



**Renato Pinto Assunção**

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores

## **Ensino de Detecção de Avarias em Motores de Indução**

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

Orientador : Prof. Dr. João Francisco Alves Martins,  
Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Pedro Pereira

Arguente: Professor António Roque

Vogal: Professora Anikó Costa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2014**



## **Ensino de Detecção de Avarias em Motores de Indução**

Copyright © Renato Pinto Assunção, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*"We are at the very beginning of time for the human race. It is not unreasonable that we grapple with problems. But there are tens of thousands of years in the future. Our responsibility is to do what we can, learn what we can, improve the solutions, and pass them on."*

*Richard P. Feynman*



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Martins, por toda a ajuda, motivação e principalmente por todo o tempo dispendido para me possibilitar a realização desta dissertação.

Aos meus colegas de curso que comigo fizeram esta longa caminhada, partilharam experiências e tornaram possível a concretização desta etapa. Um agradecimento especial ao André Santos, Tiago Cardoso, Filipe Ferreira, João Almeida, Nuno Mancelos e Joana Correira.

Um muito obrigado aos meus grandes amigos Rui Caeiro, José Carvalho, João Medeiros, Ana Cabral, Margarida Barradas, Ana Barahona, Cristina Barahona, Helena Barahona, Ricardo Carrão, Miguel Paiva, Maria Barahona, Carlos Barahona, Helena Vitória, José Henriques e Diana Kumar por todo o apoio que me deram durante este caminho.

Também àqueles que por trás dos bastidores me forneceram uma ajuda essencial para que esta dissertação fosse possível, ao Carlos, ao Vasco e ao Fernando.

À minha família, por toda a confiança depositada em mim. Ao meu pai Luís Assunção e à minha mãe Susana Pinto bem como ao meus irmãos Bernardo Assunção e Santiago Assunção.

Por ultimo um agradecimento à minha namorada, Susana Barahona, pela paciência, pela compreensão, pelos ensinamentos e ajuda que me prestou no decorrer destes anos, mas, especialmente por ter estado sempre a meu lado.



# Resumo

---

O avanço tecnológico promoveu uma crescente fiabilidade no que respeita a motores elétricos (principalmente nos Motor de Indução (MI)). Estes representam mais de 80% do total de motores elétricos utilizados em todo o mundo. A sua avaria inesperada num ambiente industrial pode significar pesados prejuízos e transtornos, fazendo com que métodos de deteção de avarias modernos sejam cada vez mais atrativos para estes ambientes. Apesar da grande necessidade industrial de profissionais capazes de lidar com estas temáticas, existe uma grande escassez de materiais de ensino que permitam o conhecimento adequado dos métodos de deteção.

Esta dissertação apresenta um sistema capaz de lidar com as necessidades educacionais encontradas hoje em dia, no que respeita ao ensino de deteção de avarias em MIs. O sistema apresentado permite a realização de ensaios em ambiente laboratorial, permitindo aos alunos visualizarem o funcionamento de um único motor em vários estados de avarias pré-programadas. Em cada uma das avarias possíveis de emular, o aluno pode tomar várias opções de simulação, alterando parâmetros específicos da avaria.

Para além de permitir a realização de diferentes ensaios, este sistema constitui ainda uma interessante ferramenta de ensino no que respeita à deteção de avarias em MIs, contendo ferramentas que visam apoiar a educação nesta temática. Essas ferramentas incluem documentos (ou um portal) desenvolvidos especificamente para este tema e exercícios didáticos que podem ser realizados diretamente no sistema.

Dada a sua versatilidade, este sistema poderá vir a constituir uma ferramenta de extrema importância didática no ensino de deteção e diagnóstico de avarias no MI.

**Palavras-chave:** Diagnóstico de Avarias, Motor de Indução, Educação

---



# Abstract

---

The technological advance promoted a crescent reliability in the electric machine (mainly in the induction machine). These machines represent more than 80% of all the electric machines used all over the world. Its unexpected breakdown in an industrial environment could mean lots of losses, due to this, fault detection methods are becoming even more used in this environment. Despite the industrial need for professionals capable of handling this theme, there is a huge shortage of education materials that allow the appropriate knowledge in detection methods.

This dissertation presents a system that can handle the educational necessities experienced nowadays, regarding fault detection in the induction machine. The system presented can perform trials in an academic ambient, allowing the students to visualise an induction machine working in faulty conditions. In each faulty state the student can choose between some simulation options, alternating the parameters of the fault.

In addition to perform some trials, this system is an interesting teaching tool regarding fault detection in the induction machine, as it contains some tools to support teaching in this theme. These tools include some documents (or a website) developed specifically regarding this topic and some didactic exercises that can be performed directly in the system.

Given its versatility, this system could be a powerful tool with extreme didactic importance in the induction machine fault detection and diagnosis teaching.

**Keywords:** Fault Diagnosis, Induction Machine, Education

---



# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e motivações . . . . .	1
1.2 Objectivos . . . . .	2
1.3 Estrutura do documento . . . . .	2
<b>2 A Máquina de Indução e o Ensino</b>	<b>5</b>
<b>3 A Máquina de Indução e suas Avarias</b>	<b>9</b>
3.1 Máquina de Indução . . . . .	9
3.1.1 Principais componentes . . . . .	10
3.1.2 Campo girante . . . . .	11
3.2 <i>Motor Current Signature Analysis (Motor Current Signature Analysis (MCSA))</i>	12
3.3 Avarias no MI . . . . .	13
3.3.1 Barras do rotor quebradas . . . . .	16
3.3.2 Excentricidade . . . . .	18
3.3.3 Rolamentos danificados . . . . .	20
3.3.4 Curto-Circuito nos enrolamentos do estator . . . . .	24
<b>4 Sistema de Ensino de Detecção de Avarias em MIs</b>	<b>29</b>
4.1 Descrição Geral do Sistema . . . . .	29
4.2 Especificações Gerais do Sistema . . . . .	30

4.3	Circuito de Potência . . . . .	32
4.4	Circuito de Controlo . . . . .	33
4.4.1	Descrição do microcontrolador . . . . .	34
4.4.2	Diagrama de ligações do dsPIC . . . . .	35
4.4.2.1	dsPIC de controlo . . . . .	36
4.4.2.2	dsPIC de recolha de dados . . . . .	38
4.4.3	Programação dos microcontroladores . . . . .	39
4.4.4	Comunicação e processamento de dados relativamente aos dsPIC . . . . .	39
4.4.4.1	dsPIC de controlo . . . . .	41
4.4.4.2	dsPIC de recolha de dados . . . . .	45
4.5	Software de Supervisão . . . . .	46
4.5.1	Desenho gráfico e menus . . . . .	47
4.5.1.1	Ficheiro . . . . .	47
4.5.1.2	Utilizador . . . . .	48
4.5.1.3	Emulação de Falhas . . . . .	49
4.5.1.4	Exercícios . . . . .	51
4.5.1.5	Configuração . . . . .	52
4.5.1.6	Sobre e Ajuda . . . . .	53
4.5.2	Sistema de Simulação . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Material Didático e Pedagógico</b>	<b>55</b>
5.1	Software de Supervisão . . . . .	55
5.1.1	Simulação de Avarias . . . . .	56
5.1.1.1	Barras do rotor partidas . . . . .	56
5.1.1.2	Avaria nos rolamentos . . . . .	58
5.1.1.3	Excentricidade . . . . .	60
5.1.1.4	Avaria nos enrolamentos do estator . . . . .	62
5.1.2	Exercícios didáticos . . . . .	64
5.1.2.1	Exercício tipo simulação . . . . .	64
5.1.2.2	Exercício tipo emulação . . . . .	66
5.1.3	Documentação de apoio . . . . .	67
5.2	Portal DAAMI . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Conclusão e Perspetivas Futuras</b>	<b>71</b>
6.1	Síntese geral . . . . .	71
6.2	Publicações . . . . .	72
6.3	Perspetivas futuras . . . . .	72

# Lista de Figuras

3.1	Partes constituintes do MI com rotor em gaiola de esquilo e refrigerado a ar.	10
3.2	Tipos de rotor de um MI.	11
3.3	Campo girante resultante, em seis tempos distintos	12
3.4	Motor sem Avaria.	14
3.5	Avarias em MIs.	15
3.6	Representação de uma quebra numa barra do rotor (esquerda) ou no anel (direita) [16].	17
3.7	Motor com uma barra partida.	18
3.8	Diferentes tipos de excentricidade	20
3.9	Motor com excentricidade.	21
3.10	Rolamento com estrias [39].	21
3.11	Geometria de um rolamento típico, adaptado de [18].	22
3.12	Motor com uma avaria nos rolamentos.	24
3.13	Diferentes tipos de curto-circuitos no estator (adaptado de [21]).	24
3.14	Motor com um curto circuito entre espiras dos enrolamentos do estator.	27
4.1	Esquema simplificado do sistema de ensino de avarias.	30
4.2	Diagrama de blocos do circuito de potência.	32
4.3	Circuito de potência - retificador de entrada.	32
4.4	Circuito de potência - braço ( <i>Insulated-gate bipolar transistors</i> (IGBTs)) de uma das fases de alimentação do MI.	33
4.5	Fluxograma do sistema.	33
4.6	Diagrama de pinos presentes no dsPIC utilizado. Cada pino branco suporta 3.3V e cada pino cinzento suporta 5V [47].	35
4.7	Circuito de controlo.	36
4.8	Dispositivo UM232R utilizado na comunicação [51].	40
4.9	Algoritmo utilizado para a transmissão e armazenamento de dados.	43
4.10	Relação entre a fase do envio e o preenchimento correto das tabelas.	45

4.11	Página inicial do software de supervisão. . . . .	48
4.12	Diagrama de menus do software de supervisão. . . . .	49
4.13	Menu emulação de falhas. . . . .	51
4.14	Menu de configuração. . . . .	52
5.1	Simulação de barras do rotor partidas: 1 barra partida e 5% de escorregamento. . . . .	56
5.2	Simulação de barras do rotor partidas: 6 barras partidas e 5% de escorregamento. . . . .	57
5.3	Simulação de barras do rotor partidas: 6 barras partidas e 10% de escorregamento. . . . .	57
5.4	Simulação de avaria nos rolamentos com $n_1 = 2$ , $n_2 = 1$ e escorregamento igual a 5%. . . . .	58
5.5	Simulação de avaria nos rolamentos com $n_1 = 3$ , $n_2 = 1$ e escorregamento igual a 5%. . . . .	59
5.6	Simulação de avaria nos rolamentos com $n_1 = 1$ , $n_2 = 3$ e escorregamento igual a 5%. . . . .	59
5.7	Simulação de excentricidade com ordem da excentricidade igual a 1, ordem da harmónica igual a 1 e escorregamento igual a 2.5%. . . . .	60
5.8	Simulação de excentricidade com ordem da excentricidade igual a 4, ordem da harmónica igual a 1 e escorregamento igual a 2.5%. . . . .	61
5.9	Simulação de excentricidade com ordem da excentricidade igual a 4, ordem da harmónica igual a 2 e escorregamento igual a 2.5%. . . . .	61
5.10	Simulação da avaria nos enrolamentos do estator com severidade baixa e escorregamento igual a 2.5%. . . . .	62
5.11	Simulação da avaria nos enrolamentos do estator com severidade elevada e escorregamento igual a 2.5%. . . . .	63
5.12	Simulação da avaria nos enrolamentos do estator com severidade elevada e escorregamento igual a 15%. . . . .	63
5.13	Exercício tipo simulação, escolha múltipla. . . . .	65
5.14	Exercício tipo simulação, resultados . . . . .	65
5.15	Exercício tipo emulação, com configuração de exercícios. . . . .	66
5.16	Exercício tipo emulação, visão do aluno. . . . .	67
5.17	Material didático, documentos de apoio. . . . .	68
5.18	Portal, página inicial. . . . .	69
5.19	Portal, secção courseware. . . . .	70
5.20	Portal, secção contacts. . . . .	70

# Lista de Tabelas

3.1	Efeito da temperatura ambiente no tempo de vida dos isolamentos [45]. . . . .	26
4.1	Descrição das ligações utilizadas no dsPIC de controlo. . . . .	37
4.2	Descrição das ligações utilizadas no dsPIC de recolha de dados. . . . .	38
4.3	Tabela <i>American Standard Code for Information Interchange</i> (ASCII) para posições em decimal entre 48 e 49. . . . .	41
4.4	Avárias emuladas e os seus parâmetros. . . . .	50



# Acrónimos

**ADC** *Analog Digital Converter*

**ASCII** *American Standard Code for Information Interchange*

**DAAMI** *Deteção Automática de Avarias em Motores de Indução*

**FFT** *Fast Fourier Transform*

**IDE** *Integrated Development Environment*

**IGBT** *Insulated-gate bipolar transistor*

**LED** *Light-emitting diode*

**MCSA** *Motor Current Signature Analysis*

**MI** *Motor de Indução*

**PWM** *Pulse Width Modulation*

**RAM** *Random Access Memory*

**UART** *Universal asynchronous receiver/transmitter*

**USB** *Universal Serial Bus*



# Lista de Símbolos

$A$	Ampére
$BD$	Diâmetro das esferas do rolamento
$f_0$	Frequência fundamental ( $50Hz$ )
$Hz$	Hertz
$I_m$	Corrente máxima
$N_M$	Número de espiras
$n_b$	Número de esferas do rolamento
$n_d$	Ordem da excentricidade
$n_{ws}$	Harmónica do estator
$p$	Número de pares de pólos do motor
$PD$	Diâmetro do rolamento
$R$	Número de barras do rotor em gaiola de esquilo
$s$	escorregamento
$t$	Tempo
$V$	Volt
$\delta$	Distância entre ferro
$\omega$	Velocidade angular





# Introdução

A título introdutório, o presente capítulo pretende fazer o enquadramento e a motivação dos trabalhos desenvolvidos. Apresentam-se ainda os objectivos do presente trabalho e por último a estrutura do documento.

## 1.1 Enquadramento e motivações

No contexto tecnológico atual, o Motor de Indução(MI) enquadra-se numa vasta gama de aplicações, quer em âmbito doméstico ou industrial. O MI corresponde a mais de 80% das máquinas eléctricas em utilização [1], sendo responsável por cerca de 50% do consumo de energia eléctrica numa nação industrializada [2].

Em âmbito industrial, a avaria de um motor eléctrico pode significar vários dias de paragem de uma linha de produção ou de um outro processo, podendo assim implicar prejuízos bastante elevados. Desta forma existe assim uma grande motivação para o crescimento do desenvolvimento de métodos de deteção de avarias por parte da comunidade científica. Alguns destes métodos [3, 4] podem ser utilizados online (ou seja durante o funcionamento normal da máquina), não sendo assim necessária a paragem da máquina, nem mesmo, em alguns casos o desmantelamento da mesma para verificação de componentes. Estes métodos de deteção de avarias apresentam inúmeras vantagens, sendo que o facto de realizarem o diagnóstico em tempo real é uma das mais importantes, permitindo uma monitorização constante. Este facto permite acompanhar o desenvolvimento da avaria, tornando assim possível agendar a reparação da máquina para uma paragem programada.

Embora os métodos de detecção e diagnóstico de avarias estejam bastante desenvolvidos [5, 6], um ponto chave no seu sucesso assenta na formação de pessoas qualificadas neste âmbito. Este facto torna essencial o desenvolvimento de estratégias de ensino que promovam a formação na detecção de um amplo espectro de avarias, através da abrangência de temáticas que permitam o contacto directo do formando com a máquina.

É ainda de referir que esta dissertação surgiu no trabalho desenvolvido no âmbito do projeto ciência viva Detecção Automática de Avarias em Motores de Indução (DAAMI).

## 1.2 Objectivos

Tipicamente, no que respeita ao ensino de avarias, são utilizados motores avariados para simular cada caso, o que se traduz num investimento elevado, visto que são necessários motores diferentes para cada um dos casos. Adicionalmente, o uso de um motor avariado proporcionará apenas condições singulares da própria avaria.

Com o intuito de melhorar o ensino de detecção e diagnóstico de avarias em MIs, é objetivo deste trabalho desenvolver uma ferramenta de ensino que permita a realização de emulações das mesmas, utilizando para isso apenas um MI não avariado. O sistema a desenvolver deverá ter duas funcionalidades distintas. Uma offline que permitirá aos utilizadores testarem avarias apenas em ambiente de simulação, utilizando para isso o software de supervisão desenvolvido. Por outro lado o sistema deve permitir a emulação de avarias no MI sem avaria, neste caso o software de supervisão transmitirá ao sistema de controlo do motor as referências necessárias para emular neste a avaria desejada.

Tanto o circuito de controlo como o software de supervisão devem ser desenvolvidos de modo a que todo o sistema suporte várias avarias parametrizáveis, de modo a potenciar ao máximo a gama de emulações possíveis. Para além disso o software de supervisão deve possuir ferramentas de apoio didático, como exercícios que permitam aferir a aquisição de conhecimentos sobre o tema e, documentação de apoio sobre a máquina, suas avarias e detecção das mesmas. Estas ferramentas de apoio didático devem apoiar o ensino desta temática.

## 1.3 Estrutura do documento

Adicionalmente ao capítulo introdutório, o presente documento compreende ainda os seguintes cinco capítulos:

- **Capítulo 2: A máquina de indução e o ensino.**

Este capítulo apresenta um breve estado de arte sobre sistemas de ensino relacionados com o MI, quer em ambiente de simulação e sistemas físicos.

- **Capítulo 3: A máquina de indução e suas avarias.**

Neste capítulo é feita uma breve introdução ao MI, sendo descritas as principais avarias que incidem no mesmo, as consequências que estas têm no seu funcionamento e alguns métodos de deteção.

- **Capítulo 4: Sistema de ensino de deteção de avarias em motores de indução.**

Neste capítulo é descrito todo o desenvolvimento do sistema, estando dividido em duas partes: o desenvolvimento do circuito de controlo, responsável pelo controlo direto do motor e o software de supervisão que funciona como interface Homem-máquina.

- **Capítulo 5: Material didático e pedagógico.**

Neste capítulo são apresentados vários exemplos da funcionalidade do sistema, sendo testados vários tipos de avarias. Adicionalmente são apresentadas as ferramentas didáticas desenvolvidas, as quais são essenciais para o ensino desta temática.

- **Capítulo 6: Conclusão e perspetivas futuras.**

O último capítulo sintetiza todo o trabalho desenvolvido, comparando os objetivos propostos com o produto final, menciona as contribuições oferecidas pela investigação efetuada e pelo sistema desenvolvido, e identifica os possíveis trabalhos futuros que resultariam no melhoramento do sistema em questão.





## A Máquina de Indução e o Ensino

Com o forte desenvolvimento tecnológico que é presenciado nos dias de hoje existe uma grande necessidade de profissionais com formação adequada, capazes de desempenhar papéis chave nesta sociedade. A componente formativa laboratorial tem desempenhado um papel essencial, fortalecendo o conhecimento teórico adquirido durante a formação, nomeadamente no ensino das ciências da vida e engenharias. Neste capítulo é apresentada uma breve revisão dos laboratórios de ensino, dando ênfase à área da engenharia eletrotécnica e, essencialmente aos trabalhos relacionados com os MIs.

Os trabalhos descritos estão divididos em dois grupos distintos:

- Laboratórios físicos: estes sistemas de ensino permitem ao aluno a realização de ensaios em ambiente laboratorial [7, 8];
- Laboratórios de simulação: estes permitem a realização de ensaios em ambiente de simulação utilizando ferramentas especificamente desenvolvidas mas não necessitam de material específico [9, 10].

Em 2005 os professores Ayasun Saffet e Nwankpa Chika da Universidade de Drexel nos Estados Unidos da América, verificaram a falta de preparação recorrente por parte dos alunos, quando estes iniciavam os laboratórios relativos aos ensaios efetuados no MI (i.e.: ensaio com rotor bloqueado e ensaio em vazio). Foi assim desenvolvido um sistema de simulação utilizando o *MATLAB/SIMULINK* que permite a realização dos referidos ensaios em ambiente computacional. Esta prévia simulação permite aos alunos complementar o conhecimento adquirido quer em experiências laboratoriais quer nas aulas teóricas, fortalecendo assim o conhecimento adquirido nesta área. Ainda assim foi, por

parte dos autores, considerado indispensável o contato com os motores e a realização dos ensaios, não vindo o sistema de simulação substituir a realização dos laboratórios mas sim complementá-lo [7].

No ano 2007, na Universidade de Campinas – Brasil, os professores Marcos Lazarini e Ernesto Filho desenvolveram um laboratório que permite efetuar o controlo de um MI utilizando a metodologia de controlo direto de binário. O sistema engloba não só todo o circuito necessário para o seu funcionamento, incluindo o MI trifásico, mas também o software onde o aluno pode desenhar o controlador e testá-lo no motor. Este laboratório veio assim permitir o estudo de controladores não lineares aplicados ao MI. Os autores defendem a grande versatilidade que este sistema possui, podendo ser preparadas várias atividades educativas. Para além disso este permite aos estudantes a interação com as particularidades e dificuldades que o controlo de sistemas não lineares apresenta, utilizando para isso o MI [8].

Após avanços significativos na deteção de avarias em MIs, em 2010, na Universidade Penn State nos Estados Unidos da América, os professores Peter Idowu e Christopher Root desenvolveram o primeiro sistema de ensino com foco na deteção de avarias. Este sistema permite aos alunos reconhecerem a assinatura da corrente correspondente a determinados tipos de avarias, utilizando MCSA. Este sistema conta com um software desenvolvido utilizando a ferramenta *LabVIEW* e permite determinar a assinatura da corrente, a qual está relacionada com um tipo de avaria. O facto deste sistema estar totalmente desenvolvido em ambiente de simulação permite, segundo os autores, dotar os alunos do conhecimento sobre este tema de uma forma rápida e eficaz, podendo ser ainda utilizado em outros casos que não a deteção de avarias, como as harmónicas induzidas por diferentes cargas [10].

Recentemente, em 2012, foi desenvolvido no Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría em Cuba, pelo professor A. Costa e seus colaboradores, uma biblioteca com o intuito de ser utilizada no software *MATLAB/SIMULINK*, permitindo efetuar o controlo de motores pelo método *field oriented control*. Os autores afirmam que os resultados apresentados pelas simulações são idênticos aos obtidos experimentalmente, referindo ainda que o sistema é mais fácil de utilizar, interativo e flexível do que um sistema experimental, permitindo ainda que sejam realizados mais testes, sendo que no ambiente de simulação cada teste é feito em consideravelmente menos tempo. Para além disso o sistema não necessita de instalações físicas uma vez que o utilizador pode realizar os testes fora do contexto letivo [9].

Apesar de alguns autores defenderem que o laboratório experimental continua a ser uma parte fundamental na formação de profissionais [7, 8], o seu custo é elevado [11], pois necessita de equipamento com características bastante específicas. Tendo em conta

este facto alguns sistemas baseados unicamente em simulação foram desenvolvidos [9, 10].

Considerando os trabalhos descritos, o sistema que será apresentado enquadra-se nas necessidades vividas hoje em dia. Este tem como foco uma área com grande necessidade, a deteção de avarias, é interativo e de fácil utilização como defende [9]. No entanto este sistema não dispensa o contato do aluno com a máquina, sendo assim necessário a dedicação de tempo e espaço para a realização do laboratório se como defende em [7]. Adicionalmente este sistema permite ainda a simulação de avarias fora do contexto letivo complementando assim o ensino efetuado em âmbito académico como defende [7].

Não foi encontrado nenhum sistema que permiti-se a realização de ensaios de avarias num motor de indução sem avaria. Tipicamente para a realização deste tipo de ensaios são utilizados vários motores com avarias específicas.





# A Máquina de Indução e suas Avarias

Desde sempre se tem vindo a desenvolver metodologias de fabrico e novas tecnologias de modo a tornar os MIs mais eficientes e fiáveis. Esta máquina elétrica é parte essencial na indústria atual, levando a grandes perdas financeiras e muitos transtornos em caso de avaria. Muitos métodos de deteção de avarias, com vista ao diagnóstico atempado da mesma têm sido desenvolvidos. No entanto, parte fulcral deste mecanismo de deteção incide nos especialistas que os operam, sendo assim importante providenciar formação adequada na área das avarias, na sua deteção e diagnóstico.

