



Carlos Filipe Machado Silva

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e
de Computadores

Laboratório para deteção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins,
Prof. Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Silva Fino

Arguentes: Engenheiro Rui Miguel Martinho Dias Jorge

Vogais: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2017

Laboratório para deteção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos

Copyright © Carlos Filipe Machado Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*“Education is the most Powerful Weapon
which you can use to change the world.”*

Nelson Mandela

Agradecimentos

Quero deixar o meu sincero agradecimento, a todas as pessoas, que de uma forma direta ou indireta, prestaram apoio durante a execução desta dissertação, tornando assim possível a concretização da mesma.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, pela oportunidade que me concedeu em desenvolver uma dissertação numa área por mim tanto desejada. Agradeço também pela sua dedicação, apoio e por todo o tempo despendido ao longo deste percurso.

Um enorme obrigado, a todos os meus grandes amigos de curso, Ana Ferreira, Bruno Almeida, Edna Moreira, Miguel Vieira, Renata Leitão e Ricardo Belchior pela amizade, apoio e experiências partilhadas durante esta longa caminhada.

À minha família, pela sua exemplar educação, orientação e por acreditarem sempre em mim. Em especial à minha mãe pela força e ajuda imprescindível ao longo da realização desta etapa, nomeadamente pela leitura atenta e rigorosa desta dissertação. Ao meu pai, um excelente bobinador, que me colocou o gosto pelos motores elétricos, e me concedeu inúmeros conselhos ao longo da realização deste projeto. Aos meus irmãos por todo apoio e força que me deram ao longo deste caminho.

À minha maravilhosa namorada Inês, meu exemplo a seguir como engenheira, pelo amor, companheirismo, compreensão, apoio, paciência e pela rigorosa leitura desta dissertação, ajudando-me a torná-la mais completa.

Um agradecimento também muito especial ao meu grande amigo António Ferreira pelo companheirismo, amizade e apoio prestado.

Resumo

Num mundo industrializado, as máquinas elétricas desempenham um papel fundamental nas indústrias, sendo os motores de indução trifásicos dos mais utilizados, devido à sua simplicidade construtiva, reduzido custo de produção, robustez e versatilidade de adaptação a diferentes tipos de carga. Apesar da robustez destas máquinas, nenhum motor está isento de estar sujeito à ocorrência de avarias, podendo estas levar a paragens nos processos produtivos e/ou danificação de material com os consequentes prejuízos financeiros.

De forma a manter um normal funcionamento contínuo evitando danos materiais e financeiros, é necessário adotar medidas de manutenção preventiva, nomeadamente através da análise do estado de funcionamento dos motores, de modo a descobrir o mais precocemente possível, eventuais avarias. Apesar da existência de vários métodos de análise das máquinas, existe uma grande escassez de material didático de modo a formar profissionais especializados na área da deteção de avarias.

Como resultado do trabalho realizado no âmbito desta dissertação foi especificado e desenvolvido um laboratório de testes de motores de indução, capaz de realizar a recolha e o processamento das várias variáveis envolvidas no funcionamento da máquina, facilitando a análise ao utilizador. Adicionalmente, este laboratório encontra-se preparado para provocar avarias nas máquinas para utilização didática da mesma.

O laboratório para deteção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos, juntamente com o respetivo módulo de aquisição e processamento desenvolvido, encontra-se preparado para adquirir sinais de corrente e tensão de alimentação do motor, com especial foco para a assinatura de corrente (*Motor Current Signature Analysis - MCSA*), bem como outros sinais externos para análise (vibração, temperatura, etc.). É ainda possível realizar a gravação de todos os dados recolhidos, possibilitando uma posterior análise recorrendo a outros métodos de deteção e diagnóstico de avarias.

Palavras-chave: Deteção e diagnóstico de avarias, ensino, módulo de teste, motor de indução trifásico.

Abstract

In an industrialized world, electric machines play a fundamental role in industries, with three-phase induction motors being the most used, due to their constructive simplicity, low production cost, ruggedness and versatility of adaptation to different types of loads. Despite the robustness of these machines, no motor is exempt from being subject to the occurrence of malfunctions, which can lead to stops in the productive processes and/or damage of material with its consequent financial losses.

In order to keep a continuous operation avoiding material and financial damages, it is necessary to adopt preventive maintenance measures, namely through the analysis of the state of operation of the motors, to discover as early as it can be possible damages. Despite the existence of several methods of analysis of the machines, there is a great shortage of didactic material to train professionals specialized in the fault detection area.

From the work carried out within this dissertation, an induction motors test laboratory was specified and developed, capable of collecting and processing several variables involved in the operation of the machine, facilitating user analysis. In addition, this laboratory is prepared to cause malfunctions in the machines also for didactic use.

The laboratory for detection and diagnosis of three-phase induction motors, together with its developed acquisition and processing module, is prepared to acquire current and voltage signals from the motor, with a special focus on current signature (Motor Current Signature Analysis - MCSA), as well as other external signals for analysis (vibration, temperature, etc.). It is also possible to record all the collected data, allowing a later analysis using other methods of detection and fault diagnosis.

Keywords: Detection and fault diagnosis, education, test module, three-phase induction motor.

Índice Geral

Agradecimentos	v
Resumo	v
Abstract	ix
Índice Geral	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
Acrónimos	xix
Lista de símbolos	xxi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
2 Fundamentação teórica prévia.....	5
2.1 Motor de indução trifásico	5
2.1.1 Constituição de um MIT.....	5
2.1.2 Princípio de funcionamento de um MIT	7
2.2 Avarias em Motores de Indução Trifásicos.....	10
2.2.1 Avarias elétricas	11
2.2.1.1 Curto-circuito nos enrolamentos	11
2.2.1.2 Barras quebradas	12

2.2.2	Avarias mecânicas.....	14
2.2.2.1	Rolamentos danificados.....	14
2.2.2.2	Desalinhamento em veios acoplados.....	15
2.2.2.3	Excentricidades no entreferro.....	16
2.3	Técnicas de detecção de avarias.....	17
2.3.1	Técnicas offline.....	18
2.3.1.1	Teste de isolamento.....	18
2.3.1.2	Análise da resistência dos enrolamentos.....	18
2.3.1.3	Análise dos circuitos do motor.....	19
2.3.2	Técnicas online.....	19
2.3.2.1	Análise acústica.....	20
2.3.2.2	Análise de vibrações.....	20
2.3.2.3	Análise da corrente consumida por fase.....	20
2.3.2.4	Termografia.....	21
2.3.2.5	Análise da assinatura de corrente (MCSA).....	21
3	Estado de arte.....	23
3.1	Resultados de investigação.....	23
3.2	Produtos de mercado.....	24
3.3	Conclusões.....	27
4	Especificação do laboratório para detecção e diagnóstico de avarias.....	29
4.1	Especificações gerais.....	29
4.2	Módulo de teste.....	31
4.2.1	Sistema de comando e potência.....	31
4.2.2	Sensores.....	32
4.2.3	Interface de processamento de dados.....	34
4.3	Bancada de suporte e simulação de avarias num MIT.....	36
4.3.1	Motores testados.....	36
4.3.2	Base de fixação do motor.....	37
4.3.3	Carga.....	38
5	Aplicação experimental do laboratório.....	39
5.1	Avarias provocadas.....	39

5.1.1	Barras quebradas no rotor.....	39
5.1.2	Curto-circuito num enrolamento do estator.....	40
5.1.3	Rolamentos danificados	41
5.1.4	Desalinhamento	41
5.2	Teste e resultados experimentais.....	42
5.2.1	Motor saudável	43
5.2.2	Barras quebradas no rotor.....	44
5.2.2.1	Duas barras quebradas.....	45
5.2.2.2	Três barras quebradas.....	46
5.2.2.3	Nove barras quebradas	47
5.2.3	Curto-circuito no enrolamento do estator.....	48
5.2.4	Rolamento danificados	50
5.2.5	Desalinhamento.....	53
6	Conclusões e perspectivas futuras	57
6.1	Conclusões	57
6.2	Perspetivas futuras.....	59
	Referências.....	61
	Anexo A.....	65
	Anexo B	67
	Anexo C	69

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Componentes de um MIT [17].	6
Figura 2.2 - Rotor rebobinado (a) e rotor em gaiola de esquilo (b) [17].	6
Figura 2.3 - Campo girante provocado pelas correntes nos enrolamentos fixos do estator [11]. Evolução temporal simultânea das três correntes trifásicas (a); Evolução temporal da posição do campo girante em relação aos eixos das três bobines, concertada com a evolução das correntes (b); Identificação da posição dos três eixos (c).	8
Figura 2.4 - Representação esquemática das várias velocidades de rotação [11].	9
Figura 2.5 - Distribuição das avarias num MIT segundo o EPRI (Adaptado de [12]).	10
Figura 2.6 - Diferentes tipos de curto-circuitos no estator (Adaptado de [16]).	11
Figura 2.7 - Fratura de anéis e barras no rotor [17].	13
Figura 2.8- Estrutura de um rolamento de esferas (Adaptado [9]).	14
Figura 2.9 - Tipos de desalinhamento em veios (Adaptado [23]).	15
Figura 2.10 - Vários tipos de excentricidades no entreferro [11].	17
Figura 3.1- SKF Dynamic Motor Analyser – EXP4000 [28].	25
Figura 3.2- Fluke 438-II Power Quality and Motor Analyzer [29].	26
Figura 4.1 - Arquitetura do laboratório para diagnóstico e deteção de avarias.	30
Figura 4.2- Laboratório para deteção e diagnóstico de avarias em MIT.	31
Figura 4.3 - Ficha para sensores externos.	33
Figura 4.4- Unidade de medição de carga De Lorenzo.	33
Figura 4.5 - Arquitetura do sistema de aquisição de dados.	35
Figura 4.6 - Exemplo de motor utilizado em laboratório.	37
Figura 4.7 - Bases de fixação (a base B permite desalinhamentos).	38
Figura 4.8 - Travão eletromagnético De Lorenzo.	38
Figura 5.1 - Rotor perfurado artificialmente.	40
Figura 5.2 - Resistências variáveis $12\Omega / 5A$.	40

Figura 5.3- Desalinhamento do motor em relação à carga (5 graus para a direita no eixo horizontal).	41
Figura 5.4 - Espectro de frequências da corrente e tensão do motor em vazio.	43
Figura 5.5 - Assinatura de corrente com rotor com duas barras quebradas: Motor em vazio (a); Motor com um binário de 3,8 Nm (b); Motor com um binário de 4,15 Nm (c).	45
Figura 5.6 - Assinatura de corrente com rotor com três barras quebradas: Motor em vazio (a); Motor com um binário de 3,8 Nm (b); Motor com um binário de 4,15Nm (c).	46
Figura 5.7 - Assinatura de corrente com rotor com nove barras quebradas: Motor em vazio(a); Motor com um binário de 3,8 Nm (b); Motor com um binário de 4,15 Nm (c).	47
Figura 5.8 - Assinatura de corrente de motor: sem curto-circuito (a); com curto-circuito(b).	48
Figura 5.9 - Variação de correntes do motor: sem curto-circuito (a); com curto-circuito (b).	49
Figura 5.10 - Assinatura de corrente do motor com rolamentos danificados em vazio.	50
Figura 5.11 - Assinatura de corrente do motor com rolamento danificados com binário de 2 Nm.	51
Figura 5.12 – Temperaturas em quatro pontos do rolamento do ataque.	52
Figura 5.13 - Assinatura de corrente do motor com desalinhamento no eixo vertical com binário de 2,3 Nm.	53
Figura 5.14 - Assinatura de corrente do motor com desalinhamento em relação ao eixo horizontal, com binário de 2,3 Nm (a); com binário de 4,15 Nm (b).	54
Figura A.1 - Esquema de comando de arranque direto para motor trifásico (KM2) e monofásico (KM1).	65

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Simbologia referente às equações 1 a 4.	7
Tabela 2.2 - Harmônicas das respectivas avarias [4], [18], [20], [34].	22
Tabela 5.1- Frequências laterais para barras quebradas.	44
Tabela 5.2 - Variação de velocidades de motor com curto-circuito.	49
Tabela 5.3 - Frequências laterias para danificação nos rolamentos, com $s = 0,013$ e $n1 = 2$. ..	52

Acrónimos

CC	Curto-circuito
ESA	<i>Electric Signature Analysis</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MI	Motor de Indução
MIT	Motor de Indução Trifásico
f.e.m	Força Eletromotriz
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (transformada rápida de <i>Fourier</i>)
RPM	Rotações por minuto

Lista de símbolos

B	Indução magnética ou densidade do fluxo magnético	[T]
$\cos \varphi$	Fator de potência	-
f	Frequência	[Hz]
f_0	Frequência de alimentação	[Hz]
f_r	Velocidade do rotor em frequência	[Hz]
H_{Tot}	Intensidade do campo total	[A/m]
I	Corrente	[A]
I_M	Corrente máxima	[A]
i_1, i_2, i_3	Corrente nas fases 1, 2 e 3	[A]
k	Número inteiro positivo	-
k_b	Número inteiro positivo	-
N	Velocidade do motor	[RPM]
N_s	Velocidade síncrona do motor	[RPM]
N_M	Metade do número de espiras do enrolamento	-
n_1	Número inteiro positivo	-
n_2	Número inteiro positivo	-

n_{cc}	Número inteiro positivo	-
n_d	Ordem da excentricidade	-
n_{ds}	Número inteiro positivo	-
n_{ws}	Categoria da excentricidade	-
p	Número de pares de pólos	-
R	Número de barras do rotor	-
s	Escorregamento	-
t	Tempo	[s]
δ	Espessura do entreferro do motor	[mm]
ω	Velocidade angular	[rad · s ⁻¹]
ω_r	Velocidade angular do campo girante do rotor	[rad · s ⁻¹]
ω_s	Velocidade angular do campo girante do estator (velocidade síncrona)	[rad · s ⁻¹]
Ω	Velocidade do rotor	[rad · s ⁻¹]
α	Posição angular dos enrolamentos	[rad]

1 Introdução

Neste capítulo são apresentados o enquadramento e a motivação que levaram à elaboração da presente dissertação e são descritos os objetivos, bem como a respetiva estrutura da mesma.

1.1 Enquadramento e motivação

Atualmente os motores elétricos estão presentes em praticamente todas as instalações industriais, comerciais e até mesmo nas residências. Estes motores têm aplicações tão distintas como discos rígidos de um computador, motores industriais, compressores, ventiladores, passadeiras, moinhos, eletrodomésticos, etc. [1].

Estima-se que, a nível mundial, em 2011, o número total de máquinas elétricas em funcionamento fosse cerca de 16,1 biliões, com uma taxa de crescimento de 50% nos últimos cinco anos [2], na qual, os motores de indução correspondem a mais de 80% das máquinas elétricas em utilização, sendo estes responsáveis por cerca de 40% a 50% da energia consumida por países industrializados [3], [4].

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é um motor elétrico muito utilizado devido às características que a própria máquina apresenta, tais como a simplicidade, reduzido custo de produção, robustez, versatilidade de adaptação a diferentes cargas e reduzida necessidade de manutenção [1].

Apesar da robustez deste tipo de máquina, estas estão sempre sujeitas a condições de operação, levando ao desgaste de componentes e a avarias do foro mecânico e elétrico, quer no rotor, quer no estator [5], [6].

Em ambiente industrial, uma avaria num motor elétrico poderá significar longas paragens de uma ou várias linhas de produção, podendo, desta forma, provocar graves prejuízos

financeiros. Em alguns casos, será mesmo necessário a substituição do motor até que se proceda à sua reparação [7].

Para evitar este tipo de situação, é necessária uma manutenção periódica e preventiva destes equipamentos. Esta tarefa nem sempre é fácil, uma vez que pode requerer equipamento e sistema de aquisição adicionais, além de mão de obra especializada [8].

Embora na fase inicial a manutenção preventiva possa implicar custos mais elevados, contudo, a médio prazo, traduz-se por ser mais eficaz, uma vez que é realizada uma monitorização constante do estado de funcionamento do motor. Assim é possível realizar um planeamento sistemático e preventivo dos equipamentos de modo a prevenir o agravamento de avarias, permitindo reduzir custos e melhorar a eficácia dos equipamentos [7].

1.2 Objetivos

Devido à importância da manutenção preventiva, no que diz respeito ao diagnóstico e deteção de avarias em MITs o mais precocemente possível, e à falta de recursos e reduzida abordagem desta matéria no ensino, pretende-se com esta dissertação a:

- Implementação de um laboratório para deteção e diagnóstico de motores elétricos, de forma a que em ambiente laboratorial, seja possível simular/provocar avarias. Realizar uma análise/avaliação do funcionamento do MIT, em tempo real, servindo como ferramenta de apoio ao ensino;
- Conceção de um módulo de teste, que permita testar MITs, quer no laboratório implementado nesta dissertação, quer em ambiente industrial/profissional, para auxiliar no diagnóstico e na deteção de avarias nestas máquinas.

A prossecução destes objetivos passa pela concretização das seguintes etapas:

- Identificação das principais avarias em MIT's (mecânicas e elétricas);
- Estudo para a implementação experimental de avarias no funcionamento dos MIT's;
- Estudo teórico de um método não intrusivo de deteção de avarias em MIT's (assinatura de corrente);
- Conceção do módulo de testes com:
 - Implementação do quadro de comando e aquisição;

- Implementação dos métodos de diagnóstico e detecção de avarias;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica, simples e intuitiva, para análise dos dados;
- Estabelecimento de um laboratório de detecção e diagnóstico de avarias para MIT, com possibilidade de imposição de avarias, focado para o ensino;
- Realização de testes experimentais e análise dos resultados obtidos.

Este método simples e inovador contribuirá, de forma significativa, para o ensino sobre o diagnóstico e detecção de avarias em MIT's, bem como constituirá um novo método para o utilizador efetuar a manutenção preventiva destas máquinas.

1.3 Estrutura

A presente dissertação encontra-se organizada nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2: Fundamentação teórica prévia**

Neste capítulo é efetuada uma breve introdução teórica, de forma a contextualizar os conceitos abordados na dissertação.

Começando pela apresentação da arquitetura da máquina em estudo, o MIT, este capítulo descreve o princípio de funcionamento deste motor, assim como as avarias a que o mesmo está sujeito.

Adicionalmente são apresentadas algumas das técnicas de detecção e diagnóstico de avarias, quer durante o funcionamento da máquina, quer com a máquina parada.

- **Capítulo 3: Estado de arte**

No terceiro capítulo são descritos os estudos já existentes no âmbito dos laboratórios para análise e detecção de avarias em motores de indução trifásicos.

- **Capítulo 4: Especificação do laboratório para detecção e diagnóstico de avarias**

No quarto capítulo é efetuada uma especificação e descrição de todos os elementos que constituem o laboratório, desde os motores utilizados em testes, passando pelos sistemas de comando e potência, pelos sensores e pela aquisição, processamento e visualização de dados através da respetiva interface.

- **Capítulo 5: Aplicação experimental do laboratório**

Neste capítulo é descrito o modo de como foram provocadas avarias num MIT de forma a testar o laboratório. De seguida é realizada uma comparação entre os resultados teóricos esperados para cada avaria e os resultados obtidos através do laboratório desenvolvido neste trabalho.

- **Capítulo 6: Conclusões e perspetivas futuras**

No sexto capítulo são apresentadas as avaliações e conclusões do trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação. São ainda apresentadas algumas sugestões de melhoria para um projeto futuro.

2 Fundamentação teórica prévia

Neste capítulo, é efetuada uma breve apresentação do motor de indução trifásico, sendo descrito o seu princípio de funcionamento, as avarias mais comuns neste tipo de motor, os fatores que levam ao aparecimento das mesmas e a sua influência nas correntes de alimentação.

2.1 Motor de indução trifásico

Neste subcapítulo, apresenta-se o motor de indução trifásico (MIT), a sua arquitetura e princípio de funcionamento, para uma melhor compreensão das avarias a que pode ficar sujeito.

2.1.1 Constituição de um MIT

Um MIT é fundamentalmente composto por duas grandes partes: o estator e o rotor, sendo a primeira a parte fixa do motor e a segunda a parte móvel (Figura 2.1).

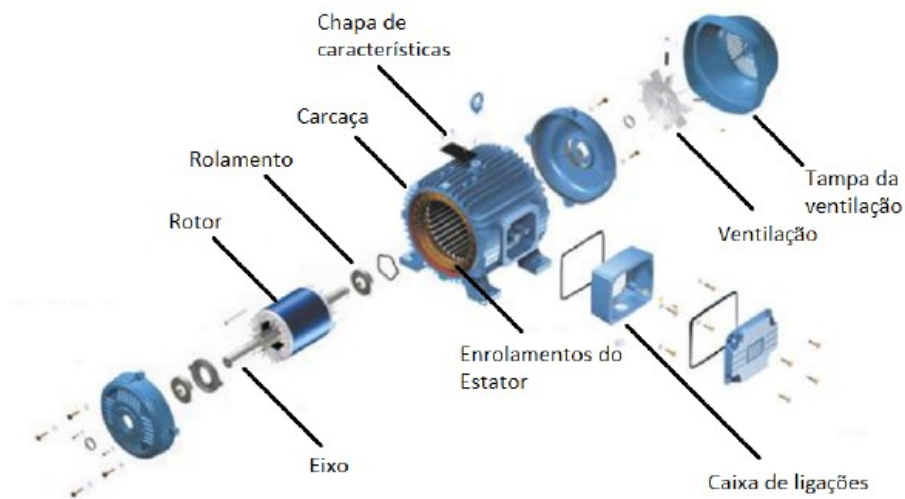


Figura 2.1 - Componentes de um MIT [17].

