de controlo

Basicamente existem dois tipos de controlo efetuado pelos inversores de frequência: o tipo escalar e o tipo vetorial.

a) Controlo escalar

O controlo escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência visto anteriormente: impor no motor uma determinada relação tensão/frequência, visando manter o fluxo magnético do motor aproximadamente constante. Este método é aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de binário e velocidade, sendo particularmente útil quando existe ligação de vários motores a um único inversor. O controlo é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade varia em função do escorregamento do motor, o qual varia com a carga. Para melhorar o desempenho do motor a baixas velocidades, alguns inversores possuem funções especiais como a compensação de escorregamento (que atenua a variação da velocidade em função da carga) e o *boost* de tensão (aumento da relação V/f para compensar o efeito da queda de tensão na resistência estatórica e manter a capacidade de binário do motor). Este tipo de controlo é o mais utilizado devido à sua simplicidade e devido ao fato da grande maioria das aplicações não requerer alta precisão e/ou rapidez no controlo da velocidade.

b) Controlo vetorial

O controlo vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controlo do binário e da velocidade do motor. A corrente do motor é decomposta em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz binário, sendo regulados separadamente. O controlo vetorial pode ser realizado em malha aberta (“*sensorless*”) ou em malha fechada (com realimentação)

- Com sensor de velocidade – requer a instalação de um sensor de velocidade (por exemplo, um encoder incremental) no motor. Este tipo de controlo permite uma ótima precisão no controlo da velocidade e do binário, inclusive à rotação zero;
- *Sensorless* – tem a vantagem de ser mais simples do que o controlo com sensor, porém, apresenta limitações de binário principalmente em velocidades de rotação muito baixas. Em velocidades maiores é praticamente tão bom quanto o controlo vetorial com realimentação.

3.4.4 Aquecimento

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil do material isolante dos enrolamentos. Esta é afetada por diversos fatores, como humidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Sendo o fator mais importante a temperatura suportada pelos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica da temperatura do isolamento, pode reduzir a

A temperatura nos produtos eletromecânicos é frequentemente o fator predominante para o envelhecimento do material isolante e do sistema de isolamento, certas classificações térmicas básicas são úteis e reconhecidas mundialmente. As classes térmicas definidas para os materiais e sistemas isolantes, segundo a norma IEC 60085, são as dispostas na Tabela 3.1.

Classe Térmica	Temperatura Máxima [°C]
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Tabela 3.1 - Classes térmicas dos materiais isolantes, adaptado de [16]

De modo a acompanhar o desenvolvimento das temperaturas envolvidas no funcionamento de um motor, é aconselhável efetuar medições da temperatura externa do motor, dos enrolamentos, e da temperatura ambiente. A medição da temperatura externa deve ser feita no centro da carcaça, na zona alhetada, e na tampa dianteira, junto ao rolamento. Deve ser também medida a temperatura ambiente a uma distância máxima de um metro do motor em causa. Relativamente à medição da temperatura dos enrolamentos, deve ser efetuada recorrendo ao método da variação da resistência óhmica com a temperatura. Consoante a classe térmica do isolamento do motor e do tipo de máquina em questão é determinado o tipo de sensor a utilizar, desde termoresistências, termístores ou termostatos. Não sendo indicada a utilização de termómetros ou termopares [15].

3.4.5 Regimes de serviço

Segundo a IEC 60034-1, regime de serviço refere-se ao grau de regularidade da carga a que um motor é submetido. Sendo nela previstos vários regimes padronizados, a saber:

- Regime de tempo contínuo (S1);
- Regime de tempo limitado (S2);
- Regime intermitente periódico (S3);
- Regime intermitente periódico com arranques (S4);
- Regime intermitente periódico com travagem elétrica (S5);
- Regime contínuo periódico com carga intermitente (S6);
- Regime contínuo periódico com carga intermitente com travagem elétrica (S7);
- Regime contínuo periódico com mudanças de carga e velocidade (S8);

- Regime com variações não periódicas de carga e velocidade (S9);
- Regime com cargas constantes e distintas (S10).

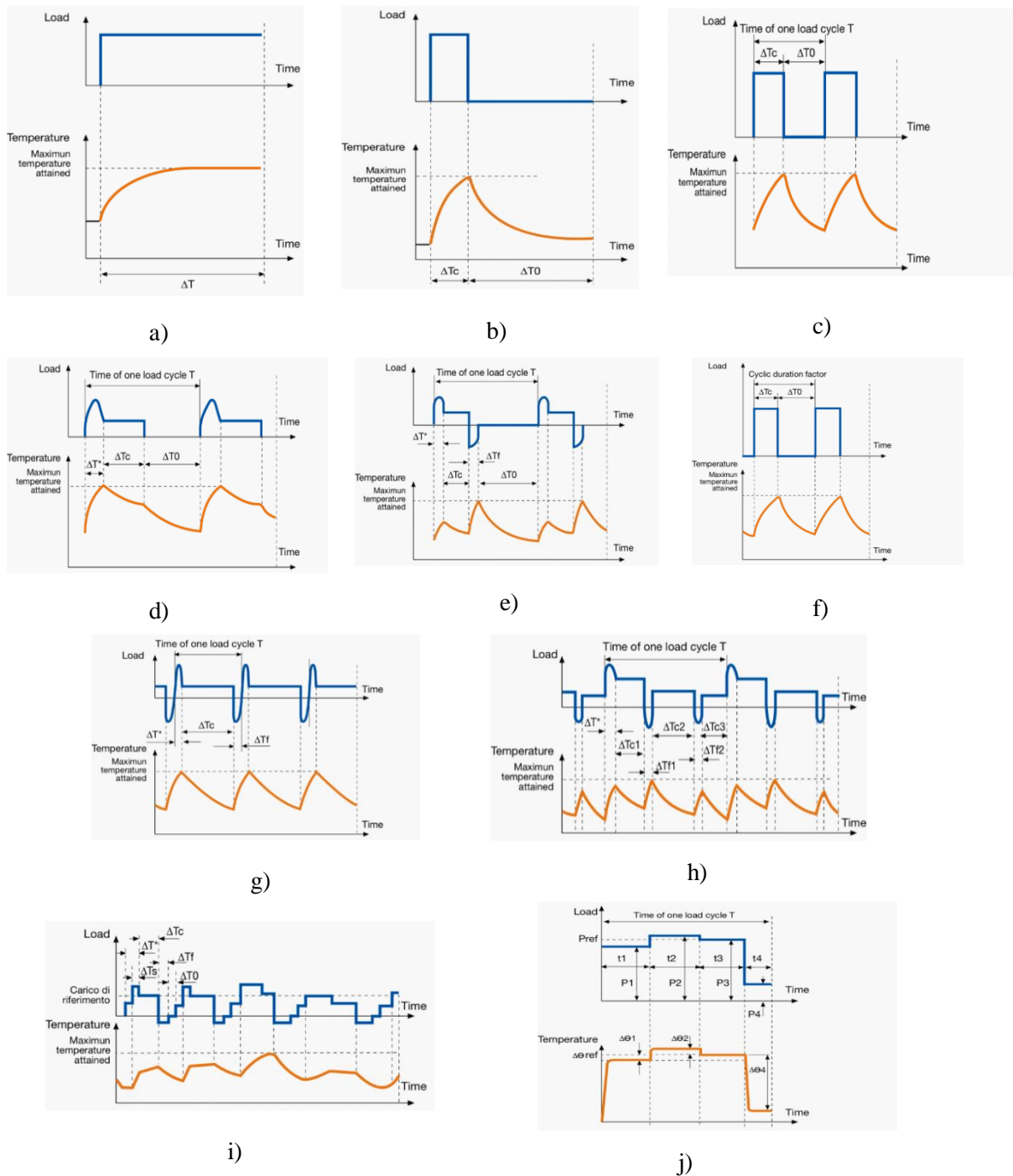


Figura 3.13 - Gráficos representativos dos regimes de serviço a) Regime S1, b) Regime S2, c) Regime S3, d) Regime S4, e) Regime S5, f) Regime S6, g) Regime S7, h) Regime S8, i) Regime S9, j) Regime S10 [17]

3.4.6 Vibração

As máquinas elétricas rotativas possuem limites aceitáveis de vibração durante o seu funcionamento, definidos pela norma IEC 60034-14. Estes valores são válidos para o ensaio da máquina a velocidade nominal e sem carga. Segundo a norma referida, estes ensaios podem ser realizados de duas formas: **por suspensão livre**, em que a máquina está assente em suportes com efeito de mola (mola, borracha ou elástico) ou **por montagem rígida**, em que a máquina é apertada diretamente a uma base sólida como o chão, ou uma placa rígida onde a vibração medida não exceda cerca de 25% da velocidade máxima que será medida no motor, na zona de ensaio e na mesma direção [2]. Na Tabela 3.2 é possível observar os valores limite da magnitude de vibração.

Grau de vibração	Altura do veio [mm]	$56 \leq H \leq 132$			$132 < H \leq 280$			$H > 280$		
	Montagem	Desloc. [μm]	Veloc. [mm/s]	Aceler. [m/s^2]	Desloc. [μm]	Veloc. [mm/s]	Aceler. [m/s^2]	Desloc. [μm]	Veloc. [mm/s]	Aceler. [m/s^2]
A	Suspensão livre	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Rígida	21	1,3	2	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Suspensão livre	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Rígida				14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Tabela 3.2 - Limites da magnitude de vibração máxima em deslocamento, velocidade e aceleração (RMS) consoante a altura do veio H [18]

O grau “A” refere-se a máquinas sem requerimentos de vibração especiais. O grau “B” refere-se a máquinas com requerimentos de vibração especiais. A montagem rígida não é aceitável para máquinas com altura de veio (comprimento desde a base do motor até ao centro do veio) inferior a 132 mm. As frequências de *interface* para deslocamento/velocidade e velocidade/aceleração são 10 Hz e 250 Hz, respetivamente.

Os motores trifásicos de gaiola de esquilo têm geralmente um conjunto rotativo pesado, ou seja, têm um rotor pesado relativamente ao estator e à estrutura envolvente, pelo que as forças geradas pelo rotor são dissipadas através dos rolamentos da estrutura que suportam o rotor. De modo a verificar a presença de vibrações anómalas no motor deve efetuar-se periodicamente uma análise de vibrações, para isso deve recorrer-se a acelerómetros instalados em posições corretas de modo a se obter leituras fiáveis [2].

Na Figura 3.14, baseada na norma ISO 10816, estão representados os pontos onde devem ser efetuadas as leituras e as posições recomendadas de como o acelerómetro deverá ser colocado aquando das medições.

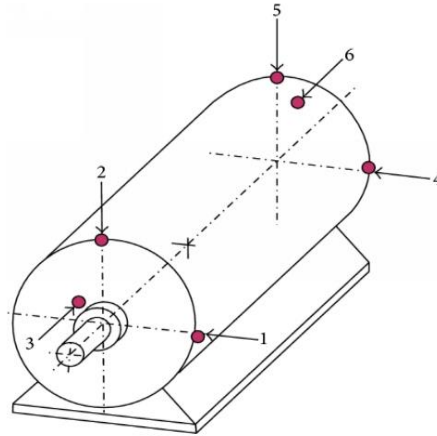


Figura 3.14 - Posições recomendadas para efetuar a medição de vibrações em motores de indução, baseados na norma ISO 10816 [19]

De acordo com a numeração presente na Figura 3.14, as posições indicadas designam:

- Posição 1 e 4: direção radial horizontal;
- Posição 2 e 5: direção radial-vertical;
- Posição 3 e 6: direção axial.

4 Falhas em motores de indução

4.1 Introdução

Nos motores de indução, as falhas podem ter como consequência uma redução do desempenho ou mesmo a interrupção do processo industrial do qual fazem parte integrante, reduzindo assim a produção, ou causando danos noutras máquinas ou equipamentos do mesmo processo industrial. A monitorização do funcionamento do motor permite detetar e diagnosticar a existência de falhas numa fase incipiente, permitindo assim evitar quebras de produção bem como os custos associados de não produção e reparação.

Os programas de manutenção usados no setor industrial são diversos e dependem das condições de funcionamento de cada instalação bem como do tipo de equipamentos instalados. A sua correta aplicação permite reduzir bastante os custos de não produção e de manutenção. Atualmente as técnicas mais utilizadas em ambiente industrial são as seguintes [20]:

- **Manutenção Corretiva:** forma mais simples de manutenção, pois apenas é desencadeada após a ocorrência de alguma falha, normalmente com a substituição das peças ou equipamentos defeituosos. Além do custo envolvido na reparação, a indisponibilidade do equipamento origina perda de produção e acréscimo nos respetivos custos de produção;
- **Manutenção Preventiva:** também chamada de manutenção periódica, consiste na revisão periódica dos equipamentos, mesmo que não existam falhas, sendo baseada no tipo de utilização e no tempo de vida útil de cada equipamento. Apresenta como vantagem o fato de prevenir algumas falhas, mas envolve a paragem do equipamento (muitas vezes desnecessária) e a eventual substituição de peças não defeituosas. Mesmo que executada de forma correta, algumas peças ou equipamentos podem eventualmente falhar ainda antes do tempo previsto para a sua manutenção ou substituição. Desta forma, quando uma falha não é evitada não se podem evitar custos envolvidos na paragem do processo, bem como os custos associados à mão-de-obra e ao armazenamento de peças e equipamentos. Existe ainda a possibilidade de inadvertidamente provocar falhas num equipamento em funcionamento durante as operações de manutenção;
- **Manutenção Preditiva:** consiste na utilização de técnicas de monitorização e análise, que visam detetar o desenvolvimento de falhas ainda num estado muito inicial. Assim, reduzem-se custos associados com reparações desnecessárias e paragens não programadas, permitindo o controlo das paragens programadas e do armazenamento de peças de substituição. Este tipo de manutenção envolve técnicas, normalmente não-invasivas, de monitorização e análise que requerem instalação de instrumentação adequada e pessoal especializado.

Nos últimos anos, uma nova técnica de manutenção tem sido estudada e aplicada, sendo designada como manutenção inteligente ou pró-ativa. Este tipo de manutenção consiste numa evolução das tradicionais técnicas de manutenção, baseadas na reparação após a falha e na substituição de peças em fim de vida útil, para uma manutenção mais centrada na monitorização, previsão e diagnóstico de ocorrência de falhas [20].

A manutenção inteligente consiste na monitorização do equipamento e do desgaste devido ao seu funcionamento normal ou a condições adversas, permitindo o atempado diagnóstico e quantificação da perda de desempenho do sistema, fornecendo informações importantes para a equipa de manutenção e permitindo atuar de uma forma automática ou não sobre o referido equipamento. Assim, quando é detetada uma falha, o sistema poder-se-á reconfigurar automaticamente por forma a continuar em operação, ainda que num modo de funcionamento degradado, até à realização da necessária operação de manutenção. Na manutenção inteligente, a monitorização, a deteção, o diagnóstico e a previsão de falhas são realizadas por recurso a sistemas inteligentes, com capacidade de análise, previsão e diagnóstico em tempo real [21].

Apresenta-se de seguida alguma da terminologia utilizada na área de manutenção, de modo a clarificar alguns conceitos relativos a falhas e respetivos sistemas de deteção e diagnóstico, [22]:

- **Falha** - Desvio não permissível ao comportamento aceitável, habitual ou padrão, de pelo menos, uma propriedade, característica ou parâmetro do sistema. Podem ser subdivididas em:
 - a) Falhas abruptas: falha cujo efeito aparece repentinamente;
 - b) Falhas incipientes: falha cujo efeito aparece progressivamente;
 - c) Falhas intermitentes: aparecem de forma abrupta e consecutiva em intervalos de tempo curtos e aleatórios;
 - d) Falhas permanentes: ocorrem de forma abrupta e definitiva.

- **Avaria** - Interrupção permanente da capacidade de um dispositivo ou sistema para executar uma função requerida sob condições de funcionamento específicas;
- **Monitorização** - Tarefa contínua em tempo real destinada a determinar as condições de funcionamento de um sistema físico, para registo de informações, com capacidade de detetar e identificar possíveis falhas ou anomalias de funcionamento;
- **Deteção de falhas** - Determina a existência ou presença de falhas no sistema, assim como, o momento da sua ocorrência, normalmente integrado na motorização;
- **Isolamento de falhas** - Determina o tipo, localização e tempo de deteção da falha. Ocorre após a etapa da deteção de falhas;
- **Identificação de falhas** - Determina o tamanho e comportamento da variação temporal da falha. Segue-se ao isolamento de falhas;
- **Diagnóstico de falhas** - Determina o tipo, tamanho, localização e o momento da ocorrência da falha. Inclui a deteção, o isolamento e a identificação de falhas.

4.2 Falhas associadas ao MIT

As falhas em máquinas elétricas podem ter início num vasto conjunto de causas, sendo umas facilmente identificáveis e outras não. Quanto à sua origem podem classificar-se como falhas internas ou externas à máquina, como se apresenta na Figura 4.1. As falhas internas, apresentadas na Figura 4.1 a), resultam de problemas de funcionamento internos da própria máquina. As falhas externas, apresentadas na Figura 4.2 b), têm origem no meio envolvente no qual a máquina se encontra em funcionamento, como problemas ambientais, transitórios e desequilíbrios elétricos e mecânicos [20].

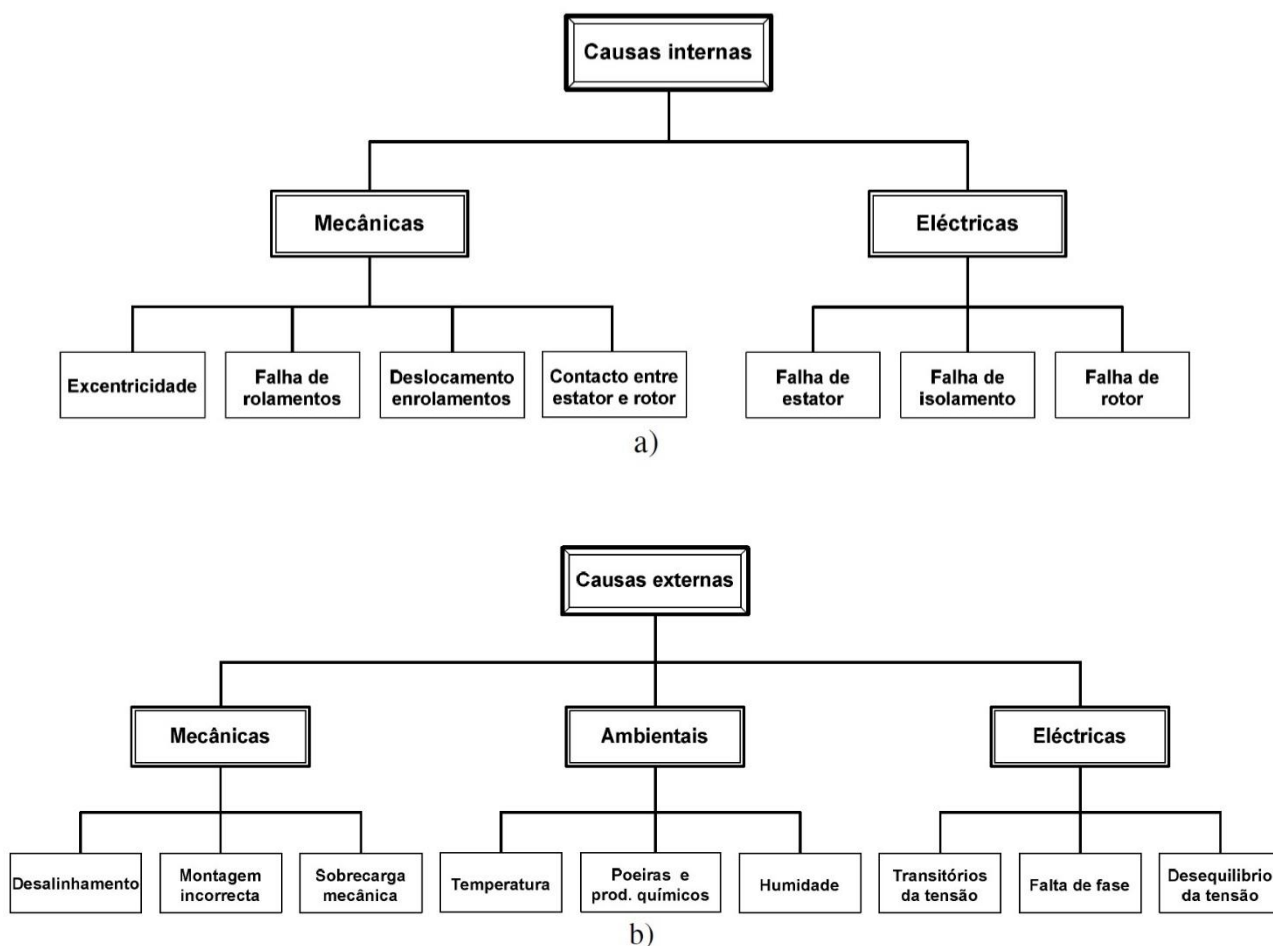


Figura 4.1 - Falhas passíveis de ocorrerem em máquinas elétricas consoante a causa: a) Devido a causas internas, b) Devido a causas externas, [20]

Tendo em conta as diversas falhas passíveis de ocorrerem em motores de indução, foram efetuados estudos de modo a se obterem valores estatísticos relativamente aos componentes mais suscetíveis à ocorrência de falha. A título de exemplo apresentam-se dois desses estudos (Figura 4.2) apresentando a distribuição das falhas segundo a sua localização.