Neste capítulo será descrita de forma breve o MI, bem como as principais avarias a este associadas. Adicionalmente, quando justificado, será apresentado um dos mecanismos mais utilizados hoje em dia no que respeita à deteção de avarias em tempo real, o MCSA, o qual serviu de base ao desenvolvimento da ferramenta de ensino posteriormente descrita.

## 3.1 Máquina de Indução

O MI é largamente utilizado nos dias de hoje, tanto a nível doméstico como industrial, representando mais de 80% dos motores elétricos utilizados no mundo [1]. Curiosamente, esta máquina (em particular na sua versão de rotor e curto-circuito), a qual apresenta um baixo custo, fácil manutenção, simplicidade e robustez, foi inventada ainda no século XIX por Nikola Tesla [12, 13]. Devido à sua grande utilização, esta máquina é responsável pelo consumo de mais de 50% da energia produzida por uma nação industrializada [2, 14].

### 3.1.1 Principais componentes

O MI é composto fundamentalmente por duas grandes partes, estator e rotor, estando estes separados por um espaço aberto constante, o entreferro, com uma espessura que varia entre 0.4mm e 4mm [13]. No entanto, existem vários outros componentes necessários ao seu bom funcionamento, entre eles os rolamentos, os enrolamentos do estator, o veio, entre outros que estão ilustrados na figura 3.1. O desgaste de alguns destes componentes pode provocar vários tipos de avarias no MI que levam ao mau funcionamento da máquina. Em algumas situações estas falhas tomam proporções tais que a sua reparação deixa de ser viável, sendo necessária a substituição da máquina, o que resulta em custos bastante agravados. Desta forma é importante efetuar uma atempada deteção e diagnóstico destas avarias.

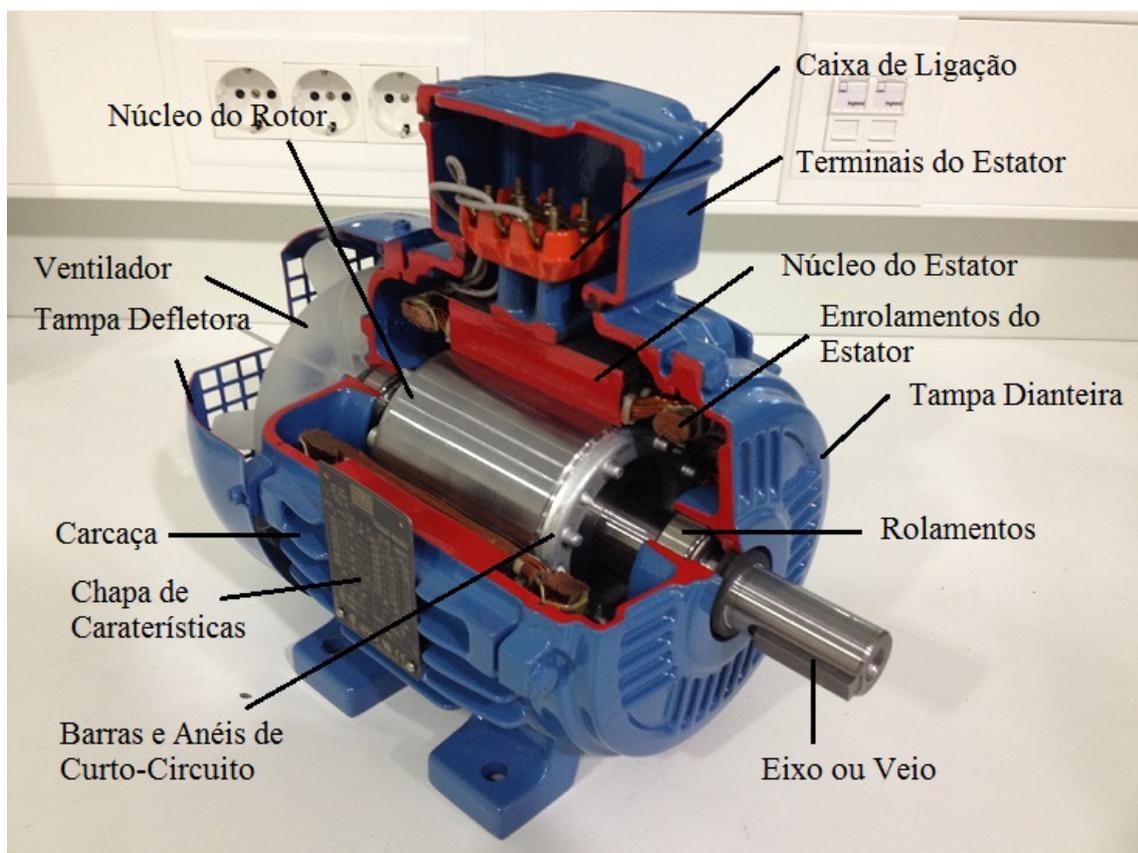


Figura 3.1: Partes constituintes do MI com rotor em gaiola de esquilo e refrigerado a ar.

O estator da máquina de indução é composto por chapas de aço separadas por verniz, de modo a diminuir o efeito das correntes de Foucault. Estão sobrepostas e unidas

através de rebites ou soldadura, formando assim o circuito magnético do estator. Os enrolamentos do estator são posicionados em ranhuras pré fabricadas. Existe também um material isolante (tipicamente resina de epóxi e papel de mica [15]) que previne o contacto elétrico entre as espiras dos enrolamentos e o próprio estator [16].

Tal como o estator também o rotor é composto por chapas de aço. Tipicamente o MI é composto por um rotor em gaiola de esquilo, como o apresentado na figura 3.2(b), pois este tipo de rotor é mais simples, robusto e tem um custo mais reduzido [17], por sua vez a gaiola é produzida em ligas de alumínio ou cobre. No entanto, em alguns casos estes motores utilizam um rotor bobinado com espiras em cobre como o apresentado na figura 3.14(a).

Este tipo de máquina tem uma aplicação bastante polivalente, existindo máquinas monofásicas e polifásicas, porém esta dissertação incide nas mais usuais, as máquinas trifásicas.



(a) Rotor Bobinado.



(b) Rotor em Gaiola de Esquilo.

Figura 3.2: Tipos de rotor de um MI.

### 3.1.2 Campo girante

Este tipo de máquinas de corrente alternada baseia o seu princípio de funcionamento no campo girante. O campo girante é um campo magnético que gira no espaço ao longo do tempo, mantendo a sua amplitude constante. Este campo pode ser produzido por qualquer grupo polifásico de enrolamentos deslocados no espaço, no estator da máquina, e alimentado por um conjunto polifásico respetivo de circuitos elétricos.

O MI trifásico, é composto por três enrolamentos (um para cada uma das fases) deslocados  $120^\circ$  no espaço. Cada um destes enrolamentos é percorrido por uma corrente com a mesma amplitude e deslocada  $120^\circ$  no tempo. As correntes são dadas pelas equações ( 3.1),( 3.2) e( 3.3) sendo  $I_m$  a amplitude em amperes,  $\omega$  a velocidade angular em radianos por segundo e  $t$  o tempo em segundos.

$$I_a(t) = I_m \cos(\omega t) A \quad (3.1)$$

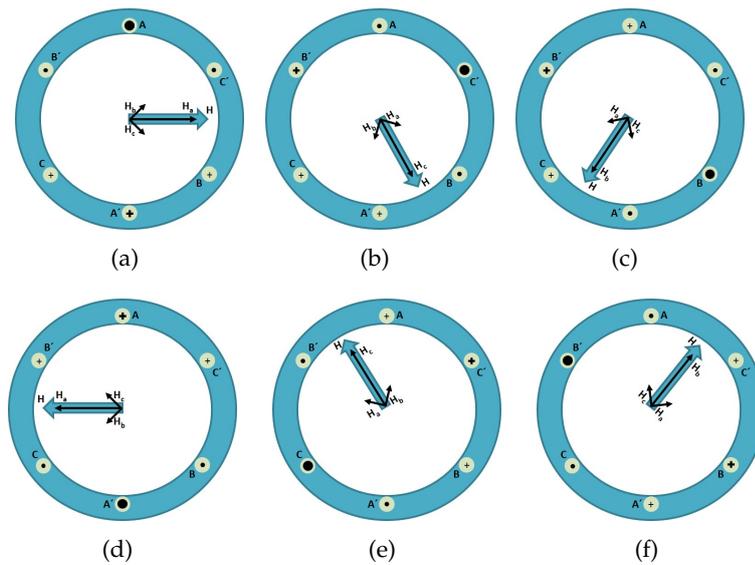


Figura 3.3: Campo girante resultante, em seis tempos distintos

$$I_b(t) = I_m \cos(\omega t + 120^\circ) A \quad (3.2)$$

$$I_c(t) = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) A \quad (3.3)$$

Deste modo, quando alimentado por um sistema trifásico, cada enrolamento do estator irá produzir um campo magnético associado às correntes trifásicas, os quais estão desfasados  $120^\circ$  no tempo (em concordância com as correntes das quais derivam). Deste modo o campo resultante da soma dos três campos magnéticos irá apresentar módulo constante rodando ao longo do tempo com velocidade constante, formando assim um campo girante (equação 3.4) (figura 3.3). Este campo girante irá induzir uma tensão nas barras do rotor (em gaiola de esquilo), fazendo com que este seja percorrido por uma corrente. Por sua vez, esta corrente irá criar um campo magnético oposto ao criado pelo estator, fazendo com que ambos os campos se atraiam. Esta força de atração provoca um binário no rotor, o que faz com que o mesmo se movimente.

$$H_{tot}(\alpha, t) = \frac{3}{2} \frac{N_M I_m}{\delta} \sin(\alpha + \omega t) \quad (3.4)$$

### 3.2 Motor Current Signature Analysis (MCSA)

Desde a existência do MI que se têm vindo a desenvolver vários métodos de deteção de avarias, quer seja por análise de vibração, temperatura, entre outras. No entanto estes métodos tem algumas limitações, muitos deles apenas identificam algumas avarias

específicas e outros não permitem uma monitorização durante o funcionamento da máquina. Deste modo considerou-se importante que a ferramenta de ensino desenvolvida abrangesse um dos métodos de deteção mais comuns, como é o caso do MCSA [19, 20], baseando assim a simulação e emulação de avarias no mesmo.

O MCSA apresenta várias vantagens, que fizeram deste método de deteção um dos mais utilizados na indústria [19]:

- Permite uma monitorização não intrusiva;
- Fornece informação sobre o estado de degradação;
- É altamente sensível a uma grande variedade de avarias;
- O diagnóstico é feito rapidamente;
- Pode ser aplicado em motores de várias potências.

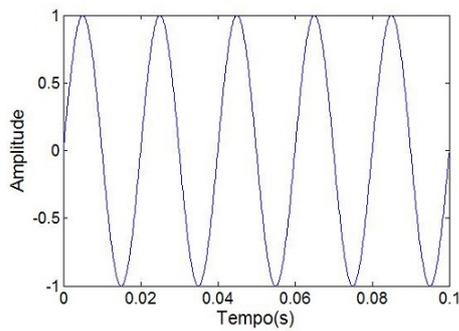
Certas avarias provocam o aparecimento de harmónicas nas ondas de corrente que alimentam os enrolamentos do estator. Deste modo o principio básico por detrás deste método é a leitura destas correntes e a identificação das harmónicas. Este método de deteção é assim efetuado em três passos:

1. Recolha das correntes durante o funcionamento do motor;
2. Cálculo da *Fast Fourier Transform* (FFT) das correntes para identificação das harmónicas que as compõem;
3. Associação das harmónicas encontradas a avarias específicas para identificação das mesmas.

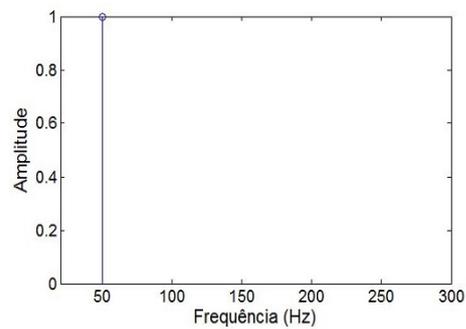
Considerando o funcionamento normal do MI, as correntes do estator devem ter um comportamento sinusoidal com apenas uma componente harmónica situada nos  $50H_z$  como está exemplificado na figura 3.4 (a figura exemplifica apenas uma fase de alimentação do motor, sendo que no caso trifásico as outras duas fases teriam as suas ondas desfasadas 120 graus). Em caso de avaria outras componentes harmónicas iriam aparecer. Essas componentes tem características específicas para cada tipo de avaria, tornando assim possível a sua identificação pela análise das mesmas. De seguida serão descritas as avarias bem como as harmónicas que as representam, quando aplicável.

### 3.3 Avarias no MI

O MI é uma máquina de uso bastante diversificado, podendo assim estar sujeito a ambientes extremos que a deterioram e reduzem o seu tempo de vida. Esses ambientes podem tomar vários padrões de humidade, temperatura, sujidade ou mesmo induzindo



(a) Forma de onda de uma fase de um motor sem avaria.



(b) FFT da Forma de onda de uma fase de motor sem avaria.

Figura 3.4: Motor sem Avaria.

stresses na máquina devido a funcionamentos desadequados, promovendo assim as mais diversas avarias da mesma. Apesar disso, a própria utilização da máquina causa o envelhecimento dos seus componentes, provocando o desgaste e consequentemente o mau funcionamento dos mesmos. Considera-se uma avaria um dano num ou mais componentes que provoquem o mau funcionamento da máquina levando, em caso extremo, a danos irreparáveis sendo, por vezes necessária a substituição de toda a máquina. Podem ser consideradas duas principais categorias de avarias [21]:

- Catastróficas: este tipo de avaria é provocado por uma ocorrência repentina que causa uma interrupção do bom funcionamento da máquina, por exemplo uma sobrecarga repentina na rede que pode levar à falha completa dos enrolamentos do estator, impossibilitando o funcionamento da mesma;
- Evolutivas: este tipo de avaria está diretamente associada ao funcionamento da máquina, sendo provocada pelo desgaste gradual dos seus componentes. Uma pequena falha em qualquer componente da máquina, quer seja devido a um fator externo ou interno, irá sendo agravada com o decorrer do tempo quando não detetada, podendo mesmo levar a falhas bastante graves.

Tipicamente as avarias catastróficas são causadas por fatores externos bastante difíceis de controlar e prever. Por sua vez as evolutivas permitem, aquando de uma deteção atempada da avaria, uma grande redução nos custos associados ao arranjo da máquina, sendo por isso, o tipo de avarias onde incide o estudo de deteção das mesmas e onde incide também o trabalho aqui apresentado.

No MI existem vários tipos de avarias, quer sejam avarias no estator ou no rotor, mecânicas ou elétricas. Tendo em conta este tipo de classificação de avarias, estudos referem que 38% destas incidem no estator do MI, enquanto 40% estão diretamente relacionadas com os rolamentos. Apesar das avarias de estator e dos rolamentos representarem 78% do total de avarias que incidem no motor, 10% têm origem no rotor e 12% têm outras

origens (figura 3.5) [22–24].

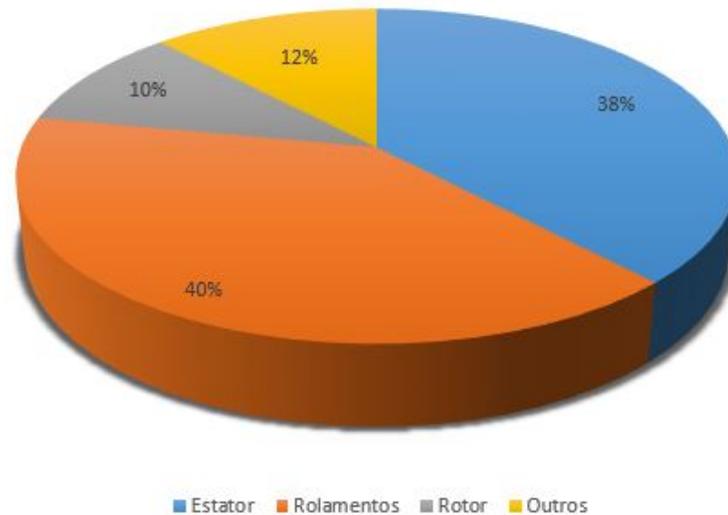


Figura 3.5: Avarias em MIs.

Inúmeras avarias podem afetar um MI, causando as mais variadas alterações no mesmo, quer sejam de origem térmica, sonora, eletromagnética, entre outras. Apesar do elevado número de consequências existentes, com o decorrer do tempo foram sendo desenvolvidos métodos que permitem identificar as avarias tendo em conta as alterações que estas provocam no motor e, que em alguns casos tornam possível identificar o tipo e a severidade da mesma.

O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de métodos de deteção de avarias no MI durante o seu funcionamento normal, sendo assim possível acompanhar a evolução destas fazendo com que o planeamento de uma reparação atempada da máquina seja possível, de modo a que seja causado o mínimo transtorno, aumentando ainda o tempo de vida útil da mesma.

Tendo em conta a categorização feita pela maioria dos autores as principais avarias que incidem num MI são as seguintes [22, 23, 25, 26]:

- Rotor
  - Elétricas
    - \* Barras do rotor quebradas (rotor em gaiola de esquilo)
    - \* Curto-circuito nos enrolamentos do estator (rotor bobinado)
  - Mecânicas

- \* Excentricidade do rotor;
  - \* Avaria no eixo;
  - \* Rolamentos danificados;
- Estator
    - Avaria no núcleo do estator;
    - Curto-circuito dos enrolamentos do estator;

Tendo em conta a listagem de avarias apresentada, apenas as barras quebradas, excentricidade do rotor, rolamentos danificados e curto-circuito nos enrolamentos do estator é que vão ser consideradas para uso no sistema desenvolvido.

### 3.3.1 Barras do rotor quebradas

Barras partidas totalizam cerca de 5% do total de avarias que incidem num MI. Apesar do rotor da máquina ter duas topologias, em gaiola de esquilo ou bobinado, hoje em dia a maioria dos MI estão equipados com rotor em gaiola de esquilo, sendo estas maioritariamente construídas a partir de ligas de alumínio ou cobre. Existem vários fatores que podem provocar a quebra de uma barra na máquina, entre eles fatores térmicos, magnéticos, dinâmicos, mecânicos e ambientais. No que diz respeito aos fatores térmicos estes ocorrem devido a variações de temperatura que podem ser causados por um excesso de carga ou distribuição não uniforme da mesma devido a irregularidades no material. Os fatores magnéticos ocorrem devido a vibrações eletromagnéticas ou forças magnéticas assimétricas, enquanto os dinâmicos se devem ao binário axial ou à força centrífuga. Por fim, fatores mecânicos e ambientais ocorrem devido à degradação de certas partes da máquina e devido a produtos químicos ou humidade, respetivamente [18, 27].

Normalmente uma falha numa barra inicia-se com uma pequena fratura, sendo que o crescimento desta avaria é praticamente exponencial, seguindo a seguinte sequência de acontecimentos [21]:

1. A barra com o defeito irá sofrer um aquecimento excessivo na região da falha, agravando o seu crescimento;
2. Após a fratura da barra irá ser estabelecido um arco elétrico através da mesma, o qual poderá causar danos no núcleo do rotor;
3. Devido à fratura, que apresenta uma resistência a uma corrente superior à normal, as barras adjacentes irão suportar uma corrente mais elevada levando à fadiga da mesma e desenvolvendo novos processos de fratura;
4. Em caso extremo as barras fraturadas podem soltar-se devido à ação das forças centrífugas que atuam no rotor, causando danos físicos em outras barras ou nos enrolamentos do estator.

Uma barra partida (figura 3.6) no rotor pode também ser considerada uma assimetria no mesmo, causando pulsações de binário, correntes desequilibradas [23], diminuição do binário médio e aumento de temperatura da máquina. Tomando o aumento de temperatura a título de exemplo, quando existe uma quebra numa barra do rotor, as barras adjacentes terão de suportar um excesso de corrente provocando assim um aquecimento das mesmas. Isto irá provocar o aquecimento global da máquina, podendo para além de, como referido anteriormente, provocar a avaria em outras barras, causando também avarias noutros componentes do MI, como curto-circuitos nos enrolamentos do estator devido a stresses térmicos que provocam o desgaste dos isolamentos [15]. É ainda importante ter em conta que uma avaria não se encontra isolada na máquina mas, pelo contrário, as suas consequências podem levar a outro tipo de avarias em outras partes do MI. Para evitar isso é bastante importante que a avaria seja detetada numa fase inicial em que os danos causados ainda não sejam graves.

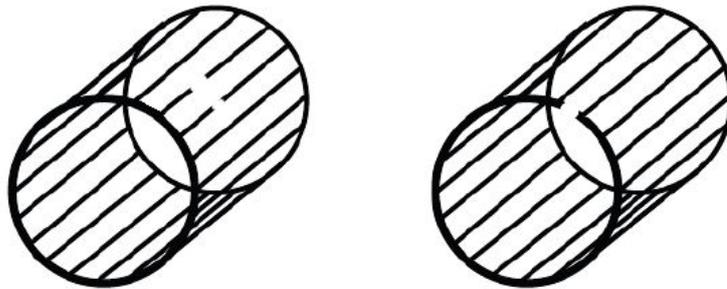


Figura 3.6: Representação de uma quebra numa barra do rotor (esquerda) ou no anel (direita) [16].

Elkasabgy [28] mostrou que a avaria de barras do rotor partidas pode ser detetada por análise da frequência de tensões induzidas. Durante o funcionamento regular, os enrolamentos, simétricos, do estator excitados a uma frequência  $f_0$  induzem correntes nas barras do rotor a uma frequência  $s f_0$  (sendo  $s$  o escorregamento). No caso desta simetria existir também no rotor, existe apenas um campo girante à frequência de escorregamento relativamente ao rotor [29, 30].

Quando uma assimetria é induzida na estrutura do rotor, irá ser criado um campo girante inverso ao movimento do rotor e, essa sequência de rotação inversa  $-s f_0$  inicia uma cadeia de interações magnéticas entre o rotor e o estator do MI. O resultado disto, no que diz respeito aos enrolamentos do estator, é a geração de uma força eletromotriz induzida no mesmo, a uma frequência  $(1 - 2s) f_0$ , causando ondulações no binário e variações na velocidade. De seguida essas ondulações são refletidas no estator como oscilações na corrente à frequência  $(1 + 2s) f_0$ , devido às oscilações provocadas no rotor pela primeira força eletromotriz induzida no estator à frequência  $(1 - 2s) f_0$ . Após isso, as componentes

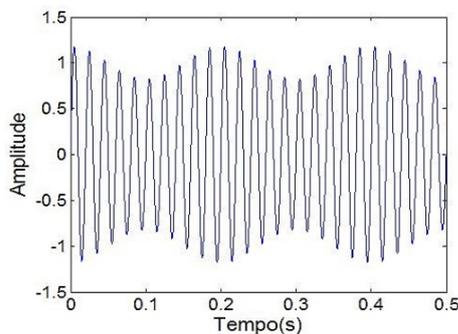
$(1 + 2s)f_0$  induzem correntes no rotor a frequências  $\pm 3sf_0$ . Esta cadeia continua até que a inércia do rotor acabe por filtrar as componentes mais elevadas [14, 18, 30, 31].

Deste modo, no caso da avaria das barras partidas do rotor, a frequência a que irão aparecer as harmónicas na corrente do estator é dada pela equação 3.5 [30].

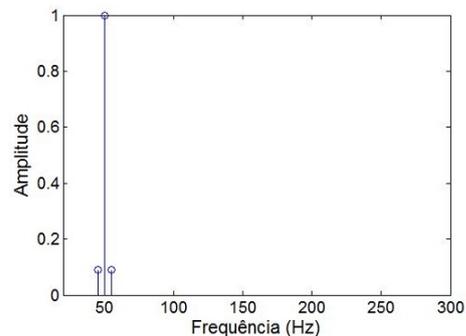
$$f_{BarrasPartidas} = (1 \pm 2s)f_0 \quad (3.5)$$

Observando-se assim o comportamento ilustrado na figura 3.7 (exemplificado apenas para uma fase, com o escorregamento igual a 5%). Verifica-se assim uma modulação na amplitude da onda, a qual pode ser mais ou menos acentuada consoante o número de barras partidas. Um aumento de barras partidas provoca conseqüentemente um aumento na amplitude das harmónicas causadas pela avaria, refletindo-se assim num agravamento da modulação visível na figura 3.7 [14].