O estator é essencialmente formado por um núcleo cilíndrico de aço elétrico laminado, sendo este constituído por um determinado número de cavas. Nestas estão alojados os três conjuntos de bobinas desfasadas 120° , na qual, cada grupo irá estar ligado a uma fase diferente das três que compõem o sistema trifásico [1], [9].

Relativamente ao rotor, este é colocado no interior do estator, onde é apoiado no veio, através de rolamentos fixos nos extremos, permitindo a rotação do mesmo. Este divide-se em duas categorias: o rotor bobinado e o rotor em gaiola de esquilo (Figura 2.2). O rotor bobinado é aquele em que são colocados enrolamentos nas suas ranhuras, sendo estes ligados a anéis coletores, posicionados no veio do rotor. O rotor em gaiola de esquilo é composto por barras condutoras colocadas nas ranhuras, ligadas entre si em curto-circuito.



(a)



(b)

Figura 2.2 - Rotor rebobinado (a) e rotor em gaiola de esquilo (b) [17].

Atualmente este motor (de rotor em gaiola de esquilo) é o mais utilizado pelos fabricantes, dada a sua robustez, baixo preço, manutenção reduzida e melhor arranque [10].

Os rotores de gaiola de esquilo são normalmente fundidos, onde o metal condutor (alumínio) é inicialmente derretido e depois vertido para as cavas do rotor, até solidificar num processo de arrefecimento, dando origem às chamadas barras em curto-circuito. Estes, apesar de apresentarem uma grande durabilidade, apresentam também uma difícil reparação devido ao seu processo de fabrico [1], [9], [10].

2.1.2 Princípio de funcionamento de um MIT

Num MIT, existindo um conjunto de três enrolamentos estacionários e desfasados de 120° no estator, ao serem percorridos por correntes trifásicas (desfasadas de 120° no tempo), dão origem a um campo girante de distribuição sinusoidal no espaço. Este campo circula com velocidade angular ω , no sentido das bobines de corrente mais adiantada para as de corrente mais atrasada, tendo o seu máximo espacial sob o eixo de cada bobine, quando a corrente da mesma é máxima (Figura 2.3) [11].

$$i_1 = I_M \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$i_2 = I_M \cdot \cos(\omega t - \pi) \quad (2)$$

$$i_3 = I_M \cdot \cos(\omega t + \pi) \quad (3)$$

$$H_{Tot}(\alpha, t) = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{N_M \cdot I_M}{\delta} \right) \cdot \sin(\alpha + \omega t) \quad (4)$$

Tabela 2.1 - Simbologia referente às equações 1 a 4.

i_1, i_2, i_3	Corrente nas fases 1, 2 e 3
I_M	Corrente máxima
ω	Velocidade angular
t	Tempo
H_{Tot}	Campo total
α	Posição angular
N_M	Metade do número de espiras
δ	Espessura do entreferro

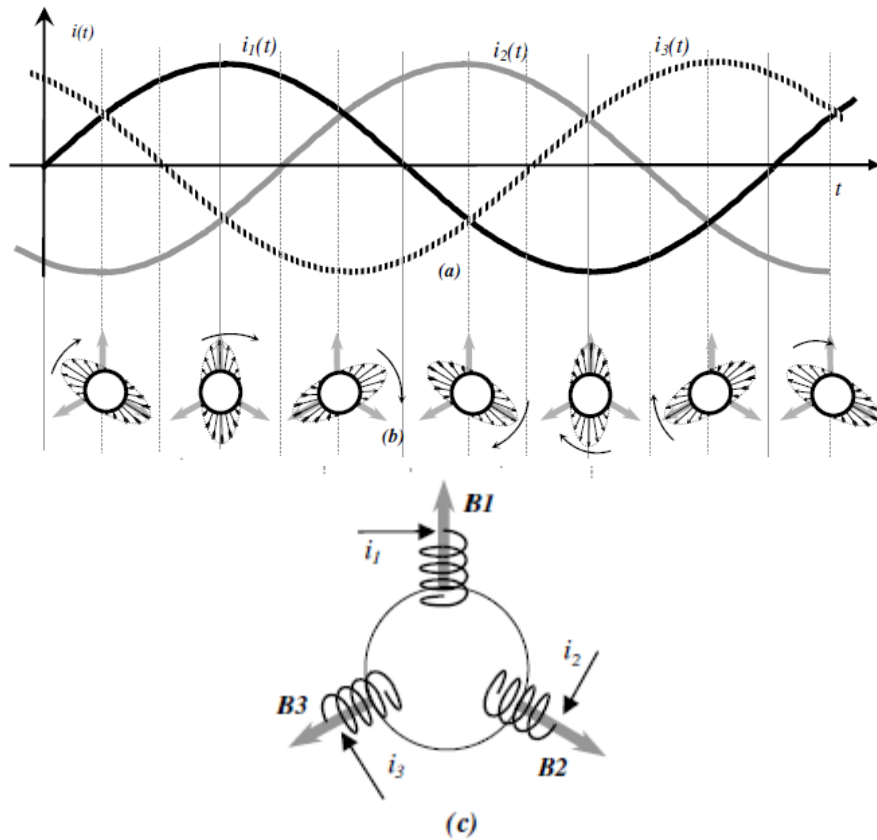


Figura 2.3 - Campo girante provocado pelas correntes nos enrolamentos fixos do estator [11]. Evolução temporal simultânea das três correntes trifásicas (a); Evolução temporal da posição do campo girante em relação aos eixos das três bobinas, concertada com a evolução das correntes (b); Identificação da posição dos três eixos (c).

O campo girante do estator, ao passar pelo rotor, através do entreferro, faz com que cada circuito rotórico seja influenciado por um campo variável no tempo. Pela lei da indução, esta situação origina o aparecimento de forças eletromotrizes (f.e.m.) nos circuitos do rotor que, ao estarem curto-circuitados, dão origem à circulação de correntes rotóricas [11]. Estas surgem através da indução, dando origem ao nome de motor de indução.

Sendo ω_s a velocidade do campo girante em relação às bobinas estacionárias, Ω a velocidade do rotor, e ω_r a velocidade do campo girante em relação às bobinas do rotor, temos que (Figura 2.4, equação (5)):

$$\omega_s = \Omega + \omega_r \quad (5)$$

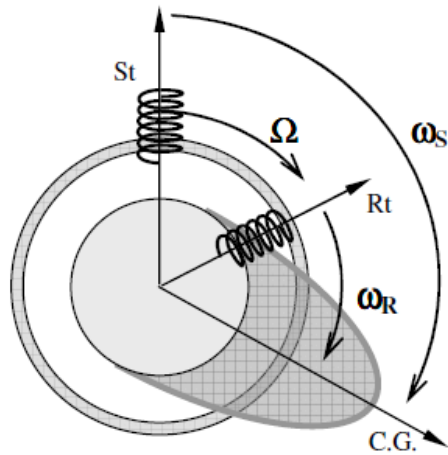


Figura 2.4 - Representação esquemática das várias velocidades de rotação [11].

Caso o rotor gire à velocidade de sincronismo, $\Omega = \omega_s$, implica que o campo girante do rotor se encontre estático relativamente aos circuitos rotóricos, o que se traduz na inexistência de correntes induzidas no mesmo, e consequentemente um binário nulo. Assim, a velocidade que o rotor atinge é sempre inferior à velocidade do campo girante, definindo-se este motor como assíncrono. Caso exista um aumento da carga, há um atraso maior do rotor em relação ao campo girante, conduzindo a um aumento das correntes induzidas e de modo a aumentar o binário desenvolvido [10], [11].

A velocidade síncrona do motor (N_s) é igual à velocidade do campo magnético girante, a qual depende da frequência de alimentação da rede f e do número de pares de pólos (p) [1]:

$$N_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \text{ [RPM]} \quad (6)$$

Sendo o escorregamento s , a relação entre os dois campos girantes (rotor e estator):

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (7)$$

A velocidade mecânica do rotor é dada por [1]:

$$N = (1 - s) \cdot N_s \text{ [RPM]} \quad (8)$$

2.2 Avarias em Motores de Indução Trifásicos

As avarias num motor de indução trifásico podem ser divididas em dois grandes grupos: as avarias mecânicas e as avarias elétricas. Relativamente às avarias elétricas, estas podem estar presentes quer no rotor, quer no estator, enquanto que, as avarias mecânicas podem surgir no rotor, nas chumaceiras ou nos rolamentos.

São vários os estudos realizados sobre a distribuição estatística das avarias nos MITs, nos quais se verifica uma ligeira discrepância de valores percentuais de estudo para estudo. No entanto, o estudo do EPRI (*Electric Power Research Institute*), as avarias nos rolamentos, no estator e no rotor são aquelas que apresentam maiores valores percentuais nos estudos analisados, como se apresenta na Figura 2.5 [12]–[14].

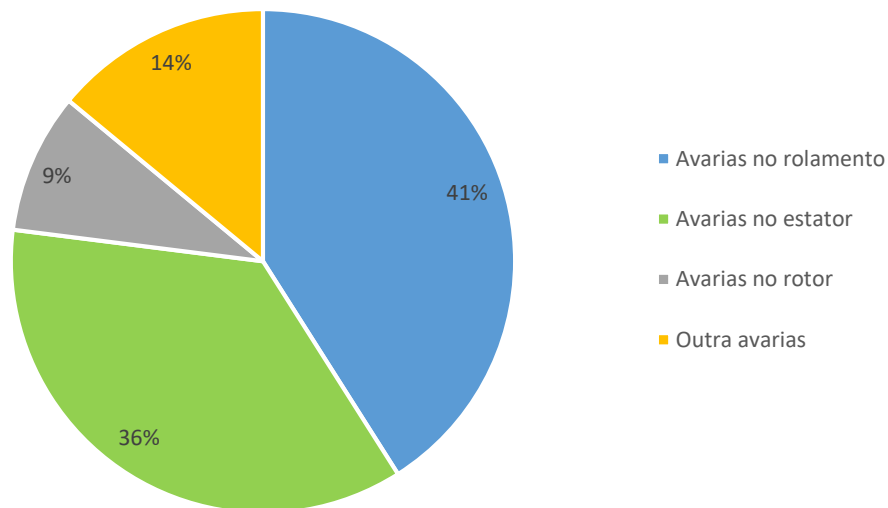


Figura 2.5 - Distribuição das avarias num MIT segundo o EPRI (Adaptado de [12]).

2.2.1 Avarias elétricas

2.2.1.1 Curto-circuito nos enrolamentos

O estator é um dos componentes chave dos MITs. É aqui que é criado o campo magnético girante, o qual possibilita a rotação do rotor. Este é constituído por elementos fundamentais, como os enrolamentos e as cavas, onde são encaixados os enrolamentos. Estima-se que cerca de 30% a 40% das avarias nos motores de indução trifásicos têm origem nos enrolamentos do estator do motor [15].

Relativamente às avarias elétricas no estator, estas podem ser divididas em cinco tipos, tal como se apresenta na Figura 2.6 [16]:

- Curto-circuito entre espiras;
- Curto-circuito entre bobines;
- Circuito aberto;
- Curto-circuito entre fases;
- Enrolamento com ligação à terra.

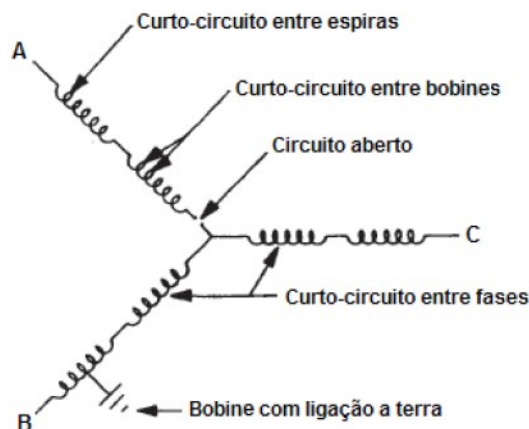


Figura 2.6 - Diferentes tipos de curto-circuitos no estator (Adaptado de [16]).

Todas estas avarias partilham a mesma causa, a deterioração do isolamento. As grandes variações de temperatura a que o isolamento está sujeito é considerada a principal causa responsável pela deterioração deste material. Estima-se que, para um aumento de cada 10°C acima da temperatura normal de funcionamento da máquina, a vida útil do isolamento poderá ser reduzida para metade. É importante realçar que, um motor é projetado para trabalhar a uma determinada temperatura, e que um aumento da mesma é por si só, um indicador de avaria. Este aumento, pode ser provocado pelos seguintes fatores [16]–[19]:

- **Excesso de carga:** os motores são projetados para uma determinada potência. Um excesso de carga provoca um aumento de corrente nas bobinas do estator, refletindo-se num aumento da temperatura;
- **Obstrução da ventilação do motor:** o calor existente no motor é dissipado por condução, convecção e radiação. Uma obstrução do fluxo de ar que transporta o calor dissipado pela máquina, irá originar um aumento da temperatura do motor.
- **Flutuações na tensão de alimentação:** estas perturbações poderão causar um aumento de corrente, levando por sua vez, a um aumento da temperatura da máquina;
- **Desequilíbrios de tensão entre fases:** este tipo de desequilíbrios causa normalmente um grande aumento de corrente. Estima-se que, para um desequilíbrio de 3,5% na tensão entre fases, pode haver um aumento de 25% da temperatura na fase de maior corrente;
- **Tipo de arranque:** o tipo de arranque tem uma grande influência no valor e duração de corrente que atravessa os enrolamentos estatóricos na fase de arranque. Arranques consecutivos em motores não dimensionados para tal, pode levar a um aumento de temperatura.

2.2.1.2 Barras quebradas

As avarias no rotor representam cerca de 9% das avarias de um MIT. As barras quebradas (Figura 2.7), são a principal causa de avarias num rotor, totalizando 51% das avarias nesse elemento, normalmente causadas por anomalias no processo de fabrico [17], [20].

As barras quebradas do rotor podem agravar-se devido a fatores térmicos, magnéticos, dinâmicos, mecânicos e ambientais. Relativamente aos fatores térmicos, estes estão associados a grandes variações de temperatura, geralmente causadas por excesso de carga ou devido à distribuição não uniforme consequente das irregularidades no material. No que diz respeito aos fatores magnéticos, estes ocorrem pelas vibrações eletromagnéticas ou forças magnéticas assimétricas, enquanto que os fatores dinâmicos se devem ao binário axial ou à força centrífuga. Por último, os fatores mecânicos e ambientais ocorrem devido à degradação de determinadas partes da máquina pela utilização de produtos químicos e/ou humidade existente nos locais onde estão instalados os equipamentos [21].

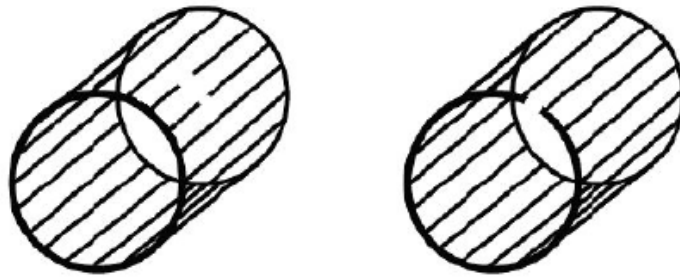


Figura 2.7 - Fratura de anéis e barras no rotor [17].

A partir do momento em que o rotor contém uma pequena fratura, até ocorrer a avaria mais grave, a sequência de acontecimentos que pode acontecer é a seguinte [18]:

1. A temperatura irá aumentar em redor da fratura da barra quebrada, agravando consequentemente o tamanho da fratura;
2. Após a fratura total da barra, surge um arco elétrico na mesma, podendo causar danos no núcleo do rotor;
3. As barras adjacentes, que constituem a barra quebrada, começam a suportar a sua corrente, desgastando as barras sem anomalias. Consequentemente, esta situação traduz-se na fadiga deste material e num possível desenvolvimento de fraturas noutras barras.

Caso esta avaria não seja detetada atempadamente, poderão alastrar-se outros danos em todo o rotor, bem como noutros componentes do motor, como é o caso dos enrolamentos.

Adicionalmente, esta avaria poderá provocar uma assimetria no rotor, influenciando o binário do motor, a sua temperatura e um desequilíbrio nas correntes. Poderá levar ainda a uma diminuição do binário e ao aparecimento de vibrações e ruído, ou até mesmo de excentricidades [12], [16].

2.2.2 Avarias mecânicas

2.2.2.1 Rolamentos danificados

Na lista dos componentes de maior importância de um MIT destacam-se os rolamentos, sendo estes responsáveis por cerca de 41% de avarias de um MIT, uma vez que são considerados materiais de rápido desgaste [22].

Um rolamento é constituído por dois anéis (interior e exterior) que delimitam uma “gaiola”, devidamente lubrificada, onde estão as esferas ou rolos cilíndricos (Figura 2.8) [2].

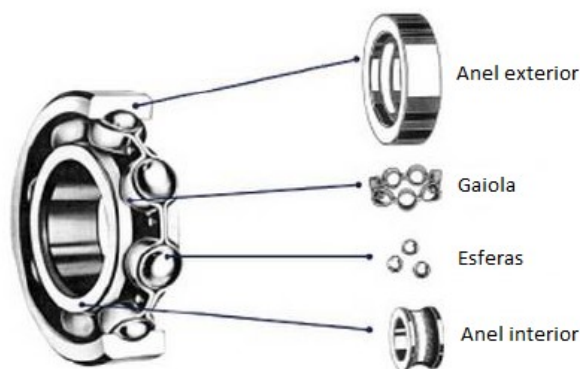


Figura 2.8- Estrutura de um rolamento de esferas (Adaptado [9]).

A função do rolamento consiste em sustentar o veio da máquina de forma a suportar a rotação do rotor. A maioria dos rolamentos em instalações industriais funcionam sobre condições não ideais, estando sujeitos a fadiga devido a vibrações mecânicas, excesso de carga, movimentos bruscos, desalinhamentos do eixo, contaminações, corrosões, má lubrificação e ainda por estarem em instalações inadequadas. É de salientar que estas más condições são responsáveis por 90% das avarias que incidem num rolamento, nomeadamente a má lubrificação, aumentando assim o atrito entre as esferas, podendo também aumentar consideravelmente a temperatura do rolamento. Consequentemente esta situação irá acelerar a deterioração do lubrificante.

Este tipo de avarias resulta numa alteração do funcionamento da máquina, surgindo o aparecimento de vibrações mecânicas, ruídos, binários resistivos, perdas de rendimento e aumentos de temperatura [2], [12], [18].

2.2.2.2 Desalinhamento em veios acoplados

Este tipo de avaria ocorre quando se acoplam duas máquinas a partir dos seus veios, ou uma máquina e um veio de uma carga, observando-se entre eles uma não linearidade nas linhas de centro de giro [10].

O desalinhamento do eixo do motor é atualmente referido como sendo uma das principais causas de prejuízo das indústrias, reduzindo substancialmente o período de vida de uma máquina.

Um correto alinhamento do eixo, além de reduzir as forças axiais e radiais, aumenta a durabilidade do motor, pois mantém a estabilidade do rotor durante a sua operação [17], [23].

Devido aos desalinhamentos no veio, são os componentes rotativo (rotor e rolamentos) que sofrem um maior desgaste, afetando o comportamento dinâmico do motor [23], [24].

Existem três tipos de desalinhamentos como se apresenta na Figura 2.9: paralelo, angular e combinado. Dependendo do seu tipo, o fenómeno de desalinhamento pode produzir e/ou aumentar as vibrações em diferentes frequências, afetando diretamente as correntes do estator, dando assim origem a novas harmónicas no seu espetro [23].

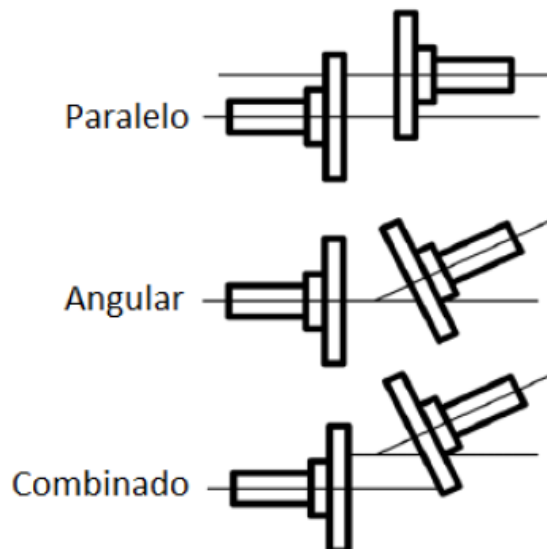


Figura 2.9 - Tipos de desalinhamento em veios (Adaptado [23]).

Salienta-se que a existência de um alinhamento perfeito é muito difícil, quanto muito este pode existir no início, quando se efetua o acoplamento. Contudo, com o funcionamento da maquinaria torna-se impossível de manter o alinhamento, devido a vários efeitos, nomeadamente os que incluem o movimento rotativo em si e o aumento da temperatura na zona de acoplamento, assim como noutras partes do motor. Sendo impossível de manter este alinhamento, o ideal é usar um acoplamento flexível que acomode um pequeno desalinhamento existente entre os veios.