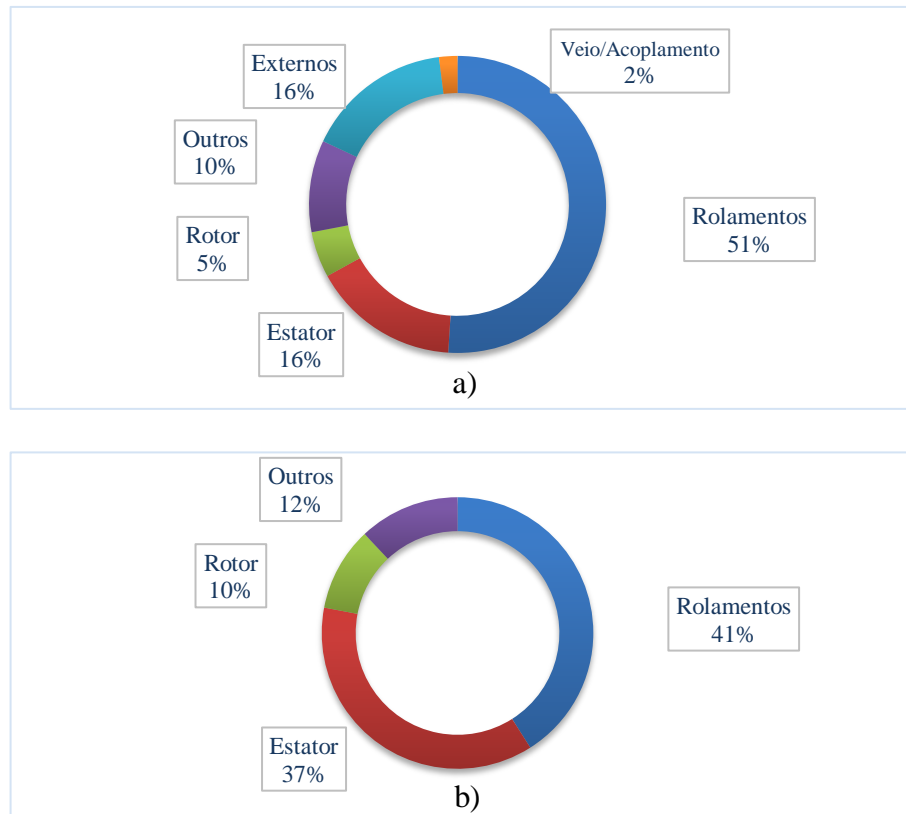


Figura 4.2 – Distribuição das falhas em máquinas de indução: a) Thomson, 2001 [23] b) Bonnet, 2008 [24]

Verifica-se, através da análise dos gráficos anteriores que os componentes com maior percentagem de ocorrência de falhas são os rolamentos, seguido do estator. Ou seja, a grande maioria das falhas está relacionada com estes dois componentes dos motores de indução.

Nos últimos anos tem-se vindo a verificar uma evolução na qualidade das máquinas elétricas, quer ao nível da construção dos enrolamentos do estator quer ao nível das barras do rotor, com uma redução considerável do número de falhas do tipo elétrico.

As falhas em máquinas elétricas podem também agrupar-se conforme o elemento da máquina onde ocorrem. Considerando a máquina de rotor em curto-circuito apresenta-se na Tabela 4.1 uma distribuição das falhas em função do elemento da máquina onde estas ocorrem. Nas seções seguintes descrever-se-ão mais em detalhe estas falhas.

Elemento	Falha
Estator	Curto-circuito (CC) entre espiras no mesmo enrolamento
	CC entre enrolamentos diferentes
	CC entre o enrolamento e a carcaça (terra)
	Circuito aberto ou falta de fase
Rotor	Quebra ou rutura das barras da gaiola do rotor
	Quebra ou rutura dos anéis de CC da gaiola do rotor
	Excentricidade do entreferro
Veio	Falhas nas chumaceiras
	Falhas nos rolamentos
	Desalinhamentos e folgas mecânicas
	Fratura e empeno do veio
	Ventilação

Tabela 4.1 - Distribuição das falhas na máquina de indução de rotor em curto-circuito, em função do elemento onde ocorrem [20]

4.2.1 Falhas associadas ao Estator

A grande maioria das falhas relativas ao estator dos motores de indução encontram-se associadas aos respectivos enrolamentos, representando a ocorrência de falhas localizadas no núcleo ferromagnético estatórico um acontecimento bastante menos frequente.

As falhas associadas aos enrolamentos do estator apresentam um conjunto diversificado de manifestações possíveis, conforme ilustra a Figura 4.3, podendo ainda verificar-se a ocorrência simultânea de diversas combinações daquelas.

Os enrolamentos das máquinas elétricas rotativas encontram-se sujeitos à ação nociva de diversos mecanismos de fadiga de natureza térmica, elétrica, mecânica e ambiental. Dependendo das dimensões das máquinas, das suas características nominais e condições de funcionamento, a interação dos vários mecanismos conduzirá à degradação mais ou menos acelerada do isolamento dos enrolamentos e, conseqüentemente, à ocorrência dos diversos modos de falhas ilustrados na Figura 4.3.

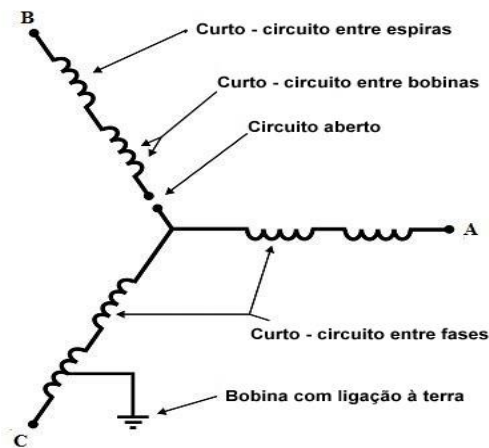


Figura 4.3 - Estator ligado em estrela, evidenciando diferentes modos de ocorrências de falhas nos enrolamentos estatóricos, [25]

Deste modo, importa analisar as principais condições de funcionamento para as quais a ação dos referidos mecanismos e respetivos processos de degradação se torna mais acentuada.

As causas das falhas do tipo curto-circuito nos enrolamentos do estator estão normalmente associadas a defeitos de isolamento dos enrolamentos devido a efeitos térmicos, elétricos, mecânicos, ambientais ou defeitos construtivos. De seguida, apresentam-se de forma resumida as principais causas de falhas de estator segundo o seu efeito [20]:

- **Efeitos Térmicos**
 1. Alimentação desequilibrada;
 2. Sobretensão ou subtensão na alimentação;
 3. Arranques diretos consecutivos e operação em sobrecarga;
 4. Deficiente ventilação.
- **Efeitos Elétricos**
 1. Defeito ou envelhecimento do isolamento;
 2. Falha de ligação;
 3. Descargas parciais ou regimes transitórios.
- **Efeitos Mecânicos**
 1. Contacto entre o estator e o rotor durante a rotação;
 2. Bobinagem, desalinhamentos, excentricidades, projeção de partículas;
 3. Vibrações;
 4. Movimento das bobinas dos enrolamentos de estator nas ranhuras.
- **Efeitos Ambientais**
 1. Humidade;
 2. Agentes químicos;
 3. Poeiras e pequenas partículas projetadas pela ventilação.

No que diz respeito à falha do tipo circuito aberto, ou falta de fase, resulta normalmente da rutura de um enrolamento ou da falta de uma fase de alimentação da máquina (geralmente

ocasionada pela interrupção do circuito devido a fusão de um fusível, falha no contator, mau contacto provocado por ligações danificadas, defeitos no conversor eletrónico, entre outras). O desequilíbrio de tensão provocado por esta falha resulta no funcionamento desequilibrado da máquina, associado a uma diminuição do binário desenvolvido e conseqüente aumento da corrente nas outras fases.

4.2.2 Falhas associadas ao Rotor

Diversos mecanismos de fadiga de natureza térmica, eletromagnética, residual, dinâmica, mecânica e ambiental, interagindo no rotor em gaiola de esquilo dos motores de indução trifásicos, constituem os principais fatores responsáveis pela ocorrência de avarias [25].

As falhas associadas ao rotor da máquina de indução resultam geralmente de defeitos na própria gaiola de esquilo ou no entreferro, e manifestam-se pela quebra parcial ou total de barras ou dos anéis de curto-circuito, ou ainda por excentricidades. Dos possíveis modos de ocorrência de falhas na gaiola dos motores de indução, o desenvolvimento de fraturas nas barras rotóricas, particularmente na região dos anéis terminais, constitui uma das situações mais frequentes.

O arranque do MIT diretamente ligado à rede de alimentação, bem como a sujeição a regimes de funcionamento sobrecarregados, comuns em várias áreas da sua aplicação, contribuem significativamente para a ocorrência de tais situações. Com efeito, o arranque direto, proporcionando o aparecimento de correntes rotóricas de elevada amplitude (até 10 vezes superior ao valor correspondente à plena carga) numa altura em que a refrigeração é mínima, ocasionará para além de esforços mecânicos consideráveis (forças de ação centrífuga, vibrações, forças de natureza eletrodinâmica, etc) um aumento significativo da temperatura.

Por sua vez, arranques consecutivos e prolongados, bem como oscilações de carga, constituem alguns exemplos de regimes de funcionamento sobrecarregados, capazes de agravar as conseqüências resultantes do arranque direto de motores, ou produzir por si só, efeitos semelhantes.

Para além dos aspetos já anteriormente analisados, poder-se-ão ainda distinguir como causas próximas da ocorrência de fraturas na gaiola dos motores de indução, fatores tecnológicos relativos aos defeitos de fabrico, ou assimetrias residuais resultantes da aplicação de certos processos construtivos.

Analisa-se agora dois dos tipos de falha associados ao rotor:

a) Quebra das barras e anéis de curto-circuito da gaiola de esquilo

A quebra ou rutura de uma ou mais barras da gaiola de esquilo é uma falha que tem como conseqüência uma redução do valor médio de binário eletromagnético e um aumento da amplitude das suas oscilações, que por sua vez provocam oscilações na velocidade de rotação resultando em vibrações mecânicas e um deficiente funcionamento da máquina.

Uma vez iniciado o processo de fratura de uma barra rotórica, verificar-se-á uma propagação em avalanche deste fenómeno, de acordo com a seguinte sequência típica:

1. A barra em defeito sofrerá um sobreaquecimento na região próxima da fenda, fomentando o seu desenvolvimento;
2. Uma vez fraturada a barra, estabelecer-se-á um arco elétrico através da fratura, o qual poderá causar danos significativos no núcleo laminado rotórico;
3. As barras adjacentes suportarão uma corrente de valor mais elevado e, portanto, mecanismos de fadiga mais intensos resultarão no desenvolvimento de novos processos de fratura;
4. Finalmente, as barras fraturadas poderão soltar-se por ação de forças centrífugas atuando no motor, causando danos físicos em outras barras, ou ainda nos enrolamentos do estator.

A quebra ou rutura de um anel é uma falha que ocorre tão frequentemente quanto a quebra de barras da gaiola, sendo normalmente devido a ruturas do próprio anel ou nas soldaduras das barras aos anéis. Este tipo de falha é de difícil detecção porque é geralmente confundido com a rutura das barras, sendo estas avarias normalmente agrupadas como falhas de rotor. Os anéis são percorridos por correntes mais elevadas do que as barras, um inadequado dimensionamento dos mesmos, a deterioração das condições de funcionamento (excesso de temperatura, humidade, etc) ou uma corrente de sobrecarga podem originar fendas e fissuras originando mesmo a quebra dos anéis.

b) *Excentricidades do entreferro*

Traduzindo-se na introdução de assimetrias no circuito magnético (entreferro não uniforme), a excentricidade do rotor constitui um problema particularmente significativo no domínio dos motores de indução, em virtude da reduzida espessura do seu entreferro (comparativamente ao das máquinas síncronas, por exemplo). A excentricidade acontece quando os centros geométricos do estator e do rotor, C_e e C_r , não coincidem com o centro de rotação do rotor, C_R , o que resulta num entreferro de dimensão variável. Numa máquina perfeita, sem excentricidades, os centros geométricos do estator e do rotor são coincidentes com o centro de rotação do rotor ($C_R = C_r = C_e$) e o entreferro tem uma espessura constante ao longo do estator, como mostra a Figura 4.4 a) [20].

A ocorrência de excentricidade poderá revestir-se de três formas distintas:

1. *Excentricidade estática*: o centro de rotação (C_R), coincidente com o centro geométrico do rotor (C_r), encontra-se deslocado relativamente ao centro geométrico do perímetro interno do estator (C_e). Nestas condições, a posição correspondente à largura mínima radial do entreferro apresenta-se fixa no espaço, Figura 4.4 b);
2. *Excentricidade dinâmica*: o centro geométrico do rotor é diferente do centro de rotação, mas o centro de rotação é coincidente com o centro geométrico do estator. O ponto onde o entreferro é mínimo está em movimento em relação ao estator, como se apresenta na Figura 4.4 c);
3. *Excentricidade mista*: ocorre quando as duas formas anteriores são combinadas. O centro geométrico do rotor, o centro de rotação do rotor e o centro geométrico do estator

são todos diferentes. O ponto onde o entreferro é mínimo também se movimenta em relação ao estator, Figura 4.4 d).

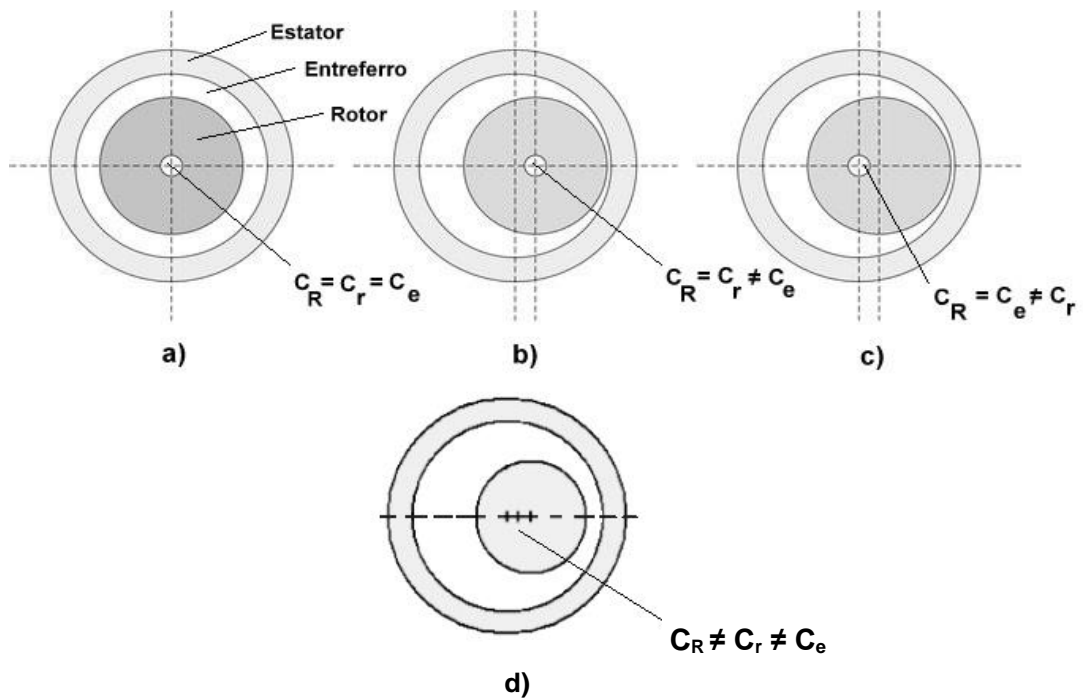


Figura 4.4 - Excentricidades do entreferro: a) motor sem excentricidade, b) motor com excentricidade estática, c) motor com excentricidade dinâmica, d) motor com excentricidade mista, adaptado de [26]

5 Processamento de sinal e Identificação de falhas

5.1 Introdução

De modo a identificar corretamente os diversos tipos de falhas que podem ocorrer num motor de indução é necessário recorrer a diferentes métodos e ferramentas quer de processamento de sinal quer de identificação de falhas. Só assim se conseguem obter valores de certeza satisfatórios relativamente ao tipo de falha que determinado motor apresenta.

Uma boa identificação do tipo de falha que certo motor sofre, é no fundo o culminar de um processo que se inicia na aquisição de dados, geralmente através de transdutores ou sensores, passa pelo processamento dos sinais adquiridos, já em formato digital, pela extração de características relevantes desse mesmo processo e termina na identificação do tipo de falha. Este é o processo geral, sendo que, quando é identificada uma falha, o motor deverá ser inspecionado devidamente por técnicos competentes de modo a verificar escrupulosamente a sua real condição. Na Figura 5.1 está representado um diagrama desse mesmo processo.

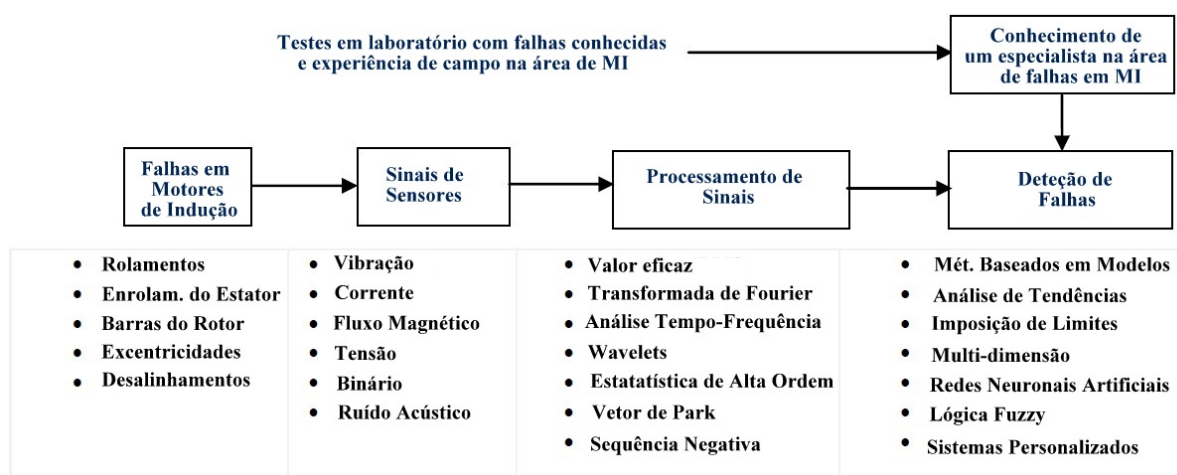


Figura 5.1 - Diagrama exemplo de um possível processo de monitorização da condição e identificação de falhas, adaptado de [27]

Como se pode observar no diagrama anterior existem múltiplos métodos passíveis de serem utilizados, quer para o processamento de sinal quer para a identificação de falhas. Na maioria das vezes, para uma correta identificação utilizam-se simultaneamente várias técnicas, aumentando assim a probabilidade da correta identificação de determinado tipo de falha.

5.2 Técnicas de processamento de sinal

As técnicas de processamento de sinal são normalmente aplicadas aos sinais provenientes de sensores e/ou transdutores que medem as diferentes grandezas associadas ao funcionamento de um motor. De forma a se conseguir obter informação útil para uma posterior identificação de

falha, como por exemplo, interligar a amplitude de certas componentes de frequência à presença de determinadas falhas, é necessário primeiramente processar os sinais adquiridos. Essas técnicas de análise podem ser efetuadas no domínio do tempo, no domínio da frequência e no domínio tempo-frequência.

5.2.1 Domínio do Tempo

Os métodos de análise no domínio do tempo são em geral muito utilizados no processamento de sinais, alertando para o surgimento e evolução da falha, não permitindo identificar a localização e natureza da mesma. Por esse motivo, este tipo de técnicas deve ser complementado com outro método que colmate os pontos em falta.

5.2.1.1 Valor eficaz

O valor eficaz ou valor RMS é a técnica mais simples e mais importante de análise de sinais no domínio de tempo podendo determinar a condição geral de um equipamento através da comparação dos valores medidos com os índices de severidade tabelados. Não indica o tipo de falha presente no equipamento, mas sinaliza, no entanto, a existência de um aumento de energia no sinal, que normalmente é devido à evolução de uma determinada falha.

Esta técnica leva em consideração o histórico do sinal ao longo do tempo e o seu valor de nível que é está com a energia contida no sinal. O cálculo do valor eficaz da velocidade de vibração é útil para se obter o grau de severidade geral do motor. Já o cálculo do valor eficaz aplicado à corrente do estator fornece uma indicação aproximada da carga a que o motor está sujeito. Para amostras discretas do sinal, o valor RMS da componente alternada é definido como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

onde N é o número total de pontos da amostra, x é a amplitude do sinal, n um número natural e \bar{x} é o valor médio do sinal de vibração.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \quad (5.2)$$

Os critérios de avaliação da máquina rotativa em velocidade RMS são dados pela norma ISO 10816 de 2012. A Tabela 5.1, baseada na norma anterior, especifica os limites de vibração, dependentes da potência da máquina e do tipo de suporte ou fundação. Para todos os pontos de medição, é registado o valor eficaz, e, a partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração é executada uma análise de frequência de modo a identificar a origem do problema.

Severidade da Velocidade RMS	Limites da Gama de Velocidade e Classes de Máquinas			
	Até 20cv	20 - 100cv	100cv base rígida	100cv base flexível
[mm/s]				
0,28	BOM	BOM	BOM	BOM
0,45				
0,71				
1,12	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO
1,80				
2,80	INSATISFATÓRIO (Alerta)	INSATISFATÓRIO (Alerta)	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO
4,50				
7,10	INACEITÁVEL (Perigo)	INACEITÁVEL (Perigo)	INSATISFATÓRIO (Alerta)	INSATISFATÓRIO (Alerta)
11,20				
18,00			INSATISFATÓRIO (Alerta)	
28,00			INACEITÁVEL (Perigo)	
45,00				

Tabela 5.1 - Limites de velocidade baseados na ISO 10816 [28]

5.2.1.2 Transformada de Hilbert

A Transformada de Hilbert (TH) é uma técnica clássica, amplamente aplicada na identificação de falhas em motores de indução. O seu uso está associado ao processo de desmodulação de sinais e à deteção de envelopes. É eficaz no tratamento de sinais modulados em amplitude e em fase, permitindo separar a componente fundamental do sinal das componentes restantes, facilitando assim a deteção de componentes associadas a falhas.