Esta forma de onda e harmónicas são características deste tipo de avaria, podendo assim um utilizador especializado identificar o tipo de avaria bem como a sua severidade pela análise das ondas e harmónicas. Este fato reforça assim a importância desta dissertação cujo objetivo é dotar os técnicos dessas capacidades.



(a) Forma de onda de uma fase de um motor com uma barra partida.



(b) FFT da forma de onda de uma fase de motor com uma barra partida.

Figura 3.7: Motor com uma barra partida.

### 3.3.2 Excentricidade

Nos motores elétricos fabricados atualmente o tamanho do entreferro varia entre 0.4mm a 4mm [13]. Devido a esta espessura tão pequena face às dimensões do rotor e do estator, é essencial manter um alinhamento perfeito entre os dois pois, caso o entreferro não seja constante em toda a máquina irão aparecer assimetrias no circuito magnético da mesma. Este fato poderá provocar o mau funcionamento da máquina podendo ainda, caso a variação seja muito grande, existir um embate físico entre o rotor e o estator. A avaria que

traduz esse tipo de ocorrência é conhecida por excentricidade, estando esta dividida em duas subcategorias, excentricidade dinâmica ou estática, podendo também existir uma excentricidade mista que conjuga ambas [23, 25].

Quando uma máquina funciona sem excentricidade (figura 3.8(a)) o rotor e o estator estão perfeitamente alinhados, sendo o centro do último o mesmo que o centro geométrico do primeiro, originando assim um entreferro constante. Deste modo o fluxo magnético que atravessa o entreferro vai ser uniforme em toda a máquina (no caso de mais nenhuma avaria afetar a máquina). A excentricidade estática acontece quando o eixo de rotação do rotor não está centrado relativamente ao estator, o que provoca uma variação na espessura do entreferro, a qual se mantém constante durante o funcionamento da máquina. Por análise da figura 3.8(b) é possível verificar que o entreferro à esquerda do rotor possui sempre uma espessura consideravelmente maior do que do lado direito. A excentricidade estática também se deve a uma ovalização do rotor, provocando assim uma variação na espessura do entreferro. Por sua vez, na excentricidade dinâmica (figura 3.8(c)) a localização do centro de rotação do rotor não se mantém constante, normalmente devido a um eixo deformado ou a uma carga desequilibrada. Neste caso, para além do entreferro não ser constante ao longo do rotor, este também vai variar no tempo, provocando para além de um campo magnético disforme, uma forte vibração da máquina [21, 25, 33].

Apesar da excentricidade estar descrita como duas avarias, dinâmica e estática, tendo estas um conceito distinto, ocorrem normalmente em simultâneo (figura 3.8(d)). Neste caso o rotor não está centrado (excentricidade estática), o que se deve com bastante frequência a problemas no fabrico e na colocação do rotor no interior do estator. Por outro lado, existe a oscilação do centro do rotor (excentricidade dinâmica) em torno de um ponto que não o central, provocando assim uma excentricidade mista [6, 14].

As causas mais frequentes da excentricidade são, normalmente, a ovalização do núcleo do rotor, o mau posicionamento do rotor, defeitos de fabrico ou deformações no veio [34]. Em caso extremo, a excentricidade pode causar o contato entre o rotor e o estator, provocando danos físicos em ambos, podendo danificar os enrolamentos do estator bem como as barras do rotor [18]. Em casos menos severos, a excentricidade provoca, como já referido, variações de espessura no entreferro da máquina. Essa diferença de espessura provoca uma variação do binário produzido pela máquina, o que pode levar a vibrações da mesma e a um menor desempenho [35, 36].

A alteração no circuito magnético causado pela excentricidade causa, à semelhança do que acontece com a avaria de barras partidas, o aparecimento de harmónicas na corrente de alimentação do estator. Estas harmónicas podem ser detetadas através da análise da corrente do estator e associadas à avaria. A sua frequência é dada pela equação 3.6 [30]

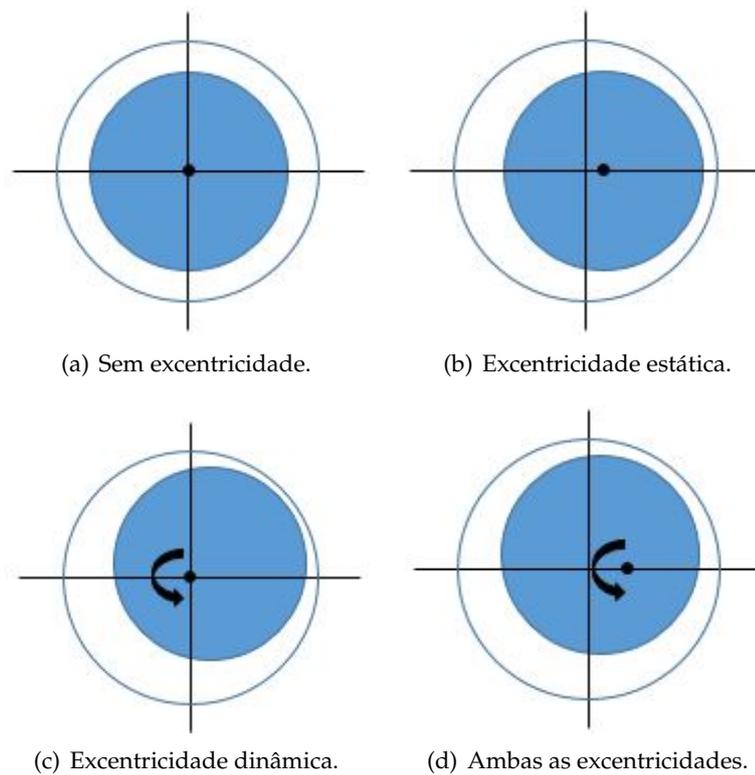


Figura 3.8: Diferentes tipos de excentricidade

onde  $R$  é número de barras do rotor,  $n_d$  é a ordem da excentricidade,  $s$  é o escorregamento do MI,  $P$  o número de pares de polos,  $n_{ws}$  é a categoria da harmónica do estator e  $f_0$  é a frequência de alimentação.

$$f_{excentricidade} = \left\{ (R \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right\} f_0 \quad (3.6)$$

Considerando-se  $n_d = 1$ ,  $n_{ws} = 1$ ,  $p = 2$ ,  $R = 8$ , e  $s = 5\%$  foram encontradas as frequências das harmónicas geradas pela equação 3.6. Pela análise da figura 3.9 verifica-se que a onda sofre algumas alterações, deixando de ser sinusoidal perfeita. Isto deve-se ao aparecimento de quatro componentes em frequências mais elevadas, que neste caso variam entre os  $92.5H_z$  e os  $287.5H_z$ . A análise destes dados torna bastante complicado a identificação desta avaria pois as frequências onde as harmónicas aparecem são bastante elevadas, o que pode ser confundido com ruído.

### 3.3.3 Rolamentos danificados

As avarias nos rolamentos (figura 3.10) de um MI totalizam 40% das falhas que incidem no mesmo. A maioria dos rolamentos em instalações industriais, funcionam sobre condições não ideais, estando sujeitos a fadiga, devido a vibração mecânica, excesso de

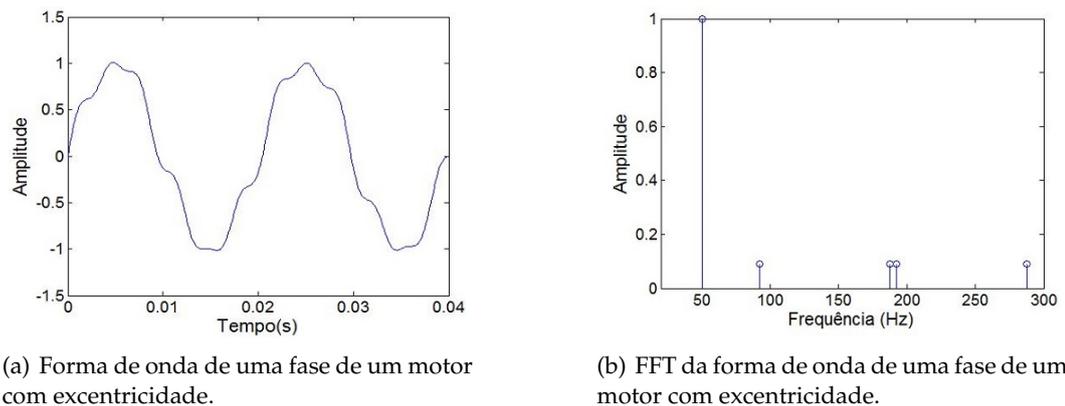


Figura 3.9: Motor com excentricidade.

carga, desalinhamento do eixo, contaminações, corrosões e má lubrificação [18]. De referir é o facto de estas más condições serem responsáveis por 90% das avarias que incidem num rolamento [38]. O rolamento é constituído por diferentes componentes (figura 3.11) estando todos eles sujeitos a desgaste. Tendo em conta a força mecânica a que este componente está sujeito e ao facto de ser uma peça cujos constituintes estão em constante fricção, esta exige uma boa manutenção, sendo uma lubrificação eficaz um ponto chave para o seu bom funcionamento e durabilidade.

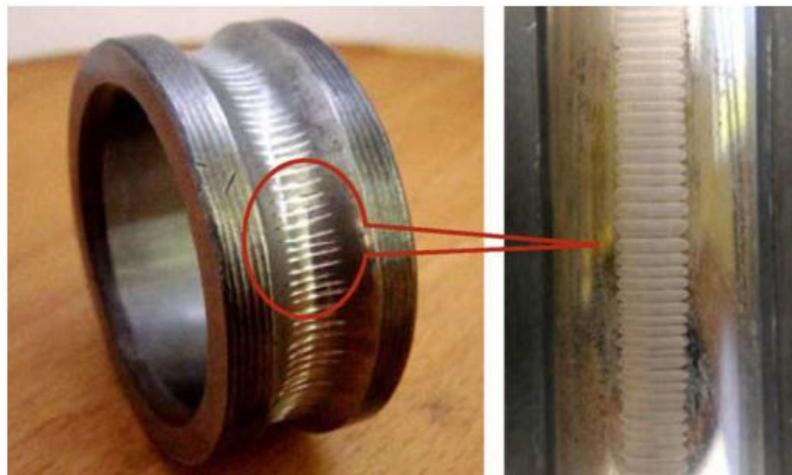


Figura 3.10: Rolamento com estrias [39].

As avarias nos rolamentos causam certas alterações no funcionamento da máquina [38]:

- **Vibração.** Esta advém dos defeitos originados nos componentes do rolamento que originam uma série de impactos entre os elementos rolantes e a superfície do defeito. Consequentemente, o movimento do próprio rolamento, estes impactos sucessivos levam a uma vibração da máquina;

- Ruídos. À semelhança das vibrações, também os impactos entre os elementos rolantes e a superfície do defeito provocam um aumento do ruído da máquina, no entanto quando se tratam de pequenas falhas, esse ruído pode ser confundido com o som emitido pelo funcionamento normal do MI;
- Binário resistente. Mesmo num rolamento em perfeitas condições, existe um binário resistente, mesmo que seja bastante baixo comparativamente ao produzido pela máquina. No entanto, uma avaria pode aumentar significativamente o binário resistente do rolamento, levando a um aumento do esforço exigido pelo MI;
- Aumento de temperatura: Quando bem lubrificado, um rolamento apresenta uma fricção entre as esferas e os anéis bastante baixa, promovendo a durabilidade do mesmo. No entanto, uma lubrificação deficiente ou de má qualidade pode provocar um aumento de fricção entre os componentes do rolamento levando a um aumento de temperatura. Também o fato de existir um binário resistente mais elevado vai causar um aumento no esforço da máquina, que vai ser refletido num aumento da corrente exigida pela mesma e que provoca o aquecimento dos enrolamentos do estator.

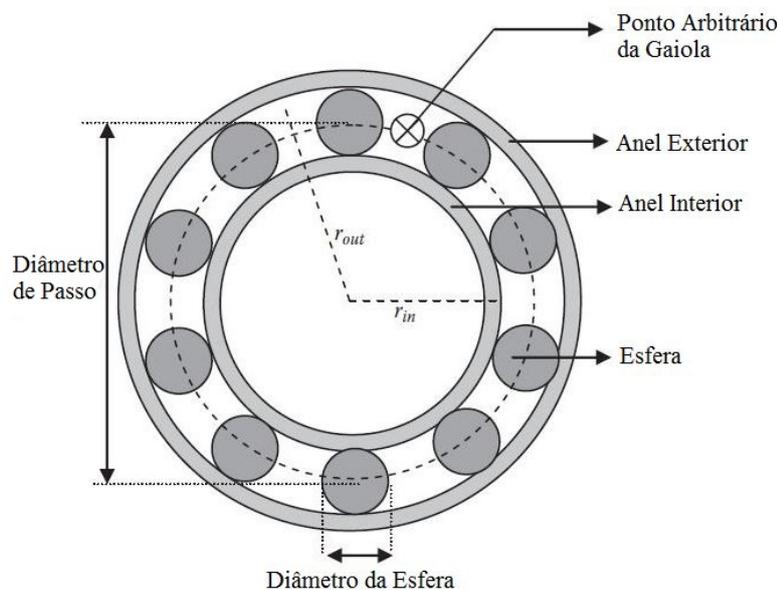


Figura 3.11: Geometria de um rolamento típico, adaptado de [18].

É ainda de referir que a degradação dos rolamentos da máquina liberta certas partículas para os fluídos de lubrificação, devido à elevada força mecânica a que estes estão sujeitos. Deste modo, a análise química do óleo de lubrificação permite analisar o estado de degradação dos rolamentos, no entanto esta análise é difícil de realizar, sendo para isso necessária a paragem da máquina [21, 22].

Apesar dos sinais evidentes a que uma falha grave nos rolamentos pode levar, existem métodos de detecção bastante eficazes no que respeita à detecção deste tipo de avarias. Tradicionalmente utilizam-se os dados relativos à vibração provocada pela avaria, método esse que provou ser bastante eficaz sendo, no entanto, em muitos casos os sinais mecânicos da máquina de difícil recolha, como por exemplo em ambientes com espaço condicionado [40]. Em tais condições é preferível utilizar os sinais elétricos da máquina, como é o caso do método MCSA que, como já referido, utiliza as harmónicas presentes na corrente do estator para identificar as avarias. De modo semelhante ao que acontece com as barras partidas, as avarias nos rolamentos do MI irão provocar uma série de harmónicas na corrente do estator as quais podem ser identificadas e associadas à avaria, permitindo assim uma monitorização online deste tipo de avarias.

Os rolamentos defeituosos vão causar uma flutuação na espessura do entreferro, à semelhança com o que acontece com uma excentricidade dinâmica, sendo por vezes confundida com esta avaria [23]. Como estas flutuações provêm da estrutura defeituosa do rolamento as frequências das harmónicas anormais podem ser derivadas da equação 3.7 [6].

$$f_{rolamento} = f_0 \pm n_b f_{i,0} \quad (3.7)$$

onde:

$$f_{i,0} = \frac{n}{2}(1-s)f_0 \left\{ 1 \pm \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right\} \quad (3.8)$$

Onde  $n_b$  é o número de esferas do rolamento,  $PD$  é o diâmetro do rolamento,  $BD$  é o diâmetro da esfera,  $\beta$  é o ângulo de contato entre as fraturas e a esfera e  $n$  é um inteiro positivo. No entanto, alguns parâmetros como o  $\beta$ , o  $BD$  e o  $PD$  são de difícil obtenção, tornando assim a equação 3.8 bastante difícil de obter, pois é necessário o acesso a dados bastante específicos da máquina e da avaria em si. A equação 3.9 é uma aproximação bastante próxima para todos os rolamentos que contenham entre seis a doze esferas [41], onde  $n_1$  e  $n_2$  são inteiros positivos e  $f_0$  é a frequência da fonte de alimentação.

$$f_{rolamento} = (0.4n_1 + 0.6n_2)(1-s)f_0 \quad (3.9)$$

Considerando assim as harmónicas com a frequência dada pela equação 3.9 (a título exemplificativo considerou-se  $n_1 = 2$  e  $n_2 = 3$ ) e adicionando as mesmas na corrente que alimenta um MI podemos verificar, pela análise da figura 3.12 (está representada apenas uma fase, uma vez que o efeito será igual para as restantes, em caso trifásico, com o desfasamento típico de  $120^\circ$ ) que a amplitude da corrente sofre alterações a cada ciclo, sendo modelada em amplitude. Este formato de onda é característico de uma avaria nos

rolamentos, permitindo assim que o diagnóstico do mesmo seja feito através da análise das harmônicas e da forma de onda.

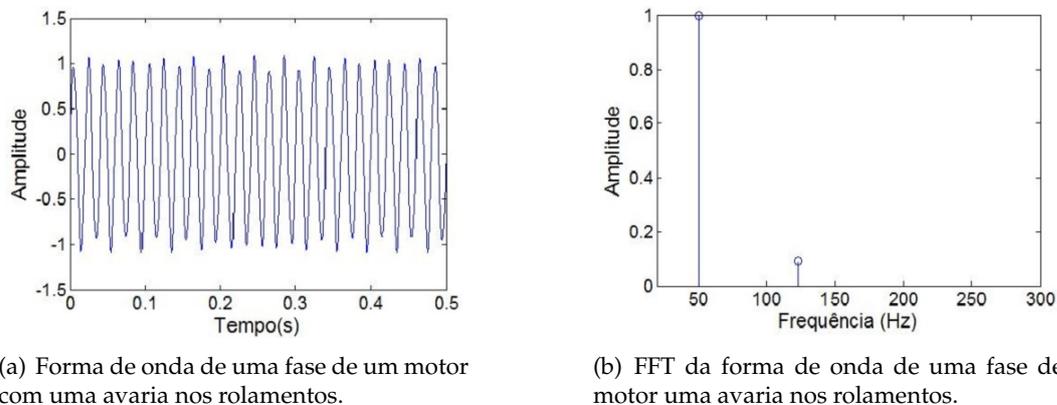


Figura 3.12: Motor com uma avaria nos rolamentos.

### 3.3.4 Curto-Circuito nos enrolamentos do estator

Tipicamente o condutor elétrico utilizado para os enrolamentos é o cobre, no entanto, as espiras são adjacentes, o que torna necessário um isolamento elétrico que previna a existência de curto-circuitos. Para além da prevenção de curto-circuitos entre espiras ou entre uma espira e o núcleo do estator, este material é também utilizado para manter os enrolamentos imóveis, devendo ser também condutor térmico para ajudar o arrefecimento do cobre [15]. A figura 3.13 ilustra os vários tipos de curto-circuitos que podem ocorrer, envolvendo os enrolamentos do estator. Estes pode ser entre espiras, entre bobinas, entre fases, entre uma fase e a terra.

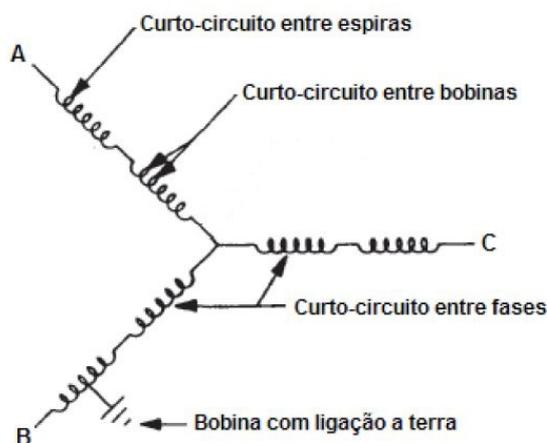


Figura 3.13: Diferentes tipos de curto-circuitos no estator (adaptado de [21]).

A degradação dos isolamentos é a maior causa de ocorrência dos curto-circuitos. Estes são projetados para terem um tempo de vida útil pré-definido, tendo assim associado um envelhecimento natural que promove a sua ineficácia e, conseqüentemente, curto-circuitos. Sendo assim, a maior causa deste tipo de avarias deve-se à degradação acentuada do material isolador, onde se considera a temperatura o maior fator de desgaste, sendo que um aumento de 10 graus na temperatura da máquina pode reduzir o tempo de vida útil do material isolador para metade [22, 42]. Como um MI é fabricado para funcionar a uma determinada temperatura, um aumento da mesma é, por si só, um indicador de avaria. Posto isto, destacam-se assim os seguintes fatores que podem provocar um aumento de temperatura na máquina:

- Flutuações na tensão de alimentação. Estas variações vão causar um aumento da corrente dos enrolamentos o que provoca o aumento de temperatura nos mesmos [43, 44];
- Arranques consecutivos. Dependendo do tipo de arranque utilizado no motor em causa, a corrente de arranque pode atingir até 5 a 8 vezes a corrente nominal do MI. Arranques consecutivos e em curtos períodos de tempo podem provocar um aquecimento excessivo nos enrolamentos do estator [15]. Para além disso estes causam a expansão e contração do sistema de isolamento, tornando o material quebradiço [45];
- Ventilação obstruída. O calor gerado no rotor e no estator é dissipado por condução, convecção e radiação. A obstrução do fluxo de ar que atravessa o motor ou que impeça a radiação do calor das partes do motor, vai causar um aumento de temperatura, sendo por isso importante que o motor seja mantido limpo no seu interior e exterior [45]
- Temperatura Ambiente. Um MI é construído, tipicamente, para operar a uma temperatura ambiente máxima de 40 °C. No caso de esta temperatura ser excedida irá provocar um aquecimento indevido no motor, diminuindo o tempo de vida dos isolamentos (tabela 3.1). Quando é inevitável operar em tais condições, devem ser adotados métodos de refrigeração mais eficientes [45];
- Tensão desequilibrada entre fases. Um pequeno desequilíbrio entre fases causa um aumento excessivo de temperatura no enrolamento. Como regra, para cada 3.5% de desequilíbrio, a temperatura do enrolamento sobre 25% na fase com a maior corrente [45];
- Excesso de carga. Normalmente os construtores de MIs projetam os motores com uma certa margem de segurança, no que respeita à carga. Normalmente isto é realizado de modo a que os MIs trabalhem abaixo dos limites críticos do seu sistema de isolamento (e de outros componentes), ou utilizando um isolamento que suporte

temperaturas acima das de funcionamento da máquina. Deste modo quando é aplicado um excesso de carga no motor, este vai exigir mais corrente à rede, o que se reflete num aumento da temperatura nos enrolamentos do mesmo (tipicamente a temperatura irá aumentar com o quadrado da carga) [45].

Tabela 3.1: Efeito da temperatura ambiente no tempo de vida dos isolamentos [45].

Temperatura Ambiente ( $^{\circ}C$ )	Tempo de vida do isolamento (horas)
30	250000
40	125000
50	60000
60	30000

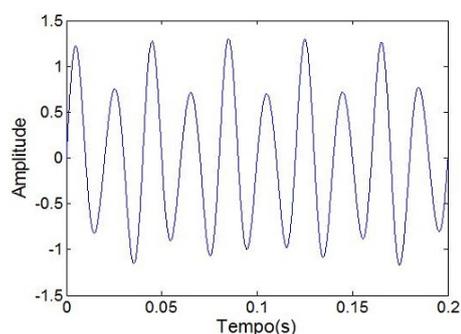
Para além dos esforços térmicos, também os elétricos podem causar um desgaste prematuro do material isolador, reduzindo o tempo de vida útil de um MI:

- Esforços dielétricos. Existe uma relação inversa entre o tempo de vida do isolamento e a tensão a este aplicada. O sistema de isolamento dos enrolamentos está sujeito a esforços resultantes da necessidade de garantir um isolamento elétrico, não só entre espiras da mesma bobina mas também entre espiras de bobinas pertencentes a fases distintas e entre as espiras e a terra. O aumento destes esforços provoca um envelhecimento prematuro do material isolador [45];
- Efeito de coroa. Este efeito é um problema bastante severo, principalmente em enrolamentos que operem a tensões demasiado elevadas. Este efeito constitui uma descarga localizada resultando de uma ionização do ar externo ao isolamento. A descarga pode ser uma de três tipos, descargas internas que ocorrem nas cavidades do dielétrico, descargas externas que ocorrem na superfície dos enrolamentos ou descargas que ocorrem em fortes campos elétricos em volta de pontas aguçadas ou arestas. Estas descargas danificam o isolamento e podem causar curto-circuitos nos enrolamentos. De referir é o facto do projeto de materiais isoladores tendo em conta este efeito é bastante complicado pois existem vários fatores que influenciam a ionização do ar à volta do isolamento, como a humidade, a poeira no ar e mesmo a temperatura [45];
- Picos de tensão. Aquando da sua ocorrência, os picos de tensão provocam um aumento repentino da mesma, aplicando esforços dielétricos no isolamento. Adicionalmente, causam um aumento de corrente, provocando, por si só, um aumento de temperatura. Por vezes estes picos de tensão são de tal dimensão que podem danificar o material isolador e provocar um curto-circuito [45].