Como foi referido anteriormente, esta avaria tem consequências diretas no funcionamento do rotor e no estator, tendo como consequência, a criação de excentricidades no entreferro [25].

2.2.2.3 Excentricidades no entreferro

De modo a reduzir a relutância magnética do motor e de forma a aumentar o coeficiente de indução, o fluxo magnético e o rendimento da máquina são projetados entreferros, cada vez mais pequenos, podendo variar entre os 0,4 mm e os 4 mm [17], [18].

Por esta razão é cada vez mais importante garantir o perfeito alinhamento entre o estator e rotor, no entanto, esta perfeição é atualmente impossível de atingir, havendo uma tolerância de 10% na excentricidade do entreferro. Os fabricantes tentam reduzir este efeito, de modo a diminuir a vibração, o ruído e a degradação do material. Este desalinhamento dá origem a entreferros assimétricos existentes entre o estator e o rotor [25].

Ao alterar a espessura do entreferro, a existência de excentricidades leva a um desequilíbrio na distribuição do fluxo magnético no entreferro e ao surgimento de uma sobrecarga mecânica sobre o veio do motor, que em situações extremas poderá levar à colisão entre o estator e o rotor, e consequentemente à destruição do motor [26], [27].

Este tipo de avaria é sem dúvida uma das que mais preocupa tanto os fabricantes, como os utilizadores, devido à frequência com que ocorre e aos danos que pode provocar. É de referir que, 80% das avarias mecânicas de um MIT levam à existência de excentricidades [28].

Existem dois tipos de excentricidades (Figura 2.10) [24], [26]:

- **Excentricidade estática** – O centro do estator e do rotor estão desalinhados, contudo o rotor mantém-se a girar em torno do seu eixo, sendo que a alteração na espessura do entreferro permanece igual;
- **Excentricidade dinâmica** – Há um desequilíbrio na carga ou uma torção no eixo, pelo que o centro do rotor gira em torno do centro geométrico do estator, e consequentemente provoca uma variação física e temporal da espessura do entreferro.

Na maior parte dos casos, as duas situações acima descritas ocorrem em simultâneo.

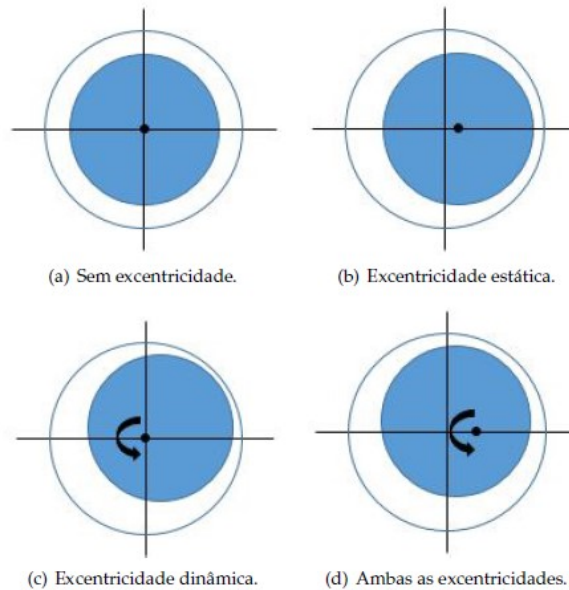


Figura 2.10 - Vários tipos de excentricidades no entreferro [11].

2.3 Técnicas de deteção de avarias

Devido à elevada comercialização do motor de indução trifásico à escala mundial, existe uma preocupação crescente relativamente à sua eficiência e manutenção [2], [3].

No contexto da manutenção preventiva, é de realçar o grande avanço no desenvolvimento de métodos de análise, monitorização e diagnóstico destas máquinas. Estas técnicas podem dividir-se em duas categorias [5], [29]:

- *Offline*: Métodos que necessitam que o motor esteja completamente desligado do circuito de alimentação. São geralmente consideradas como técnicas invasivas;
- *Online*: Métodos de diagnóstico realizados em tempo real com o motor em pleno funcionamento. São geralmente consideradas como técnicas não invasivas.

Dado o panorama industrial, onde muitas vezes é necessário manter uma operação contínua, são os métodos *online*, os mais atrativos, pelo facto de [5], [29]:

- Não ser necessária a paragem da máquina;
- As avarias poderem ser detetadas numa fase inicial;

- Possibilidade de monitorização em tempo real, sem necessidade da presença de um técnico no local, por vezes em lugares de difícil acesso e/ou com atmosferas perigosas.

2.3.1 Técnicas *offline*

As técnicas *offline* são aplicadas apenas com a máquina desconetada da rede de alimentação, o que implica a paragem forçada do MIT, podendo assim causar prejuízos financeiros às empresas.

Através destas técnicas, normalmente invasivas, não é possível diagnosticar atempadamente uma determinada avaria, podendo ser necessário a desmontagem completa do equipamento gerando consequentemente um aumento do tempo de manutenção e de custos associados [29].

As principais técnicas utilizadas são: o teste de isolamento, a análise da resistência dos enrolamentos e a análise dos circuitos do motor.

2.3.1.1 Teste de isolamento

Este teste é realizado com recurso a um Mega ohmímetro. Este aparelho é capaz de gerar uma tensão superior a 500 V, de modo a medir a resistência do isolamento das fases do motor em relação à terra (carcaça do motor), sendo assim possível realizar uma análise ao grau de isolamento da máquina. O mesmo pode ser usado também para medir a resistência entre as fases [30], [31].

Por exemplo, num motor com uma tensão de alimentação entre os 230 V e os 400 V, ao realizar o teste do isolamento com 500 V DC ou 1000 V DC, a resistência mínima aconselhável para se colocar o motor em funcionamento é entre 1 M Ω e 10 M Ω ¹. No entanto, para motores novos, espera-se um valor a rondar os Giga ohms [30].

2.3.1.2 Análise da resistência dos enrolamentos

Através de um convencional multímetro/ohmímetro, é possível medir a resistência dos enrolamentos referentes a cada fase. Os grupos de enrolamentos para todas as fases são sempre

¹ Os níveis mínimos aconselháveis diferem consoante a potência do motor, tipo de motor, localização, etc. Não existe um valor fixo exigido, os mesmos por vezes são definidos pelas empresas.

iguais, pois contêm o mesmo número de fios, a mesma secção e o mesmo número de espiras. Caso a resistência das fases seja diferente, significa que estamos perante um curto-circuito entre espiras.

Quando isso acontece, a resistência da fase (ou fases) com avaria, será inferior às restantes, dando origem a um aumento de corrente e conseqüentemente a um aumento de temperatura, acelerando o processo de deterioração do isolamento. Trata-se de um processo que rapidamente pode levar à destruição do enrolamento [31].

2.3.1.3 Análise dos circuitos do motor

Aquando realizados os testes acima referidos, poderá ser efetuado um teste mais pormenorizado, onde são analisados os vários circuitos internos da bobinagem do estator e do rotor (caso seja rotor bobinado), de forma a localizar a eventual avaria do motor. Estes tipos de testes são geralmente efetuados por um técnico especializado.

Após estes testes, se a avaria estiver localizada na bobinagem do motor, o mesmo será submetido a uma rebobinagem total [31].

2.3.2 Técnicas *online*

As técnicas *online* aplicadas nos MITs, têm como principal objetivo a monitorização e análise do motor, sem que seja necessária uma paragem no seu funcionamento, não causando desta forma prejuízos às empresas com a paragem da máquina [29].

Através destas técnicas é possível diagnosticar atempadamente uma determinada avaria, evitando uma reparação mais onerosa da máquina, ou em casos extremos, a destruição da mesma. As empresas conseguem assim reduzir o tempo de paragem de produção, bem como, reduzir os custos de manutenção [7].

O princípio de funcionamento destas técnicas baseia-se na análise de sinais recolhidos através de sensores inseridos, havendo posteriormente uma comparação dos valores obtidos, em relação aos valores nominais da máquina, fornecidos pelo fabricante, para um normal funcionamento do motor [29], [32].

De seguida apresentam-se alguns destes métodos, tais como: análise acústica, análise de vibrações, análise da corrente consumida por fase, termografia e assinatura de corrente (*Motor Current Signature Analysis - MCSA*).

2.3.2.1 Análise acústica

Esta é considerada a análise mais simples, realizada apenas através da audição humana, ou pela medição de pressão sonora emitida pelo funcionamento da máquina. Caso o motor emita ruídos anormais, poderá significar avarias nos elementos rolantes da máquina ou até mesmo problemas elétricos. No entanto, através deste método de reconhecimento de avarias, a sua descoberta poderá ser tardia, pelo facto de já poderem existir elementos danificados, levando assim a custos de reparação mais dispendiosos.

A análise acústica tem uma grande desvantagem, pois, para além de se desconhecer qual a avaria em concreto, a mesma pode-se tornar difícil de se detetar, quando a máquina está localizada em ambientes muito ruidosos [32].

2.3.2.2 Análise de vibrações

Trata-se de um método mais evoluído e mais eficaz relativamente ao método anteriormente descrito. É realizado através de aparelhagem especial, que recorre a sensores na máquina, de modo a medir a frequência vibratória.

Através desta técnica de monitorização, é possível detetar a presença de avarias mecânicas no motor, como é o caso de rolamentos danificados, desalinhamentos, excentricidades, chumaceiras ou rotor danificado, ou até mesmo avarias elétricas.

Este método poderá ter como desvantagem as vibrações existentes num meio industrial, dificultando a deteção precoce de avarias. Em comparação com a análise acústica, através da análise de vibrações, são obtidos dados com um maior detalhe, o que facilita a tomada de decisão de um técnico no diagnóstico de avarias [10], [32].

2.3.2.3 Análise da corrente consumida por fase

Com o motor em pleno funcionamento, é possível observar a corrente consumida em cada uma das três fases. Num motor saudável, as fases encontram-se equilibradas, pelo que as correntes devem apresentar valores semelhantes.

No caso de existir um desequilíbrio de corrente entre fases ou no caso de haver uma corrente superior à esperada, significa que existe uma avaria no MIT, cuja causa poderá estar relacionada com carga excessiva, curto-circuito no estator, avarias no rotor, entre outras.

Realça-se que esta análise não permite a identificação exata de uma avaria, permitindo apenas constatar a existência de avaria no motor [33].

2.3.2.4 Termografia

A análise termográfica é realizada através da captação de radiação infravermelha emitida pelos motores. Através desta técnica, é possível obter um mapeamento técnico do motor, de forma a distinguir as diferentes temperaturas de funcionamento, nas diferentes regiões do MIT. As imagens obtidas são codificadas com diferentes cores, caracterizando assim as temperaturas na máquina.

Nas zonas em que a temperatura se encontra mais elevada, existe uma maior probabilidade de avaria, sendo possível detetar a fadiga/danificação nos rolamentos, barras quebradas no rotor, passagem de correntes no estator, etc.

Este método de monitorização tem como grande vantagem a facilidade em encontrar o local exato de possíveis avarias no motor, visto que grande parte das mesmas refletem em aquecimento da máquina [7], [10], [32].

2.3.2.5 Análise da assinatura de corrente (MCSA)

Os métodos anteriores apresentam algumas limitações, como a não identificação de avarias específicas, o que por vezes, leva à necessidade de se utilizarem vários aparelhos para que se possa chegar a alguma conclusão. Realça-se também que alguns destes métodos podem não conseguir monitorizar a máquina durante o seu funcionamento [18].

O método denominado de análise da assinatura de corrente de um motor, (*Motor Current Signature Analysis* - MCSA), pretende colmatar os problemas apresentados pelos métodos anteriores. Trata-se de um método *online*, que possibilita a monitorização de um motor durante o seu funcionamento, de forma não invasiva baseando-se apenas na análise do sinal de corrente do motor [4].

Este método tem como vantagens [4], [20], [34]:

- Monitorização em tempo real;
- Monitorização não invasiva;
- Sensibilidade a diferentes tipos de avarias;
- Rapidez no diagnóstico;
- Vasta gama de potências.

Através da análise da assinatura de corrente, é possível encontrar as avarias mais frequentes num MIT [12], [22]. A partir do sinal de corrente, é analisada a frequência e a magnitude da mesma, obtendo-se os chamados padrões de assinatura da corrente. São

identificadas as várias harmônicas por recurso da transformada rápida de *Fourier*, FFT (*Fast Fourier Transform*), associando as mesmas às possíveis avarias. A existência de harmônicas diferentes da harmônica fundamental, significa que o motor se encontra com alguma avaria [17], [27].

Na Tabela 2.2 são apresentadas as expressões das harmônicas laterais, que surgem para os vários tipos de avaria.

Tabela 2.2 - Harmônicas das respectivas avarias [4], [18], [20], [34].

Avarias	Frequências	Simbologia
Barras Quebradas	$f_{Barras\ Quebradas} = (1 \pm 2k_b s) f_0 [Hz]$	<ul style="list-style-type: none"> • f_0 - Frequência de alimentação • k_b - Número inteiro positivo • s - Escorregamento • n_1 e n_2 - Números inteiros positivos • n_{ds} - Número inteiro positivo • f_r - Velocidade do rotor em frequência • n_d - Ordem da excentricidade • p - Pares de pólos • n_{ws} - Categoria da excentricidade • k - Número inteiro positivo • R - Número de barras do rotor • n_{cc} - Número inteiro positivo
Rolamentos	$f_{rolamento} = (0,4 \cdot n_1 + 0,6 \cdot n_2) \cdot (1 - s) \cdot f_0 [Hz]$	
Desalinhamento	$f_{Desalinhamento} = (f_0 \pm n_{ds} \cdot f_r) [Hz]$	
Excentricidades	$f_{excentricidade} = \left[(R \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] \cdot f_0 [Hz]$	
Curto-circuitos	$f_{Curto-circuito} = \left[\left(\frac{n_{cc}}{p} (1-s) \pm k \right) \right] \cdot f_0 [Hz]$	

3 Estado de arte

Como se apresentou no capítulo anterior, são várias as técnicas de diagnóstico e deteção de avarias em motores elétricos, com especial foco no uso de técnicas não invasivas.

Porém, com a exceção do MCSA, nenhum dos métodos descritos anteriormente, quando utilizado individualmente é capaz de facilitar a identificação inequívoca de eventuais avarias existentes num MIT.

Como já referido, o presente trabalho resulta do estabelecimento de um laboratório para deteção de avarias, em que a partir de um conjunto de leituras provenientes de vários sensores, seja possível a deteção e diagnóstico de avarias. Adicionalmente, o utilizador terá a possibilidade de provocar avarias, de modo a analisar a influência das mesmas no comportamento da máquina.

De acordo com os objetivos desta dissertação, será feita de seguida uma revisão bibliográfica, quer nos panoramas de investigação quer de mercado, no âmbito do estabelecimento de laboratórios para deteção e diagnóstico de avarias em MIT, para uso profissional e/ou de apoio ao ensino.

3.1 Resultados de investigação

Embora existam inúmeros estudos acerca de avarias em MITs e sobre os vários métodos de deteção das mesmas, contudo são poucos os trabalhos que descrevem a implementação de laboratórios e bancadas para deteção de avarias, na vertente do ensino.

É de realçar a dissertação de mestrado do Eng. Rui Araújo, do departamento de mecânica, da Faculdade de Ciências e Tecnologias, da Universidade Nova de Lisboa, que tem como tema o

“Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução”. Na referida dissertação foi projetada uma bancada para ensaios de MIT, através da implementação de instrumentos e sensores não invasivos, de modo a obter vários parâmetros durante o funcionamento de um motor, para diagnóstico de avarias no mesmo. Para tal, este projeto assentou no diagnóstico de avarias através da observação da vibração e do ruído da máquina. No entanto este trabalho baseia-se essencialmente na deteção de avarias mecânicas.

Com este trabalho foi possível a deteção de avarias nos rolamentos, bem como desbalanceamentos do motor em vazio e com carga acoplada, através de um motor de maior potência ou de um freio de cinta localizado no veio de ataque do motor [32].

Adicionalmente, é importante referir a dissertação de mestrado do Eng. Renato Assunção, realizada no departamento de Engenharia Eletrotécnica, da Universidade Nova de Lisboa, sobre o “Ensino de deteção de Avarias em Motores de Indução”. Este trabalho apresenta uma forte componente didática, na medida em que permite emular avarias pré-programadas em motores saudáveis, de modo aos alunos visualizarem o seu funcionamento, assim como um portal com documentação e exercícios didáticos relacionados com o tema [18].

No âmbito de deteção e diagnóstico de avarias em MITs, destacam-se também as dissertações de mestrado dos Engenheiros Filipe Dionísio e André Águas, onde através do relé de proteção digital desenvolvido pela EFACEC (TPU M220), foram desenvolvidos sistemas de tratamento de dados, de modo a diagnosticar diversas avarias nestas máquinas [5], [17].

3.2 Produtos de mercado

No panorama do mercado existe uma grande gama de aparelhagem de medida (Mega ohmímetro, multímetro, sensores de vibração, sensores de temperatura, etc.), como as referidas anteriormente na secção 2.3 da presente dissertação. Existem também outros aparelhos de medidas, com um maior conjunto de funcionalidades como é o caso de:

- **Osciloscópio com análise espectral (FFT)**

A utilização de um osciloscópio com capacidade de realizar uma análise espectral dos sinais (FFT), por parte de um técnico especializado, facilita na tomada de decisões sobre a deteção e diagnóstico de avarias em MITs.

- ***SKF Dynamic Motor Analyser – EXP4000***

Este equipamento (Figura 3.1) pode ser ligado a um computador portátil, de forma a analisar os dados recolhidos. Através do *software* deste aparelho, podemos ter acesso a parâmetros como a qualidade de energia, rendimento, corrente, espectro de frequências, binário, vibrações, eficiência, etc. Os dados recolhidos por este dispositivo podem ser capturados e armazenados para registo de manutenção, análise de tendências e relatórios. O mesmo exibe graficamente diagramas de fasores, correntes e tensões trifásicas, potência, etc.

Problemas como sobrecargas, ligações, desconexões, saturação de ferro, barras quebradas no rotor e defeitos nos rolamentos podem ser detetados com este aparelho, por recurso ao espectro de correntes [35].



Figura 3.1- SKF Dynamic Motor Analyser – EXP4000 [28].

- ***Fluke 438-II Power Quality and Motor Analyzer***

Este dispositivo (Figura 3.2) faz concorrência ao descrito anteriormente, na medida em que também foi concebido para analisar um motor elétrico. O *Fluke 438-II* é capaz de efetuar uma análise elétrica e mecânica sem necessidade de sensores mecânicos. Este aparelho é utilizado em motores monofásicos e trifásicos, para analisar parâmetros como tensão, corrente, potência aparente, fator de potência, distorção harmônica e desequilíbrios. Através das formas de onda da corrente e da tensão trifásica, este aparelho permite calcular o binário, velocidade, carga, campo no entreferro e a eficiência do motor [36].



Figura 3.2- Fluke 438-II Power Quality and Motor Analyzer [29].

3.3 Conclusões

Apesar de existir muito trabalho científico no que concerne à detecção e diagnóstico de avarias, existem muito poucos (quase nenhuns) dedicados a especificação de laboratórios para detecção e diagnóstico de avarias em MITs, que possam ser usadas como ferramentas de apoio ao ensino, bem como de apoio industrial através do módulo de teste.

4 Especificação do laboratório para deteção e diagnóstico de avarias

A presente dissertação tem como principal objetivo a especificação, projeto e implementação de um laboratório de deteção de avarias em motores de indução trifásicos, permitindo ao utilizador analisar a máquina em teste e provocar intencionalmente avarias durante o seu funcionamento. Neste capítulo são apresentadas as especificações gerais deste laboratório e os diferentes elementos que constituem o mesmo.

4.1 Especificações gerais

Com o intuito de tornar o laboratório mais profissional, seguro e simples possível, foi construído um quadro de comando e aquisição, para que o laboratório fosse independente de aparelhagens exteriores de arranque e de paragem das máquinas, e simultaneamente permitisse a aquisição de todos os dados.

A arquitetura do laboratório apresenta-se Figura 4.1, sendo o mesmo composto por:

- a. Bancada de suporte e simulação de avarias (base de fixação);
 - o Travão eletromagnético;
 - o Motor a testar;
- b. Unidade de controlo e medição;
- c. Módulo de teste;
 - o Quadro de comando e aquisição para recolha dos dados das máquinas em estudo e alimentação do motor;
 - o A interface para processamento e visualização dos dados.