Seja $x(t)$ um sinal modulado qualquer, a Transformada de Hilbert desse sinal, $H[x(t)]$, pode ser definida pelas Equações 5.3 e 5.4.

Normalmente, não é possível determinar a Transformada de Hilbert através do cálculo do integral, pois trata-se de um integral com limites infinitos assumindo valores infinitos dentro do intervalo de integração, o que é uma singularidade. No entanto, a variável P , designada de valor principal de Cauchy da integral, expande a classe na qual o integral é calculado, de modo

que a expressão dada pela Equação 5.3 só poderá ser determinada para valores nos quais o integral exista [29].

$$H[x(t)] = y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5.3)$$

A TH também pode ser representada como uma operação de convolução entre $(1/\pi t)$ e o sinal original $x(t)$, conforme a Equação 5.4.

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi t} * x(t) \quad (5.4)$$

Na Figura 5.2 pode ser visualizada a TH de um sinal de corrente de um motor de indução, com velocidade de rotação de 1735 rpm e com três barras do rotor partidas.

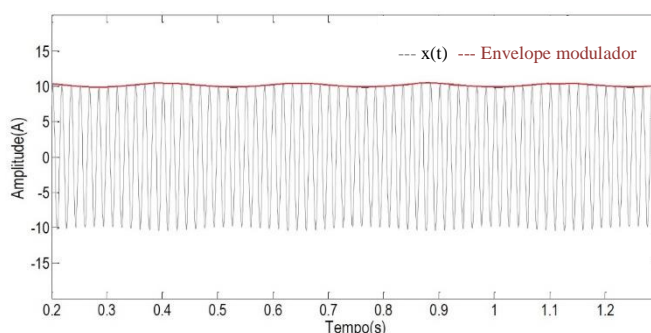


Figura 5.2 - HT do sinal de corrente $x(t)$ para obtenção do envelope modulador [4]

O sinal $x(t)$, denominado sinal portador, refere-se à forma de onda da corrente que contém as características associadas à frequência de alimentação, enquanto que o envelope ou sinal modulador transmite as informações referentes à componente de falha.

5.2.2 Análise no Domínio da Frequência

5.2.2.1 Transformada Rápida de Fourier

A transformada de Fourier de uma função $x(t)$ é definida como se segue:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5.5)$$

onde $X(\omega)$ é o sinal $x(t)$ representado no domínio da frequência.

A Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) é um algoritmo eficiente para se calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa sendo também o

método de processamento de sinal mais comumente utilizado no acompanhamento da condição em tempo real.

Muitas das falhas mecânicas e elétricas produzem sinais cujas frequências podem ser determinadas a partir do conhecimento de parâmetros do motor. Essas evidências de falha aparecem nos sinais adquiridos de transdutores e/ou sensores de vibração, de corrente, fluxo, entre outros. A análise de frequência pode, portanto, fornecer informações sobre vários tipos de falhas, embora algumas delas produzam frequências similares e, portanto, exigem outras informações suplementares para diferenciá-las. No entanto, a FFT possui desvantagens, nomeadamente na detecção precoce de falhas devido à pequena amplitude das componentes de falha que, devido ao ruído introduzido no processo de aquisição de dados dificulta a sua detecção.

No domínio do tempo discreto, a Equação 5.5 recebe a denominação de Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) e pode ser expressa da seguinte forma:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N_a-1} x(n)e^{-j(2\pi/N_a)mn} \quad (5.6)$$

em que n é um número inteiro entre $[0 \dots N_a-1]$ que representa o índice do vetor discreto do sinal $x(n)$ no domínio do tempo; m é um número inteiro, entre $[0 \dots N_a-1]$, relativo ao índice do vetor discreto do sinal $X(m)$ no domínio da frequência e N_a é a quantidade total de amostras.

A FFT consiste num conjunto de passos ordenados que utilizando as propriedades da DFT permite reduzir o número de somas e multiplicações aritméticas, desenvolvendo-se assim, um algoritmo com menos complexidade, podendo ser calculado de forma mais rápida e eficiente, diminuindo o poder computacional necessário para o seu processamento.

Um dos requisitos da FFT é que a quantidade de amostras, N_a , da janela de dados seja uma potência de 2, conforme se segue:

$$N_a = 2^v \quad (5.7)$$

em que v é um número inteiro positivo.

Em situações em que a quantidade de amostras da janela de dados não respeita a Equação 5.7, complementa-se a janela com elementos de valor nulo até à potência de 2 subsequente mais próxima. Por exemplo, considerando um sinal x com 1000 amostras na janela, a potência de 2 subsequente mais próxima é de $v = 10$, sendo $N_a = 1024$. Os 24 elementos entre $x_{(1001)}$ e $x_{(1024)}$ são preenchidos com zeros. Esse procedimento é conhecido como *zero-padding* [3].

Em conformidade com o Teorema de Nyquist, a frequência de amostragem (f_a) de um sinal deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima do sinal (f_s), conforme a seguinte expressão:

$$f_a = 2 \cdot f_s \quad (5.8)$$

A resolução em frequência (R) pode ser calculada pela razão entre a frequência de Nyquist e o número total de pontos até esta frequência, ou seja:

$$R = \frac{f_a}{2} \cdot \frac{1}{\frac{N_a}{2}} = \frac{f_a}{N_a} \quad (5.9)$$

O tempo de aquisição de dados (t_{aq}) pode ser expresso em termos de f_a e N_a da seguinte forma:

$$t_{aq} = t_a \cdot N_a = \frac{1}{f_a} \cdot N_a \quad (5.10)$$

Substituindo a Equação 5.10 na 5.9 obtém-se:

$$R = \frac{1}{t_{aq}} \quad (5.11)$$

Na Figura 5.3 está representada a relação entre as amostras de um sinal limitado no tempo $x(t)$ e o seu espectro de frequências $X(\omega)$.

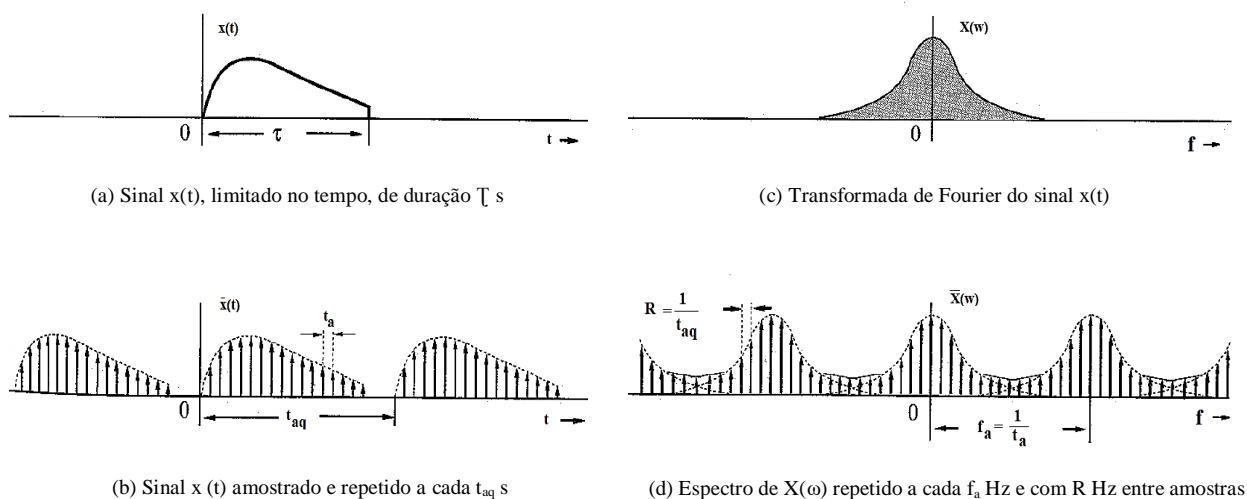


Figura 5.3 - Relação entre as amostras de $x(t)$ e $X(\omega)$, adaptado de [30]

A FFT assume implicitamente que determinado sinal a processar é periódico, o que na realidade nem sempre acontece. Em virtude desse fato serão consideradas descontinuidades que na realidade não existem, o que pode resultar numa aquisição de dados em que a forma de onda obtida possua características diferentes do sinal original. É possível minimizar os efeitos do uso de um número não inteiro de ciclos numa FFT utilizando uma técnica chamada janelamento.

O janelamento reduz a amplitude das discontinuidades nas bordas de cada sequência finita adquirida. Consiste na multiplicação do registo de tempo por uma janela de comprimento finito que varia de maneira uniforme e gradual até chegar a zero nas bordas. Com isso, os pontos extremos da forma de onda encontram-se e a forma de onda será contínua, sem transições abruptas. Algumas das janelas mais comumente utilizadas são: Janela de Hanning, de Hamminh, de Kaiser, Gaussiana, Triangular, Blackman, entre outras.

Na Figura 5.4 encontra-se ilustrado um exemplo da aplicação da janela de Hanning a um sinal adquirido e ao seu espectro de frequência. A equação que rege o seu comportamento é dada pela Equação 5.12, apresentada de seguida:

$$W_{hanning}(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N_a - 1}\right) \right], \quad 0 \leq n \leq N_a - 1 \quad (5.12)$$

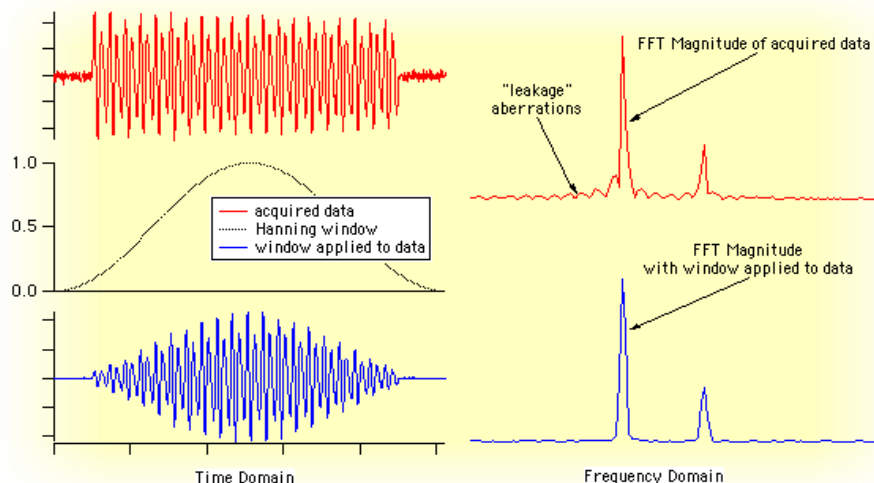


Figura 5.4 - Exemplo da aplicação da janela de Hanning a um sinal adquirido e ao seu espectro, [31]

5.2.2.2 Técnica de Envelope

A técnica de envelope ou de desmodulação de sinais permite a separação do sinal portador (forma de onda que transmite as informações relacionadas à frequência de alimentação) e o sinal modulador (forma de onda que transporta as características referentes à frequência de modulação), sendo bastante aplicada em sistemas de comunicação e na área de deteção e diagnóstico de falhas. O processo de desmodulação suprime a frequência portadora, extraindo do sinal uma nova sequência de tempo modulada, designada envelope ou sinal modulador. O envelope irá conter componentes características relacionadas à falha e, uma vez que a influência do sinal portador foi eliminada, as frequências de falhas tornam-se mais visíveis, ficando mais fácil a identificação do componente de falha.

Esta técnica é sobretudo utilizada na deteção de defeitos localizados em rolamentos, principalmente em estágio inicial. Parte do princípio que os pulsos, resultantes do impacto dos

elementos do rolamento com o defeito, excitam as frequências naturais do rolamento e da estrutura na frequência característica do defeito. São gerados dois sinais, um de alta e um de baixa frequência, sendo o de alta gerado pela ressonância do rolamento e/ou estrutura. Dessa forma, através da desmodulação (isolamento) de uma dessas frequências de ressonância é possível obter um sinal relativo à condição do rolamento. Na análise de altas frequências existem duas dificuldades, a primeira é a sua baixa intensidade comparativamente com as amplitudes das componentes de baixa frequência. A segunda é identificação das frequências características de defeito por conta dos ruídos e da baixa resolução espectral, como as relacionadas com defeitos de energia. Ou seja, as frequências fundamentais de defeito que se pretendem encontrar ficam encobertas por outras de maior energia no sistema, como desbalanceamentos, desalinhamentos ou folgas. A grande vantagem desta técnica é eliminar essas frequências de alta energia permitindo detetar com precisão e antecedência apenas os defeitos em rolamentos. Além disso permite também detetar as taxas de repetição dos impactos que geram as ondas de tensão causadoras de vibração (frequências modulantes), permite identificar a origem da falha e qual o componente defeituoso no rolamento [2].

A técnica do envelope é composta por um conjunto de procedimentos aplicados ao sinal, enumerados em seguida [2]:

1. Aplicação da FFT ao sinal, com o objetivo de identificar faixas de frequência onde houve elevação em relação aos picos de frequência adquiridos anteriormente;
2. Aplicação do filtro “passa banda”, com o intuito de eliminar baixas frequências de alta amplitude, relacionadas geralmente com desalinhamentos e desbalanceamentos;
3. Aplicação da transformada de Hilbert, com o propósito de obter o envelope do sinal do defeito;
4. Aplicação da FFT ao envelope, no intuito de obter as frequências dos defeitos.

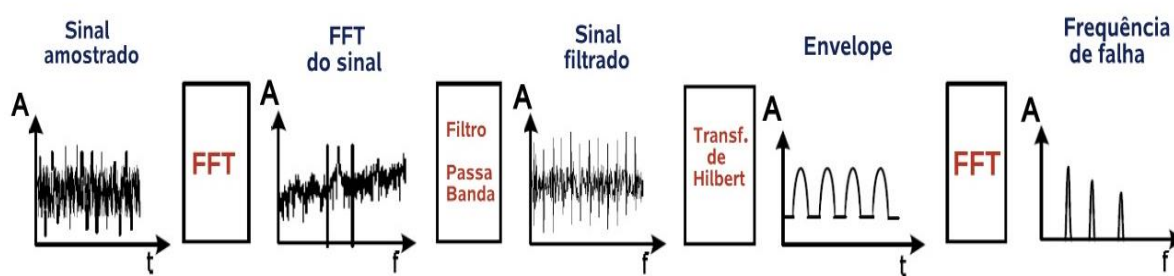


Figura 5.5 - Procedimento adotado na metodologia de desmodulação de sinal, adaptado de [2]

5.2.3 Análise no Domínio Tempo-Frequência

A análise em tempo-frequência consiste em estudar um sinal tanto em tempo como em frequência simultaneamente, usando várias representações. Este tipo de análise é útil pois métodos como a Análise de Fourier assumem que os sinais são infinitos no tempo ou periódicos, enquanto que na realidade muitos sinais são de curta duração e alteram-se durante a sua existência. Uma distribuição em tempo-frequência de um sinal fornece informação sobre como

o conteúdo espectral do sinal evolui ao longo do tempo, sendo assim uma ferramenta ideal para analisar sinais não estacionários. De entre as técnicas mais conhecidas destaca-se a Transformada de Wavelet (TW).

5.2.3.1 Transformada de Wavelet

A TW é uma importante e clássica ferramenta de processamento de sinais, muito utilizada devido à sua característica de conseguir localizar informações específicas num determinado sinal. É um método alternativo à Transformada de Fourier de Curta Duração (*Short Time Fourier Transform - STFT*), pois utiliza uma janela de tamanho variável, localizada no domínio do tempo e frequência, podendo visualizar e analisar-se o sinal em ambos os domínios.

A Transformada de Wavelet pode ser entendida como o produto interno de um sinal e versões escalonadas e deslocadas de uma função matemática designada “Wavelet-mãe” ou wavelet analisadora. É efetuada em várias etapas. Janelas de dimensões variáveis deslocam-se ao longo do sinal e, em cada posição, o espectro é determinado. Este processo pode ser repetido inúmeras vezes, obtendo-se no final, um conjunto de espectros no tempo e frequência, todos com diferentes resoluções (larguras ou escalas). Essas funções possuem parâmetros que permitem que as mesmas possam ser contraídas, expandidas e deslocadas no tempo. Isso possibilita que janelas com maior largura e menor altura sejam melhor aplicadas para o diagnóstico do sinal em baixa frequência (variações lentas), e que, em alta frequência (variações rápidas do sinal), janelas de menor largura e maior altura possam ser utilizadas [4]. A Figura 5.6 ilustra o processo de janelamento do sinal efetuado pela WT.

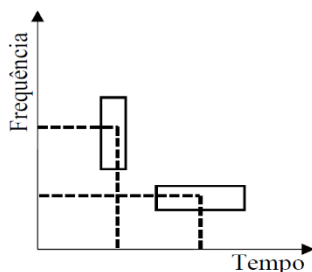


Figura 5.6 - Processo de janelamento do sinal, efetuado pela TW, [4]

A TW para o processo de decomposição do sinal utiliza uma função Wavelet-mãe, que consiste numa forma de onda de duração limitada, com valor médio nulo, de forma irregular, sendo definida matematicamente por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left[\frac{(t - b)}{a} \right] \quad (5.13)$$

onde os coeficientes a e b , referem-se respetivamente, ao parâmetro de escala (ou compressão) e ao parâmetro de deslocamento (translação no tempo). O fator $1/\sqrt{a}$ é utilizado para garantir a conservação de energia.

Para que uma determinada função seja denominada Wavelet-mãe, $\psi(t)$, deve satisfazer os seguintes critérios:

1. ser integrável;
2. não possuir frequências negativas, caso a Wavelet seja complexa;
3. apresentar nível de energia unitário:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (5.14)$$

4. Cumprir a condição de admissibilidade:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (5.15)$$

Existem diversas famílias de Wavelets, tais como: Daubechies, Symlet, Morlet, entre outras. A Figura 5.7 ilustra a função Wavelet do tipo Morlet, retirada da *toolbox* do *software* Matlab. Uma vez que cada “Wavelet-mãe” possui diferentes características, deve-se ter atenção na escolha dessa função de forma a que o processo de análise do sinal seja efetuado de maneira adequada e eficiente pela função analisadora escolhida. A TW pode ser implementada tanto na forma contínua, denominada Transformada Contínua de Wavelet (*Continuous Wavelet Transform - CWT*), como na sua forma discreta, representada pela Transformada Discreta de Wavelet (*Discrete Wavelet Transform - DWT*).

Por apresentar problemas intrínsecos, a CWT é de difícil implementação, tornando-se assim a DWT mais aplicável, sendo definida matematicamente de acordo como a Equação 5.16:

$$DWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (5.16)$$

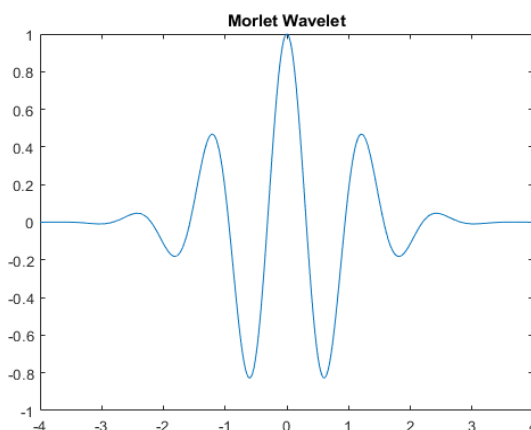


Figura 5.7 - Exemplo de função Wavelet da família Morlet, [4]

Com o intuito de facilitar os cálculos computacionais, é comumente adotado, o escalonamento binário e a translação unitária. Ou seja, atribui-se $a_0=2$ e $b_0=1$. Para tais valores, a DWT torna-se:

$$DWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \psi\left(\frac{k - n2^m}{2^m}\right) dt \tag{5.17}$$

A DWT pode ser compreendida como a aplicação de um banco de filtros que irá dividir o espectro do sinal em duas partes relacionadas: componentes de baixas e altas frequências, respectivamente denominados, coeficientes de aproximação (cn) e detalhe (dn). Esse processo de separação é obtido pela convolução entre um sinal discretizado $f[n]$ e um par de filtros passa-alta ($g[n]$) e passa-baixa ($h[n]$). Tais filtros estão correlacionados, respectivamente, com as funções Wavelet-mãe (ψ) e a escala (Φ), conforme expresso nas Equações 5.18 e 5.19:

$$c_j[f(n)] = f[n] * \Phi(n) \tag{5.18}$$

$$d_j[f(n)] = f[n] * \psi(n) \tag{5.19}$$

onde j e n referem-se respectivamente ao índice de somatório (depende do comprimento do filtro) e ao índice do sinal. A Figura 5.8 ilustra de forma resumida o processo de decomposição efetuado pela DWT.

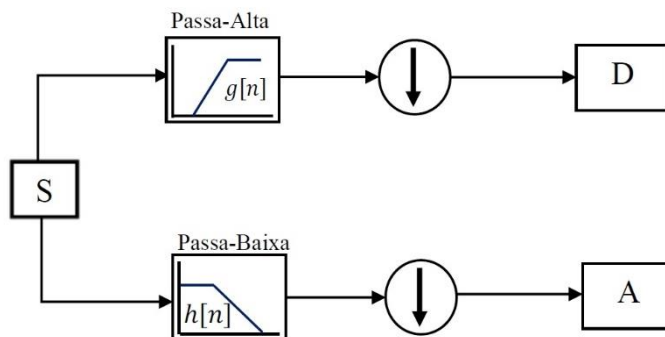


Figura 5.8 - Processo de decomposição do sinal, efetuado pela DWT, [4]

Inicialmente, o sinal em análise é filtrado por um filtro passa-alto e por um filtro passa-baixo. O filtro passa-baixo é responsável por remover o conteúdo de alta frequência do sinal, enquanto que o filtro passa-alto elimina componentes de baixa frequência. Assim, os sinais contendo a informação de baixa frequência serão de subamostragem (em geral, por um fator de 2) obtendo-se uma nova sequência de tempo denominada Aproximação do Sinal (A). Por outro lado, a sequência de tempo, associada aos componentes de alta frequência, será também de subamostragem e constituirá um novo sinal denominado Detalhe (D). Os coeficientes de detalhe e aproximação obtidos durante o processo de decomposição, podem ser utilizados novamente para se obter o sinal original. Esse

processo é conhecido como reconstrução e consiste no processo inverso ao efetuado na decomposição.