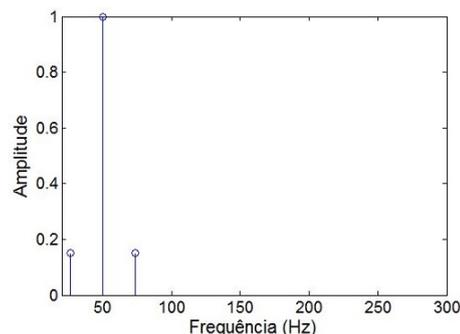
Os esforços elétricos e diferenciais térmicos a que os isolamentos estão sujeitos, são causas bastante graves para a degradação do material isolador. No entanto, também

os esforços mecânicos são um problema constante que pode danificar de forma grave o material isolador ou mesmo os enrolamentos em si:

- Movimento das espiras. A corrente nos enrolamentos do estator produz uma força nos mesmos que é proporcional ao quadrado da corrente que por eles passa. A corrente tem o seu máximo durante o ciclo de arranque do MI, provocando a vibração das espiras ao dobro da frequência da linha, com movimentos no sentido tangencial e radial. Este movimento pode causar danos graves no isolamento ou mesmo nos condutores [45];
- Embates do rotor. Existem várias razões que provocam uma colisão entre o rotor e o estator do MI, sendo as mais comuns falhas nos rolamentos, deflexão do eixo ou desalinhamento entre o rotor e o estator. Quando este contato acontece, pode provocar um dano grave no isolamento ou mesmo nas espiras [45];
- Outras causas. Para além das causas mecânicas listadas, existem outras que podem danificar o MI, quer sejam as pás do sistema de ventilação, parafusos soltos ou mesmo partículas que entrem na máquina através do sistema de ventilação [45].



(a) forma de onda de uma fase de um motor com um curto circuito entre espiras dos enrolamentos do estator.



(b) FFT da onda de uma fase de motor com um curto circuito entre espiras dos enrolamentos do estator.

Figura 3.14: Motor com um curto circuito entre espiras dos enrolamentos do estator.

Este tipo de avarias vai provocar uma disformidade no fluxo do entreferro da máquina. Adicionalmente, uma força eletromotriz vai ser induzida na falha, provocando um aumento de corrente no curto-circuito. Esta corrente vai originar uma força eletromotriz que, à semelhança com o que acontece na avaria de barras partidas, irá provocar o aparecimento de harmônicas na corrente de alimentação do estator, sendo a sua frequência dada pela equação 3.10 [46] onde  $n$  e  $k$  são inteiros positivos,  $s$  é o escorregamento da máquina,  $p$  é o numero de pares de pólos e  $f_1$  é a frequência de alimentação da mesma.

$$f_{CurtoCircuito} = \left\{ \frac{n}{p}(1 - s) \pm k \right\} f_0 \quad (3.10)$$

Considerando-se a equação 3.10 adicionou-se as harmónicas (considerando-se  $n = 1$ ,  $p = 2$ ,  $s = 5\%$  e  $k = 1$  a título exemplificativo) na corrente que alimenta um MI e obteve-se a onda mostrada na figura 3.14 de modo a exemplificar o efeito desta avaria na corrente de alimentação do motor. Verifica-se assim uma variação na amplitude da onda, não sendo esta constante. O agravamento desta avaria provoca um aumento na amplitude das harmónicas, sendo estas mais ou menos evidentes consoante a severidade da mesma. A análise da corrente e a obtenção da frequência das harmónicas, quando presentes, permite identificar este tipo de avaria, podendo assim ser tomadas precauções quando esta se encontra numa fase inicial.

# 4

## Sistema de Ensino de Detecção de Avarias em MIs

Embora o ser humano continue a ser indispensável e deva ter uma atitude ativa no que toca à deteção de avarias nos MIs, o seu ensino é um tema pouco falado na comunidade .

Assim, o trabalho desenvolvido refere-se ao desenvolvimento de um laboratório de avarias que permite a simulação das falhas mais comuns que incidem no MI, operando as mesmas numa máquina real não avariada. É possível também utilizar este sistema em modo Offline, onde o utilizador pode simular certas avarias fora do laboratório. Adicionalmente, foi também desenvolvida documentação didática e uma página na internet com vista a difundir o conhecimento sobre as avarias e os respetivos métodos de deteção.

Neste capítulo será descrito, do ponto de vista de desenvolvimento, todo o sistema que permite emular estas avarias em ambiente laboratorial. Inicialmente serão descritos os requisitos que este sistema deve cumprir e depois as opções tomadas a nível de implementação do mesmo.

### 4.1 Descrição Geral do Sistema

O sistema de ensino de deteção de avarias em MIs é constituído por quatro partes (figura 4.1), a interface homem-máquina, o circuito de controlo, o circuito de potência e o MI não avariado. A interface é responsável por garantir ao utilizador todo o controlo do sistema, possibilitando a emulação de avarias, a escolha das mesmas e a realização

de exercícios didáticos. O circuito de controlo está em comunicação com a interface e é responsável pelo controlo das avarias, sendo este parte fulcral para a emulação das mesmas. O circuito de potência transforma o sinal recebido pelo circuito de controlo num sinal que alimenta o motor, permitindo a emulação das avarias no mesmo. Por ultimo, o MI não avariado, irá funcionar em condições de avaria pré-definidas pelo utilizador.

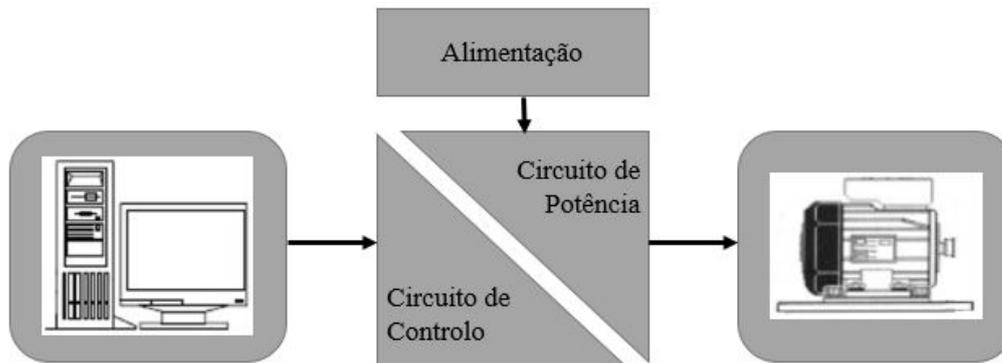


Figura 4.1: Esquema simplificado do sistema de ensino de avarias.

Com estas quatro partes é possível cumprir o principal objetivo da dissertação, a emulação de avarias num MI saudável.

Para que a emulação de avarias seja possível, o utilizador deve seleccionar os parâmetros pretendidos na interface homem-máquina. De seguida o circuito de controlo irá gerar um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) que será uma referência para o circuito de potência. Por ultimo, este irá impor as correntes de alimentação no MI, que em caso de avaria terão as harmónicas correspondentes às mesmas.

## 4.2 Especificações Gerais do Sistema

O sistema deve permitir ao utilizador, através de um software de supervisão, escolher um determinado tipo de avaria, a qual será recriada no motor. O circuito de potência deve ser alimentado por uma tomada eléctrica (230V, 50Hz) de modo a que este sistema seja flexível e não necessite de condições especiais para ser utilizado.

Em primeira instância, como todo o sistema de ensino irá ser utilizado por pessoas não especializadas, quer estejam em formação ou cursos técnicos, escolas ou universidades, este deve cumprir certos requisitos (a nível de conceção para prevenir curto-circuitos e utilização indevida) para prevenir incidentes, principalmente no que concerne ao MI. Para além disso, o sistema deve ser transversal a qualquer MI trifásico. O sistema de supervisão presente no computador deverá permitir a configuração da máquina (ou seja os

seus parâmetros nominais). Assim, para prevenir uma configuração errada da máquina levando à avaria da mesma, esta deverá ser feita pela pessoa responsável pelo laboratório. Para prevenir uma má configuração, será necessária uma chave de acesso para aceder à página de configuração.

Parte essencial do desenvolvimento do sistema incide no circuito de controlo e no software de supervisão. Quanto ao circuito de controlo, este deve conter um sistema de processamento, devendo o último estar em comunicação com o software de supervisão e, sendo para isso utilizado um cabo *Universal Serial Bus* (USB). Para que seja possível efetuar esta comunicação entre o software de supervisão e o microprocessador do circuito de controlo, o último deve conter um módulo *Universal asynchronous receiver/transmitter* (UART). Para além disso este dispositivo deve ter a capacidade de gerar pulsos PWM, que serão posteriormente utilizados para gerar uma referência para a forma de onda que irão alimentar o motor. Tipicamente são utilizados dois canais PWM (dependendo da topologia utilizada) pelo que, para um motor trifásico, o dispositivo deve ter seis canais. Para além disso, este deve também ser capaz de recolher dados da corrente do motor, de forma a que os gráficos possam ser mostrados no software de supervisão. Para tal, o microprocessador deve ter pelo menos três entradas analógicas dotadas de um *Analog Digital Converter* (ADC).

Por último, o sistema de supervisão deve ter por base uma tecnologia comum à maioria dos computadores que permita a sua utilização na maioria dos dispositivos usados em todo o mundo. Como este sistema foi desenvolvido para ser utilizado por utilizadores não especializados, deve também ter uma interface intuitiva e de fácil uso. Sendo a essência deste trabalho a emulação de avarias em motores de indução, este sistema deve suportar vários tipos de avarias, sendo que deve ser possível testar o máximo de casos possíveis para cada uma (por exemplo no caso das barras partidas o utilizador deve poder seleccionar quantas estão quebradas). Este software deve também ser acompanhado de um documento que aborde os tópicos relacionados com as avarias nos MI, bem como métodos de deteção dos mesmos. Devido ao facto de que objetivo deste sistema é instruir capacidades de identificação de avarias, o sistema de supervisão deve ter a capacidade de testar os conhecimentos dos utilizadores pela realização de alguns exercícios.

Adicionalmente, apesar do sistema ter sido desenvolvido como um todo, o sistema de supervisão deve poder ser utilizado em modo Offline, ou seja, sem ligação ao circuito de controlo e ao MI. Deste modo o utilizador pode efetuar simulações sem necessitar de um laboratório com material especializado. Neste modo de utilização todos os gráficos serão mostrados tendo em conta simulações baseadas nas equações descritas no capítulo 3, enquanto no modo real todos os dados apresentados terão origem nos valores obtidos da máquina. Sendo que as referências das correntes de alimentação são também geradas com base nas equações do capítulo 3.

### 4.3 Circuito de Potência

De modo a tornar este sistema de ensino de avarias mais versátil, foi utilizado um circuito de potência que permite alimentar o sistema recorrendo a uma tomada monofásica típica de  $230V$ ,  $50Hz$ . A figura 4.2 exemplifica o circuito de potência utilizado no sistema de ensino, bem como a sua interligação com o sistema de controlo e o MI. O circuito retificador (figura 4.3), que permite a ligação a uma tomada de corrente alternada e apresenta à saída uma tensão contínua. Este circuito tem ainda alguns componentes de proteção (fusível e relé, figura) para evitar picos de corrente causados por curto-circuitos.

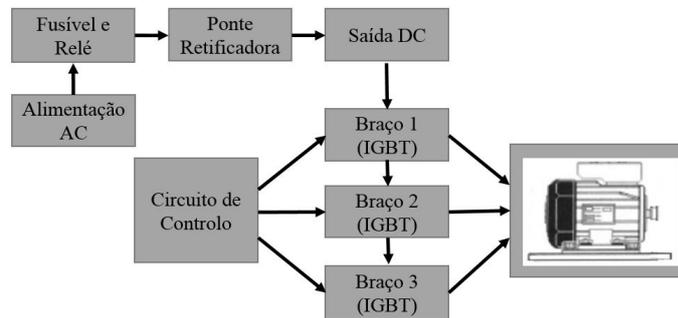


Figura 4.2: Diagrama de blocos do circuito de potência.

Este circuito vai alimentar outro circuito, constituído por três braços com IGBTs como o apresentado na figura 4.4. Estes braços vão ser controlados de forma independente pelo dsPIC de controlo de modo a recriarem um sistema trifásico que irá alimentar o MI. É a utilização deste sistema que permite a emulação de avarias no MI pois o circuito de controlo irá emular o funcionamento do motor tendo em conta a avaria seleccionada, controlando os IGBTs por forma a obter as formas de onda desejadas para as correntes estatóricas.

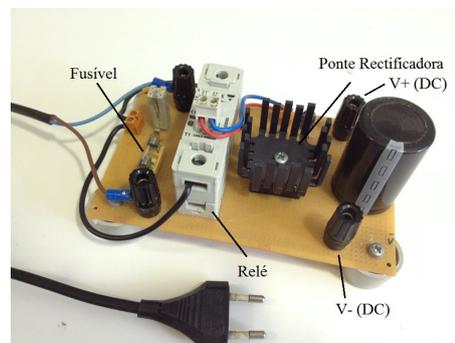


Figura 4.3: Circuito de potência - retificador de entrada.

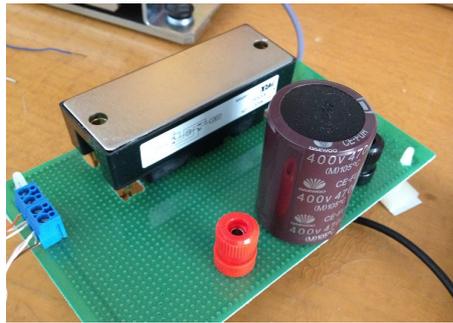


Figura 4.4: Circuito de potência - braço (IGBTs) de uma das fases de alimentação do MI.

## 4.4 Circuito de Controlo

Parte fulcral do presente trabalho é o seu sistema de controlo, que é, não só responsável pela geração de avarias mas também pela interface entre o utilizador e a máquina. Todo o sistema de controlo está dividido em duas grandes secções. O trabalho presente é composto por sete camadas (figura 4.5). A primeira camada é composta pelo utilizador, de seguida a sua interação com o sistema de ensino de avarias é efetuada pela camada interface homem-máquina. De seguida segue-se a camada de supervisão que é responsável pela recolha dos dados. A comunicação entre o computador e o dsPIC é feita pela camada de comunicação. O dsPIC engloba o sistema de controlo, sendo este o dispositivo responsável pelo processamento de dados neste nível, que irá de seguida acionar o circuito de potência. Por ultimo o motor de indução é acionado com a avaria pretendida pelo utilizador.

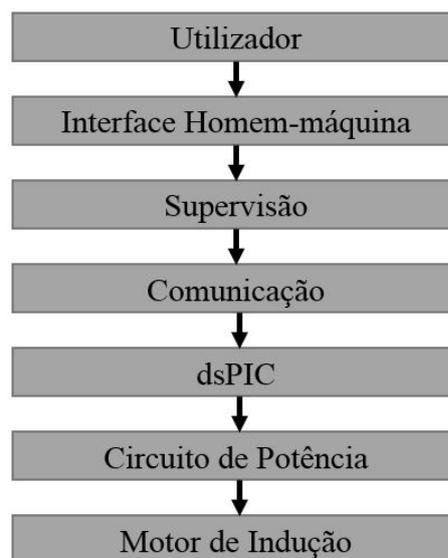


Figura 4.5: Fluxograma do sistema.

#### 4.4.1 Descrição do microcontrolador

Foi necessário encontrar um microcontrolador que, para além de cumprir os requisitos já mencionados, tivesse também um baixo custo. O dispositivo escolhido foi o dsPIC33EP512MC502, fabricado pela Microchip, com uma arquitetura de 16bits. As principais características deste dispositivo são:

- Memória *Random Access Memory* (RAM) de 49152Kb: este microcontrolador conta com uma grande memória RAM comparado com modelos semelhantes. Esta disponibilidade de memória foi fulcral para que o algoritmo de controlo fosse desenvolvido com sucesso, pois este dispositivo apresenta uma capacidade de cálculo reduzida, pelo que todo o processamento dos dados deve ser realizado antes da simulação e armazenando na sua memória interna;
- Três canais PWM de alta resolução: de modo a controlar os IGBTs do circuito de potência é necessário um canal PWM por braço com duas saídas complementares cada (high e low). Como o MI utilizado neste trabalho é trifásico são necessários três canais PWM;
- Temporizadores: apesar de este microcontrolador ter disponível cinco temporizadores a 16bits e dois a 32bits, apenas um dos primeiros foi utilizado sendo, no entanto, indispensável. Foi necessário garantir um sincronismo entre as saídas PWM e os  $50H_z$  a que o motor deve funcionar, não só para manter a máxima precisão possível na simulação mas também porque as harmónicas das avarias são calculadas tendo por base o valor desta frequência. Posto isto, o temporizador constitui um componente essencial no desenvolvimento do sistema;
- Módulo UART: como referido anteriormente, o circuito de controlo deve estar em comunicação com o software de supervisão, de modo a que as avarias possam ser simuladas com sucesso. Este facto implica que o microcontrolador possua algum dispositivo de comunicação;
- Módulo ADC: Para a leitura das correntes do estator, são adquiridos três sinais analógicos. Assim, o microcontrolador deve possuir três entradas analógicas (uma para cada fase) e um módulo ADC capaz de converter esse sinal analógico num sinal digital de forma a que este possa ser tratado pelo microcontrolador e pelo software de supervisão;

O microcontrolador é parte essencial no circuito de controlo, visto que é este o responsável pela recriação das avarias no MI. Na realidade foram utilizados dois dsPIC em paralelo, sendo um responsável pelo controlo da máquina através do módulo de potência e outro pela recolha de dados. No entanto, ambos os dsPIC partilham o mesmo canal de comunicação com o computador, pois não seria prático utilizar dois cabos USB para conectar o sistema de simulação de avarias ao computador. A razão da utilização de dois

microcontroladores deveu-se essencialmente a dois motivos. Em primeiro lugar devido ao facto da memória ser demasiado limitada e em segundo lugar devido às correntes deverem ser recolhidas durante o funcionamento no MI. Como o dsPIC tem uma capacidade de processamento reduzida, a recolha dos dados e o envio dos mesmos para o software de supervisão iria atrasar o PWM fazendo com que o sincronismo fosse perdido e, afetando, por sua vez, os dados recolhidos. Deste modo, para prevenir o acontecimento de tais erros decidiu-se utilizar dois dsPIC a funcionar em paralelo, com funções distintas.

#### 4.4.2 Diagrama de ligações do dsPIC

O microcontrolador utilizado, apesar do grande número de módulos programáveis que dispõe, contém um número bastante reduzido de ligações que se pode fazer. Este contém apenas 28 pinos (figura 4.6) sendo que 6 são utilizados exclusivamente para a sua alimentação. No entanto, devido ao reduzido número de pinos disponíveis, alguns destes permitem a sua programação para uma saída PWM UART, uma entrada analógica ou outro tipo de ligação. Mesmo assim, algumas ligações só podem ser efetuadas em pinos específicos, pelo que o circuito necessitou de uma montagem cuidadosa de forma a que todos os módulos necessários em cada dsPIC funcionassem como pretendido.

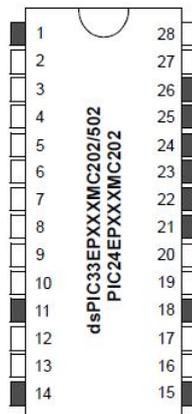


Figura 4.6: Diagrama de pinos presentes no dsPIC utilizado. Cada pino branco suporta 3.3V e cada pino cinzento suporta 5V [47].

Na figura 4.7 está apresentado o circuito utilizado para o sistema de controlo com os dois dsPIC e todos os componentes utilizados, no lado esquerdo está o dsPIC de controlo e no lado direito o dsPIC de recolha de dados. Pode também ser visto, junto a cada dsPIC, o respetivo botão de pressão que o permite reiniciar.

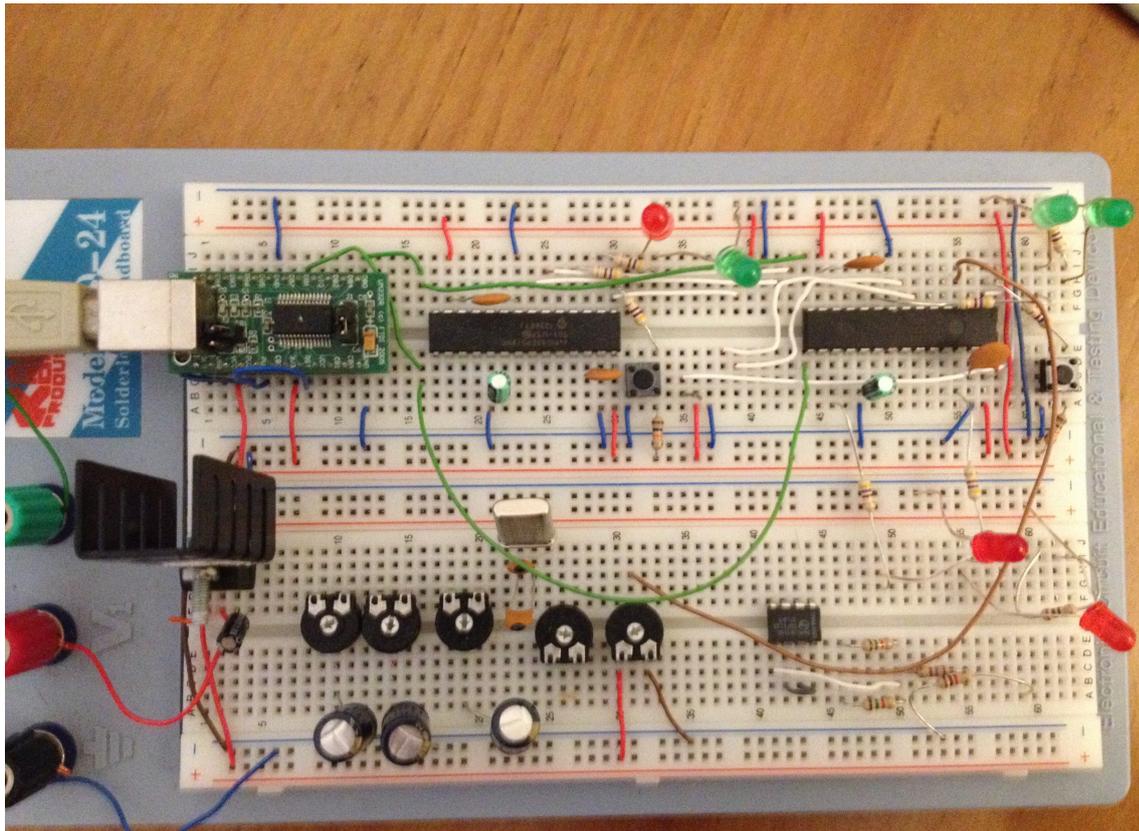


Figura 4.7: Circuito de controlo.

#### 4.4.2.1 dsPIC de controlo

A tabela 4.1 apresenta todas as ligações que foram efetuadas no dsPIC responsável pelo controlo do módulo de potência que alimenta a máquina. Cada ligação tem um objetivo próprio e são todas essenciais para o bom funcionamento do sistema de controlo.