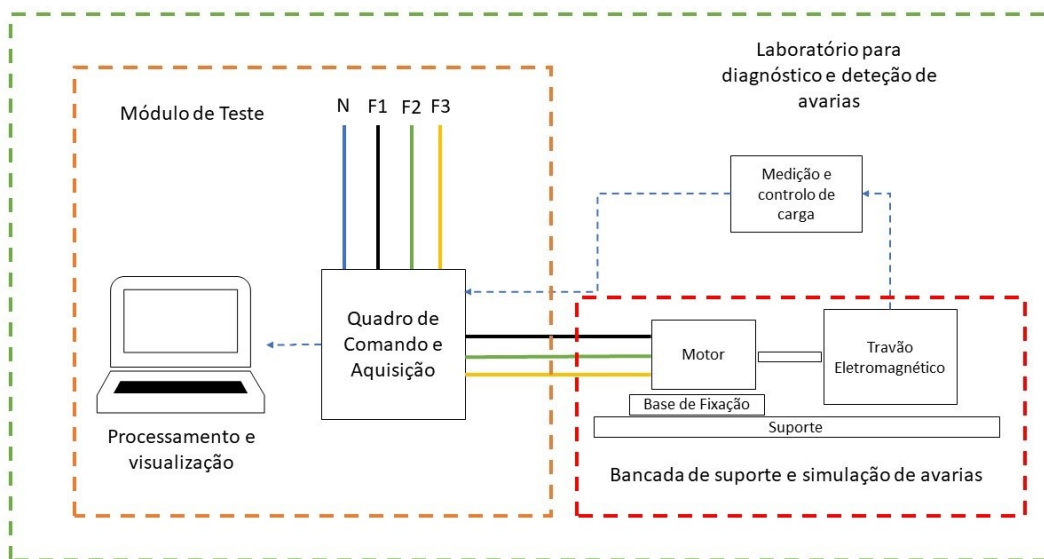


Figura 4.1 - Arquitetura do laboratório para diagnóstico e detecção de avarias.

O laboratório foi especificado para ensaiar motores com as seguintes características:

- Motores B3 (com “patas” de fixação) do tipo 90S;
- Alimentação monofásica ou trifásica;
- Corrente máxima para motores trifásicos de 18 A;
- Corrente máxima de 9 A para motores monofásicos.

O laboratório (Figura 4.2) é composto pelos seguintes elementos:

- A. Quadro de Comando e Aquisição de dados;
- B. Suporte para testes de MIT;
- C. Motor;
- D. Base de fixação sem desalinhamento;
- E. Travão eletromagnético;
- F. Unidade de controlo de carga;
- G. Unidade de medição de carga;
- H. Computador portátil;
- I. Resistências variáveis;
- J. Base de fixação para provocar desalinhamento;
- K. Pistola termográfica.

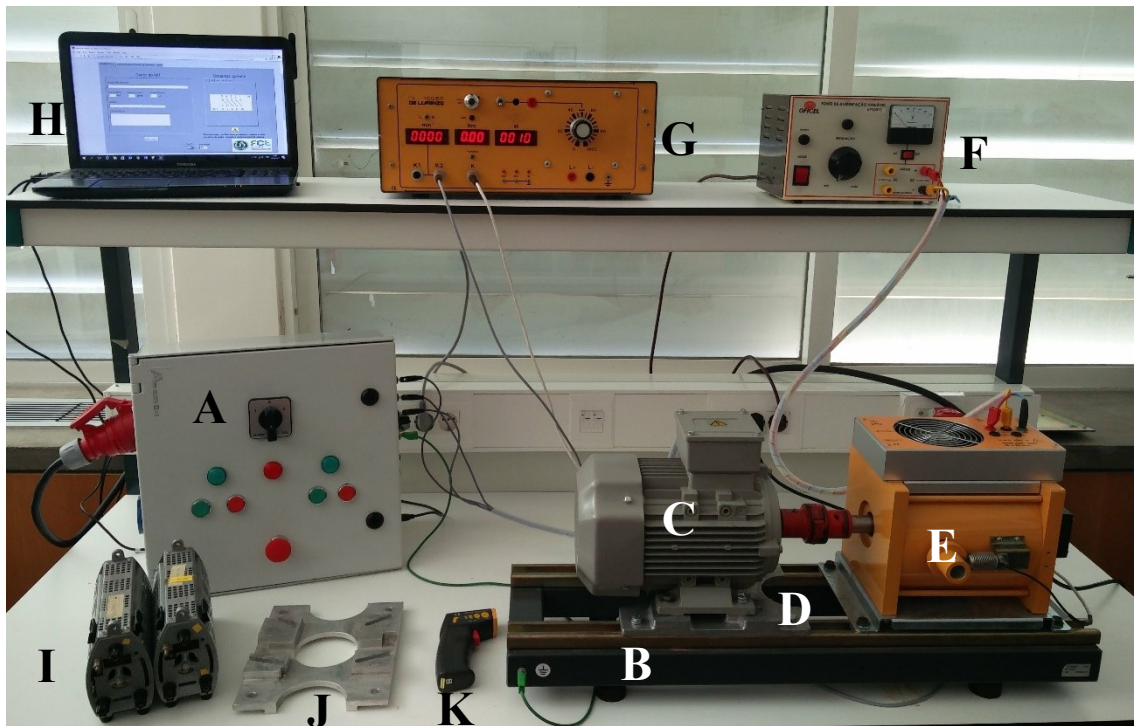


Figura 4.2- Laboratório para detecção e diagnóstico de avarias em MIT.

4.2 Módulo de teste

O módulo de teste é um armário técnico composto pelos sistemas de comando, de potência e de aquisição de dados. Este elemento é responsável pelo arranque dos motores e pelo sistema de aquisição de dados, possuindo vários sensores para um posterior processamento dos dados.

4.2.1 Sistema de comando e potência

É através deste sistema, que é realizado o arranque da máquina. Embora o foco desta dissertação seja o estudo das avarias em motores de indução trifásicos, este quadro foi projetado para efetuar também o arranque de motores monofásicos (Anexos A e B).

Este armário técnico é alimentado, através da rede a partir de um sistema trifásico ou monofásico de correntes. Caso a alimentação seja trifásica, é possível ter ligado ao quadro, os dois tipos de motor em simultâneo.

O sistema de comando é constituído por dois sistemas independentes, de modo a permitir que o utilizador possa testar motores trifásicos ou monofásicos, ou ainda os dois em simultâneo.

Na parte frontal do armário existe um conjunto de botões de pressão, destinados ao arranque e à paragem dos motores. Adicionalmente, o armário contém uma sinalização adequada, de forma a informar o utilizador se as máquinas estão desligadas (luz vermelha) ou se estas estão em funcionamento (luz verde). Para segurança do utilizador, existe também na parte frontal do armário, uma botoneira de paragem de emergência que desliga automaticamente todas as máquinas.

Relativamente às saídas de potência de cada contactor, estas foram ligadas à parte lateral direita do armário, em bornes de ligação adequados para fins didáticos, consideradas as condições de segurança e de facilidade de ligação.

4.2.2 Sensores

Após instalação dos sistemas de alimentação no quadro de comando e aquisição de modo a efetuarem o arranque e paragem da máquina, foram implementados sensores para análise e diagnóstico das avarias em motores de indução trifásicos. Este painel foi desenhado para dois tipos de sensores, os sensores fixos e sensores externos.

Os sensores fixos são os que se encontram dentro do armário e são responsáveis pela aquisição dos sinais de corrente e tensão. Foram utilizados três transdutores de correntes (LA 25-NP), um para cada fase, e três transdutores de tensão (LV 25-P), também um para cada fase, ambos da marca LEM®.

Relativamente aos sensores externos, o armário encontra-se preparado com uma ficha *Stereo*, do tipo de áudio (Figura 4.3), para que o utilizador conecte o sensor que pretende, suportando sinais analógicos, com uma tensão entre -10 V a +10 V.

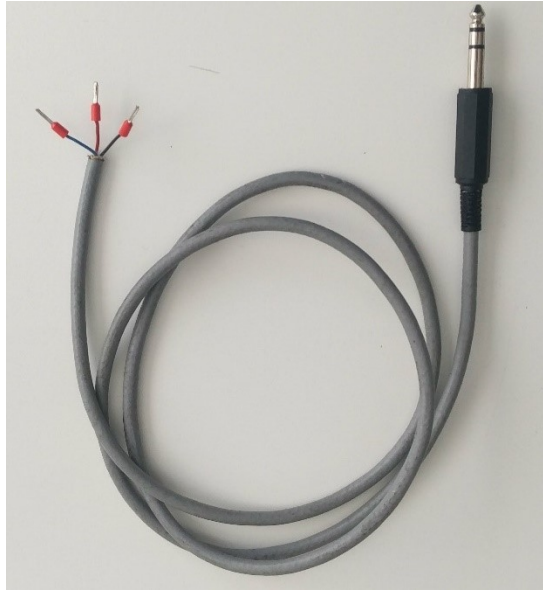


Figura 4.3 - Ficha para sensores externos.

Durante a realização deste projeto foram apenas utilizados sensores de velocidade, binário e potência mecânica, no entanto o módulo de teste encontra-se preparado para outros sensores, tais como sensores de vibração, temperatura, etc.

Para a recolha da velocidade, binário e potência mecânica foi utilizada uma unidade de medição do travão eletromagnético (Figura 4.4). Através desta é possível visualizar os valores no próprio aparelho, como transferi-los para o módulo de teste.



Figura 4.4- Unidade de medição de carga De Lorenzo.

Embora não seja um sensor que se ligue ao armário de comando e aquisição de dados, foi também utilizada no laboratório para deteção de avarias, uma pistola de leitura de temperatura, sendo que os dados terão que ser introduzidos manualmente pelo utilizador na interface.

Para que os dados fornecidos pelos sensores possam ser analisados neste painel, existe também uma placa de aquisição de dados que garante que estes são recolhidos e transferidos para o computador onde posteriormente são processados, através da interface. A placa de aquisição de dados utilizada para este efeito foi a NI USB 6008, da *National Instruments*TM.

Nesta placa de aquisição de dados, as leituras são efetuadas através das portas analógicas, contendo valores compreendidos entre os -10 V e os +10 V. A NI USB 6008 suporta oito entradas analógicas, em que seis entradas foram consideradas para os sensores de corrente e tensão e as duas restantes para os sensores externos.

4.2.3 Interface de processamento de dados

Com o intuito de realizar o processamento dos dados recolhidos pelo módulo de teste, foi desenvolvida uma interface, em ambiente de programação *labview*, da *National Instruments*TM.

Foi escolhido este método de programação, por se tratar de uma linguagem gráfica, onde através de instruções por blocos, é possível realizar um processamento de dados em tempo real, tendo disponível inúmeras opções de análise de sinais e de visualização dos mesmos.

Através desta programação é disponibilizada ao utilizador uma “ferramenta virtual”, onde de uma forma simples e intuitiva, se tem acesso a gráficos como os de um osciloscópio, com possibilidade de filtrar o que se pretende visualizar, e ainda realizar uma gravação de dados, para uma posterior análise dos mesmos.

O sistema de aquisição e processamento, é composto pelos seguintes elementos (Figura 4.5):

- Três sensores de corrente;
- Três sensores de tensão;
- Dois sensores externos;
- Uma placa de aquisição de dados;
- Um computador portátil.

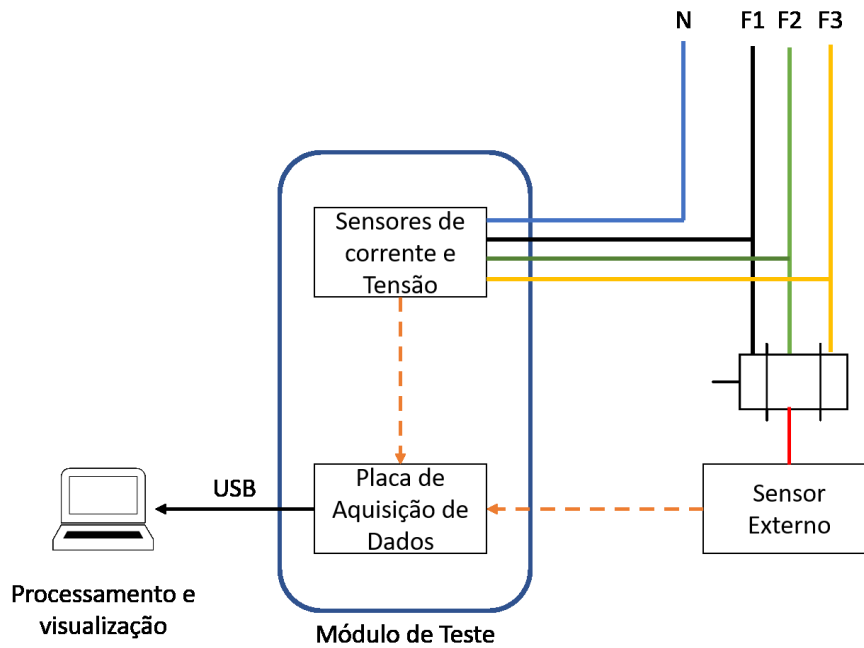


Figura 4.5 - Arquitetura do sistema de aquisição de dados.

Tendo em conta que os dados recolhidos pela placa de aquisição de dados podem variar entre -10 V e os $+10\text{ V}$, a interface encarrega-se numa primeira fase, de converter os sinais recolhidos para valores de tensão e de corrente da máquina. Relativamente ao sensor externo colocado pelo utilizador, haverá a necessidade de inserir na interface o valor multiplicativo, devido à variedade de sensores a colocar no módulo de teste.

Através desta interface, o utilizador tem acesso aos valores em tempo real da tensão, da corrente e dos sensores externos colocados, com possibilidade de visualizar o respetivo sinal ao longo do tempo, assim como o espectro dos mesmos, consoante a opção escolhida.

Para além do MCSA (método utilizado neste projeto) e da análise dos sensores externos, esta interface permite a gravação temporal de todos os dados recolhidos no motor, de modo a possibilitar que o utilizador efetue uma análise, através de outros métodos de deteção de avarias, que não os apresentados por este *software*.

4.3 Bancada de suporte e simulação de avarias num MIT

A bancada é constituída por um suporte metálico (base de fixação), no qual se encontra fixado o motor elétrico e um travão para simular uma carga no motor. O motor contém uma fixação adequada, de modo a garantir o seu alinhamento com o eixo da carga, ou caso contrário, permitir que o utilizador consiga forçar um desalinhamento, consoante o estudo pretendido.

4.3.1 Motores testados

Durante os ensaios foram utilizados cinco motores de indução trifásicos, um saudável e quatro avariados, todos da mesma marca e modelo para, posteriormente, ser efetuada a comparação dos resultados. Os motores apresentavam as seguintes características:

- Potência: 1,5 KW
- Velocidade: 2850 RPM (1 par de pólos)
- Tensão nominal: 230/400 Δ/λ V
- Corrente nominal: 5,5/3,2 Δ/λ A
- Cos φ : 0,84
- Rotor em gaiola de esquilo

O laboratório está assim equipado com cinco motores (como exemplo de motor Figura 4.6) com as seguintes características (do ponto de vista das avarias):

- Motor saudável;
- Motor com duas barras quebradas;
- Motor com três barras quebradas;
- Motor com nove barras quebradas;
- Motor com rolamentos danificados

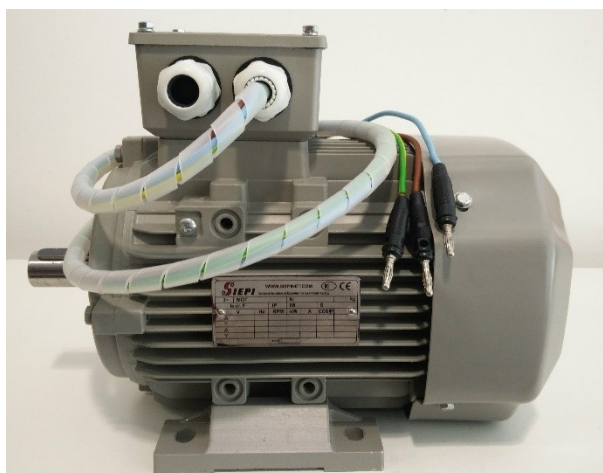


Figura 4.6 - Exemplo de motor utilizado em laboratório.

As restantes avarias (desalinhamentos, curto-circuito), foram impostas no motor saudável.

4.3.2 Base de fixação do motor

A base de fixação é um elemento da bancada que, tal como o nome indica, possibilita a fixação do motor. Este elemento garante a segurança do utilizador durante o funcionamento do motor, pois permite que o mesmo esteja sempre acoplado à carga, sem que existam deslocamentos, sendo que também reduz as vibrações da máquina.

Tendo em consideração que este laboratório, para além de efetuar a análise de MITs, permite também provocar intencionalmente avarias, foram projetados dois tipos de base de fixação (Figura 4.7):

- Base A – Após o utilizador alinhar o motor com o auxílio da assinatura de corrente, esta base garante a centralização do motor em relação à carga, evitando assim desalinhamentos entre estes dois elementos;
- Base B – Ao contrário da anterior, esta base permite impor desalinhamentos entre o motor e a carga.

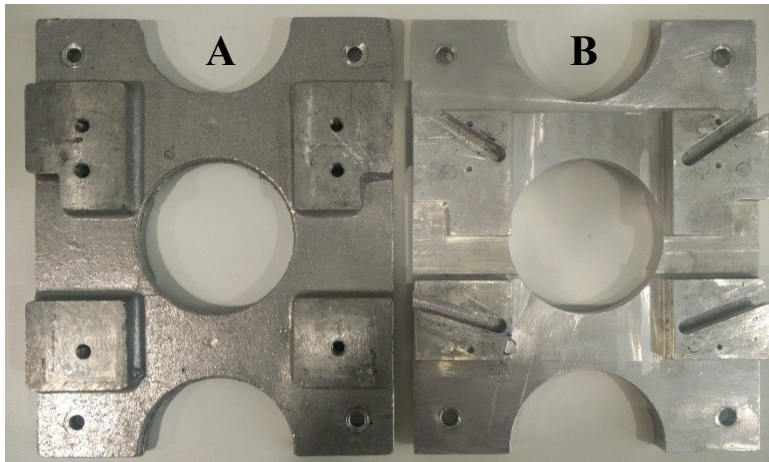


Figura 4.7 - Bases de fixação (a base B permite desalinhamentos).

4.3.3 Carga

Para efeitos de simulação da carga no motor, foi utilizado um travão eletromagnético, da marca *De Lorenzo*, preso à bancada, controlado por um sinal de 0 a 20 V DC proveniente do controlador do travão (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Travão eletromagnético De Lorenzo.

5 Aplicação experimental do laboratório

Neste capítulo é realizada uma apresentação da forma como foram provocadas/simuladas as avarias testadas e, posteriormente é efetuada uma análise dos dados recolhidos comparando-os com os resultados teóricos esperados.

5.1 Avarias provocadas

5.1.1 Barras quebradas no rotor

Com o objetivo de testar o comportamento de um motor com barras quebradas, foram intencionalmente danificados três motores, da seguinte forma:

- Rotor com duas barras quebradas;
- Rotor com três barras quebradas;
- Rotor com nove barras quebrada.

Esta avaria no rotor foi provocada com recurso a um berbequim, de modo a perfurar as barras no rotor de cada máquina (Figura 5.1).



Figura 5.1 - Rotor perfurado artificialmente.

5.1.2 Curto-circuito num enrolamento do estator

Embora o laboratório esteja preparado para testar motores com curto-circuitos provocados diretamente na bobinagem do motor, para os testes desta dissertação, esta avaria foi provocada através da introdução de duas resistências variáveis adicionais de $11\Omega/5A$ (Figura 5.2) colocadas em série com duas fases distintas do estator, onde foi sempre inserido o valor máximo. Esta simulação foi realizada no motor em estado saudável, permitindo que o mesmo seja reutilizado para outros testes.



Figura 5.2 - Resistências variáveis $12\Omega / 5A$.

5.1.3 Rolamentos danificados

Apesar de não ter sido introduzida artificialmente avarias nos rolamentos, devido à sensibilidade e importância deste elemento, esta avaria foi identificada num motor que, devido ao seu uso já não se encontrava com os rolamentos num estado completamente saudável.

5.1.4 Desalinhamento

O alinhamento dos motores em relação a uma carga é uma tarefa difícil, sendo necessário recorrer a aparelhos muito dispendiosos, o que muitas vezes é ignorado pelas empresas.

De modo a realizar testes a este tipo de avarias, foram efetuados ensaios para dois tipos de desalinhamentos estáticos.

A primeira foi através de um desalinhamento em relação ao eixo vertical do rotor. Para tal, foi utilizada a base de fixação que permite o alinhamento do motor em relação à carga. Adicionalmente foram colocados calços nos dois pontos de apoio da frente do motor, ficando a traseira do motor mais baixa relativamente ao seu eixo de ataque, originando conseqüentemente um desalinhamento do mesmo em relação à carga.

O outro tipo de desalinhamento estático foi efetuado através da base de fixação projetada, com a finalidade de provocar desalinhamentos na máquina em relação ao eixo horizontal (Figura 5.3). Assim, com o auxílio dessa base de fixação, foi possível provocar um desalinhamento do motor relativamente ao eixo horizontal de 5° para a direita.

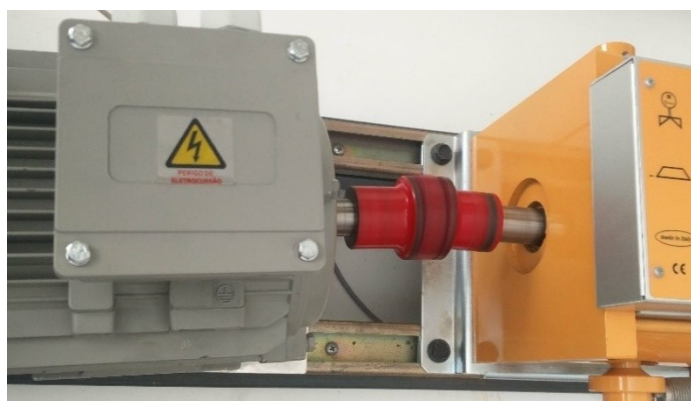


Figura 5.3- Desalinhamento do motor em relação à carga (5 graus para a direita no eixo horizontal).