Na Figura 5.9 é exibida a decomposição em três níveis de um sinal amostrado a uma frequência de 5 kHz. De notar que a decomposição é efetuada sempre pelo coeficiente de aproximação, que se divide novamente em aproximação e detalhe.

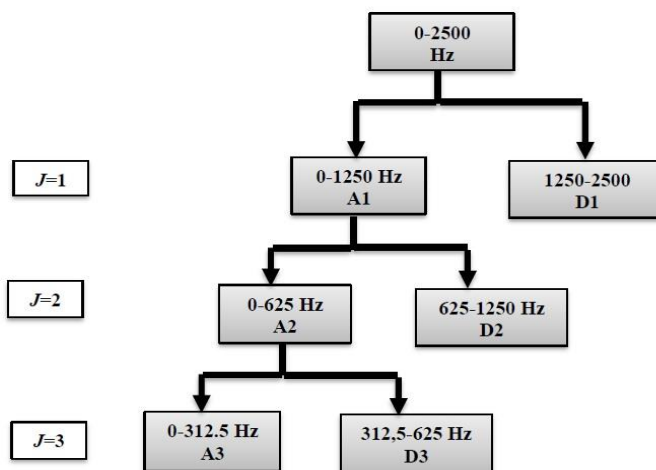


Figura 5.9 - Decomposição em três níveis de um sinal amostrado a 5 kHz [4]

Existe uma relação entre a energia do sinal obtido pela Transformada de Wavelet e a energia do sinal original, denominada Energia da Wavelet (*Wavelet Energy* - WE). Este conceito determina a energia total de um sinal através da soma dos quadrados dos coeficientes Wavelets. A energia em cada banda de frequência (E_c) para o nível de decomposição (j) é dada pela seguinte equação [4]:

$$E_c = |b_{j,c}(t)|^2 \tag{5.20}$$

$b_{j,c}(t)$ corresponde à amplitude do coeficiente da DWT para cada ponto discreto na sua respetiva banda de frequência e $c = 1, 2, \dots, 2^j$, corresponde à banda de frequência. A energia total do sinal é dada por:

$$E = \left(\sum_{c=1}^{2^j} E_c \right) \tag{5.21}$$

Através da normalização dos valores de energia obtém-se a Energia da Wavelet, correspondente ao nível de energia em cada pacote Wavelet, sendo definida por:

$$H = \left[\frac{E_1}{E}, \frac{E_2}{E}, \dots, \frac{E_{2j}}{E} \right] \quad (5.22)$$

Desta forma, recorrendo à equação anterior pode obter-se a energia normalizada em cada banda de frequência. Assim, e sabendo que a assinatura de determinada falha está contida numa certa banda de frequência, acompanhando a variação do nível de energia pode detetar-se a presença de falha, o que torna a WE um bom parâmetro quantitativo para este tipo de identificação.

5.3 Métodos convencionais de identificação de falhas

A etapa final do processo de monitorização é examinar os padrões e as características de falha, extraídas através da articulação de várias das técnicas apresentadas no subcapítulo 5.2. Após a verificação é necessário decidir se existe uma falha e, em caso afirmativo, qual a falha em questão. Usualmente essa decisão é feita com base no conhecimento e experiência de um técnico especialista na área. No entanto, tem havido um considerável avanço no desenvolvimento de meios para automatizar este processo, utilizando diferentes métodos de identificação. Neste subcapítulo serão abordados os métodos convencionais de identificação de falhas, quais os mais comumente usados, em que se baseiam e quais as suas características.

5.3.1 Análise espectral das correntes do estator

A tradicional técnica de deteção de falhas MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) baseia-se na decomposição espectral da corrente do estator, recorrendo à FFT, com o objetivo de descobrir componentes específicas que indiquem falhas em estado inicial ou uma possível degradação da condição da máquina. É uma técnica não invasiva e utiliza o motor como transdutor para detetar a presença e severidade de falhas elétricas e mecânicas. Com apenas a aquisição dos valores de corrente de qualquer uma das fases do estator é possível obter informações suficientes para efetuar o diagnóstico [2].

As correntes do estator das máquinas de indução contêm harmónicas originadas devido à disposição dos enrolamentos nas ranhuras do estator não ser perfeitamente sinusoidal, a imperfeições ocorridas no processo de fabrico da máquina ou até devido à rede elétrica de alimentação que pode conter componentes harmónicas. No caso de um motor sofrer de uma falha no estator, a configuração do campo eletromagnético girante é influenciada e como consequência as componentes harmónicas da corrente do estator têm as suas amplitudes afetadas. Assim, observando o espectro de frequência das correntes do estator, é possível detetar um curto-circuito uma vez que ocorre uma discrepância entre esse mesmo espectro obtido em tempo real e o espectro obtido quando a máquina está em condições normais de funcionamento [20].

Quando ocorrem falhas no rotor, como quebra de barras ou de um dos anéis de curto-circuito, o rotor apresenta-se como circuito trifásico desequilibrado, circulando nele correntes de

sequência negativa, que originam um campo magnético que gira no sentido oposto ao sentido da rotação do rotor, no funcionamento como motor. Este fenómeno origina um binário em sentido contrário, provocando oscilações na velocidade do rotor. Estas oscilações afetam as correntes do estator sobre as quais se induzem harmónicas em duas bandas laterais à frequência de rede. Estas bandas laterais, associadas às frequências da Equação 5.23 permitem diagnosticar e identificar a presença de falhas no rotor, sendo esta uma técnica muito eficaz na deteção de barras quebradas no rotor.

$$f_{BQ} = f_{rede}(1 - 2s) \quad (5.23)$$

onde s é o deslizamento associado ao regime de funcionamento do motor, f_{BQ} simboliza a frequência expectável da componente característica de barras quebradas e f_{rede} a frequência da rede de alimentação.

Sabendo a frequência das bandas laterais, quando menor for a diferença em dB da amplitude da banda lateral e a amplitude da componente fundamental, em pior estado estará a gaiola do rotor. A Tabela 5.2 apresenta os limites de severidade em função da diferença entre as amplitudes previamente referidas.

Na Figura 5.10 são apresentados três espectros de frequências da corrente elétrica consumida numa das fases de um motor de indução trifásico, onde é visível o aumento da componente à frequência f_{BQ} , à medida que o número de barras danificadas aumenta.

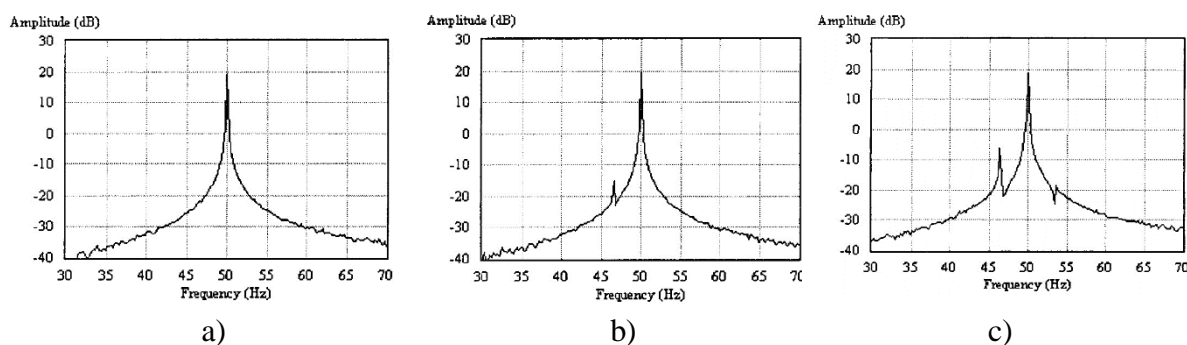


Figura 5.10 - Evolução da amplitude da componente de frequência característica de BQ, $f_{rede}*(1-2s)$, no espectro de frequências de um motor de indução ($s = 3.33\%$): a) Rotor saudável b) Rotor com 1 BQ c) Rotor com 4 BQ contíguas, [32]

Condição	Diferença entre amplitudes [dB]	Condição da gaiola do rotor	Ação a executar
1	> 60	Excelente	Nenhuma
2	54-60	Boa	Nenhuma
3	48-54	Moderada	Analisar tendência
4	42-48	Barra rachada em desenvolvimento ou juntas com alta resistência	Diminuir o intervalo de testes e analisar tendência
5	36-42	Duas barras possivelmente rachadas ou juntas com elevada resistência	Confirmar com a análise de circuito do motor
6	30-36	Múltiplas barras ou anéis de curto circuito rachadas ou quebradas	Rebobinar
7	<30	Danos severos na gaiola do rotor	Rebobinar ou Substituir

Tabela 5.2 - Limites de severidade de barras rotóricas, adaptado de [3]

A tarefa de distinguir condições de falha de condições normais de funcionamento baseada no espectro resultante da FFT pode ser executada de forma precisa desde que os sinais adquiridos sejam estacionários, que os motores de indução estejam em funcionamento com valores de carga perto do valor nominal e que as tensões de alimentação sejam sinusoidais. Contudo, a corrente do estator é um sinal não estacionário, cujas propriedades variam com as operações de funcionamento, como flutuações no binário de carga e na tensão de alimentação. Variações nestes dois parâmetros influenciarão o valor das bandas laterais, em Hertz. Uma vez que apenas a corrente é analisada neste método, os sistemas com este método implementado terão de prever de forma precisa o valor das bandas laterais para várias condições de operação de um motor.

5.3.2 Análise espectral das vibrações

A existência de vibrações representa a resposta às diversas forças que atuam na máquina e que por sua vez impõem vibrações em várias frequências que se propagam por toda a máquina. Estas frequências podem ser identificadas e, na maioria das vezes, relacionadas com cada tipo de falha. A análise espectral de vibrações mecânicas nas máquinas elétricas teve como objetivo inicial a detecção e o diagnóstico de falhas mecânicas, tais como, desgastes nos rolamentos,

excentricidade, desalinhamentos, etc, através da análise de componentes de frequência, ou até mesmo, grupos de frequências.

O processo da análise começa com a aquisição do sinal de vibração por intermédio de um acelerómetro colocado em pontos específicos da máquina, por exemplo, nas chumaceiras. Este sinal, no domínio do tempo, será transformado para o domínio da frequência, por exemplo através da função FFT, criando o espectro de vibração da máquina, que pode ser comparado com um espectro de vibração padrão da máquina sem falhas, resultando numa decisão da presença ou não de falhas mecânicas. Nestes casos, o sinal de vibração, expresso em função de amplitude de aceleração obtido ao longo do tempo, denominado *waveform* ou gráfico em forma de onda, pode ser integrado com recurso a *software* de modo a se obterem os valores em função da velocidade ou deslocamento [2].

O nível de vibrações de cada máquina está bastante dependente da geometria da sua carcaça, processo de fixação da máquina, tipo de acoplamento à carga mecânica, entre outros aspetos, o que torna este método de diagnóstico pouco fiável quando usado no diagnóstico de falhas nos enrolamentos de estator em ambiente industrial [20]. O processo de deteção é caracterizado pela colocação de acelerómetros piezoelétricos que medem a aceleração de altas frequências de vibração impostas pela falha.

5.3.3 Análise espectral do fluxo axial

O método baseado na análise espectral do fluxo magnético axial consiste na análise do fluxo axial da máquina, o que torna necessário realizar a respetiva medida do fluxo. Conforme a localização do sensor usado para a medida do fluxo, no interior da máquina ou na sua parte exterior, este método pode ser considerado como invasivo ou não invasivo. Em qualquer máquina de indução, mesmo em condições normais de funcionamento sem falha, existem pequenos desequilíbrios nas correntes de fase, que são devidos a imperfeições de construção dos enrolamentos e a desequilíbrios na rede de energia elétrica. O desequilíbrio nas correntes de fase resulta na presença de correntes de sequência negativa na máquina e também no desequilíbrio no fluxo das bobinas, que resultam assim num fluxo na direção axial da máquina. A colocação de uma bobina na extremidade da máquina de uma forma concêntrica com o seu eixo permite medir este fluxo axial e através da análise do seu espectro de frequência, é possível detetar curto-circuitos nos enrolamentos do estator, excentricidades e quebra de barras do rotor. Nas máquinas de elevada tensão e potência, onde é muita complexa a análise das correntes do estator, a utilização de uma bobina de fluxo axial apresenta-se como uma boa alternativa na deteção de falhas, mesmo em máquinas alimentadas por variadores de frequência [20].

5.3.4 Extended Park's Vector Approach (EPVA)

A técnica baseada no vetor de Park recorre a informação simultânea de todas as correntes do estator e baseia-se na representação bidimensional normalmente utilizada para representar a máquina de indução trifásica (a denominada transformação de Park que permite transformar as variáveis de um sistema de eixos trifásico da máquina num sistema de dois eixos em quadratura, dq) [20]. As componentes do Vetor de Park das correntes, i_D e i_Q , são obtidas através das seguintes expressões [33]:

$$i_D = \sqrt{\frac{2}{3}} i_A - \sqrt{\frac{1}{6}} i_B - \sqrt{\frac{1}{6}} i_C \quad (5.24)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{1}{2}} i_B - \sqrt{\frac{1}{2}} i_C \quad (5.25)$$

Em condições normais de funcionamento, sem falhas e alimentada por um sistema trifásico equilibrado de correntes sinusoidais, as componentes do vetor de Park formam um círculo centrado na origem do plano dq com um raio constante dependente da carga. No caso de um curto-circuito num enrolamento do estator da máquina, esta comporta-se como uma carga desequilibrada e as correntes do estator deixam de ser um sistema equilibrado. Estes desequilíbrios causam variações no vetor Park originando formas elípticas quando representadas no plano dq. No caso de falhas nas barras do rotor da máquina a figura geométrica obtida no plano dq mantém-se um círculo, no entanto, devido à componente de baixa frequência apresenta um traço mais grosso gerando uma figura tipo donut [20].

Observando a figura obtida é possível notar a existência de defeitos no motor, no entanto, para se obter um sistema de deteção de falhas automático baseado neste modelo, recorre-se ao método EPVA. Este método faz a análise do espectro de frequências da componente AC do módulo do vetor de Park (PVM – *Park's Vector Modulus*), calculado através da expressão 5.26, e é utilizado para monitorizar a amplitude da componente de frequência $2 \cdot f_{rede}$ de modo a acompanhar a condição dos enrolamentos do estator.

$$PVM = \sqrt{i_D^2 + i_Q^2} \quad (5.26)$$

Na Figura 5.11, fruto de resultados experimentais dos autores de [33], é possível observar o aumento da amplitude da componente em questão à medida que o número de curto-circuitos entre espiras aumenta.

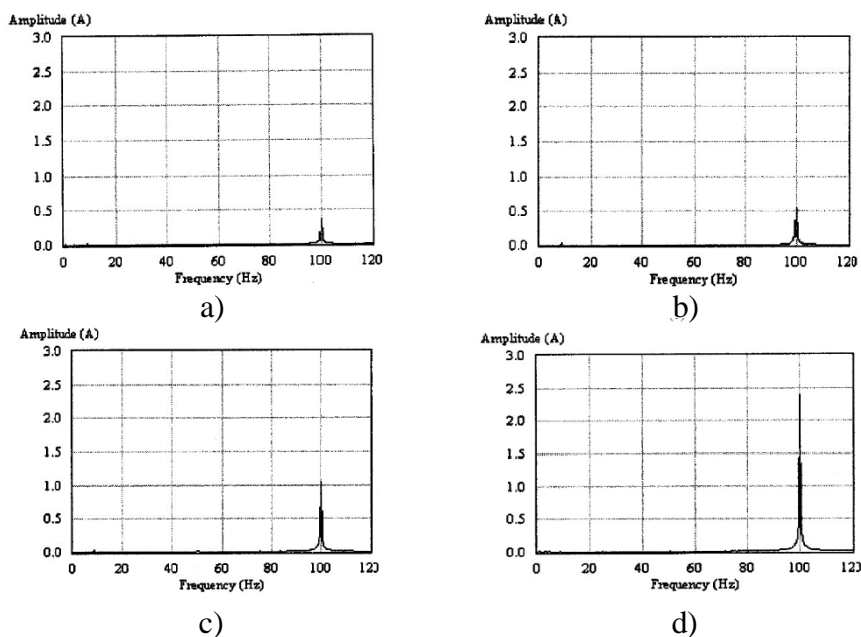


Figura 5.11 - Componente $2s \cdot f_{rede}$ do espectro EPVA de um motor com $s = 3.33\%$ para: a) Estator saudável b) 3 espiras em CC c) 5 espiras em CC d) 36 espiras em cc, [33]

De forma a se acompanhar a condição das barras rotóricas da gaiola do rotor de um motor de indução trifásico, os autores em [32] propuseram a monitorização da amplitude da componente $2s \cdot f_{rede}$. Desta forma, comparando o valor da amplitude desta componente quando o motor em teste se encontra saudável e comparando-o com os valores obtidos é possível concluir que se está ou não perante uma falha relacionada com barras quebradas. Na Figura 5.12 é possível observar esse acontecimento, em que à medida que se aumentam o número de barras danificadas, a amplitude da componente $2s \cdot f_{rede}$ vai aumentando.

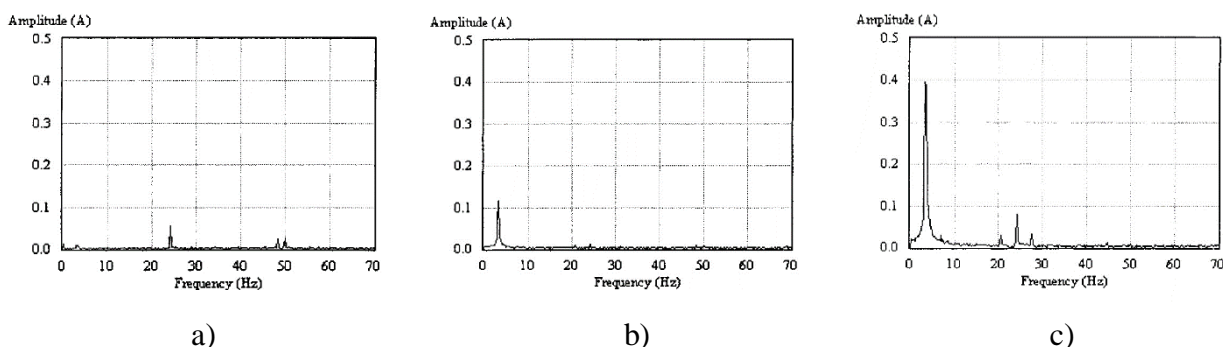


Figura 5.12 - Componente $2s \cdot f_{rede}$ do espectro EPVA de um motor com $s = 3.33\%$ para: a) Rotor saudável b) Rotor com 1 BQ c) Rotor com 4 BQ contíguas, [32]

5.3.5 Método das componentes simétricas

Qualquer sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas. Dois dos sistemas são trifásicos equilibrados, de sequência diferente, mas com um conjunto de fasores de amplitude igual. O último sistema é chamado de sequência de zero ou homopolar e é constituído por três fasores de igual amplitude e módulo. A partir dos valores complexos das tensões e das correntes de cada um dos sistemas separadamente podem-se definir as impedâncias de sequência direta, inversa e zero. No caso de máquinas de indução, tendo em conta que normalmente são ligados em triângulo ou estrela com o ponto neutro não acessível, a componente de sequência zero é nula e, portanto, pode desprezar-se. Desta forma, a máquina pode ser definida apenas pelas impedâncias direta e inversa (esta simplificação apenas é válida para máquinas perfeitamente simétricas). A impedância de sequência direta é muito dependente do estado de carga da máquina, enquanto que a de sequência inversa é praticamente independente da carga. Esta última, no entanto, é muito sensível a desequilíbrios provocados por curto-circuitos nos enrolamentos do estator, o que torna este método adequado para o diagnóstico deste tipo de falha. Na sua implementação é necessário realizar a medida das tensões e das correntes de fase da máquina e, além disso, a rede de energia deve manter o equilíbrio para medir com precisão a impedância de sequência inversa. A partir das impedâncias direta e inversa é possível estabelecer algoritmos de deteção de falha muito precisos e fiáveis [20].

6 Sistema experimental desenvolvido

O sistema de identificação e acompanhamento da condição desenvolvido encontra-se dividido em duas partes distintas: a parte de identificação de componentes em máquinas industriais e a parte de monitorização e acompanhamento da condição em MIT. Serão ambas discriminadas nas próximas subsecções.

Parte I – Identificação de Componentes:

- o objetivo consiste na identificação exclusiva de peças originais em máquinas industriais, sejam elas um motor elétrico, um cilindro hidráulico, um autómato, etc. O sistema deve ser capaz de detetar que qualquer uma das peças originais da máquina em causa já não se encontra no seu raio de alcance, devido a ter sido removida ou substituída por outra não original, emitindo um alerta. Esta função pretendida torna-se útil no caso da peça em utilização numa determinada máquina ou processo ser de elevada qualidade e fiabilidade e ser substituída por outra de menor qualidade, estando assim o processo de produção sujeito a uma maior probabilidade de paragem devido a uma possível falha da peça de substituição instalada;
- características que o sistema de identificação deverá possuir:
 - Ser capaz de monitorizar mais do que um componente simultaneamente;
 - Executar a verificação de forma rápida e precisa;
 - Transmitir ao utilizador o estado dos vários componentes em “vigilância”;
- para o sistema de identificação recorreu-se à tecnologia RFID (*Radio-Frequency Identification*). Trata-se de um método de identificação automático, efetuado através de sinais de rádio, que obtém e guarda dados remotamente, utilizando dispositivos designados *tags* RFID. As *tags* são lidas por leitores RFID, responsáveis por irradiar as *tags* no seu raio de ação e efetuar tarefas de leitura ou de escrita.