O pino 1 tem como objetivo reiniciar o dsPIC caso algum erro aconteça. Para tal está ligado um botão de pressão ao pino, que permite efetuar a operação de reiniciar o microcontrolador, sendo importante referir que caso tal facto se verifique, o dsPIC irá ser iniciado nas suas condições de funcionamento pré-definidas. Este botão de pressão funciona também como uma paragem de emergência, pois caso pressionado interrompe imediatamente qualquer operação que esteja a ser efetuada, quer seja envio de dados, tratamento de dados ou controlo do motor. Neste último caso, quando pressionado o botão, o MI para de imediato.

Quanto ao pino 2, este tem por objetivo sinalizar o funcionamento do microcontrolador, sendo que um *Light-emitting diode* (LED) verde acende ou apaga consoante o dispositivo se encontra ou não ligado. Este LED é essencialmente utilizado para garantir que

o circuito que alimenta o dsPIC está a funcionar permitindo, adicionalmente, a averiguação da origem da falha do sistema.

No que respeita à receção de dados, este dsPIC contém com uma memória provisória onde são armazenados os dados enquanto estes não são processados sendo, no entanto, esta memória finita. Deste modo, se a velocidade de receção de dados for superior à capacidade de processamento esta memória vai ficar preenchida e os dados recebidos após tal facto se verificar serão perdidos. No entanto, o dsPIC conta com uma variável que assinala se essa memória está ou não cheia. Assim, ao pino 14 está ligado um LED vermelho, que quando aceso assinala um preenchimento total da memória provisória. Quando tal facto acontece, o utilizador deve reiniciar o dsPIC e proceder a novo envio de dados.

Os pinos 6 e 7 são utilizados para efetuar a ligação entre o dispositivo de programação (PICkit 3) e o dsPIC. Apesar destes pinos só serem utilizados em casos pontuais (quando o dsPIC necessita de uma reprogramação) os mesmos são necessários e indispensáveis.

Quanto aos pinos 9 e 10, está ligado a estes um oscilador de 20MHz utilizado para impor esta frequência de trabalho no dsPIC. Os pinos 14 e 15 são utilizados para efetuar a comunicação, estando a estes ligado o módulo UART interno do dsPIC, sendo o 14 utilizado para a receção dos dados e o 15 para o envio dos mesmos.

Por último, os pinos 21 a 26 constituem a saída do sinal PWM que irá posteriormente acionar o MI, sendo os pares 21 e 22, 23 e 24, 25 e 26 utilizados para cada uma das fases do motor. Os pinos 22, 24 e 26 são as saídas baixas do PWM enquanto que os pinos 21, 23 e 25 são as saídas altas, que vão comandar os respetivos IGBTs

Tabela 4.1: Descrição das ligações utilizadas no dsPIC de controlo.

Pino	Função	Pino	Função
1	Reset	15	UART, transmissão de dados
2	LED sinalização ON/OFF	16	—
3	—	17	—
4	LED sinalização de erro	18	—
5	—	19	Vss
6	Canal para programar	20	Massa
7	Canal para programar	21	PWM sinal low fase 1
8	Vss	22	PWM sinal high fase 1
9	Entrada Oscilador	23	PWM sinal low fase 2
10	Entrada Oscilador	24	PWM sinal high fase 2
11	—	25	PWM sinal low fase 3
12	—	26	PWM sinal high fase 3
13	Massa	27	Vss
14	UART, receção de dados	28	Massa

#### 4.4.2.2 dsPIC de recolha de dados

Como se pode verificar na tabela 4.2, também o microcontrolador responsável pela recolha de dados tem uma grande maioria das suas portas ligadas, sendo estas ligações indispensáveis para que este consiga realizar as funções inerentes ao bom funcionamento de todo o sistema. À semelhança do que acontece com o dsPIC responsável pelo controlo da máquina, também o que efetua a recolha de dados tem 6 pinos utilizados para a sua alimentação, sendo estes os pinos 8, 13, 19, 20, 27 e 28.

Tabela 4.2: Descrição das ligações utilizadas no dsPIC de recolha de dados.

Pino	Função	Pino	Função
1	Reset	15	UART, transmissão de dados
2	LED sinalização ON/OFF	16	—
3	Leitura Fase 1	17	—
4	Leitura Fase 2	18	—
5	Leitura Fase 3	19	Vss
6	Canal para programar	20	Massa
7	Canal para programar	21	—
8	Vss	22	—
9	Entrada Oscilador	23	—
10	Entrada Oscilador	24	—
11	—	25	—
12	—	26	—
13	Massa	27	Vss
14	UART, receção de dados	28	Massa

O pino 1 tem como objetivo reiniciar o dsPIC caso algum erro aconteça. Para tal, este pino está ligado a um botão de pressão, que permite reiniciar o microcontrolador, sendo de notar que caso tal facto se verifique o dsPIC irá ser iniciado nas suas condições de funcionamento pré-definidas. Este botão de pressão funciona também como uma paragem de emergência, pois caso pressionado interrompe imediatamente qualquer operação que esteja a ser efetuada. No entanto, ao contrário do dsPIC de controlo, este botão não permite a paragem imediata do MI pois este dsPIC não efetua o controlo do mesmo.

No que diz respeito ao pino 2, este tem por objetivo sinalizar o funcionamento do microprocessador, sendo que um LED verde acende ou apaga consoante o dispositivo se encontra ou não ligado. Este LED é essencialmente utilizado para garantir que o circuito que alimenta o dsPIC está a funcionar. Adicionalmente, em caso de falha do sistema, o LED permite a averiguação da origem da mesma.

Os pinos 3,4 e 5, são a essência deste dsPIC, pois a cada um destes está ligado um sinal de tensão que reflete a amplitude da corrente nesse instante. Estes pinos estão assim programados para converter esse sinal de tensão analógico num valor inteiro entre 0 e

1024, utilizando para isso o módulo ADC presente neste microcontrolador.

Os pinos 6 e 7 são utilizados para efetuar a ligação entre o dispositivo de programação (PICkit 3) e o dsPIC. Apesar destes pinos só serem utilizados em casos pontuais (quando o dsPIC necessita de um reprogramação) estes são necessários e indispensáveis.

Por fim, aos pinos 9 e 10 está ligado um oscilador de 20MHz utilizado para impor esta frequência de trabalho no dsPIC. Os pinos 14 e 15 são utilizados para efetuar a comunicação, estando a estes ligado o módulo UART interno do dsPIC, sendo o 14 utilizado para a receção dos dados e o 15 para o envio dos mesmos.

#### 4.4.3 Programação dos microcontroladores

Devido ao facto de ambos os dsPIC serem fabricados pela Microchip, foi utilizado uma *Integrated Development Environment* (IDE) desenvolvida pelo mesmo fabricante que permite uma maior rentabilidade das suas capacidades, o MpLAB X [48]. Esta IDE foi desenhada especialmente para o desenvolvimento de aplicações, utilizando microcontroladores fabricados pela Microship. A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento das aplicações foi a linguagem C. Como alternativa estaria a linguagem de programação Assembly, sendo esta última de mais baixo nível considerou-se que a primeira seria a mais adequada para o desenvolvimento destas duas aplicações. O compilador utilizado foi o XC16 fornecido pela Microship [49]. Este compilador permite a tradução da linguagem de programação utilizada para a linguagem utilizada pelo dispositivo.

No entanto, é necessário um dispositivo que permita a ligação entre o computador, onde o IDE está instalado. Este dispositivo foi também produzido pela Microship e desenhado para ser utilizado com os dispositivos que a empresa produz. O dispositivo, PICkit 3 [50] permite não só a programação dos dsPIC mas também a procura de erros de programação no mesmo. O seu custo é bastante reduzido quando comparado com produtos semelhantes.

#### 4.4.4 Comunicação e processamento de dados relativamente aos dsPIC

Uma das grandes dificuldades no uso deste tipo de microcontroladores é a pequena capacidade de cálculo que estes possuem. Este problema torna-se bastante evidente quando se pretende efetuar cálculos mais complexos envolvendo números decimais e funções trigonométricas, como é o caso. Deste modo, os cálculos são efetuados no computador, mais precisamente no software de supervisão, tendo em conta o modo de funcionamento

pretendido, quer seja qualquer tipo de avaria ou funcionamento normal. Assim, o software de supervisão gera um vetor de pontos inteiros positivos (incluindo zero), com exatamente 3200 pontos por fase (totalizando 9600 pontos), sendo que cada 160 pontos correspondem a um ciclo da onda e o total de pontos enviados por fase totalizam 20 ciclos da mesma.

O facto de serem enviados 3200 pontos por fase, o que corresponde a 20 ciclos de onda, causa uma limitação na emulação de avarias, pois esta deve ser periódica nos 20 ciclos. No entanto, de forma a resolver esta limitação, todos os ensaios que serão efetuados no sistema de ensino foram estudados para cumprir este parâmetro.

A comunicação entre os dsPIC e o software de supervisão é efetuada utilizando um protocolo série (assíncrono) a uma velocidade de 9600bits/s com 8bits de dados, 1 bit de paragem e nenhum bit de paridade. Com tal propósito, utilizou-se um cabo USB, que liga o computador a um dispositivo UM232R (figura 4.8). Este dispositivo vai, por sua vez, estar ligado às portas UART dos dois dsPIC (ver figura 4.5, tabela 4.1 e tabela 4.2). O UM232R é responsável pela interligação entre o computador e os dois dsPIC. O canal de comunicação dos dois microcontroladores é partilhado, ou seja, o pino de transmissão de ambos os dsPIC estão ligados entre si. Por sua vez estes últimos estão ligados ao UM232R, acontecendo o mesmo para a receção. Adicionalmente, a alimentação do dispositivo UM232R não é feita diretamente a partir do cabo USB mas sim internamente a partir do circuito que irá alimentar também os dsPIC, ficando o cabo reservado exclusivamente para a transmissão de dados.

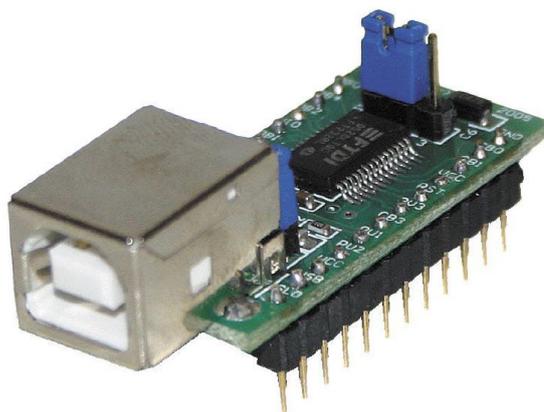


Figura 4.8: Dispositivo UM232R utilizado na comunicação [51].

Como ambos os microcontroladores partilham o mesmo canal de comunicação, é necessário garantir que estes não o utilizam em simultâneo, pois isto pode resultar na perda

de informação e mau funcionamento do sistema. Considerando o sentido de comunicação dsPIC para software de supervisão, apenas o dsPIC de recolha de dados envia informação para o computador, pelo que nunca irá ocorrer uma sobreposição de informação. O problema reside assim no envio de informação para os dsPIC, pois podem ambos processar a mesma que está a ser enviada para apenas um. De modo a resolver esse problema foi utilizado um código de letras (como o apresentado na figura 4.10), sendo que cada letra representa uma função específica em cada um dos dsPIC. Assim, todos os dados enviados após esse código serão apenas processados por um dos dsPIC.

#### 4.4.4.1 dsPIC de controlo

Para além das letras que representam o início de certas funções deste dsPIC, são enviadas as tabelas responsáveis por servir de referência para o PWM que vai controlar o MI. Os pontos (bem como todos os caracteres) são transmitidos em formato ASCII e podem variar entre 0 e 999. Por outro lado, seguindo a tabela 4.3 (a qual tem o resumo das posições correspondentes aos caracteres numéricos) verifica-se que o caractere 0 corresponde ao número decimal 48 e que o caractere 9 corresponde ao 57. Deste modo, pode escrever-se qualquer número inteiro positivo composto pelos caracteres 0 a 9 utilizando a codificação ASCII que terá um valor decimal correspondente entre 48 e 57. De acordo com este procedimento, considerando por exemplo o conjunto de caracteres 256, este vai corresponder à sequência ASCII (em decimal) 50, 53 e 54. No que diz respeito à comunicação, são apenas enviados os bits correspondentes ao número decimal do caractere que está a ser enviado. Neste caso como a comunicação é feita a 8 bits seriam enviadas as sequências 00110010 (50), 00110101 (53) e 00110110 (54).

Tabela 4.3: Tabela ASCII para posições em decimal entre 48 e 49.

Decimal	Hexadecimal	Octal	Caractere
48	30	060	0
49	31	061	1
50	32	062	2
51	33	063	3
52	34	064	4
53	35	065	5
54	36	066	6
55	37	067	7
56	38	070	8
57	39	071	9

O dsPIC contém uma memória para os dados que recebe. Este é utilizado para armazenar os dados quando o ritmo de receção dos mesmos é superior à sua capacidade de processamento, ficando assim os dados armazenados enquanto esperam para serem

processados pelo microcontrolador. Infelizmente, esta memória tem um tamanho finito que, caso a ocorrência anterior se mantenha por demasiado tempo, vai ficar preenchida. Quando isto acontece o dsPIC deixa de receber os dados e a sua informação é perdida. Felizmente o microcontrolador contém uma variável sinalizadora que indica tal facto. Assim, sempre que o dsPIC recebe um dado é verificado o estado dessa memória. Caso esteja cheio significa que provavelmente os dados não estão a ser processados a um ritmo igual ou superior ao de receção, existindo assim caracteres que estão a ser perdidos. Neste caso, o dsPIC acende um LED (ver tabela 4.1) que sinaliza o erro. Caso tal facto aconteça o dsPIC necessita de ser reiniciado e a transmissão de dados deve ser outra vez realizada. No entanto, foi definido um tempo entre cada transmissão para prevenir tal ocorrência

Como referido anteriormente, após efetuar os cálculos correspondentes ao modo de funcionamento pretendido, o software de supervisão deve enviar para o dsPIC de controlo 3200 pontos por fase, os quais podem variar entre o número inteiro 0 e 999. De modo a facilitar o algoritmo de descodificação de dados recebidos, todos os números inteiros são constituídos por três caracteres, ou seja o número 256 constituído pelos caracteres 2, 5 e 6. No entanto, o número 6 é constituído pelos caracteres 0, 0 e 6 de modo a manter esta uniformidade.

Devido ao facto de serem enviados 3200 pontos por cada fase, totalizando 9600, o dsPIC deve ser capaz de armazenar a sua totalidade quando a transmissão termine para que possa iniciar o MI num modo de avaria. No entanto, como a memória do dsPIC é limitada, foi necessário desenvolver um algoritmo para tratar e armazenar todos estes dados. Foram assim criadas três tabelas com 3200 posições cada, onde serão armazenados os dados definitivos respetivos a cada uma das fases e ainda outra tabela com 3360 posições que será utilizada como memória intermédia. Apesar de cada fase ser composta por 3200 pontos, no que respeita ao envio dos dados são enviados três caracteres por ponto, totalizando 9600 caracteres. Apenas após a compressão destes caracteres é que se obtém os 3200 pontos. Deste modo, considerando as três fases, são enviados 28800 caracteres.

Deste modo, devido ao elevado número de caracteres a serem enviados, o envio é repartido em nove partes distintas, três por cada fase. Nas duas primeiras partes de cada fase são enviados 1120 pontos (3360 caracteres) e na última parte 960 pontos (2880 caracteres), totalizando assim os 3200 pontos por fase. Na figura 4.9 encontra-se um diagrama exemplificativo do algoritmo utilizado para a realização do envio e armazenamento dos dados. Este algoritmo deve ser realizado três vezes, sendo cada uma delas para uma das fases.

Na parte 1 do algoritmo apresentado na figura 4.9 o computador envia 3360 caracteres (correspondentes a 1120 pontos) para o dsPIC, os quais são armazenados num vetor (um

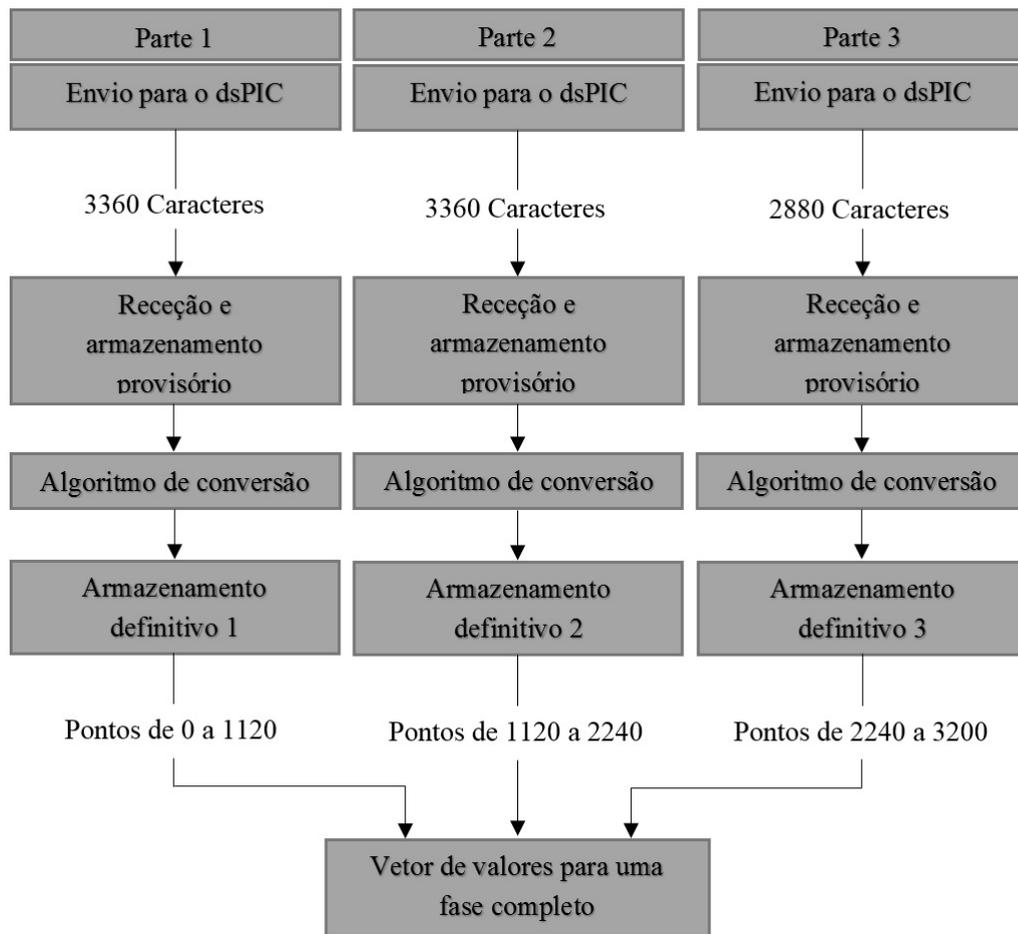


Figura 4.9: Algoritmo utilizado para a transmissão e armazenamento de dados. Note-se que este diagrama representa a transmissão e o armazenamento de dados respectivo para apenas uma fase. Este deve ser replicado três vezes antes que possa ser possível realizar a emulação da avaria.

por posição). Após o envio estar terminado o software de supervisão aguarda um tempo pré-definido, enquanto o dsPIC converte os 3360 caracteres em 1120 números inteiros.

Para efetuar a conversão dos caracteres em números inteiros foi necessário implementar um algoritmo capaz de efetuar essa conversão. Este algoritmo é resultado da equação 4.1 onde  $P$  é o número de pontos enviados (pode ser 3360 para as partes 1 e 2 ou 2880 para a parte 3),  $fase_y$  é a fase que está a ser tratada no momento (pode ser a fase 1, 2 ou 3) e a  $tabela$  são os caracteres que foram enviados, sendo estes números inteiros entre 0 e nove, ou seja com apenas um dígito. Em ASCII os caracteres numéricos correspondem em decimal às posições 48 a 57, existindo uma proporção direta de 48 entre o caractere e o seu correspondente decimal. Como os caracteres são enviados ordenadamente o primeiro corresponde à centena, o segundo à dezena e o último à unidade. No entanto, para seguir esta sequência é necessário que cada número inteiro seja constituído

por três caracteres, quer seja uma unidade (3 corresponde a 003), dezena(21 corresponde a 021) ou centena(125 corresponde a 125).

$$f_{ase_y}(x) = \sum_{x=0}^{\frac{P}{3}} 100 \times (tabela(3x) - 48) + 10 \times (tabela(3x + 1) - 48) + (tabela(3x + 2) - 48) \quad (4.1)$$

Assumindo por exemplo que se deseja enviar os números 2, 12 e 234, a sequência de caracteres enviados vai ser  $tabela(x) = 002012234$ , o que corresponde à sequência ASCII (decimal) 484850484950505152 e seguindo a função 4.1 obtemos:

$$f_{ase_y}(0) = 100 \times (48 - 48) + 10 \times (48 - 48) + (50 - 48) = 2$$

$$f_{ase_y}(1) = 100 \times (48 - 48) + 10 \times (48 - 49) + (50 - 48) = 12$$

$$f_{ase_y}(2) = 100 \times (50 - 48) + 10 \times (51 - 48) + (52 - 48) = 224$$

Pelo que se verifica o algoritmo de conversão de dados.

Continuando com o algoritmo utilizado para a transmissão(figura 4.9), no fim da parte 1 a tabela correspondente à primeira fase terá as posições 0 a 1120, ocupadas com os valores de referência enviados pelo software de supervisão. De seguida, nas partes 2 e 3 este processo será repetido mas as posições ocupadas na tabela serão as 1120 a 2240 e 2240 a 3200, respetivamente. Por último, este processo deverá ser repetido integralmente por as duas fases restantes.

É ainda importante referir que previamente ao início do envio de dados, o software de supervisão envia um caractere alfabético para indicar ao microcontrolador, iniciando não só a transmissão dos dados, mas indicando também que pontos a ser enviados, ou seja, a que fase e parte de envio correspondem. Isto é essencial para o microcontrolador não guardar os dados de forma sobreposta ou incorreta. Como descrito anteriormente, para cada fase são realizados três envios distintos, totalizando assim nove envios para todas as fases. Se os vetores onde os valores serão definitivamente guardados (um por fase) forem divididos em três partes cada, cada uma dessas irá corresponder a um envio de dados, pelo que a cada envio irá corresponder uma letra. Seguindo código exemplificado na figura 4.10, sabe-se que a letra A irá corresponder à primeira parte do envio de dados da primeira fase, a letra B à segunda parte e consecutivamente até à letra I. Deste modo, o dsPIC armazena todos os dados nos locais corretos sem existir sobreposição.

Após a finalização da transmissão de todos os dados, o dsPIC terá três tabelas (cada uma com 3200 pontos) referentes às três fases que alimentam o MI trifásico. O total de valores presente em cada tabela corresponde a vinte ciclos de onda pelo que se conclui

	A	B	C
Tabela fase1	1120 Posições	1120 Posições	960 Posições
	D	E	F
Tabela fase2	1120 Posições	1120 Posições	960 Posições
	G	H	I
Tabela fase3	1120 Posições	1120 Posições	960 Posições

Figura 4.10: Relação entre a fase do envio e o preenchimento correto das tabelas.

que cada período é composto por 160 pontos. Quanto mais fossem os pontos a definir a onda, mais seria a sua definição e exatidão, no entanto, isso provoca uma ocupação de memória superior no dsPIC, por exemplo, se cada ciclo fosse composto por 200 pontos, para armazenar 20 ciclos seriam necessárias três tabelas com 4000 posições cada. Deste modo foi necessário encontrar um valor que permitisse ter a precisão desejada mas ocupando o menor espaço possível. Após vários testes concluiu-se que esse valor seria 160.