5.2 Teste e resultados experimentais

Com os motores avariados intencionalmente foram realizados vários testes para, posteriormente ser efetuada a análise do estado de funcionamento destas máquinas. Durante os testes, para além da velocidade e o binário desenvolvido pelo motor, foram analisadas, para deteção de avarias, a tensão e corrente, e em alguns casos, a temperatura em pontos específicos do motor, consoante a avaria.

Através das correntes consumidas pela máquina e tensões aplicadas, é realizada uma análise à assinatura elétrica, ESA – *Electric Signature Analysis*, sendo a assinatura de corrente, MCSA - *Motor Current Signature Analysis*, o método mais eficaz e sensível a diversas avarias na máquina. Porém, durante as análises, a assinatura de tensão também foi analisada, quando existiu alterações notáveis na mesma.

Esses testes foram realizados através do espectro de frequências, FFT – *Fast Fourier Transform*, durante o pleno funcionamento da máquina, visto que a interface se encontrava preparada para esta análise.

Nos testes realizados, excetuando o teste do desalinhamento no rotor, foi utilizada a base de fixação que possibilita (o melhor possível) um alinhamento lateral do motor em relação à carga.

O acerto do alinhamento foi realizado através da visualização da assinatura de corrente do motor durante o seu funcionamento, fazendo os vários ajustes até o espectro de frequências conter os picos de correntes esperados de um motor em vazio. Este é um processo de uma grande importância, na medida em que o desalinhamento do eixo provoca perturbações notáveis na assinatura de corrente, “mascarando” desta forma outras avarias.

Para uma correta análise dos motores antes de cada teste, todos os motores passaram por este processo de alinhamento. Adicionalmente, para cada avaria, foram efetuados ensaios em vazio e ensaios em carga, consoante o tipo de avaria.

Os resultados apresentados, correspondem a testes realizados depois do regime transitório, com imagens adquiridas através da interface desenvolvida para esta análise (e recorrendo aos sinais obtidos a partir do quadro de comando e aquisição), existindo sempre que possível uma comparação com os resultados teóricos esperados, com especial foco para a assinatura de corrente MCSA.

5.2.1 Motor saudável

Os trabalhos laboratoriais foram iniciados a partir de um motor saudável e acoplado à carga, estando o travão de simulação desligado, de modo a simular o motor perto do vazio, mas alinhado. É assim possível comparar com os motores avariados, servindo o motor saudável de padrão.

Num motor saudável (com um alinhamento correto e uma frequência de rede de 50 Hz) não são esperadas outras frequências laterais, excetuando o ruído eletromagnético do motor, o ruído na aquisição de sinal, bem como possíveis desequilíbrios e distorções na tensão de alimentação da rede elétrica.

É também de esperar, o aparecimento de harmónicas, com decréscimo de amplitude, de 50 Hz em 50 Hz, pelo facto de se estar a trabalhar com um motor de um par de pólos, isto é, com 3000 RPM (50 Hz) [20].

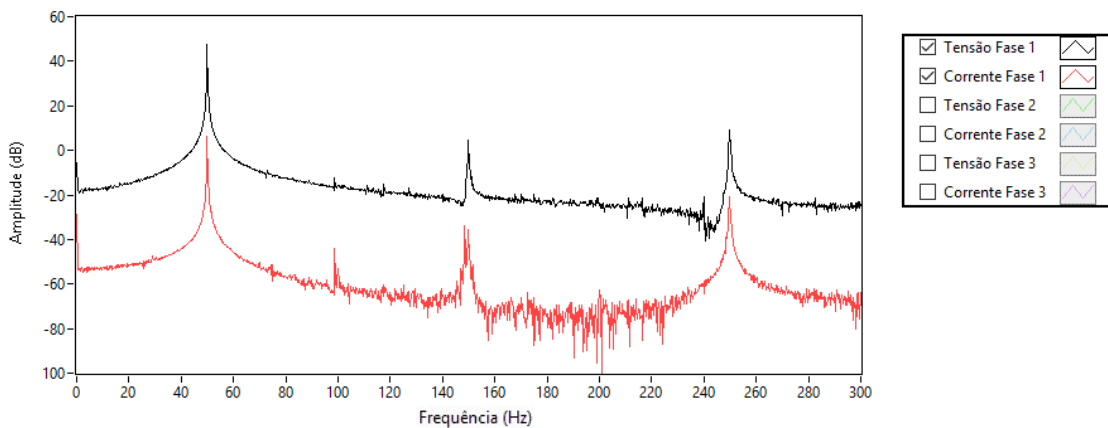


Figura 5.4 - Espectro de frequências da corrente e tensão do motor em vazio.

É possível verificar através do gráfico da Figura 5.4 a presença da primeira harmónica na tensão e na corrente, localizada na frequência fundamental da rede (50 Hz). É também observável harmónicas de 50 Hz em 50 Hz devido à rotação do motor, à distorção, desequilíbrios e características da rede elétrica.

5.2.2 Barras quebradas no rotor

As barras quebradas surgem no espectro de corrente, de acordo com a equação (9), onde s é o escorregamento da máquina, k_b um número inteiro positivo e f_0 a frequência de alimentação.

$$f_{\text{Barras Quebradas}} = (1 \pm 2k_b s) f_0 \text{ [Hz]} \quad (9)$$

Consoante o aumento de barras quebradas presentes no rotor, bem como a carga aplicada ao mesmo, é esperado que na prática surjam um maior número de frequências laterais e aumento de amplitudes nas mesmas. Para um escorregamento s de 0,03 (2900 RPM) poderão surgir as seguintes frequências laterais (Tabela 5.1):

Tabela 5.1- Frequências laterais para barras quebradas.

k_b	Frequências Laterais Esquerdas (Hz)	Frequências Laterais Direitas (Hz)
1	46,7	53,3
2	43,3	56,7
3	40,0	60,0
4	36,7	63,3
5	33,3	66,7
6	30,0	70,0

5.2.2.1 Duas barras quebradas

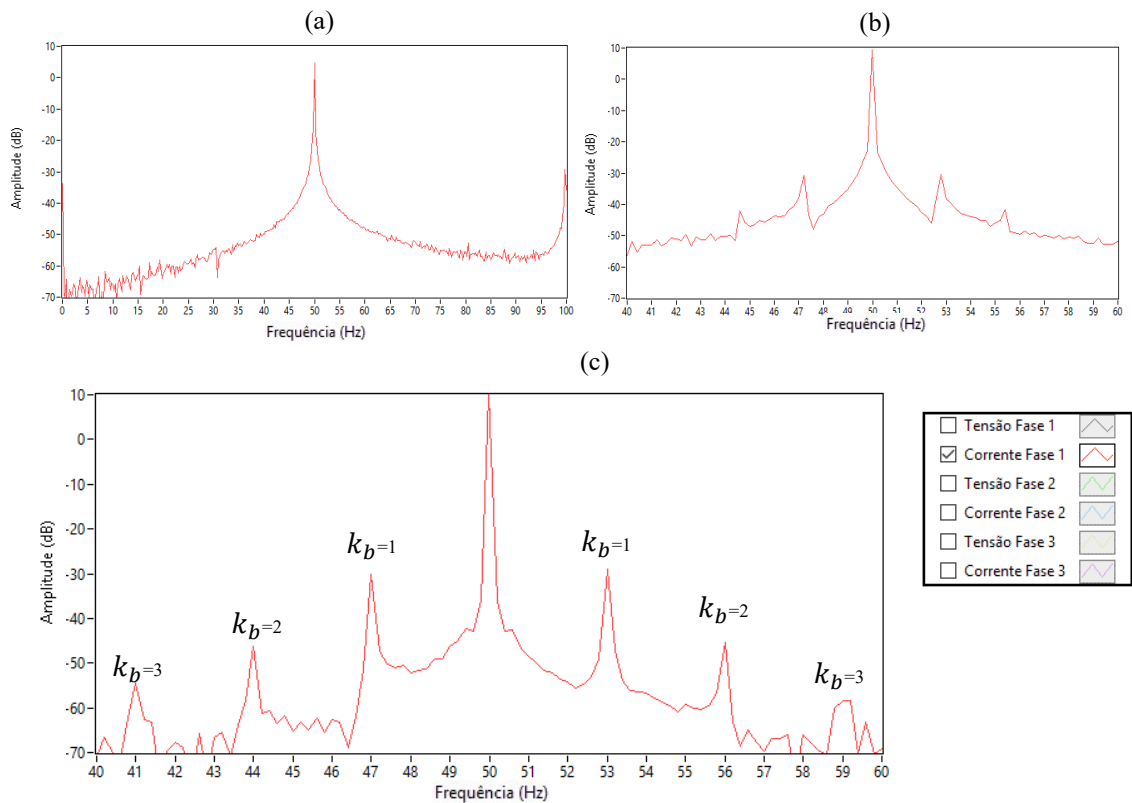


Figura 5.5 - Assinatura de corrente com rotor com duas barras quebradas: Motor em vazio (a); Motor com um binário de 3,8 Nm (b); Motor com um binário de 4,15 Nm (c).

Pela análise dos gráficos da Figura 5.5, com o motor em vazio não se observa nenhuma consequência na assinatura de corrente. No entanto, à medida que há um aumento da carga, existe o aparecimento de novas frequências, sempre aos pares, uma em cada lado, com a mesma distância da frequência fundamental, e com um decréscimo de amplitude à medida que se afastam da mesma.

Em comparação com os resultados teóricos é possível confirmar a existência de barras quebradas do motor ensaiado.

5.2.2.2 Três barras quebradas

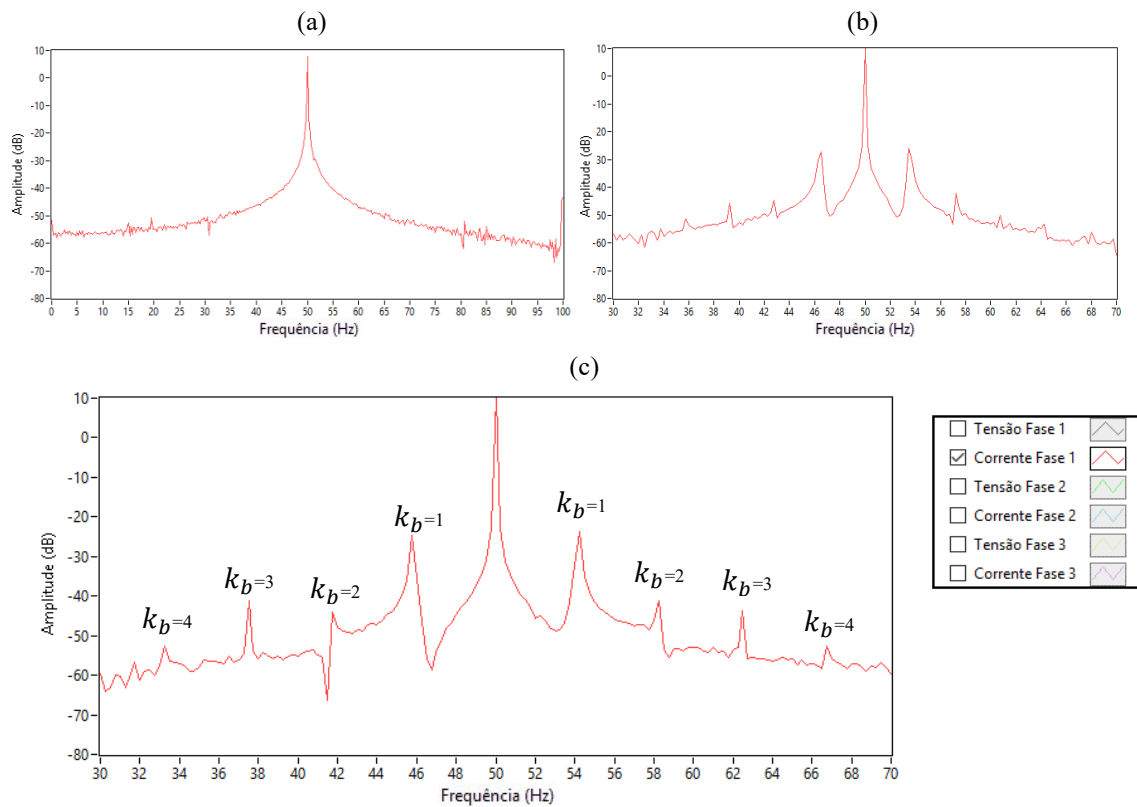


Figura 5.6 - Assinatura de corrente com rotor com três barras quebradas: Motor em vazio (a); Motor com um binário de 3,8 Nm (b); Motor com um binário de 4,15Nm (c).

Analisando a Figura 5.6, como acontece com o rotor de duas barras quebradas, há um acréscimo de harmônicas laterais e de respectivas amplitudes à medida que há um aumento da carga. Neste caso, existe um maior número de harmônicas, em comparação com o ensaio anterior.

Comparativamente com os resultados teóricos, é observável uma boa correspondência com os resultados práticos obtidos, confirmando a existência de barras quebradas no motor ensaiado.

5.2.2.3 Nove barras quebradas

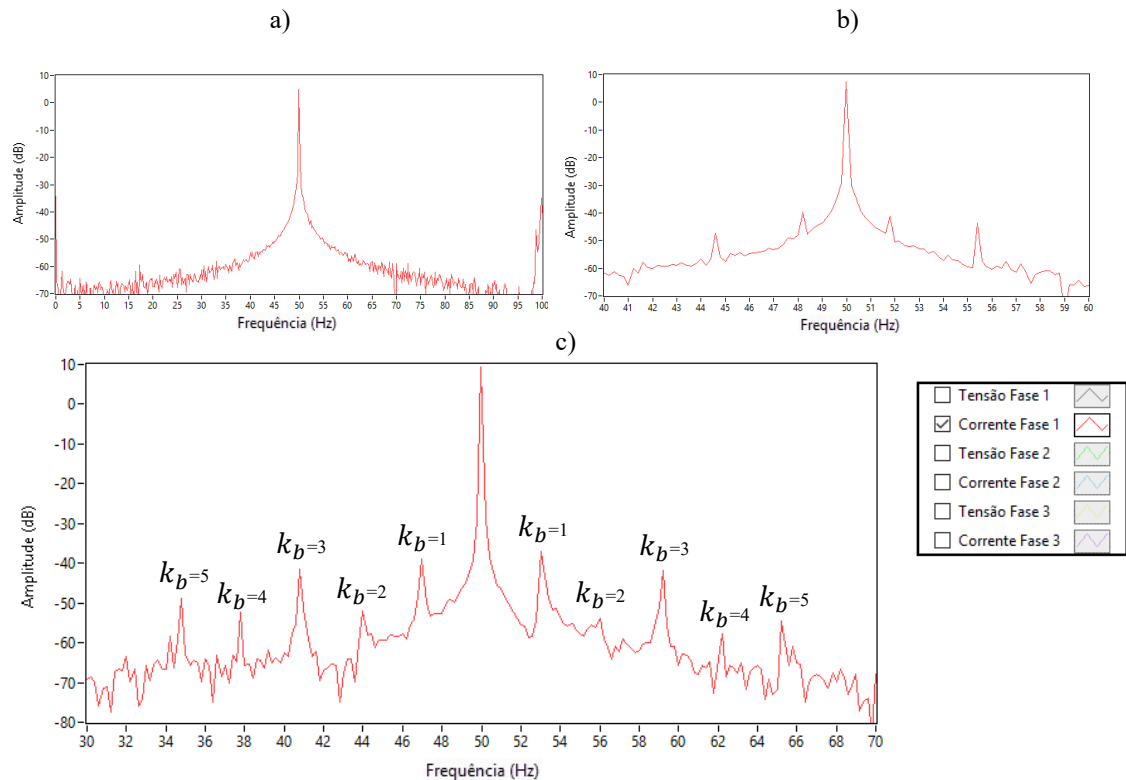


Figura 5.7 - Assinatura de corrente com rotor com nove barras quebradas: Motor em vazio(a); Motor com um binário de 3,8 Nm (b); Motor com um binário de 4,15 Nm (c).

Tal como na avaria do motor com duas barras quebradas, através da Figura 5.7, constata-se que com nove barras quebradas no rotor, não existe presença de frequências laterais quando o motor se encontra em vazio. No entanto, mais uma vez, com o aumento da carga, há um aumento das frequências laterais e da sua amplitude.

Em comparação com os resultados teóricos, torna-se a confirmar uma correspondência com os resultados práticos obtidos, verificando a existência de barras quebradas no motor testado.

Comparando os rotores com duas e três barras quebradas com o rotor com nove barras quebradas, no último há um acréscimo do número de frequências laterais, bem como um aumento da amplitude das mesmas.

5.2.3 Curto-circuito no enrolamento do estator

Para realização deste ensaio, foram inseridas as resistências em série nas fases 1 e 3, simulando o curto-circuito na fase 2 e foi colocado o motor a desenvolver um binário de 3,8 Nm. Pretende-se assim simular uma assimetria de correntes no estator, que é o primeiro sintoma de curto-circuito nos enrolamentos. Neste ensaio, foram verificados três parâmetros do motor, a assinatura de corrente, o consumo de corrente e a velocidade.

Um curto-circuito localizado no enrolamento do estator, provoca perturbações na assinatura de corrente, segundo a equação (10), onde n_{cc} representa um número inteiro positivo, p o número de pares de pólos, s o escorregamento, k um número inteiro positivo e f_0 a frequência de alimentação.

$$f_{Curto-Circuito} = \left[\left(\frac{n_{cc}}{p} (1 - s) \pm k \right) \right] \cdot f_0 \text{ [Hz]} \quad (10)$$

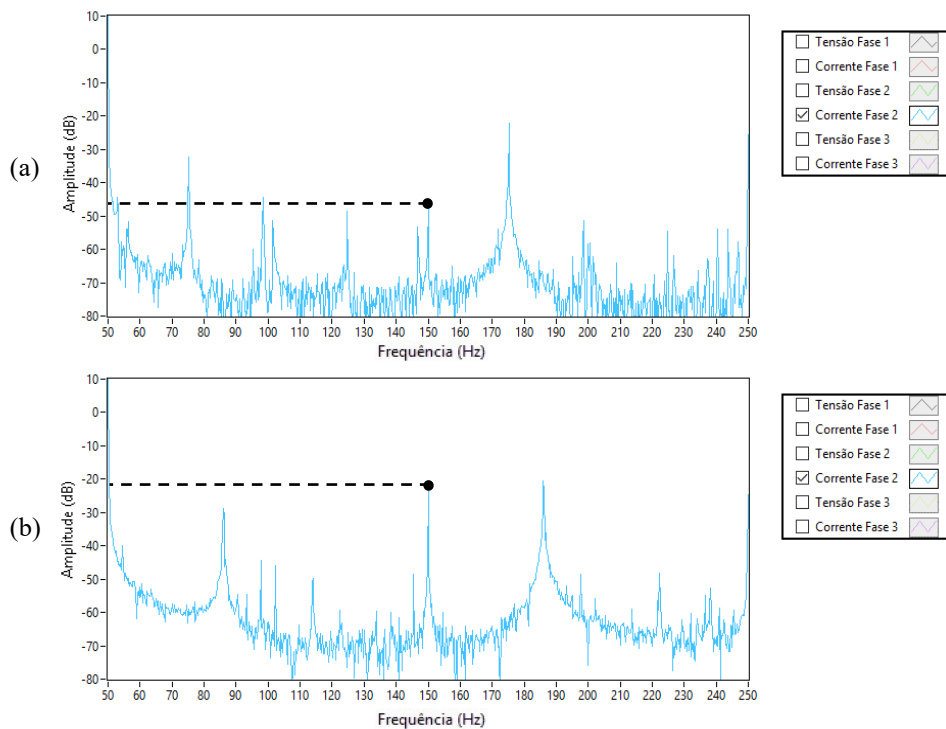


Figura 5.8 - Assinatura de corrente de motor: sem curto-circuito (a); com curto-circuito(b).

Pela análise da assinatura de corrente (Figura 5.8) existe um aumento notável da amplitude na harmónica de 150 Hz. Comparativamente com a equação teórica (10), esta harmónica surge para um n_{cc} e k de 2 e 1 respetivamente, concluindo-se pela análise da assinatura de corrente que se trata de um curto-circuito no estator.