Parte II – Monitorização e Acompanhamento da Condição

- o objetivo é adquirir dados relativos ao funcionamento de um motor, nomeadamente a corrente elétrica consumida por fase e, através das técnicas mencionadas no Capítulo 5 obter informações sobre o estado de “saúde” em que se encontra o motor. Ou seja, pretende-se não só a monitorização em tempo real dos dados relativos do funcionamento de um dado motor como também a utilização desses dados como entrada para algoritmos de processamento de sinais e de diagnóstico de falhas, com vista a alertar os técnicos de manutenção de que existe um alarme ou indício de falha que deve ser examinado de forma mais minuciosa, recorrendo a equipamentos de medição mais sensíveis e a profissionais experientes na área;
- escolha do sistema de aquisição de dados;
- desenvolvimento de *firmware* de aquisição, de pré-processamento e de diagnóstico.

6.1 Parte I - Sistema de Identificação de Componentes

Nas subsecções seguintes são apresentadas três soluções técnicas para o sistema de identificação de componentes. Diferenciam-se nos equipamentos escolhidos, nomeadamente no leitor RFID selecionado e na necessidade ou não de poder de processamento externo.

6.1.1 Solução técnica 1

Na Figura 6.1 apresenta-se o esquema de ligações da solução 1 para o sistema de identificação.



Figura 6.1 - Esquema de ligações da solução técnica 1 para o sistema de identificação de componentes

A solução apresentada na Figura 6.1 foi a solução técnica adotada para o sistema de identificação pretendido devido a possuir uma boa relação custo-benefício e por se tratar de uma solução de fácil e rápida implementação.

Em cada componente a monitorizar pelo sistema deverá ser embutida, afixada, ou até mesmo embebida, uma *tag* RFID com um código único identificador, associado ao componente a que está ligada. A antena RFID, de polarização circular, deve estar montada no centro da máquina, de modo a irradiar todas as *tags* no seu raio de ação. Estas, uma vez radiadas são energizadas, o que lhes permite enviar o seu código identificador associado ao componente a identificar. Os códigos obtidos são comparados com aqueles presentes no *firmware* e caso algum deles não tenha sido recebido, é emitido um alarme no display, alertando para a ausência de determinada peça. Devem ser executadas várias leituras diariamente, e após cada leitura o sistema deve entrar em modo *sleep*, diminuindo o consumo de energia e não emitindo ondas eletromagnéticas. De seguida são apresentados os diversos equipamentos que constituem a primeira solução descrita.

Leitor RFID

O leitor RFID escolhido foi o modelo Sargas da marca ThingMagic, representado na Figura 6.2. Trata-se de um leitor fixo de alto desempenho, multiprotocolo, de reduzidas dimensões, com possibilidade de ligação a duas antenas RFID externas, possui ainda um processador

onboard que corre o sistema operativo Linux. Na Tabela 6.1 encontram-se evidenciadas as suas características mais importantes.



Figura 6.2 - Leitor RFID escolhido para a solução técnica 1, ThingMagic Sargas [34]

Características	
Portas de Antena	2 portas, c/ conectores RP-SMA
Potência RF de saída	0dBm a 30 dBm
Interfaces de dados e controlo	Conectores: RJ45, USB Tipo-B (consola, pens), USB Tipo-A (porta de acessórios), bloco terminal de 8 pinos (interface GPIO), interface cartão micro SD, porta de video micro HDMI, DC input GPIO: 2 entradas opto-isoladas, 2 saídas opto-isoladas, +5V fonte, terra referência
Potência DC externa	5 VDC +/- 0,25 V, Potência máxima DC: 15W
Temperatura de operação	-40 °C a +60 °C
Processador	1 GHz TI ARM Cortex A8 (AM335X)
Memória DDRAM	512 MB
Memória Flash	4 GB

Tabela 6.1 - Características principais do leitor RFID, ThingMagic Sargas

Tags RFID

As *tags* RFID selecionadas para o sistema são da marca Xerafy, modelo Dot-In XS, representadas na Figura 6.3. Tratam-se de *tags* de dimensões reduzidas, com um diâmetro de 6 mm, possibilitando assim a sua aplicação numa maior variedade de peças e uma melhor afixação, para além de permitir de forma mais fácil que a sua afixação seja executada em sítios menos acessíveis, estando desta forma “camuflada” na peça que está a identificar. Este tipo de *tags* são usualmente embebidas em metal, utilizando resina epóxi. Na Tabela 6.2 encontram-se evidenciadas as suas características mais importantes.



Figura 6.3 - Tags RFID, Xerafy Dot In XS [35]

Características	
Protocolo de <i>interface</i>	EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO 18000-6C)
Frequência de operação	FCC (902-928 MHz), ETSI (866-868 MHz)
Memória	EPC 96 bits, User 512 bits, TID 64 bits
Distância máx. de leitura em metal	1,5 m
Método de afixação	Epoxy, incorporável
Temperatura de operação	-40 °C a + 85 °C
Dimensões [diâmetro x espessura]	Ø 6 x 2.5 mm
Índice de proteção	IP68

Tabela 6.2 - Características principais das tags RFID, Xerafy Dot In XS

Antenas RFID

As antenas RFID escolhidas, responsáveis por irradiar as *tags* dentro do seu raio de abrangência e obter informação por elas emitida, são da fabricante Mobilemark, modelo PN6-868LCP, Figura 6.4. Trata-se de uma antena de polarização circular, com 6dBi de ganho, que trabalha na gama UHF RFID. Na Tabela 6.3 encontram-se evidenciadas as suas características mais importantes.



Figura 6.4 - Antena RFID, da marca Mobilemark modelo PN6-868LCP [36]

Características	
Ganho	5.5 dBi máximo
Método de montagem	Em poste ou na parede
Potência máxima	10 Watts
Impedância	50 Ohm nominal
Temperatura de operação	-40 °C a + 85 °C
Dimensões [diâmetro x espessura]	146 mm x 146 mm x 18 mm (HxWxD)
Peso	0.5 kg
Índice de proteção	IP65

Tabela 6.3 - Características técnicas da antena RFID Mobilemark, PN6-868LCP

Firmware

A interação do utilizador com o leitor pode ser feita através do *software* fornecido pelo fabricante, *Universal Reader Assistant* (URA), que permite executar de forma rápida um *scan* das *tags* dentro do raio de abrangência das antenas e identificar os vários componentes marcados. No entanto, de modo a se conseguir programar o leitor a executar determinadas funções mais complexas e a correr de forma autónoma é necessário recorrer ao Mercury API e criar código em linguagem de programação C. Trata-se de um API que contém todas as funções relacionadas com os vários leitores do fabricante, permitindo escrever código reconhecido pelos leitores, para os mais diversos fins, e tornar a leitura das *tags* e o envio de informação um processo autónomo e fiável.

Single Board Computer

De forma a integrar o sistema de identificação e o sistema de acompanhamento da condição na mesma plataforma, optou-se por utilizar um *single board computer* para correr o código responsável por comandar quer o leitor RFID quer o sistema da parte II. Foi selecionada uma placa de desenvolvimento que satisfaz os requisitos necessários: possuir porta Ethernet, múltiplos pinos GPIO, possibilidade de ligação a um display externo e a periféricos, e correr m sistema operativo *open source*. Recorreu-se para isso a uma Raspberry Pi Mikkernel 3B (Figura 6.5) que corre o sistema operativo Raspbian Stretch.



Figura 6.5 - Raspberry Pi Model 3B [37]

6.1.2 Solução técnica 2

A segunda solução técnica proposta conta com o mesmo equipamento que a solução 1 diferenciando-se no leitor selecionado. Elegeu-se o leitor portátil ThingMagic USB Pro (Figura 6.6) como segunda solução possível, devido a tratar-se de um equipamento de menor custo que o anterior e ainda satisfazer as necessidades pretendidas. Possui antena interna, possibilidade de ligação a uma antena externa e uma boa robustez.



Figura 6.6 - Leitor proposto para a solução técnica 2 - ThingMagic USB Pro [38]

Características	
Ganho da antena interna	+1 dBi
RF Power Output	+30 dBm
Interface de dados	USB
Porta da antena	1 RP-SMA fêmea
Leitura	Até 50 tags/s
Alimentação	4.5 a 5.5 VDC por cabo USB
Índice de proteção	IP65

Tabela 6.4 - Características técnicas do leitor ThingMagic USB Pro

6.1.3 Solução técnica 3

Como terceira solução técnica proposta, selecionou-se uma placa eletrônica com um módulo leitor RFID incorporado e duas entradas para antenas externas. O equipamento em causa é o modelo *Micro LTE Carrier Board* da marca ThingMagic, apresentado na Figura 6.7. Todo o equipamento restante para esta solução é o mesmo da solução técnica 1. Na Tabela 6.5 estão evidenciadas as características mais importantes do dispositivo em questão.



Figura 6.7 – Dispositivo leitor RFID proposto para a solução técnica 3 - ThingMagic *Micro LTE Carrier Board* [39]

Características	
Interface de dados	UART 3.3/5V; USB 2.0
RF power Out	-5 até +30 dBm
Distância máx. de leitura	Até 9 m
Leitura	Até 50 tags/s
Alimentação	3.5 a 5.25 VDC por cabo USB
Índice de proteção	IP65

Tabela 6.5 – Principais características, módulo leitor RFID, ThingMagic *Micro LTE Carrier Board*

6.2 Parte II – Sistema de monitorização e acompanhamento da condição

Ao sistema desenvolvido para a parte II do sistema experimental deu-se o nome de SMAC (Sistema de Monitorização e Acompanhamento da Condição). Esta segunda parte do projeto é responsável por adquirir dados analógicos de um motor de indução trifásico nomeadamente as correntes trifásicas do estator, efetuar cálculos de parâmetros relativos ao seu funcionamento, processar os dados adquiridos e a partir destes diagnosticar a condição do motor. Quer o

diagnóstico da análise efetuada quer os parâmetros calculados devem ser apresentados num display tátil, permitindo assim ao cliente/técnico visualizar o estado atual do motor.

Pretendeu-se desenvolver um sistema que integrasse todas as características apresentadas na listagem seguinte:

- Utilização de equipamentos de baixo custo;
- Utilização de *software open-source*;
- Processo de aquisição e diagnóstico de falhas autónomo;
- Fácil e rápida implementação.

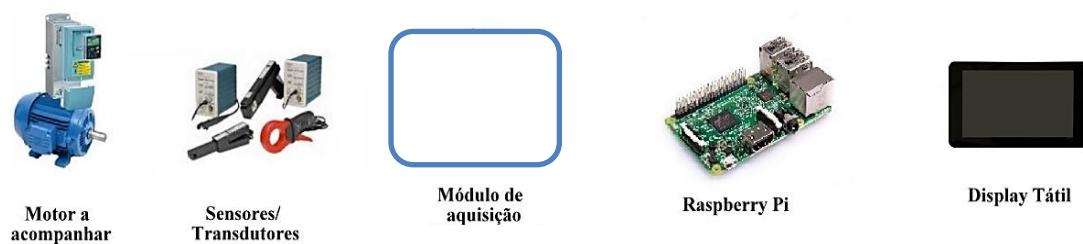


Figura 6.8 – Esquema do sistema de monitorização e acompanhamento da condição desenvolvido

Os valores adquiridos pelos equipamentos de sensorização e de aquisição, são utilizados para o cálculo de vários parâmetros de funcionamento de um motor em análise e utilizados como dados de entrada para as técnicas de processamento de sinais, permitindo assim de um modo mais fácil monitorizar amplitudes de componentes de frequências associadas a falhas. O resultado final de todo o processo culmina no diagnóstico da condição atual do motor. Na Figura 6.9 é apresentado um diagrama que retrata o procedimento adotado para o sistema experimental desenvolvido.

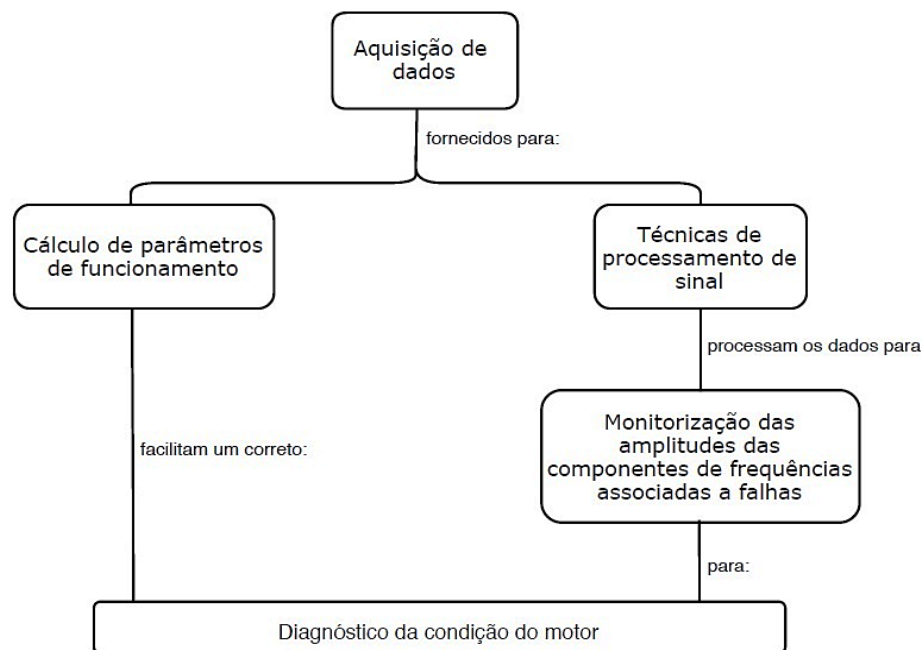


Figura 6.9 - Diagrama geral do processo de diagnóstico de falha

De seguida são apresentadas as subpartes integrantes do SMAC:

1. parte de aquisição dos dados
2. parte de processamento de sinal e diagnóstico de falha.

6.2.1 Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é constituído pelos equipamentos responsáveis por medir e converter as grandezas em análise, pelo *firmware* de aquisição, desenvolvido em linguagem C de programação e pelo *single board computer* que corre o código de aquisição.

Inicialmente é feita uma amostragem de valores discretos das correntes do estator com uma frequência de amostragem de 5 kHz. Pretendeu-se analisar os harmónicos dos sinais da corrente até cerca de 250 Hz, desse modo escolheu-se a frequência de amostragem de 5kHz permitindo obter-se 20 pontos por período. Esses valores são depois guardados num ficheiro no formato “.csv”, utilizados no cálculo de parâmetros de operação e para análise de existência de irregularidades no motor. Em cada aquisição, e para cada grandeza física de cada fase, são recolhidas 16384 amostras de valores instantâneos com 200 μ s entre cada amostra. Cada coluna do ficheiro de dados gerado pelo programa em C é depois lida pelo código da parte de processamento, desenvolvido em linguagem *Python*, e guardada num vetor, sendo facilmente acessível para os vários cálculos posteriores.

Visto que o módulo de aquisição de dados apenas permite adquirir sinais de tensão, foi necessário colocar no secundário de cada transformador de corrente uma resistência de medida (RL) de 200 Ohms.

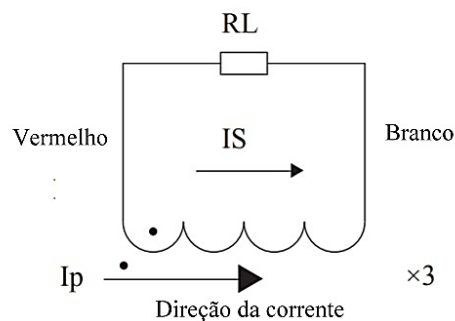


Figura 6.10 - Ligação das resistências de medida, RL

6.2.2 Cálculo de parâmetros de funcionamento

Após os valores da corrente e tensão serem adquiridos e guardados em ficheiro, são utilizados para o cálculo de vários parâmetros associados ao funcionamento do motor, para cada uma das fases: Corrente RMS, Tensão RMS, Potência e Fator de potência. Os parâmetros são calculados cada vez que um novo ficheiro de valores adquiridos é gerado, sendo depois apresentados no display do sistema através da *user interface* desenvolvida para o efeito.

O código de cálculo dos parâmetros foi desenvolvido em Python, tendo sido utilizadas as bibliotecas *open source* Matplotlib, NumPy e SciPy, de modo a ser possível efetuar os cálculos matemáticos necessários de uma forma mais fácil, assim como gerar os gráficos pretendidos.

Devido ao fato de terem ocorrido atrasos na chegada dos sensores de tensão selecionados, os parâmetros Tensão RMS, Potência e Fator de Potência não puderam ser calculados visto não terem sido adquiridos os valores instantâneos das tensões de alimentação durante os ensaios experimentais. No entanto, o *firmware* está preparado para efetuar o seu cálculo, e utiliza as expressões matemáticas apresentadas na Tabela 6.6.

Parâmetro	Expressão utilizada
Corrente RMS (I_{rms}) [A]	$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i_i^2}$
Tensão RMS (U_{rms}) [V]	$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2}$
Potência (P) [W]	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \cdot i_i$
Fator de Potência (FP)	$FP = \frac{P}{U_{rms} \cdot I_{rms}}$

Tabela 6.6 - Parâmetros calculados com base nos valores adquiridos e as suas respectivas fórmulas

6.2.3 Acompanhamento da condição e diagnóstico de falhas

O sistema experimental foi desenvolvido com o objetivo de fornecer um acompanhamento da condição de funcionamento com vista ao diagnóstico de dois dos tipos de falha em motores de indução trifásicos: barras rotóricas quebradas e curto-circuitos nos enrolamentos estatóricos. Foi adotada uma abordagem que, através de valores adquiridos no processo de aquisição de dados pretende obter um correto diagnóstico da falha, utilizando para isso algumas das técnicas apresentadas previamente, quer de processamento de sinal quer de detecção de falhas. A abordagem em questão encontra-se exposta no diagrama da Figura 6.11.

Foram utilizados dois métodos distintos para a detecção dos dois tipos de falha em análise: o método MCSA e o método EPVA. O primeiro foi utilizado para a análise do estado das barras rotóricas e o segundo para indicar a existência ou não de curto-circuitos nos enrolamentos do estator. Através da técnica EPVA pretendeu-se também analisar o estado da gaiola do rotor, podendo depois o resultado deste método ser comparado com o resultado obtido pelo método MCSA e assim saber qual o método mais fiável entre os dois na detecção desse tipo de falhas.

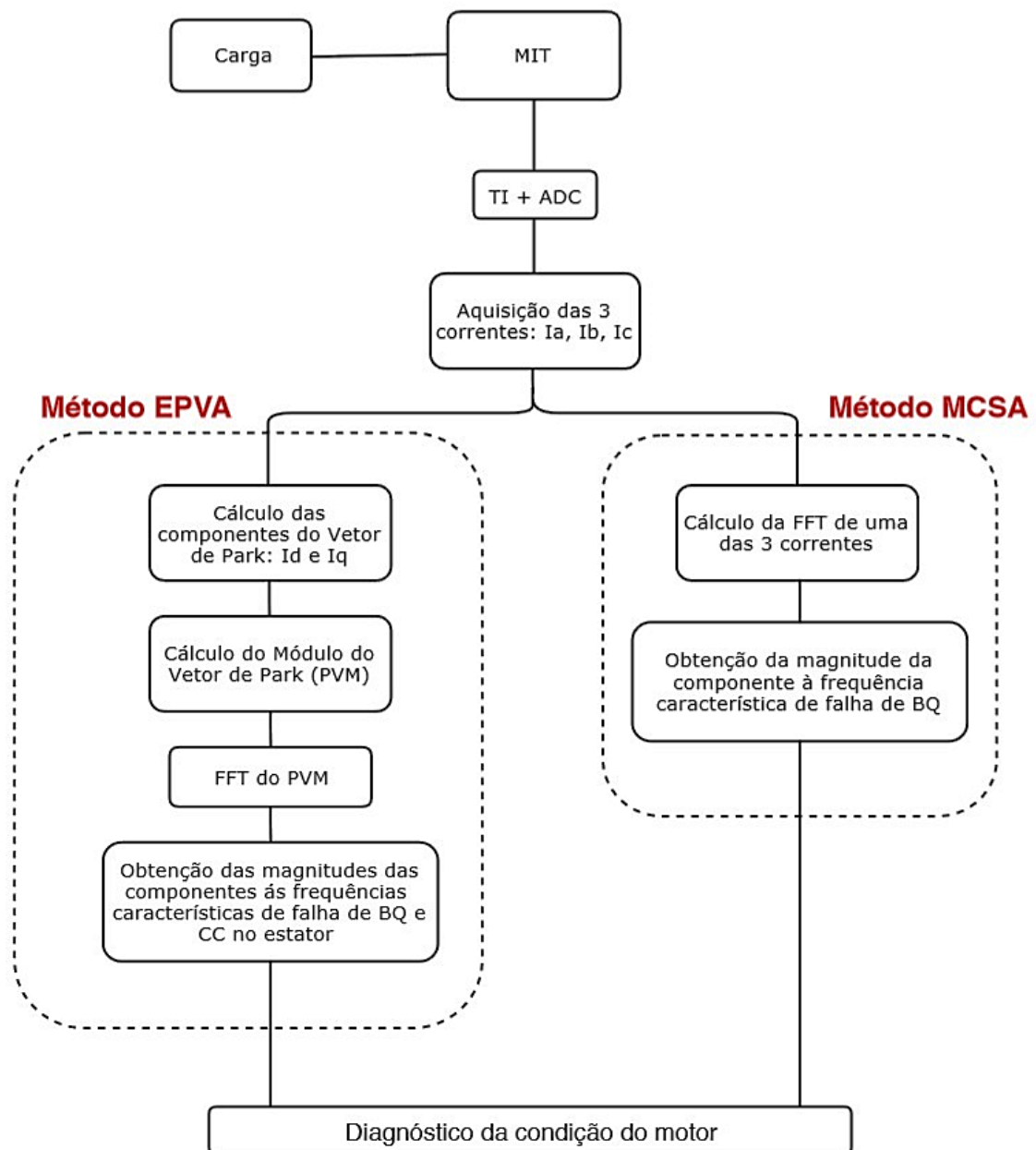


Figura 6.11 - Diagrama do processo de diagnóstico de falhas do SMAC

Diagnóstico pelo método EPVA

Os valores discretos de cada uma das correntes de fase são guardados em três vetores, utilizados pelo Método EPVA para o cálculo das componentes I_d e I_q do Vetor de Park. Após estas serem calculadas é determinado o Módulo do Vetor de Park (PVM) e calculado o espectro de frequências do PVM através do algoritmo FFT. De seguida é efetuada a análise do espectro obtido, monitorizando as amplitudes das componentes às frequências características de falha. Tendo por base a investigação efetuada previamente, sabe-se que a existência de falhas nos

enrolamentos do estator manifesta-se através da presença de uma componente espectral, no referido espectro, com dobro da frequência fundamental, $2 \cdot f_{\text{rede}}$. Sabe-se também que a amplitude dessa componente está diretamente ligada à extensão da falha. Deste modo, e como referido em [32], um indicador do grau de assimetria pode ser obtido pela razão entre a amplitude da componente espectral à frequência de $2 \cdot f_{\text{rede}}$ e o nível DC do Módulo do Vetor de Park da corrente, ou seja, a média das amplitudes desse vetor quando o motor está em condição “saudável”. Deste modo, pré-definindo um valor para o grau de assimetria é possível verificar a existência deste tipo de falhas quando esse valor limite é ultrapassado, significando um aumento da amplitude da componente em monitorização, correspondente a um indício de falha.