Em termos de geração da onda de referência da corrente estatórica propriamente dita, o dsPIC vai gerar três sinais PWM, correspondendo cada um a uma das fases do MI trifásico. Este sinal vai ser a referência para os braços constituídos por IGBTs no circuito de potência, obtendo-se assim a onda sinusoidal da corrente. O valor do ciclo de trabalho (ou seja o tempo a que o PWM está a 1 em cada ciclo) é dado pelos valores inseridos nas tabelas. Sabendo que cada ciclo de onda é constituído por 160 pontos e, que a frequência pretendida para a onda é de  $50H_z$ , conclui-se que a frequência de comutação do ciclo de trabalho do PWM deve ser  $8KH_z$  ( $160 \times 50$ ), o que corresponde a 0.125 milissegundos. Deste modo, quando dsPIC inicia a emulação, o valor do ciclo de trabalho vai ser o primeiro valor na tabela. Após 0.125 milissegundos o ciclo de trabalho vai ser alterado para o segundo valor na tabela e assim sucessivamente até chegar à posição 3200 onde retorna novamente ao início da mesma. Este processo é repetido até que o utilizador pare o processo de emulação da avaria. Este método permite emular as avarias no MI apenas pela alteração dos valores de referência contidos nas tabelas.

#### 4.4.4.2 dsPIC de recolha de dados

O dsPIC de recolha de dados está encarregue de recolher os dados referentes às correntes que estão a alimentar as três fases do MI. Estes dados são depois apresentadas ao utilizador no software de supervisão, de modo a que o utilizador possa ter uma leitura correta destas formas de onda sem necessitar de aparelhagem especializada, como por exemplo um osciloscópio, reduzindo assim os custos de equipamento.

A visualização do valor da corrente instantânea é realizada de forma independente em cada uma das fases, utilizando-se para isso um sensor que mede o valor instantâneo

da corrente e o transforma num sinal contínuo. O dsPIC utilizado contém um módulo ADC que permite a conversão de valores analógicos num valor digital compreendido entre 0 e 1024 (em valor decimal), sendo que 0 representa uma tensão de 0V e 1024 representa uma tensão de 3.3V. Deste modo, foram configurados 3 pinos do dsPIC (consultar tabela 4.2) para funcionarem como entradas analógicas. Assim, para cada tensão aplicada num destes pinos, o dsPIC vai devolver uma variável com um valor digital compreendido entre 0 e 1024.

Optou-se por utilizar a mesma lógica apresentada no dsPIC de controlo. Deste modo, foram criadas três tabelas com 3200 posições cada uma, sendo que cada uma destas armazenará os dados recolhidos em cada uma das fases. Também se considerou a taxa de amostragem igual, de modo a obter 160 amostras por cada onda. Assim, o ADC presente no dsPIC foi configurado para recolher amostras das três entradas analógicas a cada 0.125 milissegundos, ou seja a uma frequência de  $8KHz$ .

Ao ser iniciada a emulação da avaria pelo utilizador e o motor começa a funcionar, e o dsPIC de recolha de dados começa a armazenar os mesmos. Este processo irá decorrer até que as três tabelas estejam preenchidas. De seguida o microcontrolador inicia a transmissão dos dados para o software de supervisão de modo semelhante ao que acontece com o dsPIC de controlo, mas de forma inversa. No entanto, neste caso o envio é realizado de forma contínua e mais rápida, pois não existe necessidade de aguardar pelo processamento dos dados por parte do software de supervisão. Tal facto deve-se à capacidade de processamento acrescida que o hardware onde o software de supervisão está montado apresenta, relativamente ao dsPIC. Assim, a informação referente às correntes fica rapidamente disponível para ser tratada pelo software de supervisão.

## 4.5 Software de Supervisão

O software de supervisão representa a interface homem-máquina de todo o sistema. O seu interface gráfico permite ao utilizador controlar o sistema de ensino de uma forma simples e intuitiva.

Foi assim necessário seleccionar uma linguagem de programação que permitisse desenvolver uma aplicação deste tipo, sendo assim elegida a linguagem de programação Java.

Como linguagem de programação escolheu-se o Java. A principal razão para a escolha desta linguagem deve-se ao facto de esta ser amplamente utilizada, permitindo a utilização de uma aplicação Java em praticamente qualquer plataforma. Isto facto facilita a instalação do programa por parte dos utilizadores, para os quais este sistema foi desenvolvido [52].

Java é uma linguagem de programação orientada a objetos, desenvolvida pela empresa Sun Microsystems (agora detida pela ORACLE), que permite o desenvolvimento de programas complexos de forma modular e sistemática [53]. De modo a desenvolver o software de supervisão foi utilizada a IDE netbeans [54]. A parte gráfica é de extrema importância, principalmente tendo em conta o tipo de utilizadores alvo. Para tal, foi utilizado o JavaFX scene builder [55], pois permite a criação de projetos com um visual bastante moderno e intuitivo.

### 4.5.1 Desenho gráfico e menus

O software de supervisão foi desenvolvido para ser atrativo e de fácil utilização, com menus simples de uso intuitivo. Na figura 4.11 está representada a página inicial deste software. Na barra superior encontram-se os menus principais, onde estão as várias opções do programa. No lado superior esquerdo estão os logotipos de todas as entidades envolvidas no projeto de ensino DAAMI. No canto inferior esquerdo estão os menus secundários. Ao contrário dos menus principais que permitem alterar modos de funcionamento do software e simular avarias, os menus secundários apresentam apenas informação sobre alguns dos temas abordados, como será apresentado no capítulo 5. Do lado direito encontra-se a tela principal do software de supervisão (neste caso com a imagem de um motor elétrico), onde irão aparecer os menus e as informações para o utilizador.

Este software tem dois modos de funcionamento distintos. Quando iniciado este está pré-definido para funcionar sem estar conectado ao resto do sistema, ou seja, permite a simulação de avarias, realização de exercícios ou consulta de documentos. Quando o software de supervisão é conectado ao circuito de controlo, este começa a funcionar em modo on-line ou seja as avarias deixam de ser simuladas e passam a ser emuladas no MI. Para além disso, o software tem a capacidade de recolher as formas de onda das correntes do MI para futura análise.

A nível de implementação foram desenvolvidos sete principais menus (figura 4.12), cada um com uma operação e objetivo específicos. Estes menus serão apresentados de seguida, bem como descritas as suas funções.

#### 4.5.1.1 Ficheiro

Este menu contém apenas uma opção, “fechar”. Quando configurado, o software inicia um processo de comunicação com os dsPIC que irá decorrer durante todo o seu funcionamento. No entanto, quando o utilizador deseja encerrar o software, deverá utilizar este menu, principalmente quando o software de supervisão estiver conectado ao resto



Figura 4.11: Página inicial do software de supervisão.

do sistema. Assim, o encerramento será realizado da forma correta e todos os processos serão encerrados da forma devida.

#### 4.5.1.2 Utilizador

Este sistema está desenvolvido para dois tipos de utilizadores distintos. O responsável pelo sistema de ensino e o aluno. Para separar o acesso entre estes dois utilizadores foi criado o menu utilizador, tornando necessária a existência de uma palavra passe de acesso a alguns conteúdos.

Algumas operações neste software devem ser efetuadas com algum cuidado, como por exemplo a simulação de avarias ou a configuração de sistema. Este menu contém dois submenus, um onde é realizado login, que permitirá o acesso do utilizador a todas as funcionalidades do sistema, e outro para o utilizador efetuar logout. A principal utilidade deste menu é em ambiente letivo pois o professor, com acesso privilegiado, pode efetuar login, configurar todo o sistema, efetuar logout e deixar que os alunos façam as experiências (os quais não possuem acesso restrito).

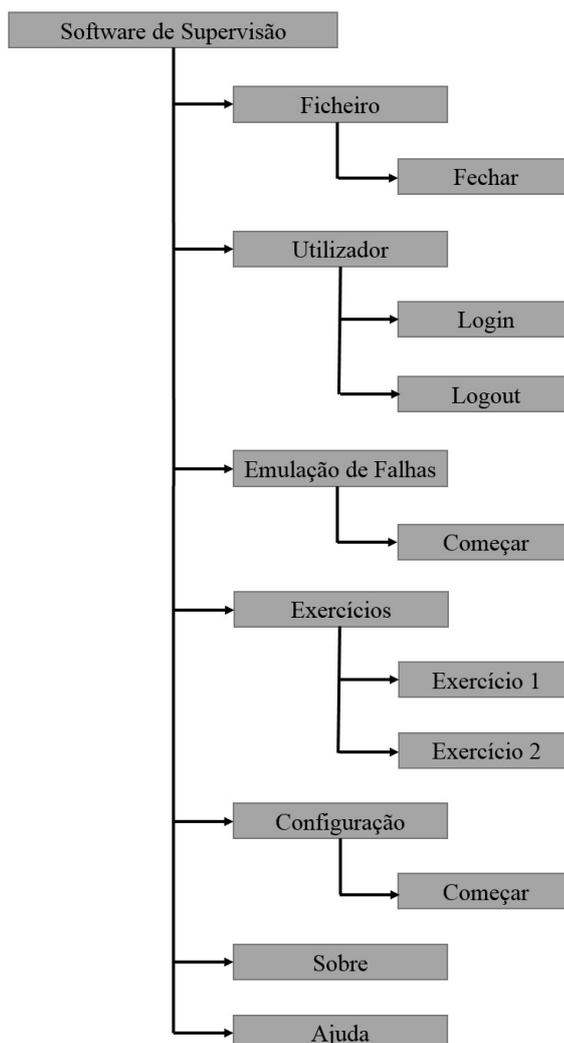


Figura 4.12: Diagrama de menus do software de supervisão.

#### 4.5.1.3 Emulação de Falhas

O menu emulação de falhas é o principal menu de todo o sistema, uma vez que permite configurar a emulação de avarias no motor. Este está dividido em quatro grandes zonas, assinaladas na figura 4.13 com os números 1 a 4. Na zona 1 o utilizador poderá escolher uma das avarias disponíveis, quer sejam de estator ou rotor bem como os seus parâmetros (na tabela 4.4 estão todas as avarias que este sistema permite emular bem como os parâmetros alteráveis em cada caso). Na figura 4.13 encontra-se, a título de exemplo, aberta a opção da excentricidade, sendo possível verificar que o utilizador poderá realizar várias opções para esta avaria. Ao pressionar o botão SET o utilizador estará a seleccionar esta avaria como a pretendida. Qualquer alteração que seja efetuada num dos parâmetros da avaria será tida em conta mas o seu efeito só será considerado após o utilizador pressionar novamente o botão SET. Adicionalmente, este botão irá também iniciar o envio dos dados referentes à avaria (com os parâmetros seleccionados) para o dsPIC.

Neste caso, cada avaria tem opções diferentes e em alguns casos inerentes à avaria em causa, tais como escorregamento, número de barras partidas ou severidade da avaria. O facto do escorregamento ser um parâmetro variável na emulação das avarias, permite efetuar a mesma para diferentes níveis de carga. Na zona 2 irão ser mostrados os gráficos referentes às avarias bem como a sua FFT, dependendo da escolha do utilizador.

Tabela 4.4: Avarias emuladas e os seus parâmetros.

Avaria	Parâmetro	Opções	Unidade
Barras Quebradas	nº de barras quebradas	1;2;3;4;5;6;7;8	–
	Escorregamento	5;10;15	%
Avaria nos Rolamentos	$n_1$	1;2;3;4;5	–
	$n_2$	1;2;3;4;5	–
	Escorregamento	2,5;5;10	%
Excentricidade	Ordem da excentricidade	1;2;3;4;5;6	–
	ordem da harmónica	1;2;3;4	–
	Escorregamento	2,5;5;10	%
Avaria nos Enrolamentos	Severidade	baixa, média, alta	–
	Escorregamento	2,5;5;10;15	%

A zona 3 permite o comando de várias ações neste menu. Em primeiro lugar os botões ON/OFF Run e Stop estarão a sombreado, o que se deve ao facto de neste momento o software não estar conectado aos dsPIC e estas opções não estarem disponíveis (estando assim o software de supervisão a funcionar em modo offline). O botão ON/OFF é utilizado para permitir ao sistema carregar as avarias para o motor. Se este botão não estiver ativo o utilizador não poderá carregar as avarias para o motor. O botão Graphic, serve apenas para ligar ou desligar o gráfico, apesar de ser possível visualizar as formas de onda no mesmo, o utilizador pode pretender utilizar outra ferramenta, como por exemplo um osciloscópio. O botão normal serve para selecionar o modo de funcionamento sem avaria. Quanto aos botões Run e Stop só devem ser pressionados após o envio dos dados par o dsPIC de controlo ter sido efetuado (se tal for realizado durante ou antes do envio nada acontecerá). A barra de progresso indica o envio dos dados para o dsPIC, ou seja quando esta estiver cheia o envio de dados está terminado e o utilizador pode pressionar o botão Run. Tal irá dar ordem ao dsPIC para iniciar a simulação, ou seja, ativar os seus canais PWM que irão acionar o MI. O botão Stop, contrariamente ao botão Run, pára imediatamente a operação do MI. Por vezes, os dados referentes aos gráficos podem ter utilidade, quer seja para efetuar relatórios ou outro tipo de trabalhos. Nestes casos, o botão Save permite guardar todos os dados referentes ao gráfico. Estes dados serão guardados num ficheiro em formato de texto que pode depois ser exportado para uma folha de cálculo ou outra ferramenta.

Dependendo do tipo de informação que o utilizador pretende visualizar no gráfico pode ser vantajoso ter mais ou menos ciclos de onda ou visualizar apenas uma fase do motor (uma vez que três fases podem tornar o gráfico demasiado confuso). Estas constituem as opções que podem ser tomadas na zona 4, onde o utilizador pode seleccionar o número de ciclos de onda que deseja visualizar no gráfico ou quais as fases que deseja que sejam mostradas. Tais opções irão apenas afetar o gráfico da onda, pois o gráfico da FFT matem-se constante, não havendo alterações de escala. Por último, existe uma caixa de texto entre as zonas 3 e 4 a que informa o utilizador de possíveis erros que possam ter ocorrido ou de opções tomadas.

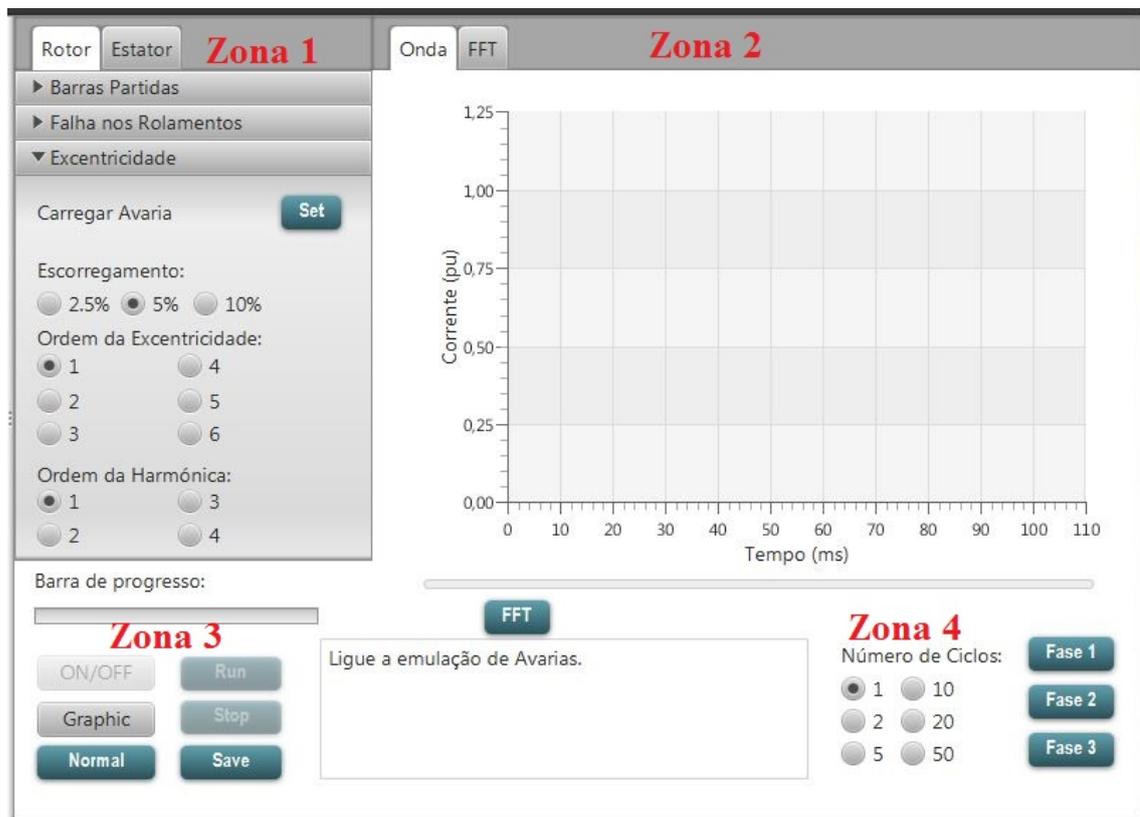


Figura 4.13: Menu emulação de falhas.

#### 4.5.1.4 Exercícios

Este menu dá acesso à realização de exercícios. Estes exercícios servem de apoio ao docente/formador no que toca à avaliação de conhecimentos. Apesar do sistema de ensino de avarias em MIs ser uma ferramenta auxiliar no ensino, este permite também a realização de certos exercícios por parte dos alunos/formandos. Para além disso certos exercícios permitem ainda uma configuração (feita pelo docente/formando). No capítulo 5 estes exercícios serão descritos com mais detalhe.

#### 4.5.1.5 Configuração

Este menu (figura 4.14) permite efetuar a conexão entre o software de supervisão ao circuito de controlo. O utilizador deverá utilizar o cabo USB para ligar fisicamente o computador onde o software está a ser utilizado e o circuito de controlo. Após isso deverá pressionar no botão localizar, que irá iniciar um processo no software. Esta função irá mostrar as portas USB que estão a ser utilizadas como porta COM. Após o utilizador selecionar a porta, deverá pressionar em conectar. Após isto a comunicação entre o software de supervisão e o circuito de controlo será permanente, tornando assim possível o funcionamento online, ou seja a emulação de avarias.

Ao ser pressionado o botão Offline, o software voltará ao seu funcionamento por defeito (offline), ou seja, todas os testes com avarias serão feitos em ambiente de simulação. Este modo de funcionamento permite ao utilizador realizar as simulações de avarias fora do contexto laboratorial, sem necessitar do equipamento desenvolvido para efetuar a emulação de avarias no MI.

Siga os seguintes passos para efetuar a conexão:

- Pressione o botão localizar;
- Escolha a porta (porta COM);
- Pressione Conectar

Localizar [dropdown] Conectar

Estado:

Offline

Configuração dos parâmetros do motor

Potência Nominal: [input]

Tensão Nominal: [input]

Pares de Polos [input]

Numero de Barras do Rotor: [input]

Load

Figura 4.14: Menu de configuração.

No lado direito da figura 4.14 existem vários espaços que o utilizador deverá preencher. Aqui o utilizador pode definir alguns parâmetros sobre o MI que está a ser utilizado. Caso estes parâmetros não sejam definidos o software de supervisão utiliza valores pré-definidos, no entanto, em alguns casos o uso de parâmetros exatos tornará mais preciso o cálculo das avarias, e a apresentação de resultados.

#### 4.5.1.6 Sobre e Ajuda

Embora os menus sobre e ajuda não estejam diretamente relacionados com o ensino de deteção e diagnóstico de avarias poderão constituir um auxílio no que respeita ao sistema. O menu sobre indica qual a versão do software que está a ser utilizada, bem como a sua data de desenvolvimento. O menu ajuda fornece ao utilizador um contacto de e-mail para onde possam ser reportados quaisquer problemas no funcionamento do sistema, recomendações ou dúvidas de funcionamento.

### 4.5.2 Sistema de Simulação

Como referido no capítulo 3, as avarias provocam uma alteração na corrente de alimentação do estator, adicionando harmónicas na corrente. Os estudos teóricos referidos no capítulo 3 mostram que essas harmónicas são características de avarias específicas. Deste modo utilizaram-se esses dados para simular as avarias, adicionando as harmónicas características de cada avaria.

As equações das harmónicas para as avarias consideradas são dadas pelas equações 3.5, 3.6, 3.9 e 3.10. Assim, no menu de emulação de falhas contido no software de supervisão, quando selecionada uma avaria, o sistema irá somar essas harmónicas à onda base, criando uma tabela com 3200 pontos por fase que posteriormente irá enviar para o dsPIC no circuito de controlo, tal como apresentado em 4.4.

No entanto, a frequência a que as harmónicas surgem não é constante, variando segundo certos parâmetros, como por exemplo o escorregamento do MI. Também a amplitude das mesmas pode variar tendo em conta alguns parâmetros, como por exemplo o número de barras partidas no MI (no caso da avaria das barras partidas). Com os parâmetros que foram adicionados (tabela 4.4) em cada avaria, torna-se possível efetuar várias simulações (e emulações, no caso de funcionamento online) de avarias em diferentes condições.





## Material Didático e Pedagógico

Neste capítulo será demonstrado o contributo que esta ferramenta poderá ser no ensino de avarias em MI, como laboratório auxiliar nesta tarefa.

Neste capítulo serão descritas as simulações/emulações que podem ser feitas com o sistema. Para além disso serão também descritas outras ferramentas desenvolvidas com o material didático e o portal. O material didático e pedagógico está dividido em duas grandes partes distintas. A primeira é constituída pelo software de supervisão e todo o sistema de simulação/emulação de avarias. Neste capítulo serão descritas algumas das experiências e exercícios associadas ao sistema desenvolvido. A segunda parte deste curso consiste no desenvolvimento dum portal onde se encontram todos os dados referentes ao projeto DAAMI. Neste portal o aluno/formando poderá encontrar informação sobre a máquina, as avarias que nela incidem e também sobre os mais variados métodos de deteção utilizados. O uso destas duas ferramentas em simultâneo fornece um apoio na formação do utilizador para que este consiga identificar avarias em MIs, principalmente no que respeita à deteção pelo método MCSA.

### 5.1 Software de Supervisão

No que diz respeito ao ensino de deteção de avarias no MI, o software de supervisão tem um papel bastante importante, permitindo a configuração e simulação das avarias no MI. É ainda de referir que este tema do ensino o software de supervisão possui duas ferramentas distintas. A emulação de avarias, a qual permite recriar em ambiente laboratorial (ou fora dele, em modo Offline, a simulação das mesmas) vários tipos de avarias que incidem no MI e o material didático, que permite ajudar a testar os conhecimentos

sobre este tema.

## 5.1.1 Simulação de Avarias

### 5.1.1.1 Barras do rotor partidas

Nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 estão descritas três simulações efetuadas para a avaria de barras partidas. Na figura 5.1 a simulação foi realizada apenas para uma barra partida e um escorregamento de 5%. Na figura 5.2 a simulação foi feita para o mesmo escorregamento mas para seis barras do rotor partidas e, por último na figura 5.3 a simulação foi realizada para seis barras partidas e um escorregamento de 10%.

A título exemplificativo, cada uma das figuras mostra uma combinação de fases diferentes. Adicionalmente, todas têm selecionados 20 ciclos de onda nas opções do gráfico, uma vez que esta avaria se reflete numa modulação da onda que, no caso do escorregamento de 5% apenas é visível neste período. Existem assim 24 opções de simulação diferentes que o utilizador pode efetuar para esta avaria, podendo variar entre 1 a 8 barras partidas e entre um valor de escorregamento entre 5%, 10% e 15%. Deste modo, o aluno pode verificar as diferenças entre estas opções. É também possível verificar na caixa de texto a fórmula da frequência das harmónicas bem como o seu valor segundo as opções escolhidas. Tendo em conta os gráficos da FFT das verifica-se que as harmónicas estão muito próximas dos  $50H_z$  (principalmente para baixos escorregamentos), o que torna esta avaria bastante difícil de detetar por métodos computacionais.