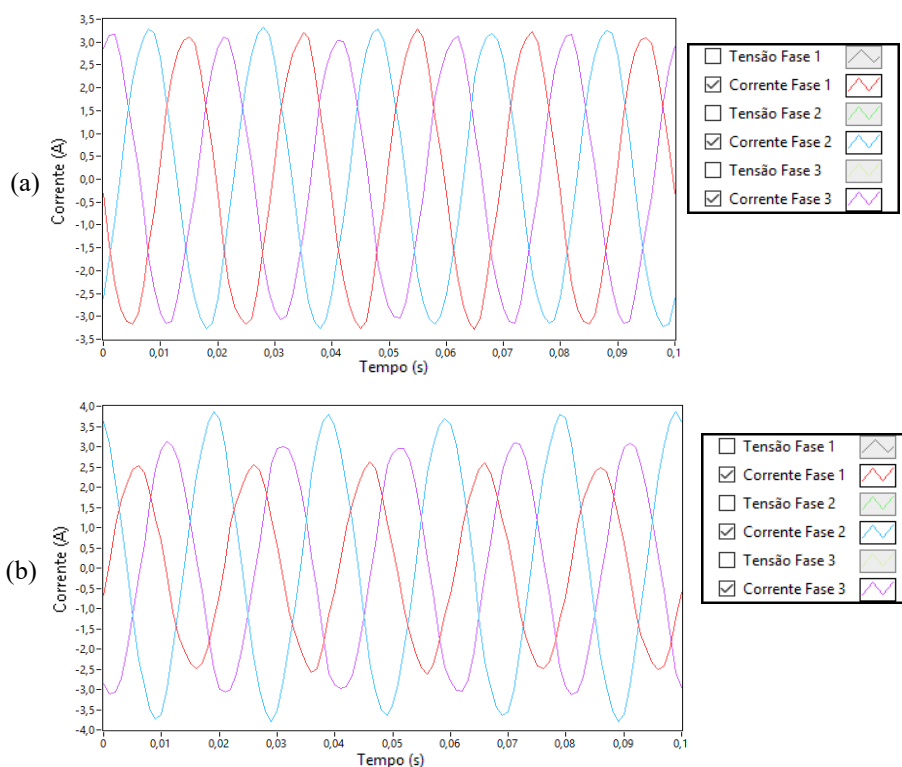


Figura 5.9 - Variação de correntes do motor: sem curto-circuito (a); com curto-circuito (b).

Relativamente ao consumo de correntes (Figura 5.9) foi verificado um desequilíbrio nas três fases, tendo-se observado que a fase com o curto-circuito, contém um consumo maior que as restantes.

Tabela 5.2 - Variação de velocidades de motor com curto-circuito.

Binário [Tm]	Sem CC [RPM]	Com CC [RPM]
vazio	2995	2985
2,3	2950	2940
3,8	2920	2895
4,15	2905	2870

Por último, pela análise das velocidades (Tabela 5.2), constatou-se alterações na mesma, existindo uma diminuição de velocidade do motor, ao impor o curto-circuito no estator.

Através destas três análises, facilmente é diagnosticada uma avaria no MIT, no entanto, é através da assinatura de corrente, que se conclui que a avaria presente na máquina diz respeito a um curto-circuito nos enrolamentos.

5.2.4 Rolamento danificados

No que diz respeito à danificação dos rolamentos nos motores, existe um efeito na assinatura de corrente segundo a equação (11), onde n_1 e n_2 são números inteiros positivos, s o escorregamento da máquina e f_0 a frequência de alimentação da máquina.

$$f_{rolamento} = (0,4 \cdot n_1 + 0,6 \cdot n_2) \cdot (1 - s) \cdot f_0 [Hz] \quad (11)$$

Nos testes práticos, utilizou-se um motor com anomalias nos rolamentos, provocadas pelo uso excessivo e também por não ter havido qualquer tipo de manutenção do motor. Analogamente aos ensaios anteriores, numa primeira fase foi colocado o motor em vazio, e posteriormente houve um aumento de carga com o auxílio do travão existente na bancada.

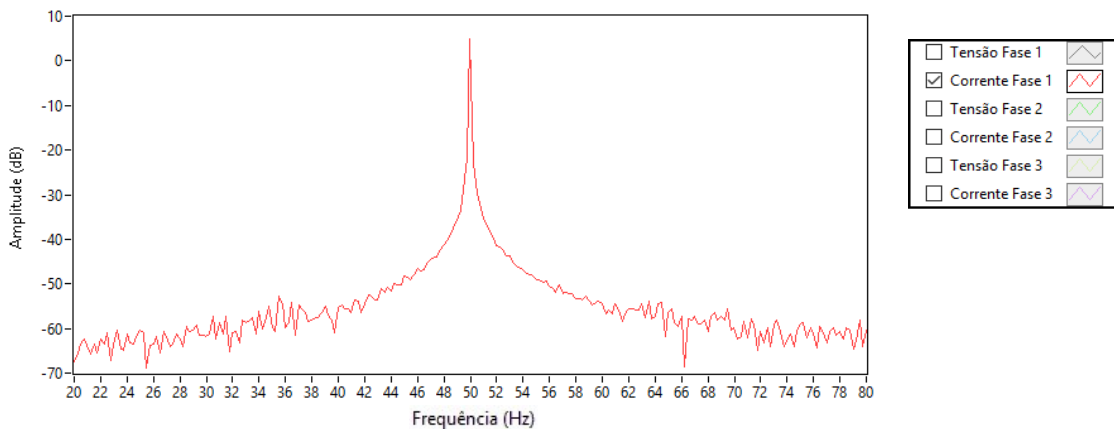


Figura 5.10 - Assinatura de corrente do motor com rolamentos danificados em vazio.

Realizando numa primeira fase o ensaio em vazio, mas com o motor acoplado ao travão (Figura 5.10), verificou-se que a assinatura de corrente é semelhante à assinatura de corrente de um motor saudável.

Desta primeira análise podemos concluir que:

- Em vazio o motor não apresenta problemas de rolamentos através da sua assinatura de corrente;
- A máquina encontra-se bem alinhada, podendo ser submetida a cargas. O desalinhamento do motor origina danificação nos rolamentos, “mascarando” o espectro de frequência.

Estando o motor alinhado, foi introduzida uma carga, que fez com que o motor desenvolvesse um binário de 2 Nm (Figura 5.11). Observa-se o aparecimento de uma componente harmónica perto dos 60 Hz.

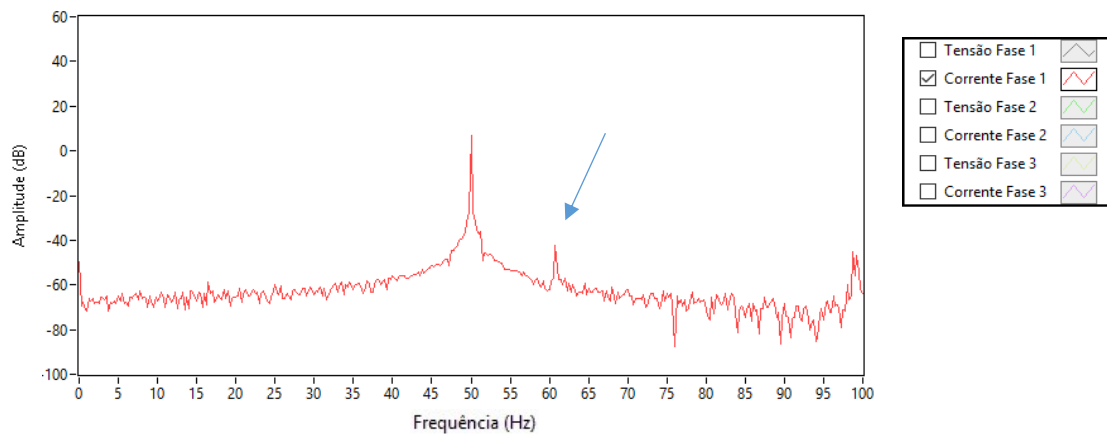


Figura 5.11 - Assinatura de corrente do motor com rolamento danificados com binário de 2 Nm.

Tendo em consideração que a velocidade do motor no ensaio foi de 2960 RPM, traduzindo-se num escorregamento de 1,3%, e considerando como valor inteiro 2 para n_1 e qualquer valor inteiro positivo para n_2 , verifica-se o aparecimento de uma frequência a começar nos 59,6 Hz com n_2 igual a 1 e com um acréscimo de 4 décimas à medida que o mesmo aumenta (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Frequências laterais para danificação nos rolamentos, com $s = 0,013$ e $n_1 = 2$.

n_2	Frequências laterais [Hz]
1	59,6
2	60
3	60,4
4	60,8

Deste modo, pode concluir-se que este motor possui os rolamentos danificados.

Para confirmar mais concretamente a avaria da conclusão anterior, foi realizada a mediação da temperatura em quatro pontos da tampa frontal do motor, onde se encontra localizado o rolamento.

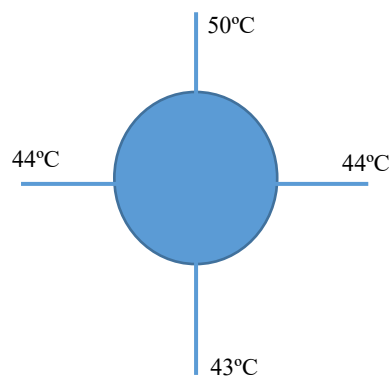


Figura 5.12 – Temperaturas em quatro pontos do rolamento do ataque.

Num motor corretamente alinhado e com os rolamentos saudáveis, é de esperar uma temperatura semelhante ao redor dos rolamentos, no entanto, através da Figura 5.12, é observável uma diferença de temperatura na parte superior do rolamento relativamente aos outros pontos, concluindo-se que o rolamento do motor se encontra danificado.

5.2.5 Desalinhamento

Segundo a equação (12), onde f_0 representa a frequência de alimentação, n_{ds} um número inteiro positivo e f_r a frequência de velocidade do rotor, um desalinhamento num motor de um par de pólos, cuja frequência de velocidade do rotor é de 50 Hz, faz surgir o aparecimento de frequências de 50 em 50 Hz.

$$f_{Desalinhamento} = (f_0 \pm n_{ds} \cdot f_r) [Hz] \quad (12)$$

No entanto, devido à distorção da rede e às frequências de rotação do motor, há uma sobreposição das frequências destas últimas com as frequências relativas ao desalinhamento, esperando desta forma uma maior amplitude nessas.

- **Desalinhamento no eixo vertical**

Estando o motor acoplado à carga, foram colocadas anilhas por debaixo dos dois pontos de fixação do motor do lado do ataque, provocando um desalinhamento segundo o eixo vertical.

Colocando o motor em funcionamento, foi imposta uma carga de 2,3 Nm, de modo a observar as consequências que esse desalinhamento tem na assinatura de corrente do motor.

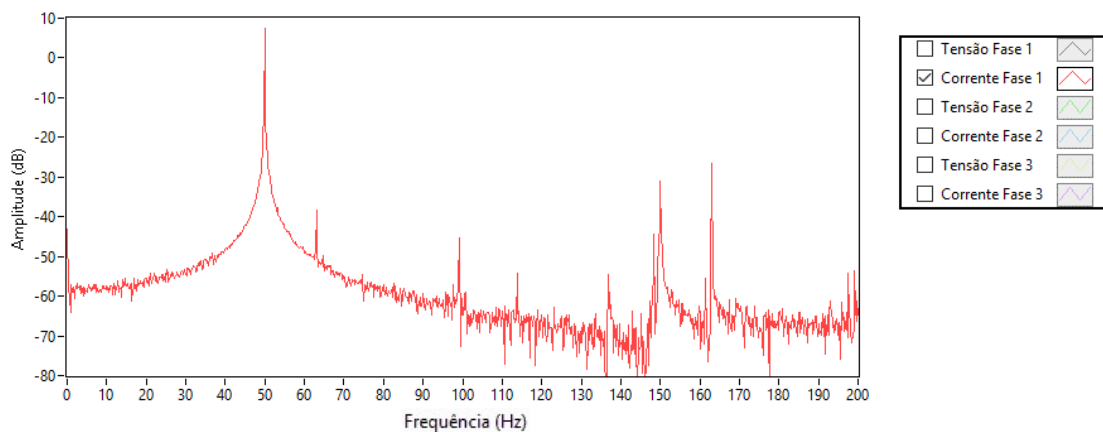


Figura 5.13 - Assinatura de corrente do motor com desalinhamento no eixo vertical com binário de 2,3 Nm.

Através da análise da Figura 5.13, é possível verificar o aumento de amplitude na segunda e terceira harmónica, relativamente ao motor saudável e alinhado.

Surge também o aparecimento de uma frequência entre os 60 e os 70 Hz, que provavelmente está relacionada com os rolamentos, na medida em que as avarias de desalinhamentos afetam diretamente o desempenho normal dos rolamentos.

- **Desalinhamento no eixo horizontal**

Adicionalmente foi ensaiado o motor, fixo a uma base que permite um desalinhamento do mesmo em relação à carga.

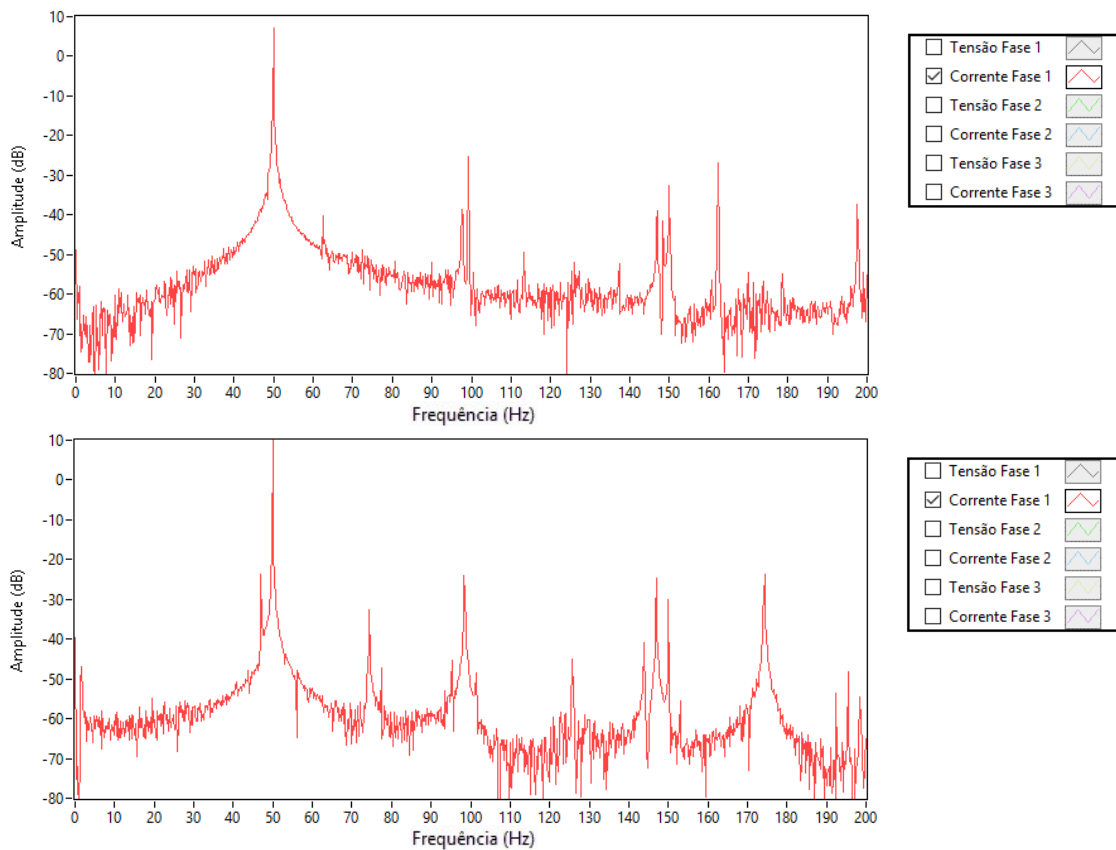


Figura 5.14 - Assinatura de corrente do motor com desalinhamento em relação ao eixo horizontal, com binário de 2,3 Nm (a); com binário de 4,15 Nm (b).

Acoplado à carga e com o desalinhamento provocado de 5° para a direita, foi acionado o travão eletromagnético, ficando o motor a desenvolver um binário de 2,3 N.m e posteriormente 4,15 N.m.

Em comparação com o que teoricamente era de esperar neste ensaio (Figura 5.14) é visível o aumento da segunda e terceira harmónica, bem como o aparecimento de frequências

associadas aos rolamentos, pelo facto de os desalinhamentos terem um impacto direto no funcionamento dos mesmos.

Neste ensaio é notável uma maior quantidade de frequências indesejáveis e um aumento das amplitudes, pelo facto de o último teste conter um desalinhamento maior.

Durante estes ensaios, houve também uma medição da temperatura na zona de acoplamento, verificando-se um aumento significativo nos dois tipos de desalinhamentos. Enquanto no acoplamento alinhado a temperatura rondava os 40°C, nos desalinhamentos a temperatura atingiu os 80°C.

6 Conclusões e perspectivas futuras

6.1 Conclusões

Sendo o motor de indução trifásico a máquina mais utilizada nas indústrias, e tendo em consideração que grande parte das avarias poderão levar à destruição da máquina e, conseqüentemente, a graves prejuízos financeiros, revelou-se pertinente, atuar na área da manutenção preventiva não invasiva, projetando uma ferramenta de apoio a dois fins:

- Didático: Devido à falta de aparelhagem de apoio, e ao elevado custo do material, esta tem sido uma área pouco abordada no ensino, havendo uma necessidade de a incorporar, uma vez que o motor de indução trifásico é a máquina mais utilizada nas indústrias;
- Profissional: Devido à falta de versatilidade de aparelhagem de diagnóstico em tempo real, existe a necessidade de instrumentação que permita a colocação de vários sensores para diagnóstico da máquina, uma monitorização em tempo real, bem como a possibilidade de utilização de vários métodos para deteção de avarias.

Através da revisão da literatura, apercebeu-se que são poucos os projetos que, para além de conter métodos de diagnóstico e deteção de avarias, através de vários dados recolhidos de um motor, contenham também mecanismos de simulação de avarias nas máquinas, de modo a prestar auxílio no ensino.

Assim, para colmatar estas lacunas, esta dissertação teve como principal objetivo a implementação de um laboratório para deteção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos, onde foram cumpridos os dois objetivos principais:

- Conceção de um módulo de teste, para diagnóstico e deteção de avarias em MITs, em ambiente industrial/profissional;
- Implementação de um laboratório para simulação/provocação de avarias no MIT, onde juntamente com o módulo de teste seja possível realizar uma análise e devidos estudos das avarias nas máquinas.

A prossecução deste fim só foi possível devido à concretização das seguintes etapas:

1. Identificação das principais avarias em ambiente industrial num motor de indução trifásico;
2. Estudo dos métodos *online* mais eficazes para deteção das avarias num MIT;
3. Estudo da relação entre cada avaria e a assinatura elétrica da máquina;
4. Conceção de um módulo de teste capaz de colocar os motores em funcionamento e de realizar a aquisição de dados dos vários sensores;
5. Implementação de um laboratório para simulação de avarias num MIT;
6. Elaboração de uma interface gráfica para processamento e visualização dos dados recolhidos, de modo a prestar auxílio na deteção e diagnóstico de avarias nos MITs;
7. Análise e respetivas conclusões acerca das avarias.

Assim, com esta dissertação, foi implementado um laboratório, onde é possível simular as principais avarias e, em conjunto com a interface, possibilita ao utilizador uma análise *online* através dos métodos utilizados na mesma, ou a exportação de dados, a serem aplicados a outros métodos de diagnóstico e análise de avarias.

Embora o módulo de teste permita a exportação de dados, para que se possam ser aplicados outros métodos de deteção e diagnóstico de avarias, durante os ensaios realizados a este laboratório apenas foi realizado o diagnóstico através dos métodos implementados na interface, cujo processamento é realizado em tempo real.

Durante os ensaios, foi possível realizar um estudo prático acerca das avarias com maior ocorrência nos MITs, das quais, se destacam os curto-circuitos nos enrolamentos do estator, danificação nos rolamentos, desalinhamentos, barras quebradas no rotor e excentricidades.

Realizando uma comparação com resultados obtidos durante os ensaios realizados, com os resultados teóricos relativamente à assinatura de corrente (MCSA), confirmou-se na totalidade a origem das avarias nos motores, considerando-os assim bastante satisfatórios para que se possa realizar os devidos testes para diagnóstico e deteção de avarias. Numa forma geral, todos os objetivos propostos foram cumpridos com sucesso.

6.2 Perspetivas futuras

Sendo a manutenção preventiva uma área em constante desenvolvimento, devido à sua relevância no setor industrial, é importante, que projetos como este sejam aperfeiçoados, de modo a melhorar a eficácia no diagnóstico e deteção de avarias, para fins didáticos e profissionais.

Assim sendo, sugere-se como trabalho futuro para esta dissertação, as seguintes melhorias:

1. Melhoramento do suporte de fixação do motor, garantindo um alinhamento mais correto do motor;
2. Colocação de outras furações nos suportes de fixação dos motores, de modo a que se possa realizar testes com motores de diferentes potências e modelos;
3. Obtenção de uma placa de aquisição de dados que contenha mais entradas analógicas, de forma a permitir uma leitura de um maior número de sensores em simultâneo;
4. Introdução de outros métodos de diagnóstico e deteção de avarias na interface desenvolvida, para uma identificação mais assertiva das avarias presentes no motor;
5. Deteção automática de avarias através da interface desenvolvida;

Com estas melhorias, pretende-se prevalecer não só uma crescente qualidade no ensino, como também auxiliar na prevenção de avarias, ajudando o técnico na tomada de decisão, com o apoio de mais recursos para deteção das mesmas.