No que diz respeito às falhas relativas a barras rotóricas quebradas, o espectro PVM é também analisado, sendo monitorizada a amplitude da componente espectral na frequência $2 \cdot s \cdot f_{\text{rede}}$. É também possível estar atento a este tipo de falha monitorizando o fator de severidade normalizado, definido como o rácio entre a amplitude desta componente e a média das amplitudes do espectro do Módulo do Vetor de Park.

Diagnóstico pelo método MCSA

O acompanhamento efetuado pelo Método MCSA é feito apenas às barras da gaiola do rotor de cada motor em análise. Das três correntes adquiridas, apenas uma é utilizada para análise. Foi escolhida a fase A do motor, no entanto qualquer uma das fases pode ser utilizada. É executada a FFT aos valores instantâneos adquiridos da corrente da fase A guardados num vetor, obtendo-se assim o espectro de frequências da corrente consumida dessa fase. Nesse espectro é monitorizada amplitude da componente espectral à frequência de $f_{\text{rede}} \cdot (1-2s)$ e a amplitude da componente espectral à frequência fundamental, f_{rede} . Com base na diferença entre as duas amplitudes é possível obter a condição em que se encontra a gaiola do rotor, seguindo os valores presentes na Tabela 5.2. Esses valores estão presentes no código desenvolvido, consoante a diferença obtida entre amplitudes, é indicada a condição do rotor segundo esses valores.

6.2.4 Interface de utilizador

Foi desenvolvida uma *interface* gráfica na linguagem de programação *Python* que permite ao utilizador visualizar vários parâmetros associados ao funcionamento do motor em acompanhamento. É possível saber qual o escorregamento a que o motor está sujeito, os valores RMS das três correntes do estator e a percentagem de cada valor eficaz de corrente em relação ao somatório dos valores eficazes das três correntes. Para além disso, são apresentados os gráficos das formas de onda da corrente elétrica consumida e os espectros de frequência, onde se encontram sinalizadas as amplitudes das componentes em monitorização. É ainda possível visualizar o estado da gaiola do rotor segundo a técnica MCSA, que indicará um dos sete estados seguintes: “Excelente”, “Bom”, “Duvidoso”, “1 Barra Quebrada” (1 BQ), “2 Barras Quebradas” (2 BQ), “3 ou mais Barras Quebradas” (3 BQ+), “Danos Severos”. É também apresentada a condição do estator relativamente a curto-circuitos entre enrolamentos do estator segundo a técnica EPVA. Essa condição está dependente do valor obtido para o fator de

severidade, apresentado anteriormente, podendo apresentar dois estados distintos: “Normal” e “Limite Ultrapassado”.

O programa de aquisição e de processamento corre em *loop* de 10 em 10 minutos e apresenta os resultados na interface gráfica, podendo o utilizador visualizar rapidamente a condição atual de cada uma das partes do motor em análise. O utilizador pode também adquirir dados do motor no momento em que pretender, basta para isso clicar no botão “Adquirir valores”, o programa de aquisição e de processamento corre em *background* e passados alguns segundos os novos resultados são apresentados na interface. Na Figura 6.12 está representada a interface gráfica desenvolvida para o SMAC.

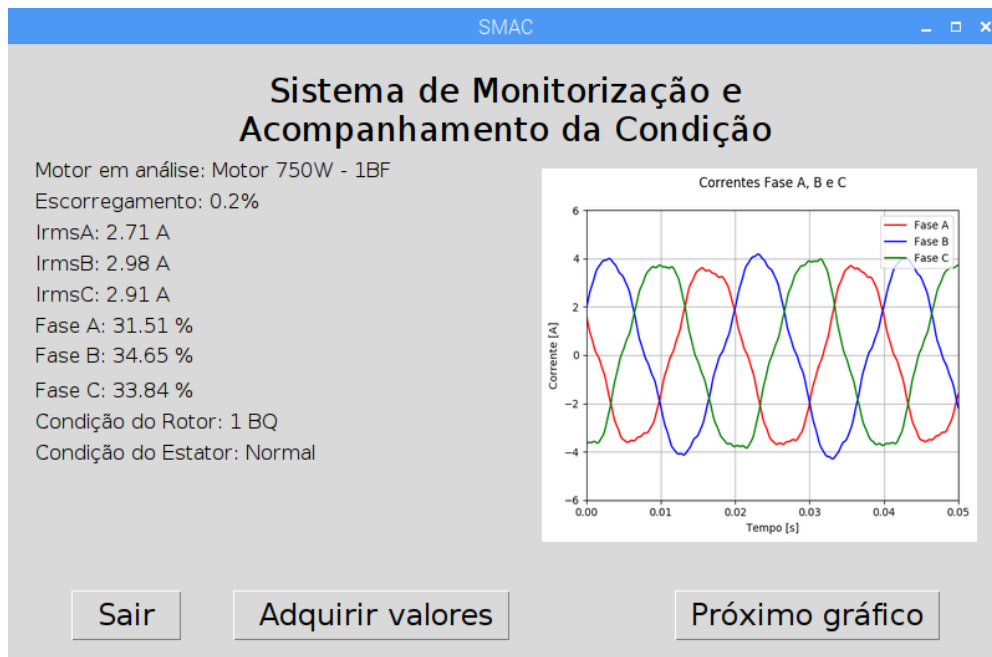


Figura 6.12 - Interface gráfica desenvolvida

7 Ensaios Experimentais e Resultados Obtidos

7.1 Detalhes do equipamento de teste

Durante os ensaios foram utilizados quatro motores de indução trifásicos, três saudáveis e um danificado artificialmente. O primeiro a ser utilizado foi um motor de 2.2 kW, 4 pólos, 50 Hz, ligado em estrela, modelo BF31 100L4, da marca Universal Motors. O segundo foi um motor da marca WEG, modelo AL71-04, de 0.25 kW, de 4 pólos, ligado em estrela. O motor danificado utilizado nos ensaios experimentais foi um motor de indução trifásico, 50 Hz, 4 pólos, 0.75 kW, com ligação em triângulo, da fabricante Universal Motors, modelo BF31 80M4, carcaça de Alumínio, contendo uma barra rotórica furada propositalmente. O quarto motor trata-se de MIT de 0.75 kW da marca WEG, de 4 pólos, 50 Hz, ligado em estrela. A Figura 7.1 apresenta os vários motores utilizados nos diferentes ensaios experimentais.

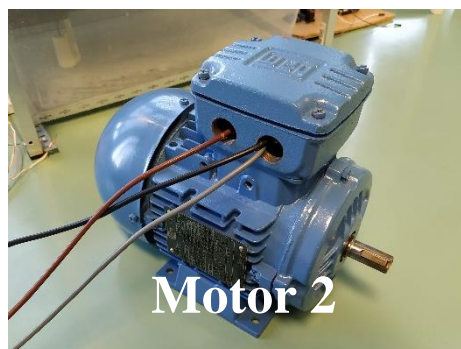
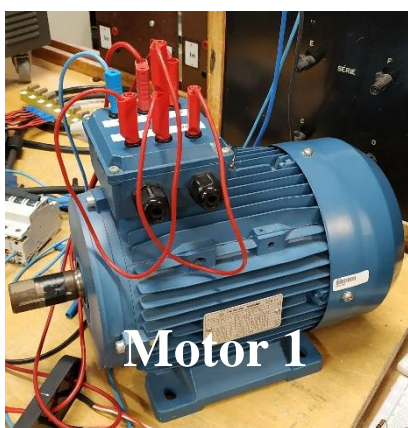


Figura 7.1 - Motores de indução trifásicos utilizados nos ensaios experimentais: Motor 1 – 2.2 kW; Motor 2 – 0.25 kW; Motor 3 e 4 – 0.75 kW cada

7.2 Trabalho prático

Os ensaios experimentais foram realizados no laboratório de Máquinas Elétricas do departamento de Engenharia Eletrotécnica. Foram executados 6 ensaios distintos, de modo a observar o comportamento do sistema para diferentes tipos de ligações e diferentes motores.

Primeiro teste: efetuado com o Motor 1 a funcionar em vazio, sem qualquer carga acoplada, diretamente ligado à rede trifásica de alimentação;

Segundo e Terceiro teste: realizados com o Motor 2 e com o Motor 3, respetivamente, ligados a um inversor de frequência, ambos em vazio;

Quarto teste: o Motor 3 foi alimentado a partir de um autotransformador trifásico com uma tensão alternada de 230 V_{AC} entre fases e acoplado ao Motor 4, estando este último em funcionamento isolado, ligado a um conjunto de condensadores e resistências trifásicas, encontrando-se assim o Motor 3 a consumir uma baixa potência;

Quinto teste: a ligação do Motor 3 manteve-se igual aquela do teste três, sendo fornecida carga mecânica até metade da sua potência nominal, recorrendo para isso ao Motor 4, a funcionar como gerador, alimentando um circuito RC paralelo ajustável, composto por dois bancos de condensadores e três resistências variáveis;

Teste seis: efetuado com o Motor 3 sujeito a um valor de carga próximo de 92 % do seu valor nominal, recorrendo à mesma montagem do quinto teste.

Visto não ter sido possível a obtenção de vários motores contendo falhas, nem obter rotores do mesmo tipo, de modo a lhes introduzir falhas artificialmente e se efetuar diferentes ensaios, foi apenas utilizado um motor danificado, o Motor 3, com um único rotor, e obtidos dados para o motor a funcionar em vazio, a meia carga e perto da carga nominal.

Na Figura 7.2 é apresentada a montagem experimental e os equipamentos utilizados nos ensaios práticos realizados.



Figura 7.2 – Montagem experimental utilizada para a aquisição de dados dos diferentes motores

- A. Multímetro;
- B. Autotransformador;
- C. Transformador de intensidades;
- D. Módulo de aquisição de dados;
- E. Motor em teste;
- F. Medidor de velocidade de rotação;
- G. Motor com a função de gerador;
- H. *Software* de aquisição e monitorização;
- I. Bateria de condensadores;
- J. Resistências variáveis.

7.2.1 Teste 1 – Motor 1 em vazio diretamente ligado à rede

Velocidade de rotação medida: 1498 rpm

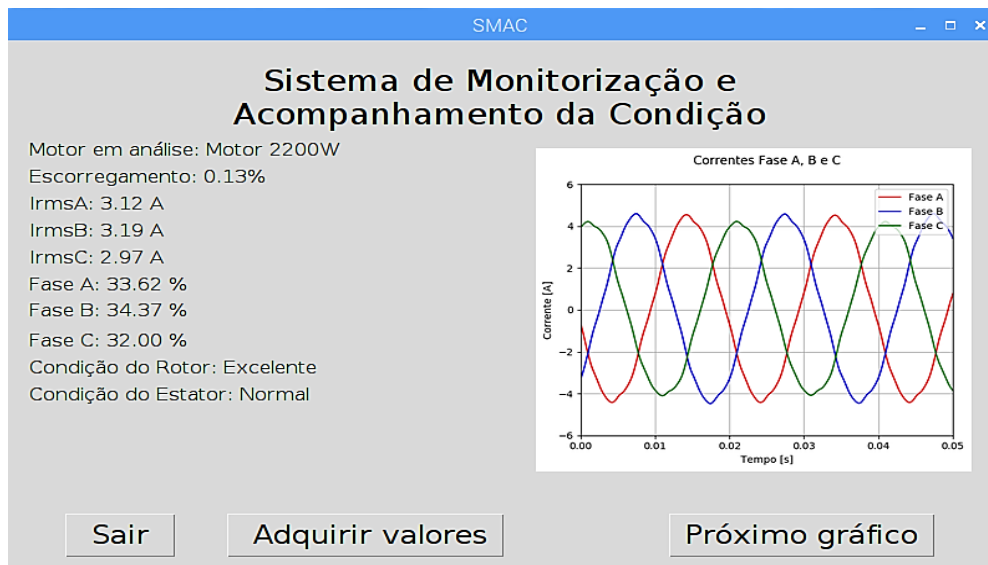


Figura 7.3 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o Teste 1

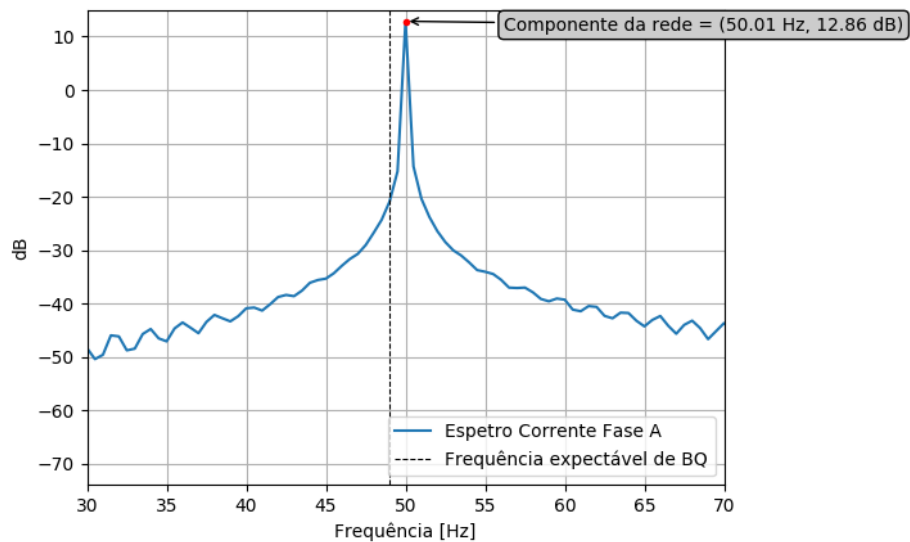
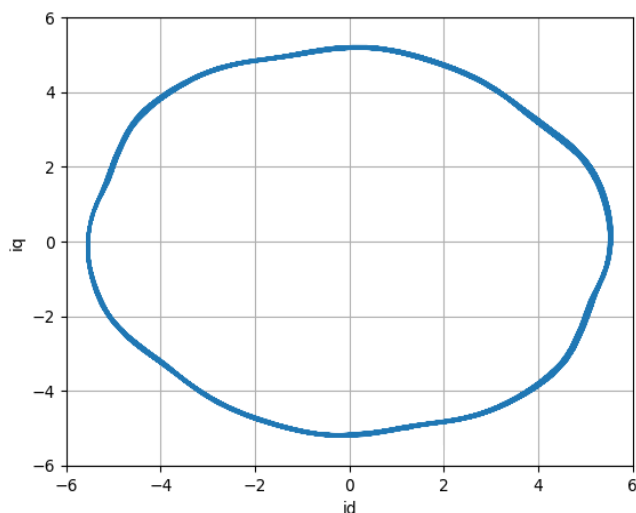
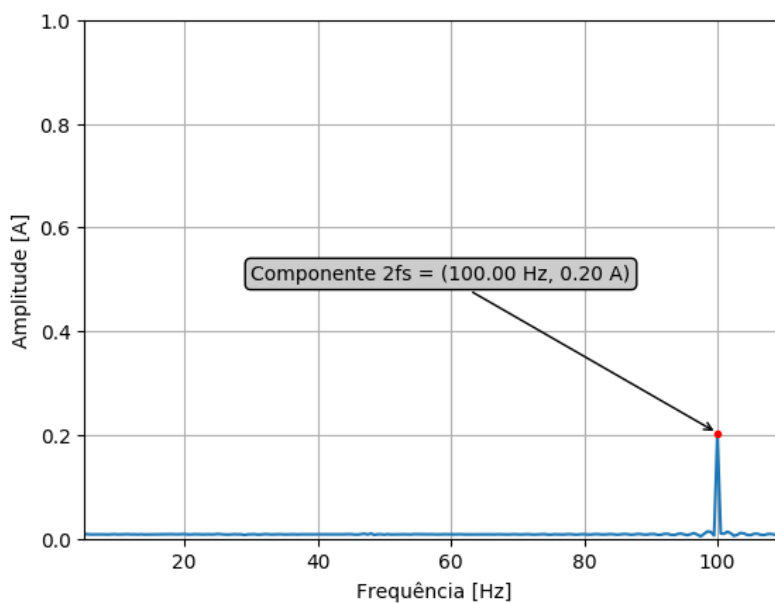


Figura 7.4 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 1 (s = 0.13 %)

Figura 7.5 - Gráfico do vetor de Park obtido para o ensaio 1 ($s = 0.13 \%$)Figura 7.6 - Espectro EPVA obtido no teste 1 ($s = 0.13 \%$)

Não foram identificados indícios de falha nestas condições. Segundo a aplicação desenvolvida a condição da gaiola do rotor encontra-se no estado “Excelente” e a condição do estator em estado “Normal”. Trata-se de um motor saudável, pelo que é de esperar esses mesmos resultados. No espectro da corrente da fase A não é visível qualquer componente na frequência expectável de barras quebradas, $f_{rede} \cdot (1-2s)$. No espectro EPVA é visível apenas a componente $2fs$ com uma amplitude de 0.2 A. Seria teoricamente previsível que em condições normais, a assinatura EPVA estivesse livre de quaisquer componentes espectrais, no entanto, na prática, a

existência de uma componente espectral de pequena amplitude à frequência de 100 Hz, ou seja, 2 vezes a frequência fundamental, está relacionada com a existência de assimetrias residuais no circuito do estator do motor, como referido pelos autores em [33]. No entanto, o motor está a funcionar em vazio, circulando nele correntes consideravelmente baixas, logo, algumas das componentes podem não ser visíveis para valores de carga nula, mesmo em casos de existência de falhas. De referir que os gráficos obtidos são os esperados e que não é notória a presença de ruído elétrico.