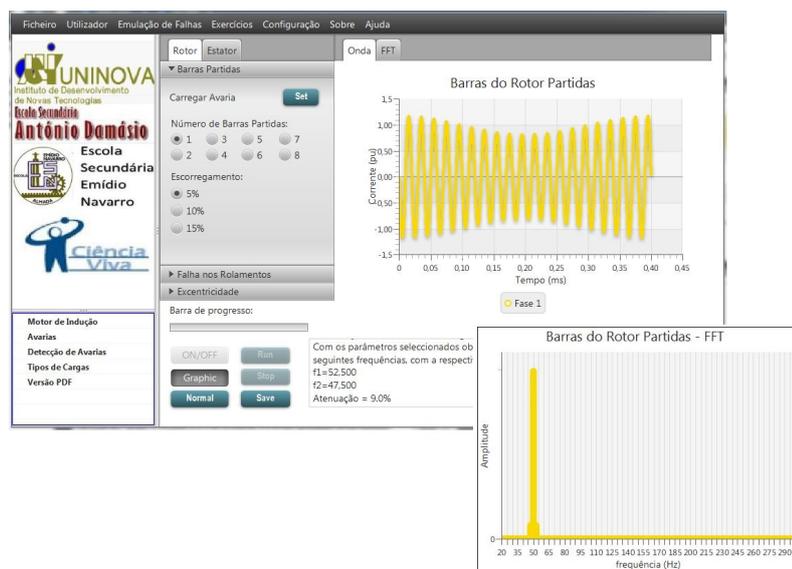


Figura 5.1: Simulação de barras do rotor partidas: 1 barra partida e 5% de escorregamento.



Figura 5.2: Simulação de barras do rotor partidas: 6 barras partidas e 5% de escorregamento.

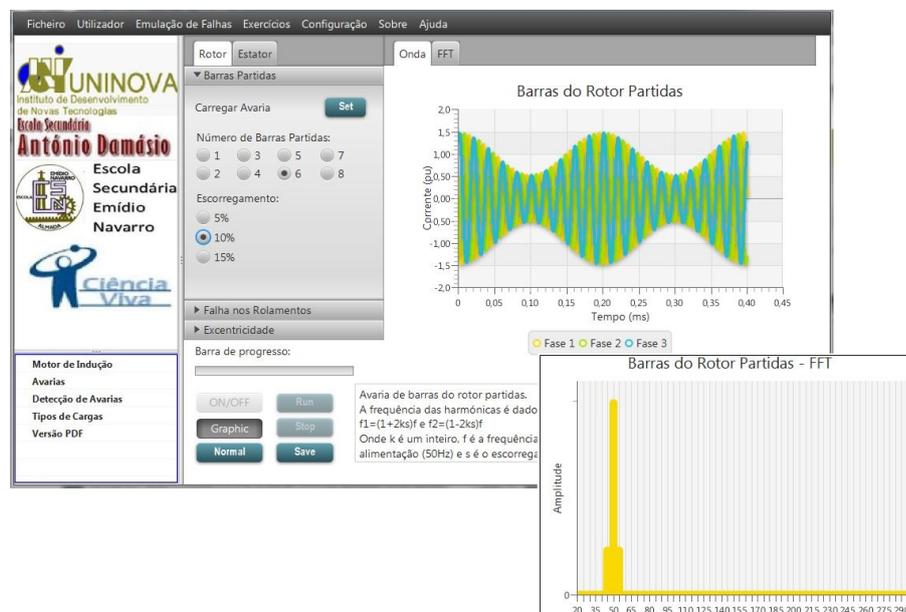


Figura 5.3: Simulação de barras do rotor partidas: 6 barras partidas e 10% de escorregamento.

### 5.1.1.2 Avaria nos rolamentos

Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6 estão representadas três simulações efetuadas para a avaria nos rolamentos. Nesta avaria a equação da frequência das harmônicas (dada pela equação 3.9) têm como parâmetros duas variáveis  $n_1$  e  $n_2$ , para além do escorregamento. No entanto, a equação utilizada retrata várias ocorrências para este tipo de avaria, sendo que o aluno tem 75 combinações para efetuar diferentes testes, considerando as várias possibilidades existentes para  $n_1$ ,  $n_2$  e o escorregamento.

Neste caso é de notar que, ao contrário do que acontece na avaria das barras partidas, todos os parâmetros afetam diretamente a frequência das harmônicas (visível na caixa de texto das figuras 5.4, 5.5 e 5.6), tornando esta avaria especialmente difícil de identificar. No entanto, por realização destes testes o aluno é capaz de identificar um padrão para reconhecer a avaria em situações futuras, para além disso a análise do gráfico da FFT facilita a identificação desta avaria.

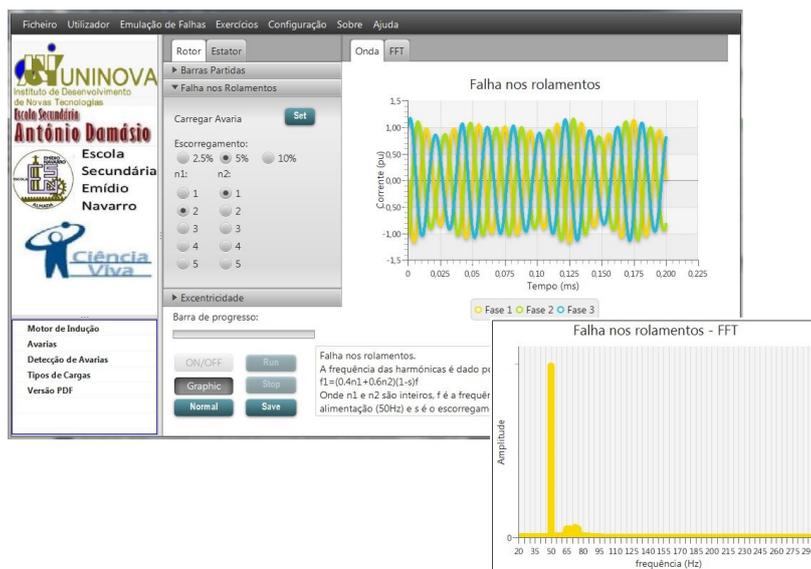


Figura 5.4: Simulação de avaria nos rolamentos com  $n_1 = 2$ ,  $n_2 = 1$  e escorregamento igual a 5%.

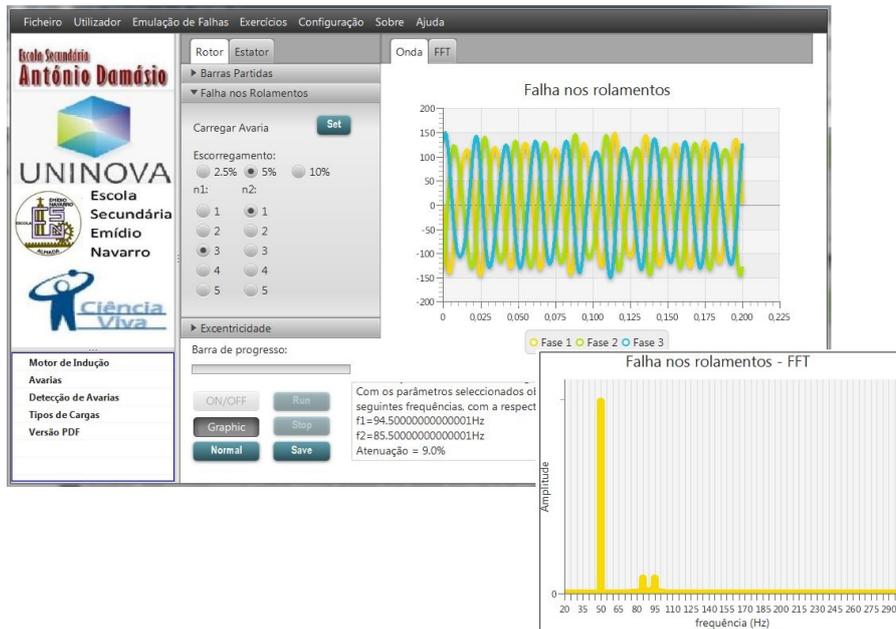


Figura 5.5: Simulação de avaria nos rolamentos com  $n_1 = 3$ ,  $n_2 = 1$  e escorregamento igual a 5%.



Figura 5.6: Simulação de avaria nos rolamentos com  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 3$  e escorregamento igual a 5%.

### 5.1.1.3 Excentricidade

Nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9 estão representadas três simulações para o caso de excentricidade. Na equação 3.6 confirma-se que existem vários parâmetros que influenciam o comportamento desta avaria (tais como o escorregamento, a ordem da excentricidade e a ordem da harmónica) traduzindo-se na frequência a que as harmónicas aparecem. Nesta simulação o aluno tem disponíveis 72 combinações possíveis, fazendo variar a ordem da harmónica, a ordem da excentricidade e o escorregamento.

Tal como se verifica na avaria dos rolamentos, também neste caso, todos os parâmetros influenciam a frequência a que as harmónicas aparece. Por análise dos gráficos presentes nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9 verifica-se que as sinusóides sofrem uma grande distorção. isto deve-se ao facto de as harmónicas características destas avarias aparecerem em frequências mais elevadas, como se pode também verificar nas três figuras acima referidas, nas respetivas caixas de texto. É também possível verificar que com o aumento das ordens (da excentricidade ou da harmónica) a frequência onde surge a harmónica aumenta.

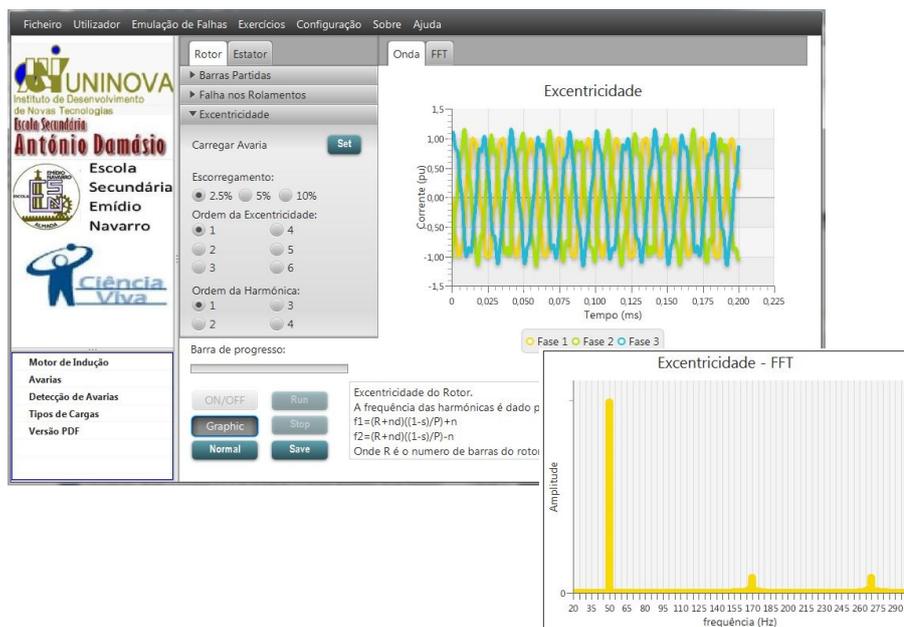


Figura 5.7: Simulação de excentricidade com ordem da excentricidade igual a 1, ordem da harmónica igual a 1 e escorregamento igual a 2.5%.

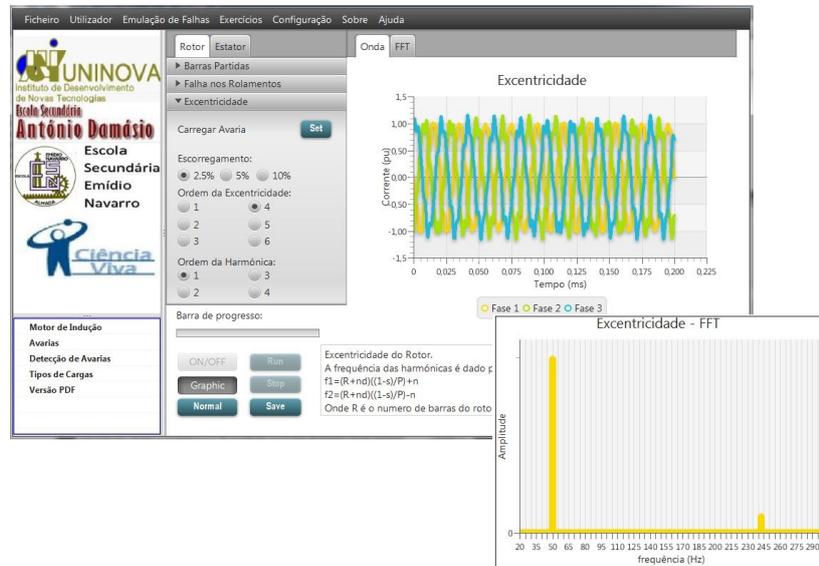


Figura 5.8: Simulação de excentricidade com ordem da excentricidade igual a 4, ordem da harmónica igual a 1 e escorregamento igual a 2.5%.

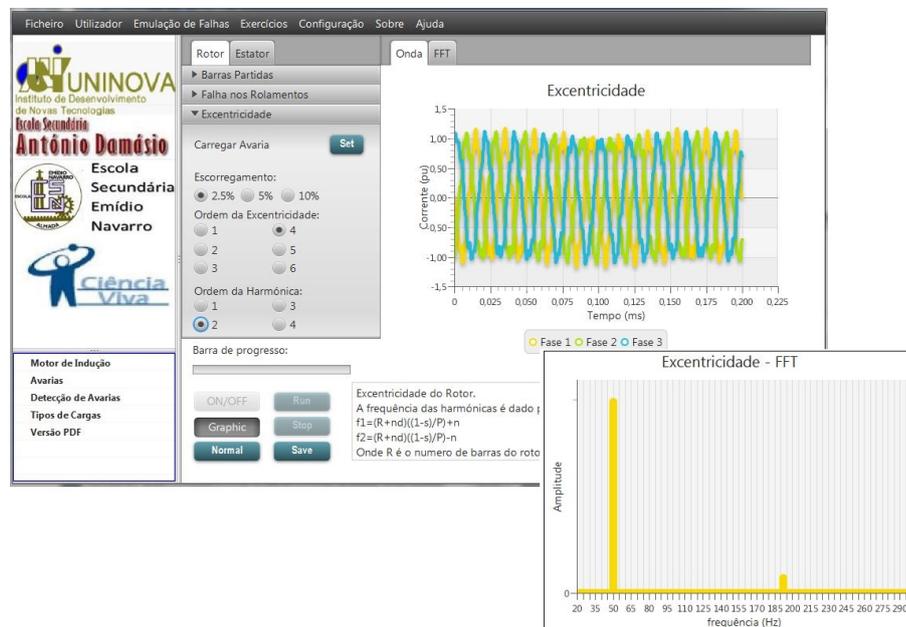


Figura 5.9: Simulação de excentricidade com ordem da excentricidade igual a 4, ordem da harmónica igual a 2 e escorregamento igual a 2.5%.

#### 5.1.1.4 Avaria nos enrolamentos do estator

Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 estão apresentadas três simulações que representam uma avaria nos enrolamentos do estator. Nesta avaria, à semelhança do que acontece com a avaria de barras do rotor partidas, apenas se consideraram duas variáveis, o escorregamento do MI e a severidade da avaria. No caso da avaria das barras partidas a severidade da mesma está diretamente relacionada com o número de espiras em curto-circuito. Esta avaria é bastante evolutiva, o que se traduz num aumento da amplitude das harmónicas, pelo que se implementaram três casos distintos de severidade, de modo a recriar essa evolução.

Considerando assim os três casos de severidade e as diferentes opções de escorregamento, é possível efetuar 12 diferentes simulações para esta avaria. Por análise dos gráficos presentes nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 verifica-se que esta avaria tem um comportamento semelhante à avaria das barras do rotor partidas, pois o seu efeito é uma modulação na amplitude da onda. Comparando também as frequências das harmónicas, verifica-se que em ambos os casos surgem duas componentes, uma inferior aos  $50H_z$  e outra superior. Neste caso, é importante referir que nesta avaria a distância das harmónicas à frequência fundamental é superior.



Figura 5.10: Simulação da avaria nos enrolamentos do estator com severidade baixa e escorregamento igual a 2.5%.

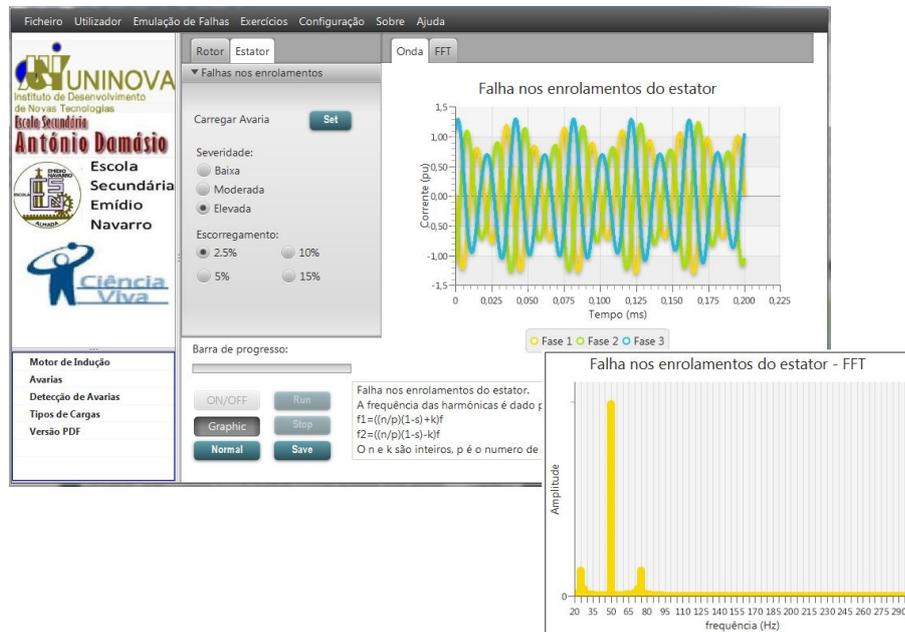


Figura 5.11: Simulação da avaria nos enrolamentos do estator com severidade elevada e escorregamento igual a 2.5%.

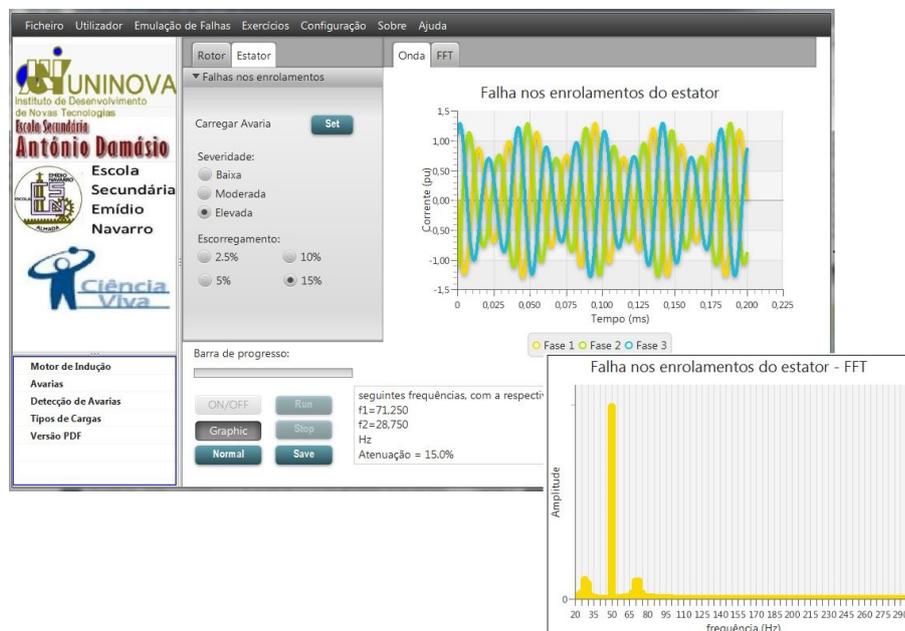


Figura 5.12: Simulação da avaria nos enrolamentos do estator com severidade elevada e escorregamento igual a 15%.

### 5.1.2 Exercícios didáticos

Os dois tipos de exercícios apresentados foram desenvolvidos com o propósito de serem utilizados de forma complementar ao ensino de detecção e diagnóstico de avarias nos MIs. A sua utilização irá auxiliar no teste de conhecimentos e no suporte ao laboratório, permitindo ao docente/formador responsável a realização de diferentes exercícios com os alunos.

#### 5.1.2.1 Exercício tipo simulação

Este exercício foi desenvolvido com o intuito de ser utilizado em modo offline e como suporte ao estudo deste tema por parte do utilizador, permitindo ao aluno o teste dos seus conhecimentos de detecção de avarias no MI tendo por base metodologias de assinatura de corrente, como o caso do MCSA.

Este exercício apresenta-se na forma demonstrada na figura 5.13 e é composto por um número limitado (e configurável) de perguntas do tipo escolha múltipla. Ao pressionar o botão RUN, um gráfico aleatório é gerado. Este gráfico representa uma das quatro avarias consideradas no sistema. Os parâmetros característicos de cada uma destas avarias é gerado aleatoriamente dentro das opções que o software de supervisão permite simular. Deste modo, garante-se não só um grande conjunto de questões, mas também uma uniformidade nos testes realizados por este software, uma vez que, todos os resultados podem ser também testados em modo de emulação.

Após o gráfico ser gerado, o utilizador deverá selecionar a resposta correta, ou seja, deve ser capaz de identificar a avaria, quer seja pela análise do gráfico da onda ou pelo gráfico da FFT. Após selecionar a opção pretendida, o utilizador deverá pressionar o botão RUN e outra avaria será gerada. Este ciclo será repetido até que o total de questões seja cumprido. Após finalizar o teste, o utilizador terá acesso às perguntas efetuadas, à sua resposta, bem como à percentagem de perguntas certas, como está exemplificado na caixa de texto da figura 5.14.



Figura 5.13: Exercício tipo simulação, escolha múltipla.

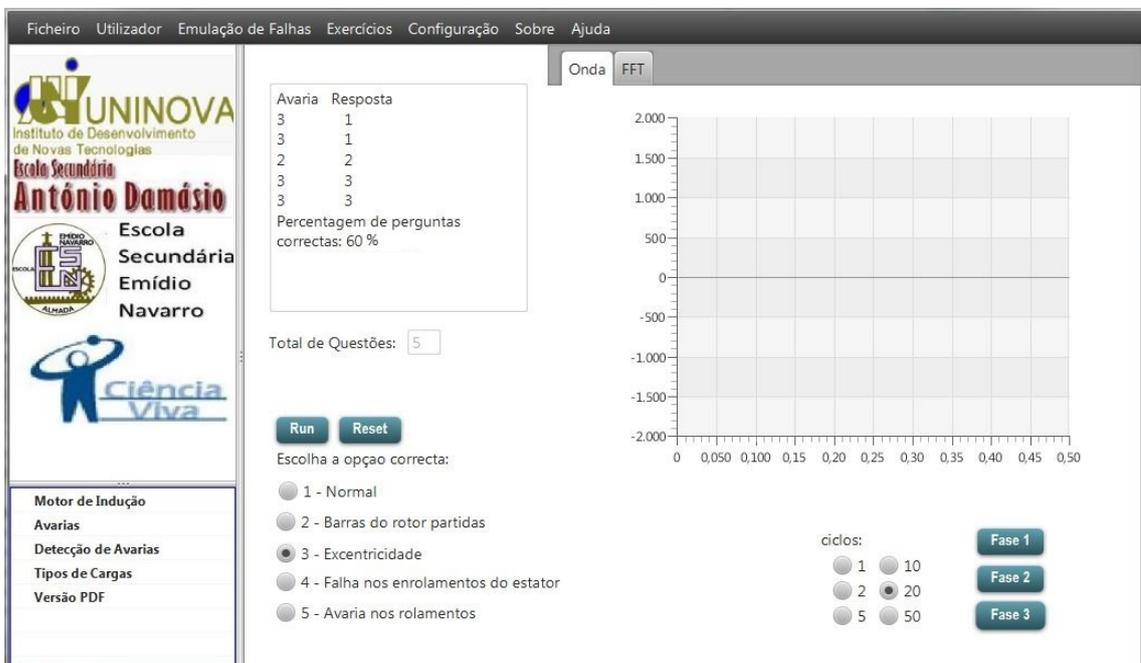


Figura 5.14: Exercício tipo simulação, resultados

### 5.1.2.2 Exercício tipo emulação

Ao contrário do exercício tipo simulação, este foi desenvolvido para servir de apoio aos laboratórios, permitindo a realização de vários ensaios. O seu objetivo é proporcionar ao docente um ambiente onde este possa configurar vários exercícios, permitindo assim a realização de diferentes ensaios.