Referências

- [1] WEG, “Motores elétricos assíncronos e síncronos de media tensão - especificação, características e manutenção,” 2015.
- [2] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, and H. Meshgin-kelk, *Electric Machines: Modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. CRC Press, 2013.
- [3] B. Ayhan, M. Y. Chow, and M. H. Song, “Multiple signature processing-based fault detection schemes for broken rotor bar in induction motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, pp. 336–343, 2005.
- [4] W. T. Thomson and M. Fenger, “Current signature analysis to detect induction motor faults,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.
- [5] A. G. Águas, “Otimização de um sistema on line de deteção de falhas em motores de indução,” Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [6] P. F. da S. P. Dinis, “Análise e Monitorização de Condição em Motores de Indução Trifásicos,” Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2017.
- [7] L. Wang and R. X. Gao, *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*. Springer, 2006.
- [8] G. K. Singh and S. A. S. Al Kazzaz, “Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 64, no. 2, pp. 145–158, 2003.
- [9] E. Gaucheron, “Cahier technique no . 207 Electric motors ... and how to improve their control and protection,” 2004.
- [10] M. Kadivonga, “Diagnóstico e Detecção de Avarias em Motores de Indução Trifásicos,” IPS-ESTS, 2010.
- [11] M. Ventim, “Máquina de Indução (Máquina Assíncrona),” 2016.

- [12] K. M. Siddiqui, K. Sahay, and V. K. Giri, "Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor- A Review," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 2320–3765, 2014.
- [13] P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, R. M. McCoy, and E. L. Owen, "Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. EC-1, no. 1, pp. 39–46, 1986.
- [14] *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std 493-1997 [IEEE Gold Book], 2007.
- [15] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, 2005.
- [16] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors," vol. 28, no. 4, pp. 921–937, 1992.
- [17] F. Dionisio, "Sistema de detecção e diagnóstico de avarias em tempo real para motores de indução , baseado num referencial de correntes 3D," FCT, UNL, 2015.
- [18] R. Assunção, "Ensino de Detecção de Avarias em Motores de Indução," FCT-UNL, 2014.
- [19] P. Gnacinski, "Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over- or undervoltages," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 363–371, 2008.
- [20] W. Thomson and R. Gilmore, "Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, Data interpretation, and industrial case histories," *Proc. 32nd Turbo ...*, no. 1987, pp. 145–156, 2003.
- [21] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, and M. B. B. Sharifian, "Time Stepping Finite Element Analysis of Broken Bars Fault in a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 68, pp. 53–70, 2007.
- [22] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, and G. Rostaing, "Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1813–1822, 2008.
- [23] J. M. Bossio, G. R. Bossio, and C. H. De Angelo, "Angular misalignment in induction motors with flexible coupling," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1033–1038, 2009.
- [24] X. Li, Q. Wu, and S. Nandi, "Performance analysis of a three-phase induction machine with inclined static eccentricity," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp. 531–541,

2007.

- [25] A. K. Jalan and A. R. Mohanty, “Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition,” *J. Sound Vib.*, vol. 327, no. 3–5, pp. 604–622, 2009.
- [26] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, S. Bin Lee, and D. Hyun, “Detection of eccentricity faults in induction machines based on nameplate parameters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1673–1683, 2011.
- [27] D. GUO, F. CHU, and D. CHEN, “the Unbalanced Magnetic Pull and Its Effects on Vibration in a Three-Phase Generator With Eccentric Rotor,” *J. Sound Vib.*, vol. 254, no. 2, pp. 297–312, 2002.
- [28] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, and H. A. Toliyat, “Motors Using Finite Element Method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1764–1767, 2009.
- [29] C. J. Verucchi, G. G. Acosta, and F. A. Bengler, “A review on fault diagnosis of induction machines,” vol. 38, pp. 113–121, 2008.
- [30] Fluke, “Ferramentas de teste para motores elétricos,” 2011.
- [31] E. E. P. Vaz, *Motores eléctricos e bobinagem*. 1984.
- [32] R. Araújo, “Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução,” FCT-UNL, 2015.
- [33] A. Santos, “Diagnostico de avarias em motores de inducao,” ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [34] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tasson, and G. B. Kliman, “Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars By Means of Electrical Signature Analysis,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1248–1255, 2001.
- [35] T. Skf, D. Motor, A. Exp, and T. Exp, “SKF Dynamic Motor,” PUB CM/P2 14547 EN, 2014.
- [36] F. Corporation, “Fluke 438-II Power Quality and Motor Analyzer,” 2016.

Anexo A

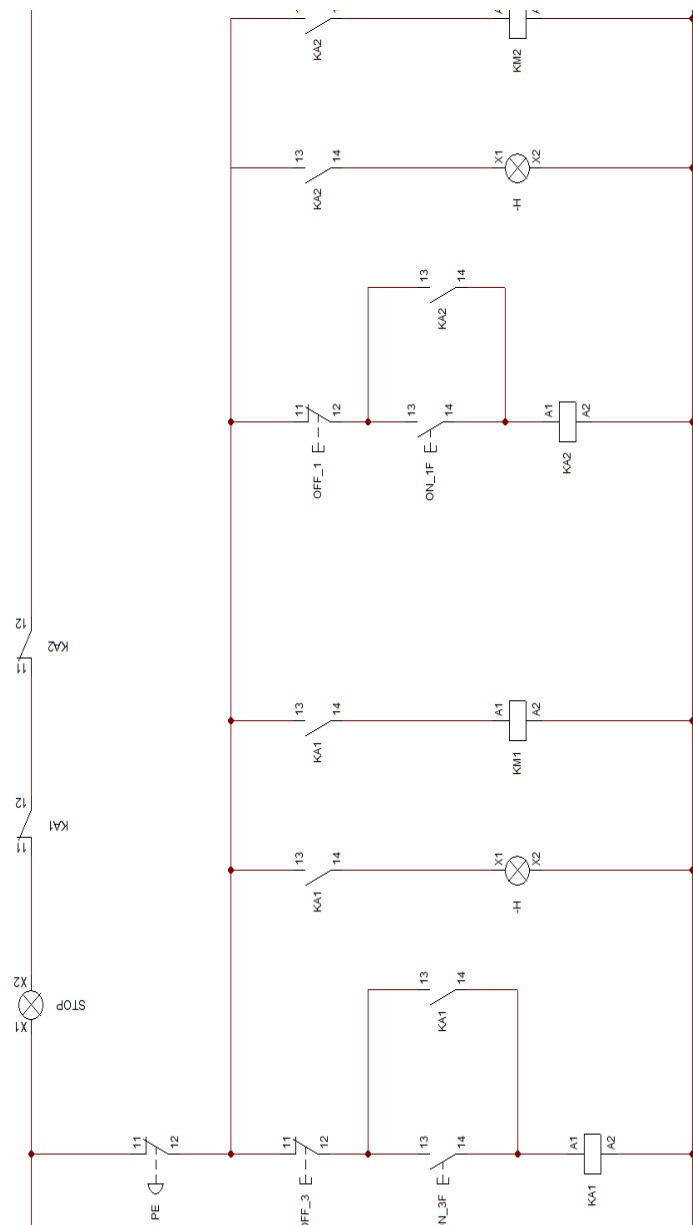


Figura A.1 - Esquema de comando de arranque direto para motor trifásico (KM2) e monofásico (KM1).

Anexo B

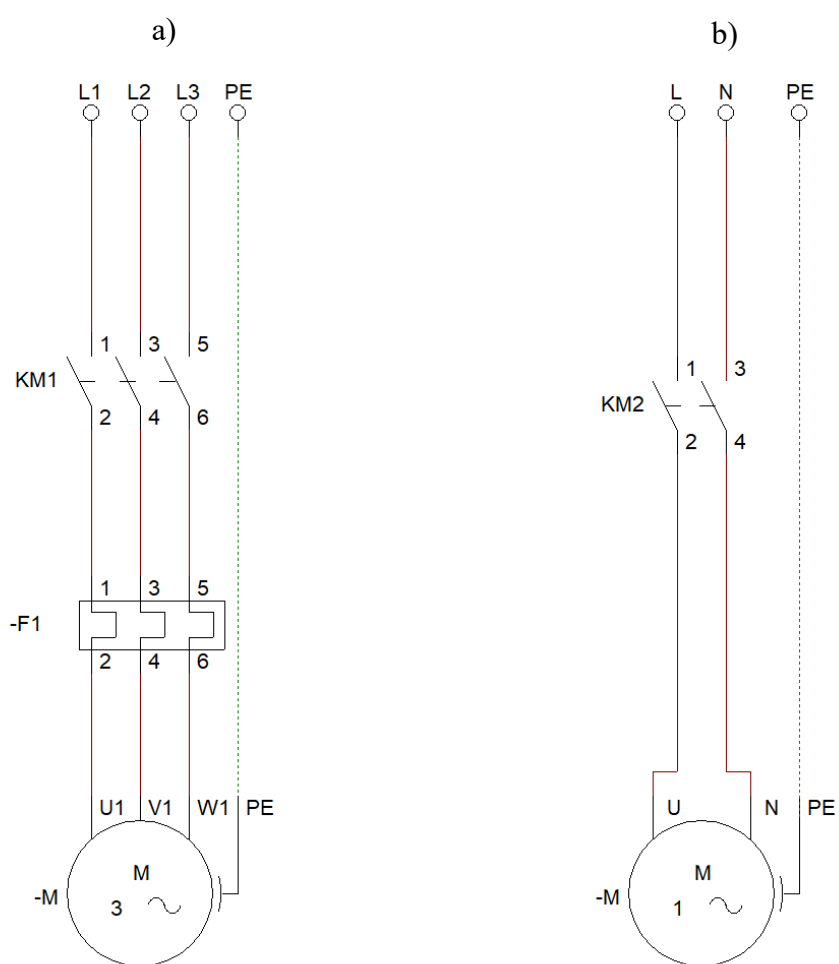


Figura B.1 - Esquemas de potência para motor trifásico (a) e motor monofásico (b).

Anexo C



MANUAL DE UTILIZADOR

MÓDULO DE TESTE PARA DETEÇÃO E
DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

VERSÃO 1.0
SET-2017

Índice

1.	Introdução	7
2.	Avisos de segurança	9
3.	Instruções de montagem e funcionamento	11
3.1.	Montagem do equipamento	11
3.1.1.	Descrição do equipamento	11
3.1.2.	Esquema de corrente	12
3.1.3.	Alimentação do equipamento	13
3.1.4.	Conexão ao motor	14
3.1.5.	Conexão de sensores	15
3.1.6.	Arranque do motor	15
3.2.	Interface de processamento e análise de dados	17
3.2.1.	Funcionalidades da interface	17
3.2.2.	Colocação em operação	17
3.2.3.	Análise de dados	20
3.2.4.	Gravação de dados	22
5.	Especificações gerais	24

Índice de figuras

Figura 1.1 - Kit ferramenta.....	8
Figura 3.1 - Vistas e identificação dos elementos do aparelho.	11
Figura 3.2 - Tomada de alimentação monofásica.....	13
Figura 3.3 - Tomada de alimentação trifásica.	14
Figura 3.4 – Comutador do módulo na posição "0" - desligado.	15
Figura 3.6 - Interruptor para ligação do aparelho na posição "1" - ON Motores Monofásicos...	16
Figura 3.7 - Interruptor para ligação do aparelho na posição "2" - ON Motores Trifásicos.	16
Figura 3.8 – Painel a abrir – Diferença entre "Front Panel" e "Block Diagram".	18
Figura 3.9 - Visualização do "Front Panel".....	18
Figura 3.9 - Iniciação do programa.	18
Figura 3.10 - Pagina inicial.	19
Figura 3.11 - Escolha de amostragem.	20
Figura 3.13 - Separador de análise da corrente e tensão.	21
Figura 3.14 - Separador de análise de sensores externos.	22
Figura 3.15 - Página de gravação de dados.	23

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Descrição do equipamento.....	11
Tabela 3.2 - Esquemas de ligação referente à corrente nominal do motor.....	12
Tabela 3.3- Identificação das cores do cabo dos sensores.	15
Tabela 5.1 - Especificações gerais.	24

1. Introdução

O presente documento destina-se a prestar auxílio ao utilizador, para uma adequada utilização do módulo de teste para deteção e diagnóstico de avarias em motores elétricos. Com este módulo, é possível colocar um motor de indução trifásico ou monofásico em funcionamento, assim como conceder ao utilizador vários parâmetros da máquina em teste, auxiliando no diagnóstico da avaria, para uma mais acertada tomada de decisão por parte do técnico.

É de salientar que, embora este módulo de teste esteja preparado para colocar em funcionamento motores trifásicos e monofásicos, o mesmo encontra-se preparado unicamente para apresentar valores de corrente e tensão de motores trifásicos, no entanto os motores monofásicos poderão ser analisados através da colocação de sensores externos no módulo.

Este módulo de teste, foi construído no âmbito da dissertação acerca da implementação de um laboratório para diagnóstico e deteção de avarias num motor de indução trifásico, realizada pelo autor da primeira versão deste manual.

Este manual contém a descrição e instruções do módulo de teste (doravante denominado por instrumento, equipamento ou ferramenta de teste), que devem ser tomadas em consideração, para um correto funcionamento do equipamento e para uma maior segurança do utilizador, de modo a evitar danos pessoais e materiais.

Conhecimentos básicos necessários

O equipamento em questão deve ser operado por pessoal qualificado, ou sob supervisão do mesmo, sendo que, para uma melhor compreensão deste manual, são necessários conhecimentos gerais da eletrotécnica. A sua montagem e utilização também pressupõem um conhecimento das normas de segurança e das normas relevantes.

Validade do documento

Este manual, é apenas válido para este módulo de teste, com primeira versão terminada em setembro de 2017. Qualquer atualização no módulo de teste após essa data, este manual poderá não corresponder ao correto funcionamento do módulo de teste.

Kit ferramenta

Para o correto funcionamento, esta ferramenta contém:

- a) Módulo de aquisição;
- b) 1 cabo de alimentação trifásico 16 A - 5 pins;
- c) 1 cabo de alimentação monofásico;
- d) Conjunto de cabos para conectar o motor ao módulo;
- e) Conjunto de fichas para ligações internas de corrente;
- f) Cabo *jack stereo* para sensor externo;
- g) Cabo USB A/B;
- h) Chave do armário;

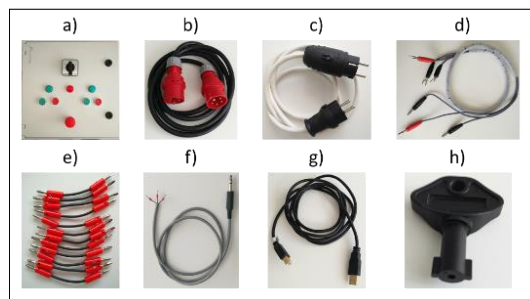


Figura 1.1 - Kit ferramenta.

Este equipamento necessita ainda de um computador, não estando incluído no “pacote” onde será necessária a existência do programa *labview*, da National Instruments™.

Esta ferramenta contém ainda uma *pen drive* com ficheiros de apoio.

Conteúdo da *Pen*

A *Pen* inclui os seguintes arquivos:

- Manual do utilizador do módulo de teste;
- Dissertação acerca da implementação de um laboratório para deteção e diagnóstico de avarias num MIT;
- *Interface* de apoio para o diagnóstico e deteção de avarias.

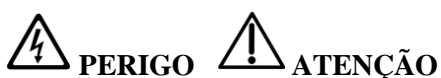
Suporte Técnico

Em caso de dúvidas e/ou de problemas técnicos contacte o professor responsável pelo laboratório.

2. Avisos de segurança

Este manual contém instruções que devem ser observadas para sua própria segurança, de modo a evitar o risco de choques elétricos, bem como possíveis danos materiais.

Todas as instruções de segurança pessoal encontram-se sinalizados com o símbolo de perigo de choques elétricos, e, com um símbolo de atenção para instruções relacionadas com a danificação do equipamento.



Como tal, aconselha-se que:

- Leia e compreenda todas as instruções da documentação que acompanha este equipamento;
- Observe todas as advertências e instruções indicadas ao longo desta documentação;
- Desconecte este produto da tomada antes de limpá-lo;
- Não use o equipamento próximo da água;
- Instale o equipamento com segurança numa superfície estável;
- Instale o equipamento num local protegido, onde ninguém possa pisar ou tropeçar no fio de alimentação, e onde este não seja danificado;
- Não use o equipamento quando este não demonstrar um correto funcionamento;
- Não use o equipamento com os acessórios danificados, nomeadamente cabos descarnados;
- Não toque em zonas metálicas do equipamento quando este estiver ligado;
- Não ultrapasse quaisquer valores especificados.;
- Procure não trabalhar sozinho;
- Não opere o equipamento com a porta do quadro aberta;
- Coloque sempre primeiro a ficha no equipamento antes de colocar na rede elétrica.

3. Instruções de montagem e funcionamento do equipamento

Este capítulo apresenta uma exposição passo a passo da montagem do equipamento, desde a conexão do equipamento, até ao funcionamento da máquina em teste, assim como indica todas as funções da interface utilizada para aquisição e análise dos dados.

3.1. Montagem do equipamento

3.1.1. Descrição do equipamento

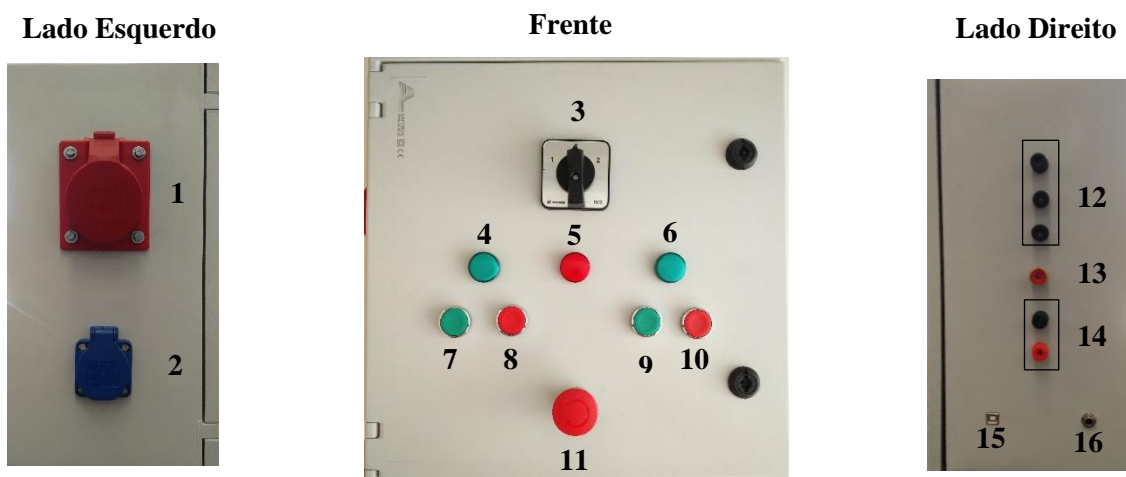


Figura 3.1 - Vistas e identificação dos elementos do aparelho.

Tabela 3.1 - Descrição do equipamento.

1	Alimentação Trifásica
2	Alimentação Monofásica
3	Comutador (0-Desligado 1-Monofásico 2-Trifásico)
4	Sinalizador motor monofásico ligado
5	Sinalizador de motores desligados
6	Sinalizador motor trifásico ligado
7	Botoneira de arranque motor monofásico
8	Botoneira de paragem motor monofásico
9	Botoneira de arranque motor trifásico
10	Botoneira de paragem motor trifásico

11	Botoneira de emergência
12	Ligação motor trifásico (3 fases)
13	Terra de proteção
14	Ligação motor monofásico (fase + neutro)
15	Entrada USB
16	Entrada sensor externo

Para uma maior compreensão todos os elementos apresentados aqui, serão referidos ao longo do documento como (elemento N°).

3.1.2. Esquema de corrente

Antes de qualquer montagem, verifique primeiro qual a corrente nominal do motor que pretende testar. Dependente da corrente nominal do motor, verifique e, caso seja necessário, modifique as ligações que se encontram dentro do equipamento, através dos conectores.

1. Abra o equipamento com a chave (item h);
2. Modifique as ligações nas três fases, através das fichas (item e), segundo os seguintes esquemas:

Tabela 3.2 - Esquemas de ligação referente à corrente nominal do motor.

Corrente Nominal (A)	Esquemas de Ligação
5	
6	
8	
12	

3. Volte a fechar a porta do armário.



De modo a evitar choques elétricos, garanta que o equipamento se encontra desligado da corrente elétrica.

Certifique-se que depois de alteradas as ligações, a porta do armário encontra-se bem fechada.



Tenha cuidado com todo o equipamento e cabelagem no interior do módulo, de modo a evitar desconexões de cabos e danificações do material.

3.1.3. Alimentação do equipamento

Depois de verificados os esquemas anteriores, comece por alimentar o equipamento à rede elétrica. Esta ligação poderá ser monofásica, caso pretenda unicamente colocar em funcionamento um motor desse tipo, ou trifásica, caso pretenda colocar em funcionamento e realizar análise a um motor trifásico.

Relativamente à conexão monofásica (elemento 2), esta é efetuada através de fichas normais (2 pins + terra).



Figura 3.2 - Tomada de alimentação monofásica.

Se a alimentação for trifásica (elemento 1), este equipamento possibilita unicamente uma conexão de uma ficha trifásica de 5 pins (3 fases + neutro + terra) e de 16 A.



Figura 3.3 - Tomada de alimentação trifásica.