7.2.2 Teste 2 – Motor 2 em vazio ligado ao inversor

Velocidade de rotação medida: 1498 rpm

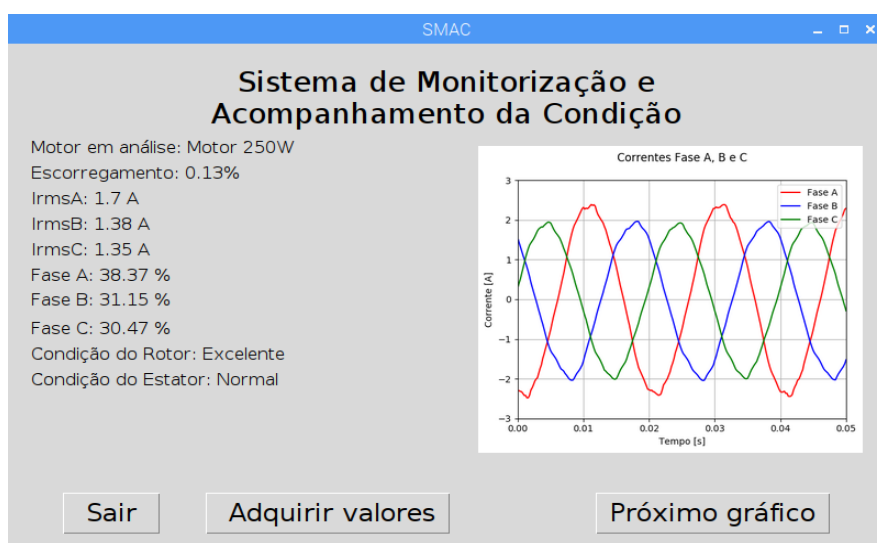


Figura 7.7 - Dados obtidos pelo sistema e gráfico do domínio temporal das correntes do estator para o teste 2

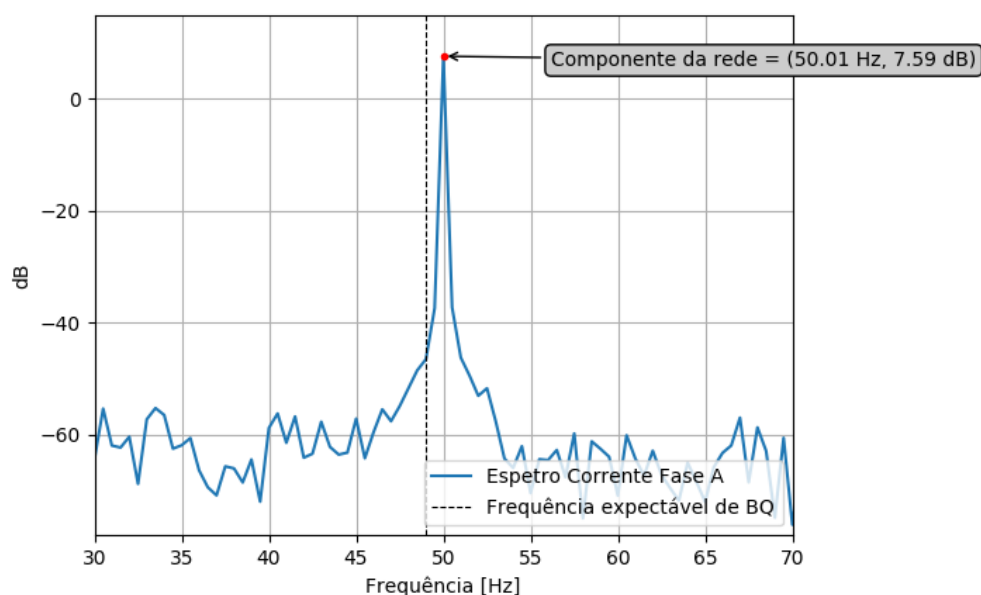


Figura 7.8 - Espetro de frequências da corrente da fase A do Motor 2 ($s = 0.13\%$)

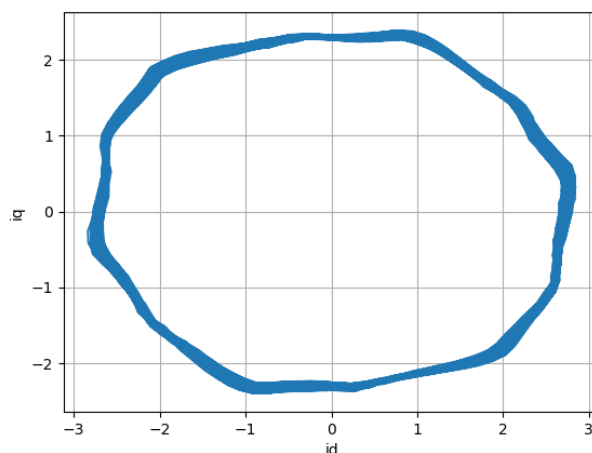
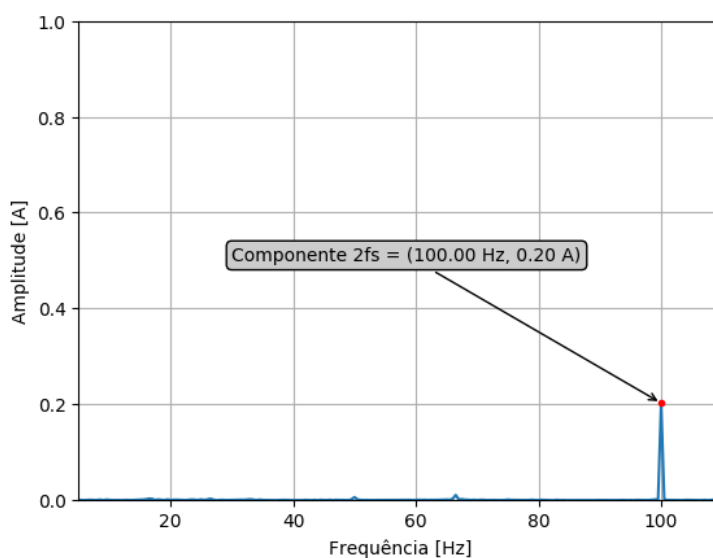


Figura 7.9 - Gráfico do vetor de Park do teste 2

Figura 7.10 - Espectro EPVA teste 2 ($s = 0.13\%$)

Neste segundo teste não foram novamente identificados indícios de falha. É um resultado expectável visto o Motor 2 ser saudável e se tratar de um ensaio em vazio. Existe, no entanto, um notório ruído no espectro de frequências da corrente da fase A, possivelmente devido ao próprio inversor ou a vibrações durante a aquisição. A forma obtida pelo vetor de Park, que se encontra ligeiramente distorcida e com um traço um pouco mais grosso do que seria esperado, deve-se provavelmente aos mesmos fatores. É também visível um maior consumo de corrente por parte da fase A (38.37 %) relativamente às restantes fases.

7.2.3 Teste 3 – Motor 3 em vazio ligado ao inversor

Velocidade de rotação medida: 1498 rpm

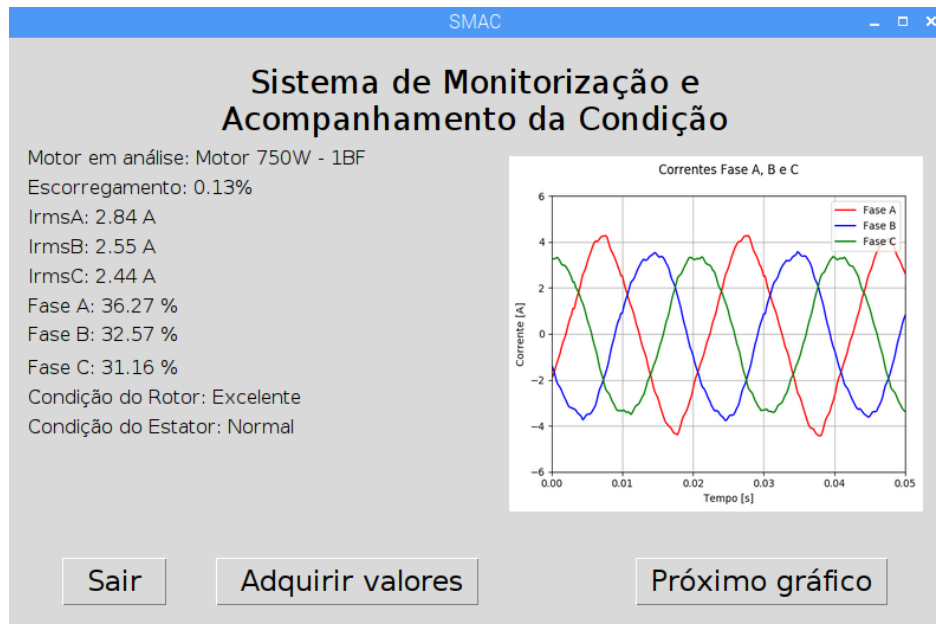


Figura 7.11 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o teste 3

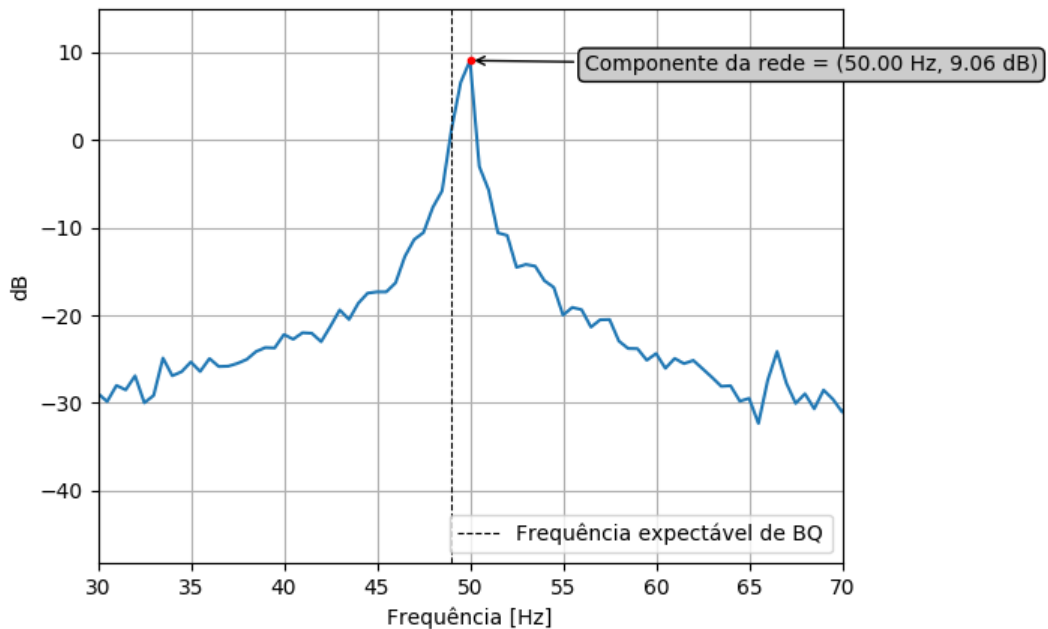


Figura 7.12 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 (s = 0.13%)

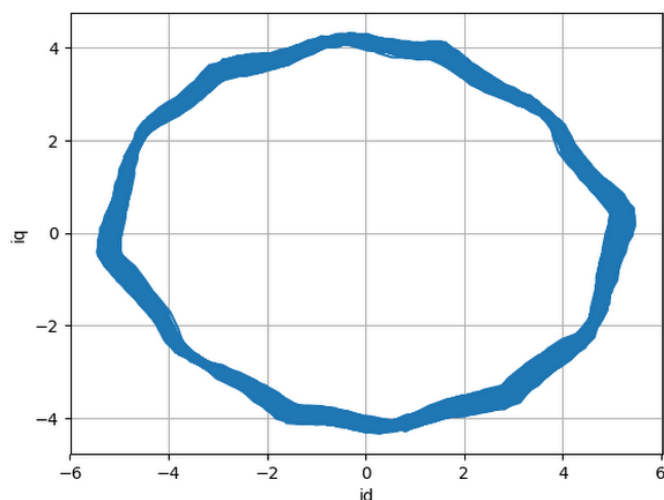


Figura 7.13 - Gráfico do vetor de Park do teste 3 ($s = 0.13 \%$)

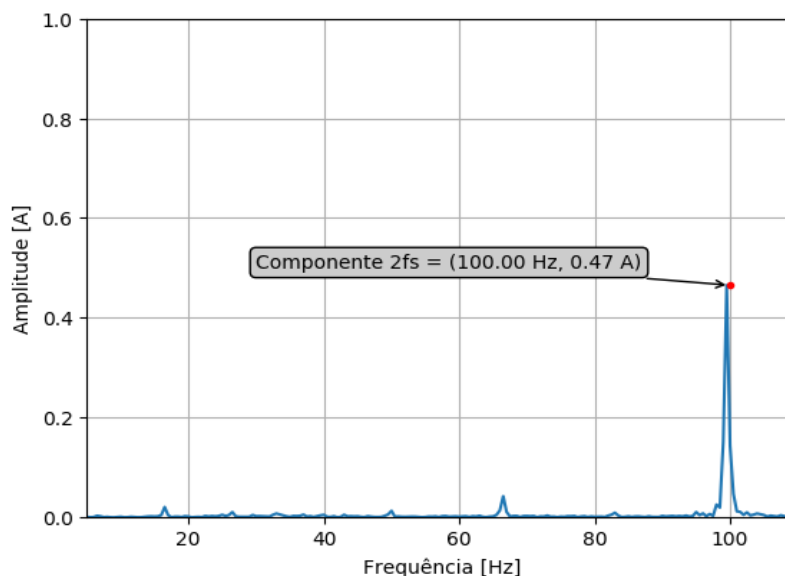


Figura 7.14 - Espectro EPVA obtido para o teste 3 ($s = 0.13 \%$)

Neste terceiro teste, foi utilizado o Motor 3, que possui uma barra rotórica furada artificialmente. Não foram detetados indícios de falha pelo sistema. Este fato deve-se principalmente ao motor estar a funcionar em vazio o que reduz drasticamente a quantidade de corrente que atravessa a gaiola do rotor, dificultando assim o correto diagnóstico. É visível alguma distorção no espectro de frequências da Fase A. É também possível observar uma espessura bem considerável da forma geométrica representada pelo vetor de Park, estando possivelmente relacionada com algum ruído proveniente do processo de aquisição, mas também com condição real do rotor. No espectro EPVA nota-se que a componente $2 \cdot f_{rede}$ possui uma amplitude um pouco maior que o esperado, sendo possivelmente um indicador precoce da presença de um curto-circuito no estator, no entanto, o limite definido de 0.5 A, não foi ainda ultrapassado, sendo a condição de “Normal” apresentada. É também visível um maior consumo de corrente pela fase A (36.27 %).

7.2.4 Teste 4 – Motor 3 acoplado em vazio ligado ao autotransformador

Dados obtidos com o leitor de rotações e com o multímetro digital:

- Velocidade de rotação: 1497 rpm
- Tensão de alimentação BC: 230.4 V
- Potência consumida: 178,2 W
- Corrente fase RMS A: 2.69 A

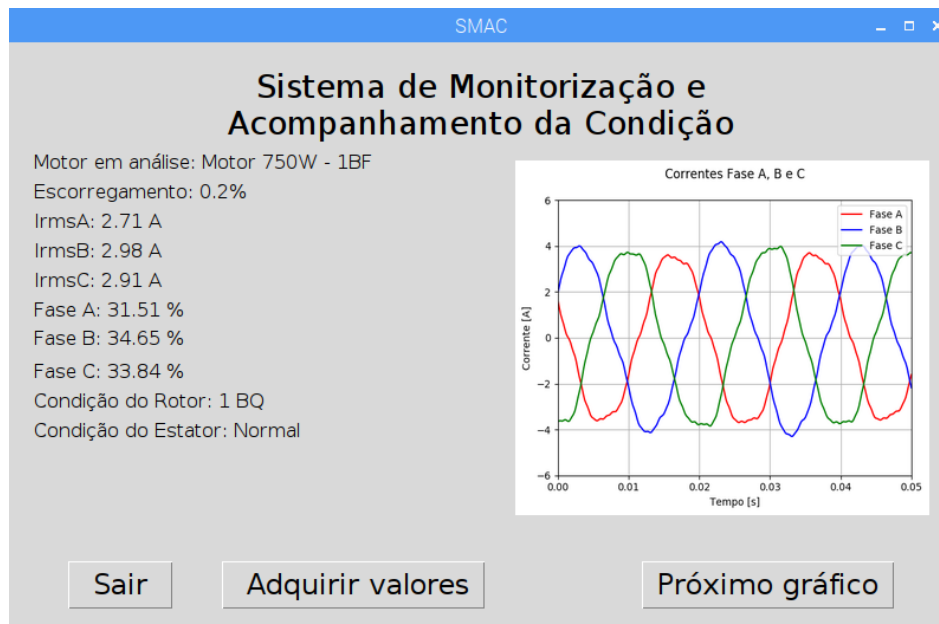


Figura 7.15 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o teste 4

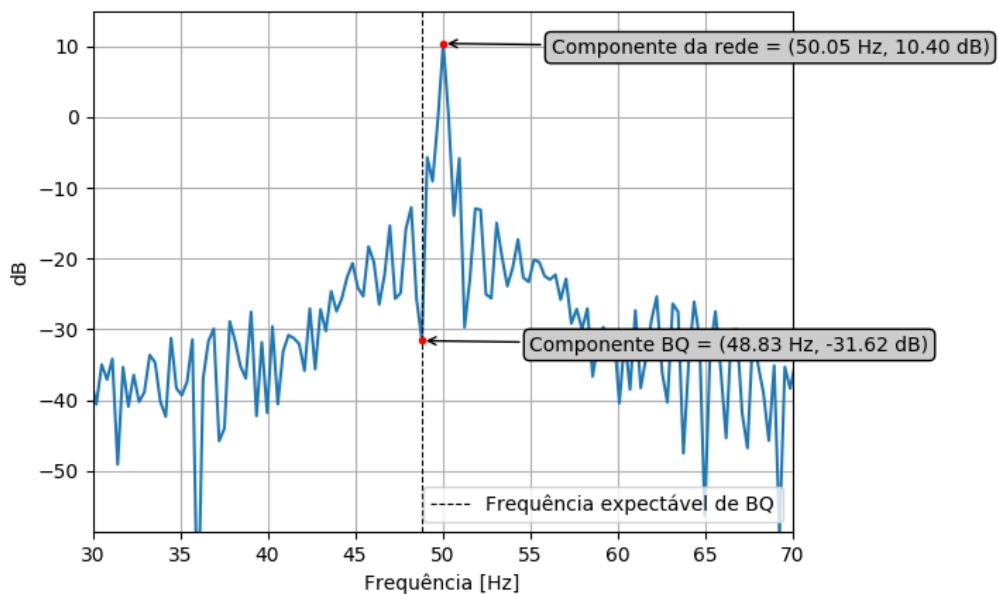
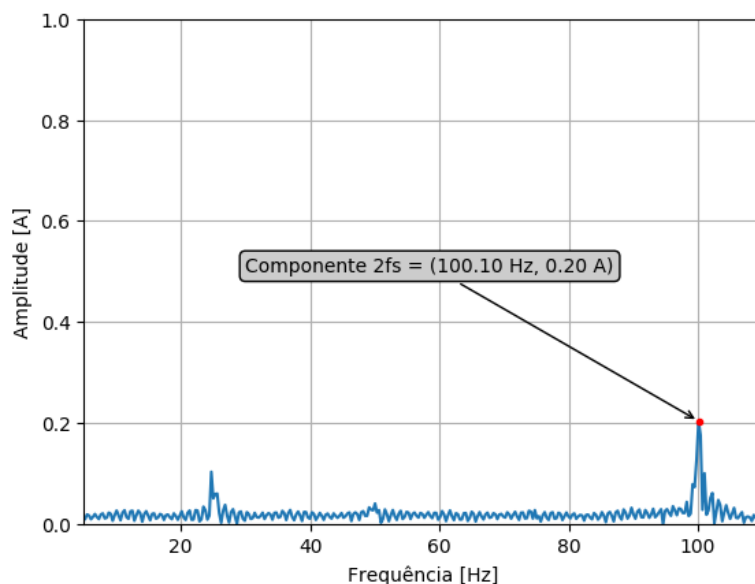


Figura 7.16 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 no teste 4 ($s = 0.20\%$)

Figura 7.17 - Espectro EPVA teste 4 ($s = 0.20\%$)

No teste quatro, o motor 3 foi alimentado através do autotransformador, com 230 VAC entre fases e colocado em funcionamento em vazio, estando apenas acoplado ao motor 4. Obteve-se uma potência ativa consumida de cerca de 178 W e uma velocidade de rotação de 1497 rpm, correspondente a 0.20 % de deslizamento.

O sistema apresenta a condição do rotor como “1 BQ” devido a ter sido encontrada uma componente na frequência de 48.83 Hz, $f_{rede}(1-2s)$, e a diferença (42.02 dB) entre a amplitude da componente fundamental e a amplitude dessa componente se encontrar no patamar de 1 Barra Quebrada. No entanto, analisando o gráfico, a componente detetada não pode ser considerada válida visto que existe muita distorção e os picos existentes não são devidos a falhas no rotor mas muito possivelmente a problemas relacionados com vibrações a que o transformador de intensidades esteve sujeito durante este teste, devido ao fato de estar na mesma bancada onde os motores estavam em funcionamento.

Observando o gráfico do espectro EPVA é visível a componente $2*f_{rede}$, de baixa amplitude, indicando um aparente estado saudável do estator relativamente a curto-circuitos.

