

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise e Monitorização de Condição em Motores de Indução Trifásicos

Pedro Ferreira da Silva Pereira Dinis



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho

24 de Fevereiro de 2017

Resumo

Os motores elétricos têm uma grande importância nos processos industriais, por isso existe uma grande necessidade de manter os níveis de confiabilidade ao longo do seu tempo de vida útil. Convencionalmente os dispositivos de proteção elétricos apenas atuam após a ocorrência de falhas, o que pode implicar a interrupção do processo e consequentemente custos avultados para a empresa.

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema de monitorização de condição, com a capacidade de deteção e identificação de falhas automático nos seus estados iniciais, capaz suportar o ciclo de vida do produto.

Foi projetada uma estrutura para o sistema com base em métodos de deteção de falhas já existentes e validados. A aplicação desenvolvida foi testada para dois tipos de falhas diferentes.

Abstract

Electric motors are of great importance in industrial processes, so there is a great need to maintain levels of reliability throughout its lifetime. Conventional electrical protection devices act only after the occurrence of failure, which can lead to disruption of the process and consequently high costs to a company. The main objective of this work is the development of a automatic state monitoring system capable of detecting and identifyng faults in their initial state. In a first step, a structure was projected on the basis of existing methods and validation of the fault detection system. The application was developed and tested by two different types of faults.

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Adriano da Silva Carvalho, por tornado possível esta dissertação e me ter orientado ao longo do trabalho.

Em segundo gostaria de agradecer à minha família pelo apoio, aos meus pais por e terem suportado ao longo deste projeto, á minha Tia Paula Silva pelas orientações na escrita.

Por ultimo aos meus companheiros que me acompanharam nesta experiência.

Pedro Ferreira da Silva Pereira Dinis

“In the midst of chaos, there is also opportunity”

Sun Tzu

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Estrutura do documento	3
2	Análise de falhas em Motores de Indução Trifásicos	5
2.1	Introdução	5
2.2	Barras rotóricas partidas	6
2.2.1	Causas e efeitos:	7
2.2.2	Deteção de avarias	8
2.3	Avarias em Rolamentos	9
2.3.1	Causas e efeitos:	9
2.3.2	Deteção de avarias	10
2.4	Avarias nos enrolamentos do estator	11
2.4.1	Causas e efeitos:	12
2.4.2	Deteção de avarias	13
2.5	Excentricidade rotórica	15
2.5.1	Causas e efeitos:	15
2.5.2	Deteção de avarias	16
3	Processamento de sinal e métodos para análise de falhas	17
3.1	Introdução	17
3.2	Processamento de sinal para avaliar falhas	17
3.2.1	Domínio temporal	17
3.2.2	Domínio das Frequências	18
3.2.3	Domínio do Tempo-Frequências	19
3.3	Métodos de identificação de falhas:	20
3.3.1	Transformada de Park e EPVA	20
3.3.2	Análise de padrões da corrente do Motor	22
3.3.3	Método das componentes simétricas	23
3.3.4	Simulated Annealing	24
3.4	Inteligência Artificial na identificação de falhas	25
3.4.1	Redes Neurais Artificiais	25
3.4.2	Lógica Fuzzy	26

4	Monitorização e análise da condição de falha	29
4.1	Introdução	29
4.2	Estrutura do sistema	29
4.2.1	Sistema de deteção de falhas	31
4.2.2	Sistema de identificação de falhas	32
4.2.2.1	Identificação de curto-circuitos nos enrolamentos do Estator . .	32
4.2.2.2	Identificação de barras rotóricas partidas	32
5	Aplicação da metodologia em Motores de Indução Trifásicos	33
5.1	Introdução	33
5.2	ANSYS®Maxwell	33
5.3	Desenho de um MIT com gaiola esquilo usando o RMXprt	33
5.4	Desenho de um MIT com gaiola esquilo usando o Maxwell	36
5.4.1	Simulação de falhas em MIT	38
5.4.1.1	Simulação de barras rotóricas partidas	39
5.4.1.2	Simulação de curto-circuito nos enrolamentos do estator	40
5.5	Desenvolvimento e funcionamento da aplicação	41
6	Resultados	45
6.1	Introdução	45
6.2	Resultados da deteção de falhas	45
6.3	Resultados da identificação de barras partidas	47
6.4	Resultados da identificação de curto-circuitos nas fases	49
6.5	Conclusões	52
7	Conclusões e trabalhos futuros	53
	Referências	55