1. Coloque a ficha na tomada do equipamento (item b) ou c);
2. Conecte esse cabo (item b) ou c) à rede elétrica.



PERIGO

Para evitar choques elétricos, é de elevada importância colocar primeiro a ficha de alimentação no equipamento, uma vez que o cabo é do tipo Macho-Macho.

3.1.4. Conexão ao motor

Observe a parte lateral direita do instrumento. Esta ferramenta possui 3 entradas de alimentação para um motor trifásico, para proteção terra e duas entradas de fase e neutro para um motor monofásico.

1. Através dos cabos auxiliares (item d) conecte o motor (elemento 12 ou 14) que pretende testar segundo o seu tipo (trifásico ou monofásico);
2. Conecte a ligação terra do motor ao equipamento (elemento 13).



PERIGO

Ao realizar este passo, garanta que o interruptor se encontra a posição '0' de modo a garantir que não exista tensão nas tomadas de alimentação do motor.



Figura 3.4 – Comutador do módulo na posição "0" - desligado.

3.1.5. Conexão de sensores

Este módulo contém sensores de corrente e tensão, unicamente para **uma conexão trifásica**, no entanto, possibilita igualmente a conexão de um sensor externo, com dois sinais e *ground* comum.

1. Através do cabo *jack* stereo (item f), insira o mesmo à tomada encontrada na zona inferior da parte lateral direita do módulo (elemento 16) e conecte a outra extremidade do cabo ao sensor que pretende colocar no motor, tendo em conta:

Tabela 3.3- Identificação das cores do cabo dos sensores.

Preto	GND
Azul	Sinal ± 10 V
Vermelho	Sinal ± 10 V

 **ATENÇÃO**

Por ser uma tomada stereo, significa que o sensor apenas poderá conter uma ou duas saídas de sinal e um *ground* comum aos dois.

O sensor não poderá exceder o valor de sinal de ± 10 V.

3.1.6. Arranque do motor

Depois do equipamento, da máquina para teste e sensores estarem devidamente conectados, já se pode proceder de uma forma segura ao arranque da máquina.

1. A) Caso tenha optado por uma alimentação do módulo através de uma alimentação monofásica, coloque o interruptor (elemento 3) no número 1.



Figura 3.5 - Interruptor para ligação do aparelho na posição "1" - ON Motores Monofásicos.

- B) Caso tenha optado por uma alimentação trifásica, coloque o interruptor (elemento 3) na posição 2.



Figura 3.6 - Interruptor para ligação do aparelho na posição "2" - ON Motores Trifásicos.

2. Para realizar o arranque da máquina, pressione o botão de pressão verde, do lado esquerdo se for um motor monofásico (elemento 7), do lado direito se for um motor trifásico (elemento 9).
3. Para parar o motor, basta pressionar no botão vermelho ao lado do botão de arranque que pressionou (elemento 8 ou 10), ou pressionar a botoneira de emergência (elemento 11), realizando uma paragem quer de um ou dos dois tipos de motor.

3.2. Interface de processamento e análise de dados

Para utilização da interface de processamento e análise dos dados recolhidos através do módulo de teste, é necessária a instalação *labview*, da *National Instruments*TM, assim como os *drivers* necessários para a placa de aquisição de dados NI6008¹.

Esta interface foi programada através da versão 16 do *labview*, não aconselhando a utilização de versões inferiores a 2011, de modo a garantir o bom desempenho e a utilização de todos as funções utilizadas.

3.2.1. Funcionalidades da interface

Esta interface de apoio ao módulo de teste tem as seguintes funcionalidades:

- Gravação do nome do técnico, dados técnicos da máquina, tipo de avaria, comentários adicionais;
- Visualização do melhor esquema de corrente a colocar no interior do quadro;
- Análise da corrente e tensão em tempo real;
- Análise dos sensores externos em tempo real;
- Gravação dos dados adquiridos (corrente, tensão e sensores).

3.2.2. Colocação em operação

1. Antes de começar qualquer passo na interface, garanta que o módulo de teste se encontra conectado (elemento 15) ao computador através do cabo USB (item g) fornecido.
2. Ao abrir o ficheiro “Interface Módulo de Teste”, garanta que se encontra aberto o “*Front Panel*” e não o “*Block Diagram*”.

¹ <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-117/lang/pt>

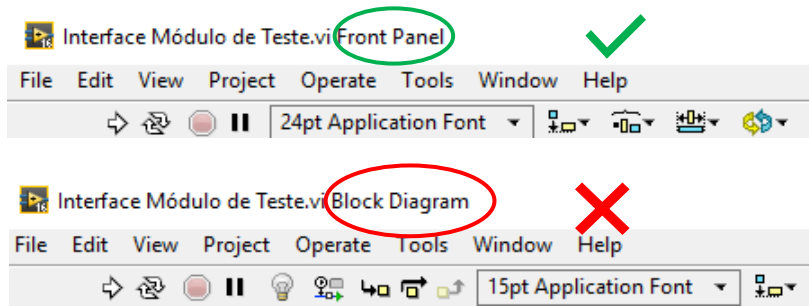


Figura 3.7 – Painel a abrir – Diferença entre "Front Panel" e "Block Diagram".

Caso esteja aberto o "Block Diagram", pressione o ícone "Windows", "Show Front Panel".

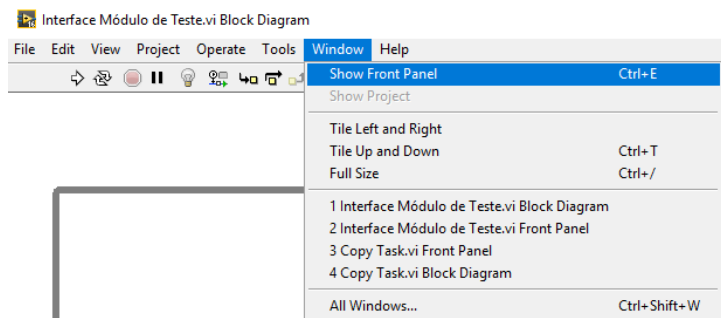


Figura 3.8 - Visualização do "Front Panel".

3. De seguida, para iniciar o programa seleccione o seguinte ícone:

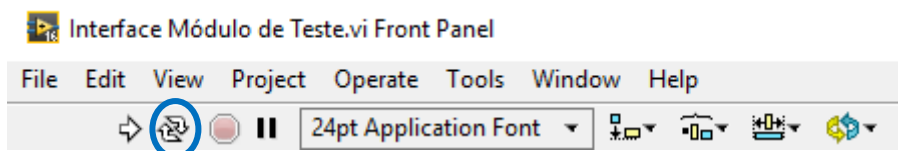


Figura 3.9 - Iniciação do programa.

4. No menu inicial comece por digitar o seu nome, bem como os dados do motor em teste, premindo de seguida o ícone "ok".

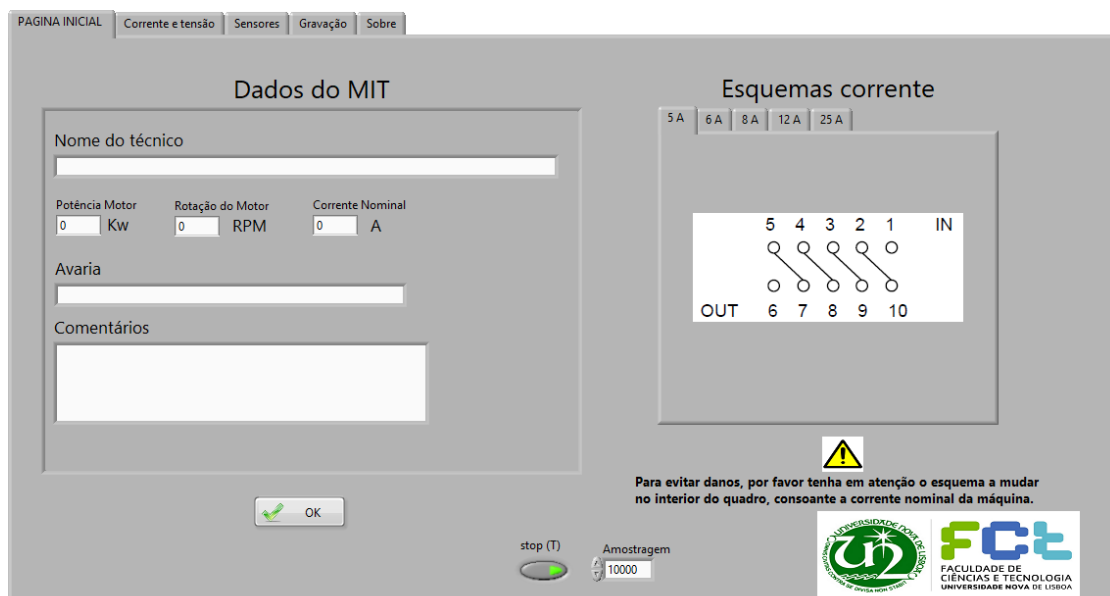


Figura 3.10 - Pagina inicial.

5. Selecione a pasta e o nome do ficheiro que pretende guardar.

Aqui irá guardar um ficheiro em formato .txt onde irão estar todas as informações introduzidas, assim como a data e a hora.



ATENÇÃO

É de elevada importância a introdução da corrente nominal do motor em teste, pelo facto de a partir desta, o utilizador ser informado qual a melhor ligação a colocar na placa existente dentro do quadro (CAPITULO 2 – 4º PASSO).

6. De seguida, deve escolher o número de amostragem adequado. Por defeito o valor é de 10000 amostras, no entanto aconselha-se uma taxa de amostragem de 4000, para uma melhor relação velocidade/qualidade de dados.

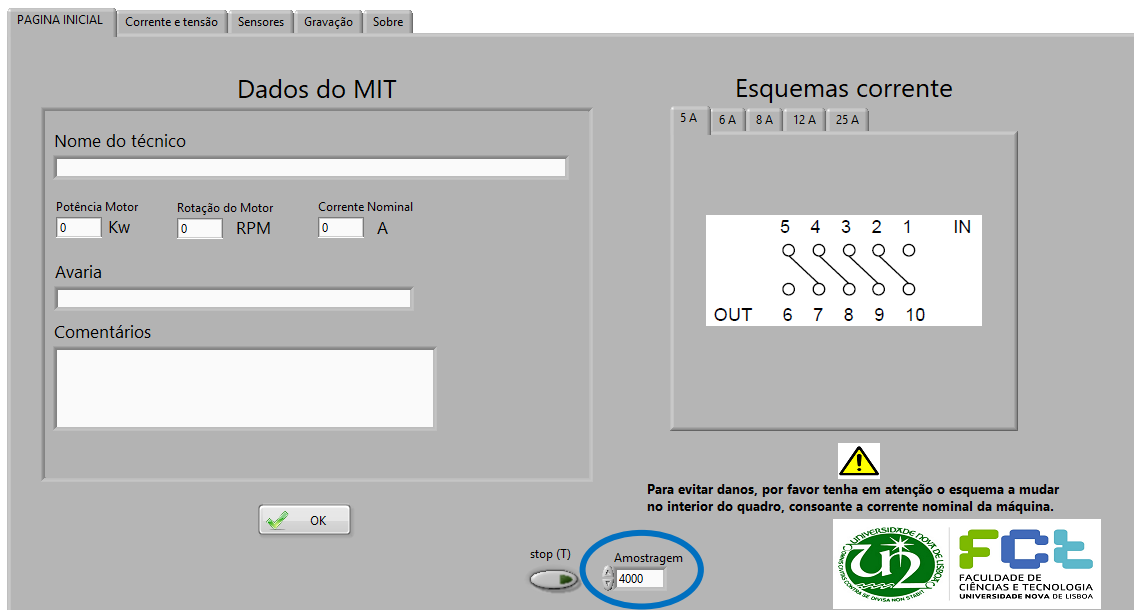


Figura 3.11 - Escolha de amostragem.

7. Após todos os dados acima preenchidos, e esquemas de corrente corretamente introduzidos, o utilizador poderá colocar a máquina em funcionamento (**CAPÍTULO 3.1.6 – PASSO 7**).

3.2.3. Análise de dados

1. Para a análise da corrente e tensão do motor de indução trifásico em tempo real, esta interface tem as seguintes opções:
 - Análise da assinatura de corrente e de tensão
Selecione o separador “Corrente e tensão” -> “Assinatura”
 - Formas de onda da corrente e da tensão
Selecione o separador “Corrente e tensão” -> “Formas de onda”
 - Valores
Selecione o separador “Corrente e tensão” -> “Valores”

Durante a visualização das correntes e tensões, o utilizador contém do lado direito, 6 interruptores de modo a selecionar o que pretende visualizar (três para a corrente e três para a tensão).

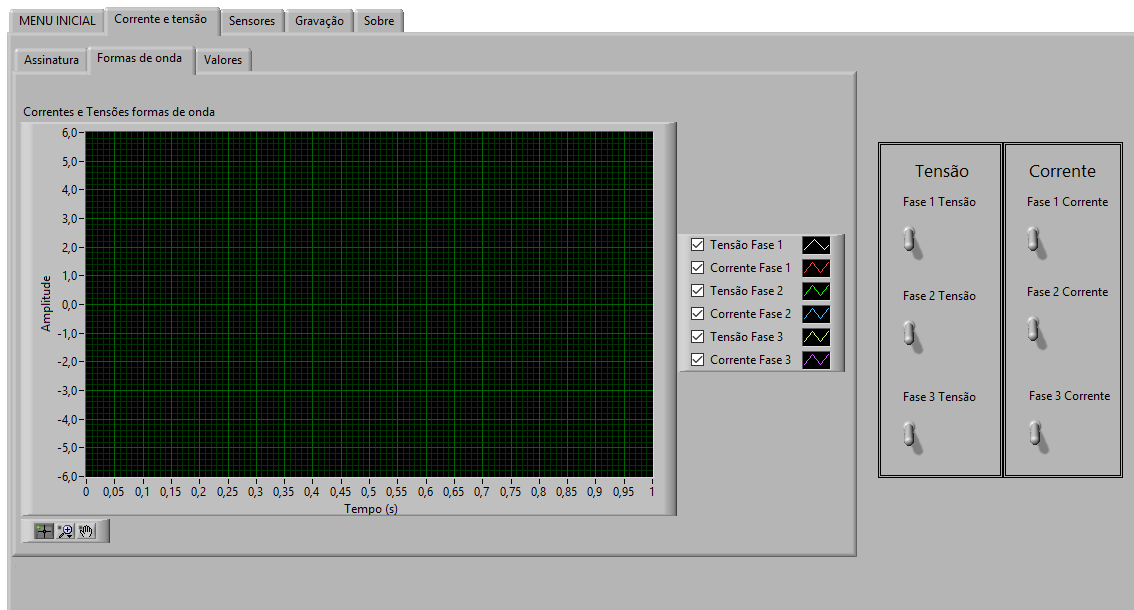


Figura 3.12 - Separador de análise da corrente e tensão.

2. Para a análise dos sensores externos temos:

- FFT dos sensores externos
Selecione o separador “Sensores” -> “FFT”
- Formas de onda dos sensores externos
Selecione o separador “Sensores” -> “Formas de onda”

Para análise dos sensores externos o utilizador tem acesso a dois interruptores para seleccionar qual o sensor que pretende analisar, assim como um local para introduzir um valor multiplicativo consoante o valor de saída do sensor a utilizar.

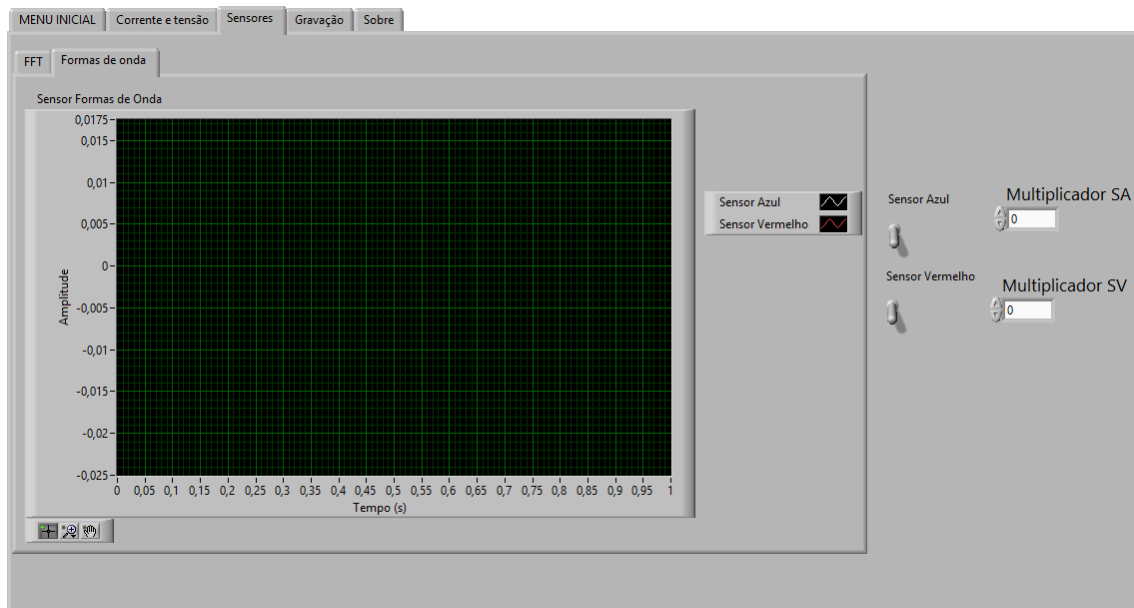


Figura 3.13 - Separador de análise de sensores externos.

3.2.4. Gravação de dados

De modo a poder analisar os dados do motor posteriormente através de outros métodos, esta interface permite a recolha de dados para esse efeito.

1. Antes de gravar os dados, caso pretenda introduzir qual a avaria do motor e/ou algum comentário, faça-o no separador do menu inicial e seleccione “ok” (**Capítulo 3.2.2 - Passo 4 e 5**).
2. De seguida, seleccione o separador “Gravação” e coloque a duração que pretende gravar em segundos, e seleccione “ok”.
3. Seleccione a pasta para gravar e o nome do ficheiro.
4. Assim que gravação tiver terminada, é informado do mesmo através do sinalizador (Figura 3.14)

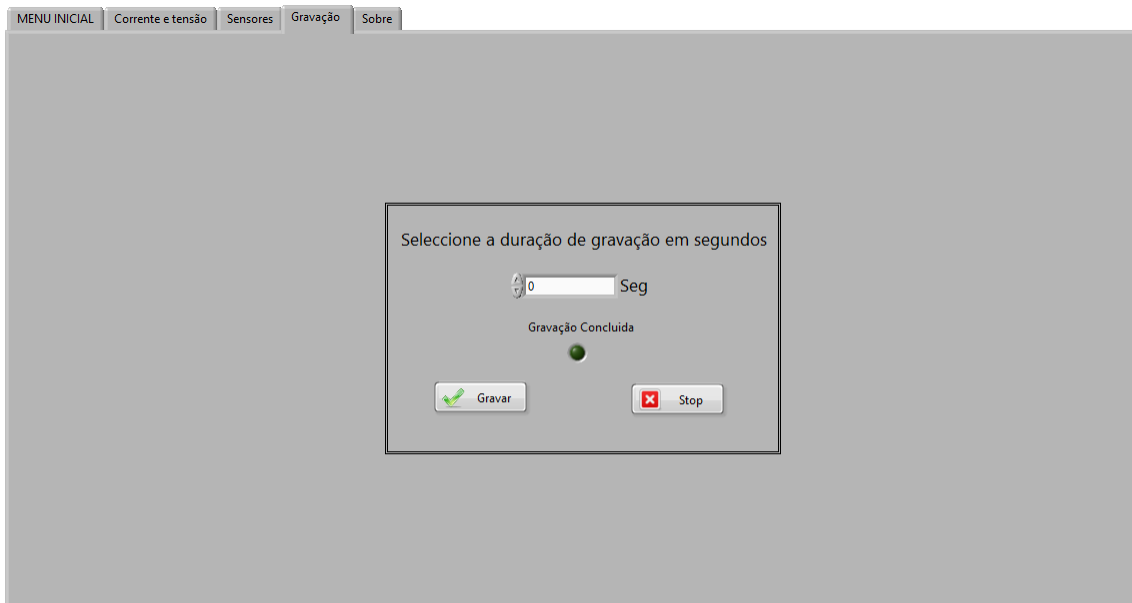


Figura 3.14 - Página de gravação de dados.

5. Especificações gerais

Tabela 5.1 - Especificações gerais².

Alimentação e saída	
Alimentação trifásica	380 V (3 fases + Neutro + Terra)
Alimentação monofásica	230 V (Fase + Neutro + Terra)
Corrente máxima motor trifásico	18 A
Corrente máxima motor monofásico	9 A
Aquisição de dados	
Tensão máxima	± 10 V (2 linhas de sinal + <i>ground</i>)
Resolução de Entrada	12 Bits
Taxa de amostragem máxima	10KS/s
Generalidades	
Temperatura de Funcionamento	0°C ... +70°C
Temperatura de armazenamento	-25°C ... +70°C
Índice de proteção	IP 65, IK 10
Peso	11,4 Kg
Dimensões	450 × 400 × 200 mm

² Todos os dados apresentados foram retirados das especificações dos componentes utilizados, e devidamente analisados os seus limites.