7.2.5 Teste 5 – Motor 3 a meia carga alimentado por autotransformador

Dados obtidos com o leitor de rotações e com o multímetro digital:

- Velocidade de rotação: 1478 rpm
- Tensão de alimentação BC: 227.4 V
- Potência consumida: 377,8 W
- Corrente fase RMS A: 2.66 A

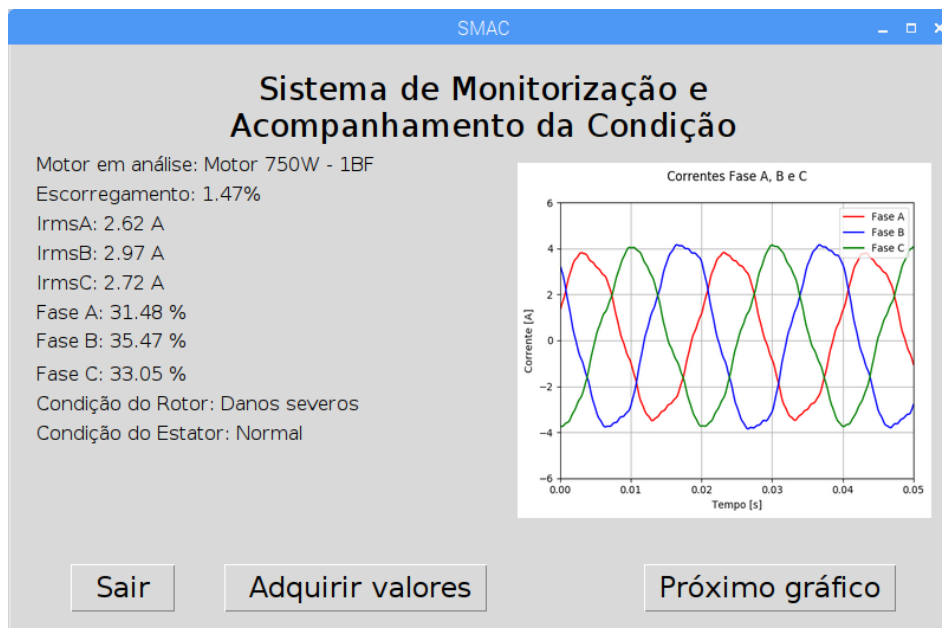


Figura 7.18 - Dados obtidos pelo sistema e domínio temporal das correntes do estator para o Teste 5

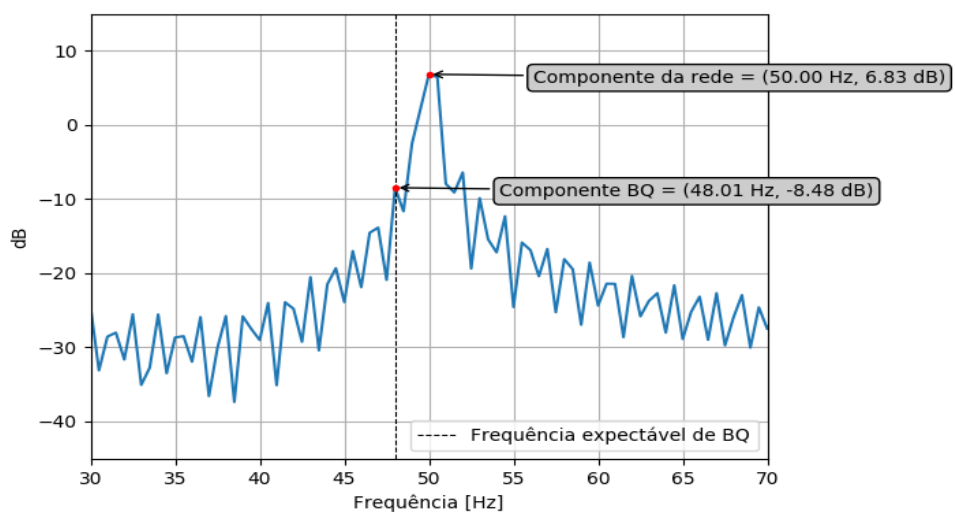


Figura 7.19 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 no teste 5 (s = 1.47 %)

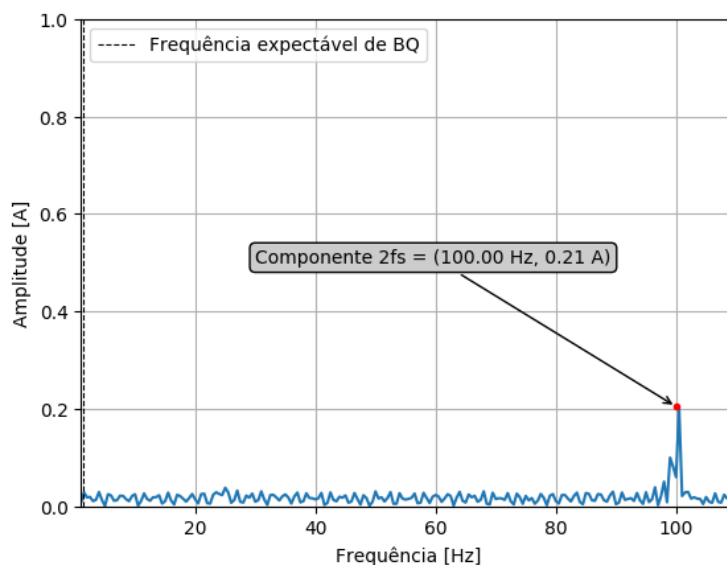


Figura 7.20 - Espectro EPVA teste 5 ($s = 1.47\%$)

O motor 3 foi colocado em funcionamento e foi aumentado o valor da carga até que a sua potência ativa fosse próxima de metade do valor da potência nominal, 375 W. Posteriormente foi medido o valor da velocidade de rotação, obtendo-se 1478 rpm. A esta velocidade o valor do deslizamento corresponde a aproximadamente 1.47 %.

O resultado obtido pelo sistema para a condição do rotor é “Danos severos”, visto a diferença entre as componentes monitorizadas no espectro de frequências da corrente da fase A ser inferior a 30 dB. No entanto não é possível ter a certeza de que o pico de frequência indicado como sendo característico de barras quebradas foi realmente causado devido à barra rotórica furada de forma manual. Isto porque o espectro em causa sofre de alguma distorção, podendo levar a conclusões erradas. De referir também que a carga a que o motor estava sujeito é apenas metade do valor da sua carga nominal, o que não é o mais favorável à deteção deste tipo de componentes, utilizando o método MCSA, que requer valores de carga próximos do valor da carga nominal.

A tracejado, no gráfico do espectro EPVA encontra-se a frequência característica da componente expectável de barras quebradas, visível neste espectro na frequência $2s \cdot f_{rede}$, (1.47 Hz). Nessa frequência não é identificada qualquer componente considerável. No que diz respeito à componente $2 \cdot f_{rede}$, o seu valor de amplitude é aproximadamente igual ao valor obtido no ensaio quatro.

7.2.6 Teste 6 – Motor 3 a 92 % carga alimentado por autotransformador

Dados obtidos com o leitor de rotações e com o multímetro digital:

- Velocidade de rotação: 1447 rpm
- Tensão de alimentação BC: 230 V
- Potência consumida: 692 W
- Corrente fase RMS A: 2.92 A

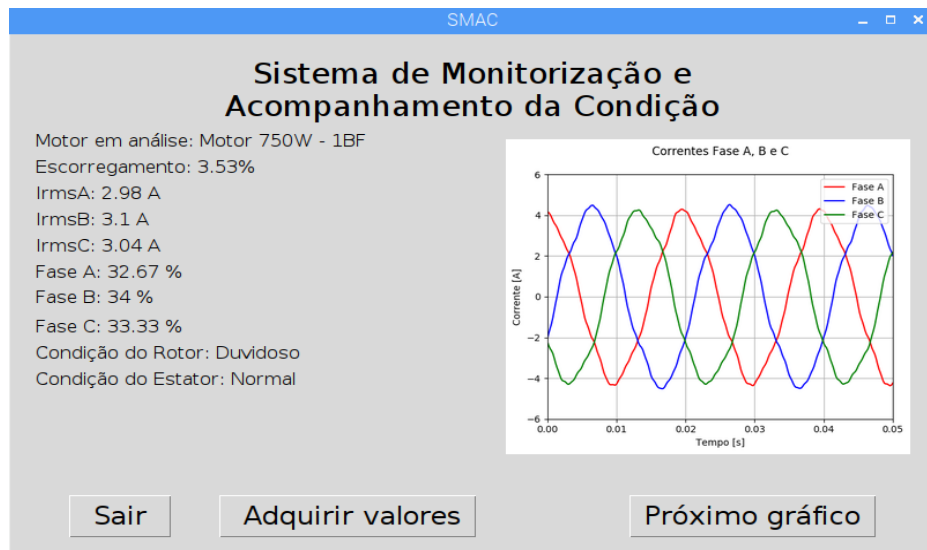


Figura 7.21 - Dados obtidos pelo sistema e o gráfico domínio temporal das correntes do estator para o teste 6

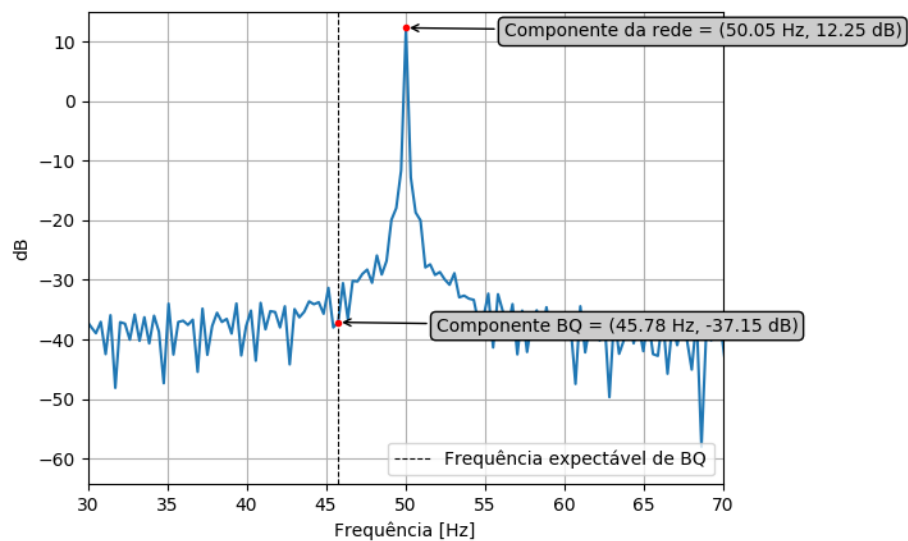


Figura 7.22 - Espectro de frequências da corrente da fase A do Motor 3 no teste 6 ($s = 3.53\%$)

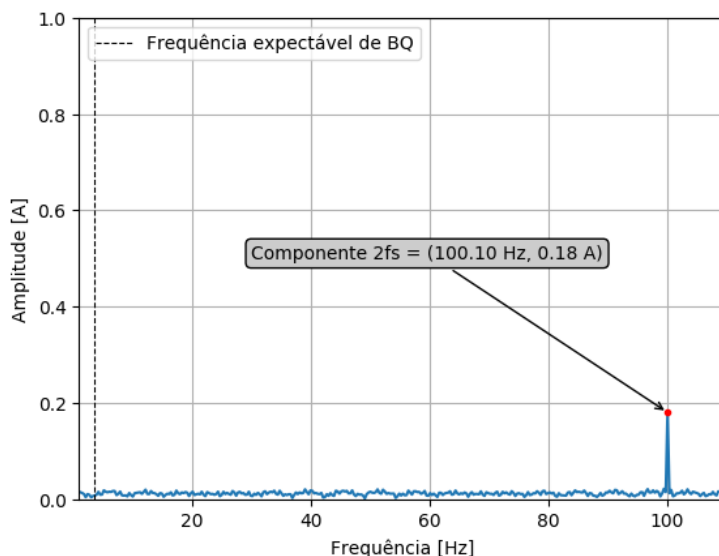


Figura 7.23 - Espectro EPVA teste 6 ($s = 3.53\%$)

No sexto teste foi elevada a carga a que o motor estava sujeito até ao valor máximo obtido de 92 % da potência nominal do motor. Obteve-se uma potência ativa de aproximadamente 692 W. A velocidade de rotação obtida foi de 1447 rpm, correspondente a um deslizamento de 3.53 %.

Neste último teste é possível verificar pela análise do espectro de frequências da corrente da fase A que a frequência da componente $f_{rede} \cdot (1-2s)$ já encontra um pouco mais afastada da componente à frequência fundamental, devido ao aumento da carga submetida ao motor que por sua vez aumenta o valor do deslizamento, fazendo diminuir o valor da frequência desta componente. Analisando o valor da diferença entre as amplitudes das duas componentes, 49.4 dB, legendadas no gráfico em questão, verifica-se que o estado da gaiola do rotor se encontra classificado como “Duvidoso”, visto essa diferença se situar entre 48 e 54 dB (conforme apresentado na Tabela 5.2). No entanto, analisando atentamente o espectro em causa verifica-se que a componente detetada não é indicadora de barras quebradas, pois, mais uma vez, a forma do espectro obtida não é totalmente a indicada para se conseguir extrair através do método MCSA um resultado correto. Neste caso ($s = 3.53\%$) seria de esperar um pico de frequência na frequência em monitorização, no entanto devido ao ruído existente não foi possível a sua correta deteção.

No espectro EPVA não é notável qualquer componente na frequência em monitorização, $2 \cdot s \cdot f_{rede}$, (3.53 Hz), frequência característica de barras quebradas. Relativamente à amplitude da componente $2 \cdot f_{rede}$, permanece aproximadamente igual à amplitude registada nos dois testes anteriores (teste 4 e teste 5).

7.2.7 Resultados obtidos

De seguida é apresentada a tabela resumo dos resultados obtidos para os ensaios efetuados.

Ensaio	Motor em teste	Componente $f_{rede}*(1-2s)$	Componente $2*f_{rede}$	Componente $2*s*f_{rede}$
1	Motor 1 (2.2kW)	Não presente	Detetada	Não presente
2	Motor 2 (0.25kW)	Não presente	Detetada	Não presente
3	Motor 3 (0.75kW)	Não presente	Detetada	Não presente
4		Identificação duvidosa	Detetada	Não presente
5		Identificação duvidosa	Detetada	Não presente
6		Identificação duvidosa	Detetada	Não presente

Tabela 7.1 - Tabela resumo dos ensaios práticos realizados

8 Conclusões e perspectivas futuras

8.1 Conclusões

Ao longo do tempo decorrido para o desenvolvimento do sistema de identificação de componentes e para o sistema de acompanhamento da condição foram inicialmente estudadas várias tecnologias e abordagens diferentes de modo a se conseguir atingir os objetivos pretendidos para ambos os sistemas.

Relativamente ao sistema de identificação de componentes em máquinas industriais, foi selecionada a tecnologia RFID para reconhecer de forma exclusiva diversos componentes que se pretendam identificar. Foi projetada a utilização de *tags* RFID de tamanho reduzido, cerca de 6 mm de diâmetro e de elevado índice de proteção. Estas, sendo possível serem embutidas/afixadas a uma grande variedade de componentes diferentes sem ser notório a sua presença tornou-se uma ótima solução a adotar. Uma vez instaladas nos elementos a identificar, basta serem radiadas através de um leitor RFID ligado a uma antena, de modo a transmitirem o seu código único e identificador do elemento a que estiverem associadas, sendo assim possível executar uma rápida e fiável identificação de vários componentes instalados em máquinas industriais. Não foi no entanto possível passar do papel à prática este sistema devido à falta de grande parte do material necessário e ao seu elevado custo, nomeadamente o leitor RFID.

No que diz respeito ao sistema desenvolvido para monitorização e acompanhamento da condição de motores de indução trifásicos cujo objetivo era desenvolver um sistema com essas capacidades, adotando tecnologias *open-source* e de baixo custo, o sistema foi desenvolvido, concretizado na prática e executados alguns testes. Recorreu-se a um módulo de aquisição de dados de baixo custo, responsável por adquirir os valores vindos do conjunto de três transformadores monofásicos de corrente, que mede as correntes consumidas no estator de um motor. Os dados adquiridos são depois processados numa Raspberry Pi e apresentados numa aplicação desenvolvida em linguagem *Python* onde são mostrados ao utilizador os valores medidos, os gráficos da última medição efetuada e a condição atual do estator e da gaiola do rotor.

Tendo em consideração que não foi possível obter mais do que um motor com falhas artificialmente causadas, não foi possível verificar a resposta do sistema para casos de falhas no rotor mais graves. Não foi também possível obter motores com falhas no estator, pelo que foi executada a monitorização da componente $2 \cdot f_{rede}$ do espectro EPVA, indicadora de curto-circuitos entre espiras, em todos os ensaios. O valor da amplitude dessa componente manteve-se sempre em torno do valor 0.20 A, à exceção do Teste 3 em que foi obtido o valor de 0.47 A.

De notar que a maioria dos espectros obtidos possuíam distorção, possivelmente devido a vibrações durante a leitura ou a interferências eletromagnéticas, o que não permitiu uma adequada obtenção dos vários espectros e dificultou a identificação das componentes pretendidas.

8.2 Perspetivas futuras

No que diz respeito a possíveis futuros trabalhos, relativamente ao sistema de acompanhamento da condição desenvolvido, a colocação de sensores de tensão de modo a medir as tensões de alimentação do motor, de um sensor indutivo ou de um sensor ótico de modo a se poder ler a velocidade de rotação do motor de forma automática em cada teste e de um acelerómetro eram *upgrades* desejáveis e fundamentais ao sistema. Relativamente ao *firmware* e à *interface* gráfica desenvolvida seria interessante adicionar novas funcionalidades como por exemplo a incorporação de novos métodos de diagnóstico de falhas, possíveis com a utilização de novos sensores e equipamentos. Ou por exemplo o envio de dados para uma base de dados, de modo a ser feito um histórico de medições, possibilitando uma análise de tendências. Para além disso, o desenvolvimento de uma PCB que englobasse o módulo de aquisição de dados, a Raspberry Pi e os circuitos eletrónicos, acrescentando uma melhor filtragem seria também um objetivo importante.

9 Referências bibliográficas

- [1] EDP (2018). https://energia.edp.pt/media/107660/motoresaltorendimento_edp_pme.pdf. Energias de Portugal, Soluções de eficiência PME, [Acesso em 2018]
- [2] Rui Gonçalo Clara Araújo, “Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos”, Universidade Nova de Lisboa, 2015
- [3] Marcelo Dos Martyres Wageck, “Detecção de Defeitos em Motores de Indução pela Análise da Assinatura da Corrente Elétrica ”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015
- [4] Daiane Aparecida Alves, “Técnicas de Detecção de Falhas em Barras do Rotor nos Motores de Indução Trifásicos”, Universidade Federal de São João del-Rei, 2017;
- [5] Madelina dos Anjos Sibumbe, “Desenvolvimento de um sistema de monitorização de vibrações em equipamentos rotativos”, Universidade Nova de Lisboa, 2017
- [6] BBP (2018). <http://www.bradybrandprotection.com/en/product-authentication>. Brady Brand Protection, Product Authentication, [Acesso em 2018]
- [7] HID (2018). <https://www.hidglobal.com/solutions/authenticity-brand-protection>. HID Global, Authenticity & Brand Protection, [Acesso em 2018]
- [8] RT (2018). <http://www.ravirajtech.com/rfid-tags.html>. Raviraj Technologies, RFID Tags, [Acesso em 2018]
- [9] GM (2018). <http://www.grupamarat.pl/en/offer-2/maintenance-tools/condition-monitoring/electric-motor-test-and-monitoring-solutions/>. GrupaMarat, Maintenance Tools, [Acesso em 2018];
- [10] MCT (2018). <https://www.motioncontroltips.com/use-servo-drives-asynchronous-induction-motors/>. Motion Control Tips, [Acesso em 2018]
- [11] Francisco, A. (2013). Motores Elétricos, 5ª Edição. ETEP - Edições Técnicas e Profissionais
- [12] ESE (2018). <http://emadrlc.blogspot.com/2012/07/squirrel-cage-induction-motor-frame.html>. Engineering Search Engine, [Acesso em 2018]
- [13] TEE (2018). <https://www.top-ee.com/parts-of-a-motor/>. Top Electrical Engineers, [Acesso em 2018];
- [14] Costa, J. (2010). Apontamentos de Máquinas Elétricas
- [15] WEG, (2012). Motores Elétricos – Guia de Especificação
- [16] IEC (2007). *Electrical insulation - Thermal evaluation and designation*. International Electrotechnical Commission
- [17] EEP (2018). <https://electrical-engineering-portal.com/10-duty-types-three-phase-asynchronous-motors>. Electrical Engineering Portal, [Acesso em 2018];

- [18] IEC (2003). *Rotating electrical machines - Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity*. International Electrotechnical Commission
- [19] RG (2015). https://www.researchgate.net/figure/ISO-10816-recommended-positions-for-vibration-measurements-28-where-position-1-and_fig16_282305689. ResearchGate, *ISO 10816 recommended positions for vibration measurements*, [Acesso em 2018]
- [20] Foito, D. (2015). *Deteção e Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Acionamento com Máquinas de Indução Hexafásicas*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade Nova de Lisboa
- [21] Bonaldi E. (2005). *Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados*. Tese de Doutoramento, Universidade Federal de Itajubá
- [22] Cardoso A. J. L. (2006). *Supervisão e Controlo de Sistemas Dinâmicos com Tolerância a Falhas – Contribuição para uma Abordagem Estruturada e Robusta*. Tese de Doutoramento, Universidade Coimbra
- [23] Thomson W.T., Fenger M. (2001). *Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 7, no. 4, pp.1077-2618
- [24] Bonnet A. H., Yung C. (2008). *Increased Efficiency versus Increased Reliability*, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 29 – 36
- [25] Cardoso, A. J. M. (1991). *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*. Ed. 1, 1 vol., ISBN: 972-32-0452-5. Coimbra: Coimbra Editora
- [26] Miljkovic, D. (2015). *Brief Review of Motor Current Signature Analysis*
- [27] Siddiqui, K., Sahay, K. e Giri, V. (2014). *Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor - A Review*. International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering
- [28] ISO (2014). *Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*. International Organization for Standardization
- [29] Dinis P. (2017). *Análise e Monitorização de Condição em Motores de Indução Trifásicos*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- [30] Lathi, B. P. (2005). *Linear Systems and Signals, Second Edition*
- [31] WM (2018). <https://www.wavemetrics.com/products/igorpro/dataanalysis/signalprocessing/spectralwindowing>. Wavemetrics, Spectral Windowing, [Acesso em 2018]
- [32] M. A. Cruz, A. J. Marques Cardoso, S. (2000). *Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach*. *Electric Machines & Power Systems*, 28(4), 289–299

-
- [33] Cruz, S. M. A., & Cardoso, A. J. M. (2001). *Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach*. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(5), 1227–1233
- [34] JADAK (2018). <https://www.jadaktech.com/products/rfid/fixed-mount-rfid-readers/sargas/>. ThingMagic Sargas Fixed Mount (UHF) RAIN RFID, [Acesso em 2018]
- [35] XERAFY (2018). <http://www.xerafy.com/en/catalogue/product/dot-in-xs/3>. Xerafy, Dot-iN XS, [Acesso em 2018]
- [36] RS (2018). <https://ee.rsdelivers.com/product/mobilemark/pn6-868lcp-1c-wht-6/mobilemark-pn6-868lcp-1c-wht-6-ism-band-uhf-rfid/7239088>. RS Components, Mobilemark PN6-868LCP-1C-WHT-6 ISM Band, UHF RFID Antenna, [Acesso em 2018]
- [37] RPI (2018). <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. Raspberry Pi, Raspberry Pi 3 Model B, [Acesso em 2018]
- [38] ARFIDS (2018). <https://www.atlasrfidstore.com/thingmagic-usb-pro-rfid-reader/>. Atlas RFID Store, ThingMagic USB PRO RFID Reader, [Acesso em 2018]
- [39] ARFIDS (2018). <https://www.atlasrfidstore.com/thingmagic-micro-lte-carrier-board/>. Atlas RFID Store, ThingMagic Micro LTE Carrier Board, [Acesso em 2018]
- [40] ABB (2018). <https://new.abb.com/motors-generators/pt/servicos/servicos-avancados/smart-sensor>. ABB Ability™ Smart Sensor, [Acesso em 2018]