Lista de Figuras

2.1	Rotor com uma e duas barras partidas	7
2.2	Rolamento esférico [1]	9
2.3	Estator ligado em estrela a mostrar os diferentes tipos de falha nos enrolamentos	11
2.4	Foto de um enrolamento danificado	12
2.5	Tipos de excentricidade	15
3.1	Janela multi resolução tempo-frequência	20
3.2	Padrão da corrente de Park correspondente a um motor saudável e a um com dezoito enrolamentos curto-circuitados na fase C	21
3.3	Padrão da corrente de Park correspondente a um motor saudável e a um com quatro barras partidas seguidas.	22
3.4	Fluxograma de um algoritmo de simulated annealing	25
3.5	Exemplo de uma rede neuronal "feedfoward multi camadas"	26
3.6	Exemplo de um diagrama esquemático de um sistema fuzzy	27
4.1	Esquema do sistema de diagnóstico	30
5.1	Estator	34
5.2	Rotor	34
5.3	Interface do RMxpr	35
5.4	Gráficos do RMxprt	36
5.5	Opção de criação do Maxwell a partir de um setup	36
5.6	Modelo a 2-D do motor de 30kW	37
5.7	Corrente da fase vs Tempo	37
5.8	Binário vs Tempo	38
5.9	Velocidade vs Tempo	38
5.10	Motor sem barras partidas na esquerda e com quatro barras partidas na direita . .	39
5.11	Gráfico da evolução das três correntes durante um segundo de simulação com quatro barras partidas	40
5.12	FFT do motor com quatro barras partidas (só considerando o regime permanente)	40
5.13	Menu para curto-circuitar enrolamentos	41
5.14	Gráficos das correntes para 1 segundo de funcionamento com fase A 11% curto-circuitada	41
6.1	Relação entre o número de barras partidas e o fator de severidade, para barras partidas juntas e separadas respetivamente	49
6.2	Relação entre a percentagem de curto-circuitos na fase A (eixo das abcissas) e o fator de severidade (eixo das ordenadas)	51

Lista de Tabelas

2.1	Percentagem relativa das avarias em MIT dos constituintes do motor	6
5.1	Parâmetros do Estator	34
5.2	Parâmetros do Rotor	34
5.3	Resultados da análise	35
6.1	Valores medidos para o motor saudável e limites estabelecidos	45
6.2	Resultados da deteção da falha em caso de barras partidas	46
6.3	Resultados da deteção da falha em caso de curto-circuitos nas fases do estator (neste caso todos são na fase A)	47
6.4	Resultados da identificação de barras partidas	48
6.5	Valores da análise de curto-circuitos com motor estar saudável	49
6.6	Resultados da identificação da fase curto-circuitada	50
6.7	Evolução dos resultados com o aumento da severidade da falha na fase A	51

Abreviaturas e Símbolos

MIT	Motores de Indução Trifásicos
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de engenheiros eletrotécnicos)
EPRI	Electric Power Research Institute (Instituto de investigação de eletrónica de potencia)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier)
DFT	Discrete Fourier Transform (Transformada de Fourier discreta)
RNA	Redes Neurais Artificiais
STFT	Short-time Fourier Transform (Tranaformada de Fourier curta)
WT	Wavelet Transform (Transformada de wavelet)
TF	Transformada de Fourier
EPVA	Extended Park Vector Approach (Método do vetor de Park extendido)
F.E.M'S	Forças Eletromotrizes
BSD	Berkeley Software Distribution (Software de distribuição Berkeley)
MCSA	Motor current signature Analysis (Método da análise do sinal da corrente do motor)
SF	Severity Factor (Fator de severidade)
F.E.M.S	Forças eletromotrizes

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

Atualmente os motores elétricos têm uma enorme importância pois são elementos centrais em qualquer processo industrial. Na União Europeia cerca de 70% de toda a energia consumida no setor industrial está associada a estes [1]. Os motores elétricos são dispositivos que transformam energia elétrica em energia mecânica. São os mais usados de todo tipo de motores pois possuem um rendimento relativamente bom, grande versatilidade e um custo reduzido. Os tipos de motores elétricos que normalmente se encontram são dois: os de corrente contínua e os de corrente alternada [2].

- Motores de corrente contínua, como o nome indica, são alimentados com uma fonte de corrente contínua. Estes motores são menos utilizados pois o seu custo elevado de instalação apenas é aceitável em casos especiais muito específicos.
- Motores de corrente alternada, como o nome indica, são alimentados por corrente alternada. Estes por sua vez podem ser classificados em síncronos e assíncrono. Os síncronos funcionam com uma velocidade de rotação constante. Os assíncronos (também conhecidos como motores de indução) funcionam com uma velocidade estável que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Ainda dentro dos motores de indução existem dois tipos, o de rotor bobinado e os de gaiola de esquilo que constituem 90% deste tipo de motores. Devido à sua robustez e baixo custo são os mais utilizados.

Será sobre estes últimos (motores de indução) que este trabalho incidirá, pois como se pode concluir assumem uma importância determinante devido ao volume em que estão presentes na indústria.