O docente pode configurar quatro exercícios diferentes em simultâneo, devendo para isso ter efetuado Login adequado no menu Utilizador. Quando pressionado o botão configurar a janela de configuração assinalada na figura 5.15 aparece. Esta janela permite configurar as avarias pretendidas e associá-las a um dos botões EX:1, EX:2, EX:3 ou EX:4. Deste modo, o docente pode definir quais as avarias que serão testadas pelos alunos, com os parâmetros por si configurados.

Quando um aluno entra neste menu apenas visualiza o que está presente na figura 5.16, ou seja, não tem acesso ao menu de configuração. Deste modo, não é possível saber a avaria representada em cada um dos exercícios. O aluno deve assim iniciar a emulação, onde o MI inicia o seu funcionamento avariado, de seguida deve utilizar uma ferramenta, proposta pelo docente (podendo utilizar o software de supervisão, um osciloscópio ou um analisador de frequências) para fazer a análise de corrente e, se possível analisar outras ocorrências na máquina para concluir qual é a avaria que afeta a mesma.

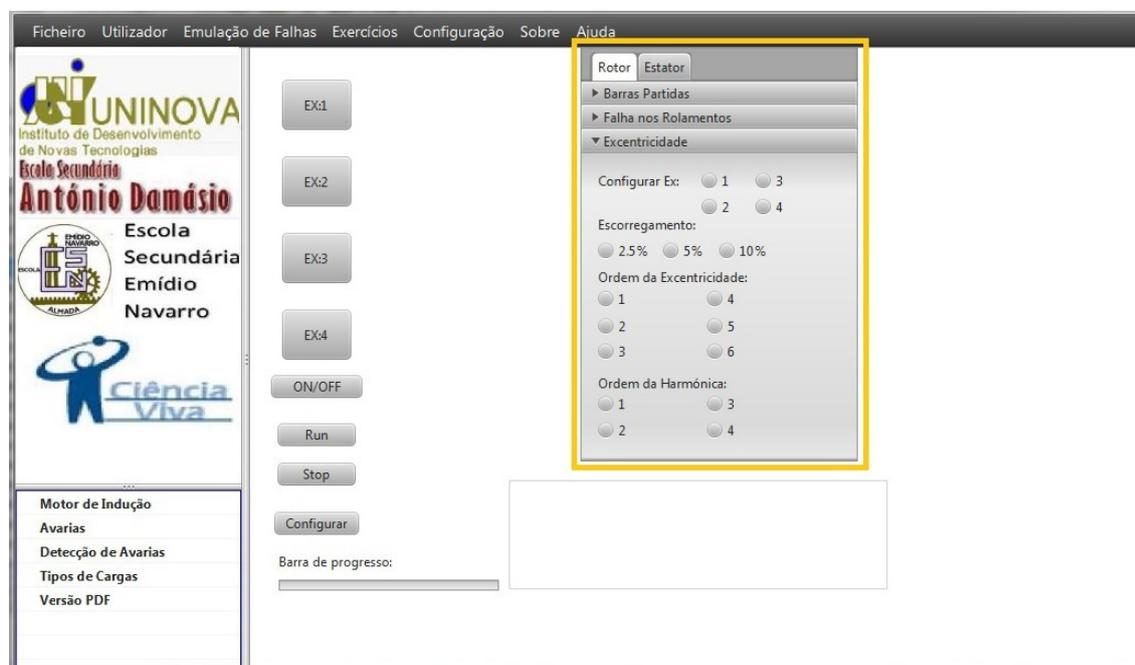


Figura 5.15: Exercício tipo emulação, com configuração de exercícios.

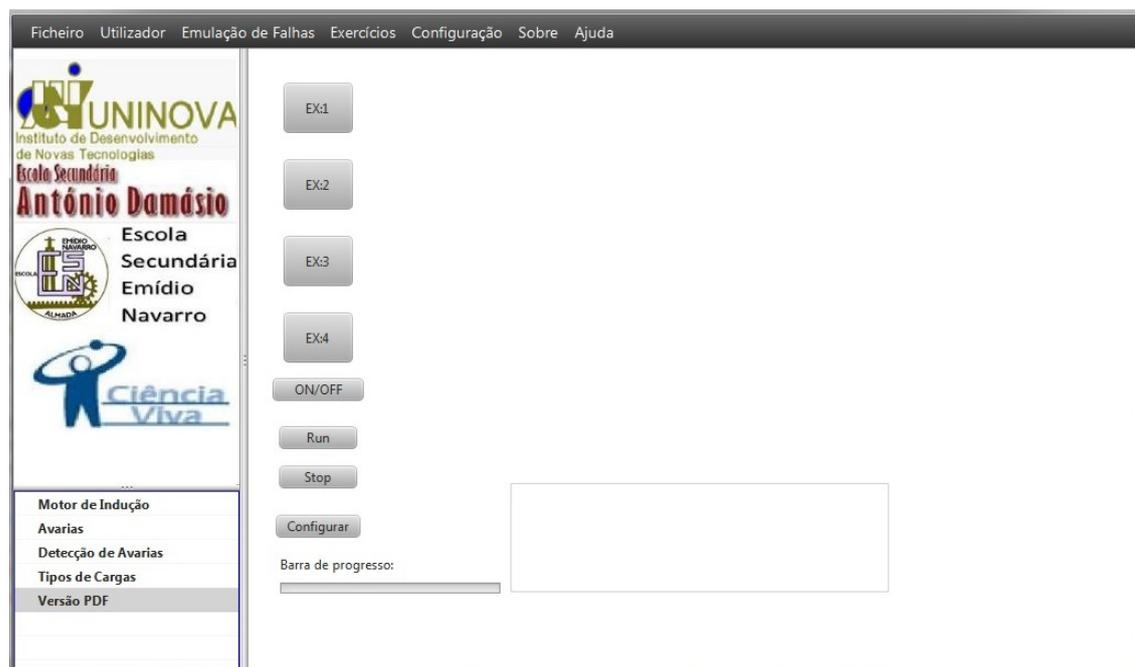


Figura 5.16: Exercício tipo emulação, visão do aluno.

### 5.1.3 Documentação de apoio

Visando fornecer apoio aos estudantes no que ao tema da deteção de avarias em MIs diz respeito, foi desenvolvido um documento que, para além de poder ser obtido em formato pdf, está contido no software de supervisão como pode ser visualizado na figura 5.17.

Este sistema de ensino e deteção de avarias foi desenvolvido não só para ser utilizado no ensino superior mas também no ensino secundário. A título de exemplo este sistema poderá servir de suporte a cursos onde este tema seja lecionado, como é o caso do curso tecnológico de eletrotecnia e eletrónica da escola secundária Emídio Navarro. No entanto, nestas disciplinas lecionadas no ensino secundário, existe uma escassez de documentação no que respeita a estes temas. Deste modo esta sebenta foi desenvolvida com vista a preencher esta lacuna. Esta está assim dividida nos seguintes tópicos:

- Motor de Indução: neste primeiro capítulo são apresentados os princípios básicos do funcionamento do MI, as suas partes constituintes e diferentes construções (rotor em gaiola de esquilo ou rotor bobinado);
- Avarias: no segundo capítulo são abordadas as avarias mais comuns que incidem no MI;
- Deteção de avarias: neste último capítulo são descritos vários métodos de deteção de avarias, desde os métodos mais tradicionais como a análise de temperatura ou velocidade, até métodos mais modernos, como a assinatura de corrente (MCSA).

Esta sebenta é um documento auxiliar que visa complementar o conhecimento adquirido em ambiente académico, servido também como ferramenta de estudo para os alunos. Para além disso, o facto de se encontrar também inserida no software de supervisão permite que o utilizador consulte o documento em qualquer local onde esteja a utilizar o sistema.

**Motor de indução**

Apesar da enorme utilização da máquina de indução magnética, ela foi inventada ainda no século XIX por Nikola Tesla. Hoje em dia mais de 80% dos motores eléctricos utilizados na indústria são motores de indução. Dai este tipo de motores serem responsáveis pelo consumo de mais de 50% da energia produzida por uma nação industrializada.

Figura 1: Estator.

A máquina de indução pode ser utilizada como motor ou como gerador, no entanto o seu desempenho como gerador não é satisfatório para muitas aplicações pelo que é raramente utilizada com tal. Assim esta máquina é principalmente utilizada como motor. Existem vários tamanhos tipicamente utilizados para o motor de indução, os mais pequenos encontram-se em aparelhos domésticos tais como liquidificadores, máquinas de lavar a roupa, máquinas de fazer sumo e máquinas de...

Figura 5.17: Material didático, documentos de apoio.

## 5.2 Portal DAAMI

O desenvolvimento do portal teve por base dois objetivos distintos, o apoio ao estudantes e a divulgação do sistema. Na página inicial (figura 5.18), apresenta-se uma breve descrição desta ferramenta de ensino.

O portal está dividido em cinco secções distintas:

- Projeto;
- Equipa;
- Material Didático;
- Contactos;
- Referências.



Figura 5.18: Portal, página inicial.

Na secção projeto, está descrito todo o projeto, a forma como foi desenvolvido, como funciona e qual é o público alvo. Esta secção tem como objetivo tornar este sistema conhecido ao público em geral, de modo a divulgar o laboratório de ensino de deteção e diagnóstico de avarias em MIs no maior número de instituições de ensino possível.

Na secção equipa, como o próprio nome indica estão apenas apresentados todos os elementos, referentes a cada uma das instituições envolvidas, que participaram no desenvolvimento do sistema. Na secção material didático, são disponibilizados os documentos em formato pdf. A informação contida neste documento (figura 5.19) é a mesma que está presente no software de supervisão, no entanto, no portal esta está disponível para a realização do download em formato pdf. Este documento pode ser utilizado como apoio em qualquer uma das temáticas relacionadas com MIs, as suas avarias ou métodos de deteção.

Quanto à secção contactos (figura 5.20), esta apresenta, não só as instituições que participaram no desenvolvimento deste sistema mas também uma ligação ao portal de cada instituição. Por último, na secção referências poder-se-á ter acesso a uma listagem bibliográfica da temática em estudo, baseada em artigos científicos.

sites.uninova.pt/daami/pages/courseware-0

UNINOVA

DAAMI  
Diagnóstico Automático de Avarias em Motores de Indução

Escola Secundária Emídio Navarro  
Ciência Viva

PROJECT TEAM COURSEWARE CONTACTS REFERENCES

### Courseware

Apesar da enorme utilização da máquina de indução magnética, ela foi inventada ainda no século XIX por Nikola Tesla. Hoje em dia mais de 80% dos motores elétricos utilizados na indústria são motores de indução. Daí este tipo de motores serem responsáveis pelo consumo de mais de 50% da energia produzida por uma nação industrializada.

A máquina de indução pode ser utilizada como motor ou como gerador, no entanto o seu desempenho como gerador não é satisfatório para muitas aplicações pelo que é raramente utilizada como tal. Assim esta máquina é principalmente utilizada como motor. Existem vários tamanhos utilizados para o motor de indução, os mais pequenos encontram-se em aparelhos domésticos tais como máquinas de lavar a roupa, máquinas de fazer sumo e máquinas de cortar a relva. Máquinas de maiores dimensões são utilizadas em bombas de água, compressores e na indústria fabril.

Em baixo pode ser feito o download de uma versão pdf de um documento de apoio às avarias e detecção das mesmas na máquina de indução.

```

graph LR
    A[Interface, Homem - Máquina] --> B[Microcontrolador]
    B --> C[Circuito de Potência]
    C --> D[Máquina de Indução]
  
```

[material\\_didatico.pdf](#)

Figura 5.19: Portal, secção courseware.

sites.uninova.pt/daami/links

UNINOVA

DAAMI  
Diagnóstico Automático de Avarias em Motores de Indução

Escola Secundária Emídio Navarro  
Ciência Viva

PROJECT TEAM COURSEWARE CONTACTS REFERENCES

### Contacts

UNINOVA – Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias

Campus da FCT/UNL  
Monte da Caparica  
2829 – 516 Caparica  
Portugal

Escola Secundária António Damásio

Av. Dr. Francisco Luís Gomes  
1800-178 Lisboa  
Portugal

Escola Secundária Emídio Navarro

Avenida Rainha Dona Leonor  
2809-009 Almada  
Portugal

Facebook Twitter LinkedIn Google+ 0

Figura 5.20: Portal, secção contacts.

# 6

## Conclusão e Perspetivas Futuras

Este capítulo começa por apresentar a síntese geral do trabalho desenvolvido, tendo em conta os objetivos propostos. Posteriormente comentam-se e os trabalhos futuros que podem melhorar o sistema desenvolvido.

### 6.1 Síntese geral

No caso dos MIs existem alguns métodos de deteção de avarias bastante eficazes, que permitem identificar avarias específicas. Deste modo revela-se assim a importância do trabalho realizado nesta dissertação.

O sistema aqui apresentado permite a realização de vários ensaios, tendo em conta diferentes avarias. A sua principal vantagem é a utilização de um MI no qual é emulado um funcionamento em avaria, pré-definido pelo utilizador. São quatro as avarias que é possível emular neste trabalho. Para cada uma das avarias existem vários parâmetros variáveis, o que permite testar as avarias em vários estados e condições diferentes, alargando assim o leque de emulações possíveis. Para além das emulações, também é possível realizar estes ensaios em ambiente de simulação no software de simulação desenvolvido, sendo apenas necessário o mesmo.

Apesar dos laboratórios terem um papel essencial no ensino de certas temáticas, estes necessitam de outras componentes, quer sejam documentos de apoio ou pessoas qualificadas. Para tornar este sistema mais completo foram ainda desenvolvidas outras ferramentas que possibilitam uma melhor aquisição dos conhecimentos. Os documentos de

apoio fornecem ao aluno o conhecimento teórico necessário para adquirir estas competências. Quanto aos exercícios didáticos, estes permitem auxiliar o docente na realização de avaliações e laboratórios. Por último, o portal é utilizado como ponto de divulgação de todo o projeto, contendo também todos os documentos de apoio.

Esta dissertação oferece assim um sistema que permite efetuar o ensino de avarias em motores de indução de forma eficaz e interessante. O sistema permite a realização de ensaios de situações de avaria de um modo bastante alargado com um motor saudável mas, fornecendo também outras componentes essenciais ao ensino desta temática.

## 6.2 Publicações

Foi elaborado um artigo para a conferência ISIE (International Symposium on Industrial Electronics) 2014:

- Renato Assunção; V. Delgado-Gomes; V. Fernão Pires; J. F. Martins; “A new teaching tool for fault detection in the induction machine” 2014 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. pp. 2190 - 2195. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864957.

## 6.3 Perspetivas futuras

Esta dissertação apresenta um sistema que permite alterar a forma como os laboratórios de avarias em motores indução são efetuados. Ainda assim, como perspetivas, alguns aspetos devem ser tidos em conta, não só de forma a melhorar o sistema em si, como também a prática de ensino de avarias em motores elétricos:

- Apesar do MI ser o motor elétrico mais utilizado na indústria, este sistema pode ser alargado a outros tipos de máquinas, como por exemplo o motor síncrono;
- Podem ser adicionadas emulações de vários tipos de carga no MI;
- Este sistema permite a simulação de quatro avarias, barras de rotor partidas, excentricidade, rolamentos danificados e curto-circuitos nos enrolamentos do estator. Assim, como perspetiva futura seria de máximo interesse estender este sistema a outras avarias possíveis;
- Tendo sido o sistema desenvolvido para ser principalmente utilizado em ambiente académico, poderão ser desenvolvidas mais experiências didáticas que permitam tornar o método de ensino de avarias mais eficaz;

- Por fim, o sistema poderá ser totalmente otimizado para poder ser comercializado, todo o hardware deve ser condicionado de modo a tornar a sua utilização segura e o software poderá ser otimizado para permitir a utilização constante por parte dos alunos.



# Bibliografia

- [1] B. Ayhan, M.-Y. Chow e M.-H. Song. "Multiple signature processing-based fault detection schemes for broken rotor bar in induction motors". Em: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 20.2 (2005), pp. 336–343.
- [2] J. CusiDO, J. ROSERO, E. Aldabas, J. A. Ortega e L. Romeral. "New fault detection techniques for induction motors". Em: *Electrical Power Quality and Utilisation, Magazine* 2.1 (2006).
- [3] W. T. Thomson e M. Fenger. "Current signature analysis to detect induction motor faults". Em: *Industry Applications Magazine, IEEE* 7.4 (2001), pp. 26–34.
- [4] A. Widodo, B.-S. Yang e T. Han. "Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors". Em: *Expert Systems with Applications* 32.2 (2007), pp. 299–312.
- [5] J. F. Martins, V. F. Pires e T. Amaral. "Induction motor fault detection and diagnosis using a current state space pattern recognition". Em: *Pattern Recognition Letters* 32.2 (2011), pp. 321–328.
- [6] J.-H. Jung, L. Jong-Jae e B.-H. Kwon. "Online diagnosis of induction motors using MCSA". Em: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 53.6 (2006), pp. 1842–1852.
- [7] S. Ayasun e C. O. Nwankpa. "Induction motor tests using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses". Em: *IEEE Transactions on education* 48.1 (2005), pp. 37–46.
- [8] M. V. Lazarini e E. Ruppert Filho. "Sensorless three-phase induction motor direct torque control using sliding mode control strategy laboratory set-up for motor speed control teaching". Em: *Teaching international Conference On Engineering Education–ICEE 2007 September 3*. Vol. 7. 2007.
- [9] A Costa, M Vilaragut, J. Travieso-Torres, M Duarte-Mermoud, J Muñoz e I Yznaga. "Matlab based simulation toolbox for the study and design of induction motor FOC speed drives". Em: *Computer Applications in Engineering Education* 20.2 (2012), pp. 295–312.

- [10] P. Idowu e C. Root. "Real-time motor current signature analysis tool for undergraduate laboratory". Em: *Computer Applications in Engineering Education* 18.4 (2010), pp. 634–639.
- [11] J. Ma e J. V. Nickerson. "Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review". Em: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 38.3 (2006), p. 7.
- [12] N. Tesla. "A new system of alternate current motors and transformers". Em: *American Institute of Electrical Engineers* (1888).
- [13] T. Wildi. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. Prentice Hall, 2002.
- [14] W. T. Thomson e R. J. Gilmore. "Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives—fundamentals, data interpretation, and industrial case histories". Em: *Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium*. 2003, pp. 145–156.
- [15] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert e H. Dhirani. *Electrical Insulation for Rotating Machines*. IEEE Press, 2004.
- [16] J.-C. Trigeassou. *Electrical Machines Diagnosis*. John Wiley & Sons, 2011.
- [17] P. C. Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, 1997.
- [18] H. A. Toliyat, S. Choi, S. Nandi e H. Meshgin-Kelk. *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. CRC Press, 2013.
- [19] P Pillay e Z Xu. "Motor current signature analysis". Em: *Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS'96., Conference Record of the 1996 IEEE*. Vol. 1. IEEE. 1996, pp. 587–594.
- [20] G. Kliman e J Stein. "Methods of motor current signature analysis". Em: *Electric Machines and power systems* 20.5 (1992), pp. 463–474.
- [21] A. J. M. Cardoso. *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*. Coimbra Editora, 1991.
- [22] A. Siddique, G. Yadava e B. Singh. "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors". Em: *Energy conversion, iee transactions on* 20.1 (2005), pp. 106–114.
- [23] S. Nandi, H. A. Toliyat e X. Li. "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review". Em: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 20.4 (2005), pp. 719–729.
- [24] M. Sin, W. L. Soong e N. Ertugrul. "Induction machine on-line condition monitoring and fault diagnosis—A survey". Em: *Australasian Universities Power Engineering Conference, Christchurch, New Zeland*. Vol. 28. 2003.
- [25] M. El Hachemi Benbouzid. "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection". Em: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 47.5 (2000), pp. 984–993.

- [26] F Filippetti, A Bellini e G Capolino. "Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: State of art and future perspectives". Em: *Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013 IEEE Workshop on*. IEEE. 2013, pp. 196–209.
- [27] J. Faiz, B. M. Ebrahimi e M. B. B. Sharifian. "Time stepping finite element analysis of broken bars fault in a three-phase squirrel-cage induction motor". Em: *Progress In Electromagnetics Research* 68 (2007), pp. 53–70.
- [28] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham e G. E. Dawson. "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 28.1 (1992), pp. 165–171.
- [29] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni e P. Vas. "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 34.1 (1998), pp. 98–108.
- [30] W. T. Thomson e M. Fenger. "Current signature analysis to detect induction motor faults". Em: *Industry Applications Magazine, IEEE* 7.4 (2001), pp. 26–34.
- [31] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni e G. B. Kliman. "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 37.5 (2001), pp. 1248–1255.
- [32] N. Mehala e R. Dahiya. "Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis". Em: *International journal of systems applications, engineering & development* 2.1 (2007), pp. 29–35.
- [33] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni e G.-A. Capolino. "Advances in diagnostic techniques for induction machines". Em: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.12 (2008), pp. 4109–4126.
- [34] M. Haji e H. A. Toliyat. "Pattern recognition-a technique for induction machines rotor broken bar detection". Em: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 16.4 (2001), pp. 312–317.
- [35] M. Blodt, M. Chabert, J. Regnier e J. Faucher. "Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 42.6 (2006), pp. 1454–1463.
- [36] M. Blodt, J. Regnier e J. Faucher. "Distinguishing load torque oscillations and eccentricity faults in induction motors using stator current wigner distributions". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 45.6 (2009), pp. 1991–2000.
- [37] A. H. Bonnett. "Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 36.5 (2000), pp. 1435–1448.
- [38] SNR. *O Diagnóstico Perito SNR: Análise e Preconizações para Optimizar a Vida dos Rolamentos*. 2003. URL: <http://www.ntn-snr.com/industry/es/es-es/file.cfm/dt10br.pdf?contentID=1639>.

- [39] I. Y. Onel e M El Hachemi Benbouzid. "Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and concordia transform approaches comparative study". Em: *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 13.2 (2008), pp. 257–262.
- [40] F. Immovilli, A. Bellini, R. Rubini e C. Tassoni. "Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison". Em: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 46.4 (2010), pp. 1350–1359.
- [41] R. L. Schiltz. "Forcing frequency identification of rolling element bearings". Em: *Sound and vibration* 24.5 (1990), pp. 16–19.
- [42] A. H. Bonnett. "A Comparison between insulation systems available for PWM inverter fed motors". Em: *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1996, Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 43rd Annual*. IEEE. 1996, pp. 49–60.
- [43] P. Gnacinski. "Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over-or undervoltages". Em: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 23.2 (2008), pp. 363–371.
- [44] J. Faiz e H Ebrahimpour. "Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages". Em: *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*. Vol. 1. IEEE. 2005, pp. 485–491.
- [45] A. H. Bonnett e G. C. Soukup. "Cause and analysis of stator and rotor failures in 3-phase squirrel cage induction motors". Em: *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1991., Conference Record of 1991 Annual*. IEEE. 1991, pp. 22–42.
- [46] J Penman, H. Sedding, B. Lloyd e W. Fink. "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors". Em: *Energy conversion, iee transactions on* 9.4 (1994), pp. 652–658.
- [47] Microchip. *16-Bit Microcontrollers and Digital Signal Controllers with High-Speed PWM, Op Amps and Advanced Analog*. 2013. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70000657H.pdf>.
- [48] Microship. *MPLAB® X Integrated Development Environment*. 2009. URL: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/family/mplabx/>.
- [49] Microship. *MPLAB® XC16 C Compiler User's Guide*. 2013. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002071C.pdf>.
- [50] Microship. *PICKIT™ 3 Programmer/Debugger User's Guide*. 2009. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/52116A.pdf>.
- [51] FTDIChip. *UM232R USB - Serial UART Development Module Datasheet*. 2011. URL: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS\\_UM232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Modules/DS_UM232R.pdf).
- [52] C. T. Wu. *A Comprehensive Introduction to Object-Oriented Programming with Java*. McGraw-Hill, 2008.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [53] B. Brown. *A Guide to Programming in Java*. Lawrenceville Press, 2007.
- [54] Oracle. *NetBeans Documentation, Training and Support*. URL: <https://netbeans.org/kb/index.html>.
- [55] Oracle. *JavaFX Scene Builder*. URL: <http://www.oracle.com/technetwork/java/javafx/tools/index.html>.