Os tipos de avarias em motores de indução podem ser classificados em três tipos, mecânicas, elétricas (constituem as avarias internas) e de origem exterior (que sozinhas, tal como o nome indica, são as avarias externas). Estas manifestam-se de diferentes maneiras no motor e através de diferentes métodos e/ou abordagens é possível monitorizar o motor e diagnosticá-las, minimizando o seu impacto ou mesmo evitando que estas possam vir a ter efeitos negativos no sistema. De entre

todos os métodos existentes, destacam-se alguns como sendo os mais comuns, como por exemplo a transformada de Park, sistemas de inteligência artificial e meta-heurísticas que serão entre outros estudados no capítulo 2 [3].

1.2 Motivação

Nos processos onde os motores estão incluídos, existe a necessidade de manter os níveis de fiabilidade ao longo do seu tempo de vida útil. A grande variedade de ambientes, mais ou menos agressivos, associados às condições de funcionamento dos motores, são os principais fatores que estão na origem das avarias, que para além do impacto que estas trazem no processo leva à redução da vida útil destes.

Os dispositivos de proteção convencionais dos motores elétricos atuam somente após a ocorrência de falhas (ex.: relés, fusíveis etc...). Se estas forem graves implica a interrupção do processo, podendo provocar estragos noutros componentes do sistema, trazendo custos avultados para a empresa e em situações extremas pode mesmo chegar a colocar em risco a vida dos trabalhadores.

Deste modo, a deteção antecipada de possíveis avarias possui uma enorme importância na medida em que reduz os custos de manutenção assim como os tempos de interrupção, aumentando o tempo de vida útil do motor e dos respetivos acionamentos. Por isso, é necessário desenvolverem-se sistemas de monitorização e diagnóstico de falhas automáticos, de forma a garantir a produtividade, o mínimo de interrupções passivas, sem elevados custos de manutenção e sem a necessidade de ter profissionais especializados constantemente a analisar os motores [3].

Foi com isto em mente que se desenrolou este projeto, que teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema completamente automático de monitorização e análise de condição num motor de indução.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste projeto foi o desenvolvimento de um sistema de análise e monitorização de condição em MIT usando as correntes do estator. Para alcançar este objetivo foram definidas várias metas.

A primeira meta foi o estudo das condições de falha dos MIT e dos vários métodos de deteção e identificação existentes. Este documento serviu de base para a escolha das metodologias adotadas assim como dos modos de falhas sobre os quais o sistema irá ser testado.

A segunda meta foi o desenvolvimento de uma aplicação que detetasse falhas e conseguisse, utilizando diferentes métodos, identificar três falhas. Estas foram curto-circuitos nos enrolamentos do estator, barras partidas e falhas nos rolamentos.

A terceira meta foi usar software Ansys Maxwell para testar a aplicação desenvolvida, para o qual se deveria documentar o processo de simulação e funcionamento, pois é uma ferramenta adotada recentemente e sem muita documentação, permitindo dessa forma comprovar a sua eficácia e precisão no executar das suas tarefas.

1.4 Estrutura do documento

A dissertação divide-se em sete capítulos. No primeiro capítulo, é apresentado o contexto e a motivação para o desenvolvimento desta dissertação, bem a descrição dos objetivos deste projeto. No segundo, são estudadas as condições de falhas de MIT, a sua descrição, as suas causas mais comuns, os seus efeitos e os melhores métodos de identificação. No capítulo três, são expostas diferentes técnicas de processamento de sinal e a exposição de vários métodos de identificação de falhas. No capítulo quatro é explicada a metodologia e estrutura do sistema desenvolvido, as técnicas e métodos utilizados assim como a justificação da escolha de cada um deles. No capítulo quinto, é exposta a ferramenta de simulação Ansys Maxwell usada para as simulações, sendo descrito o processo de desenvolvimento da aplicação bem como o seu funcionamento. No sexto capítulo, encontram-se expostos os resultados das simulações executadas assim como a análise e conclusões retiradas. Termina-se este documento com um capítulo que apresenta as conclusões dos trabalhos realizados bem como os objetivos alcançados e uma proposta para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Análise de falhas em Motores de Indução Trifásicos

2.1 Introdução

Apesar de serem robustos, os MIT estão sujeitos a vários tipos de avarias, que estão associadas a falhas que podem ser de origem interna (mecânicas ou elétricas) ou externas [1].

O objetivo deste capítulo é descrever as principais falhas deste tipo de motor, as principais causas de cada, os efeitos que produzem no motor e os diferentes métodos de detecção. As mais comuns são [4]:

Avarias Elétricas:

- Curto-circuitos entre fases ou entre espiras de enrolamentos – consequência de falhas de isolamento elétrico;
- Ligações erradas entre enrolamentos;
- Resistência elevada no contacto entre condutores de bobinas da mesma fase;
- Circulação de correntes nos rolamentos e no veio – motores alimentados através de conversores estáticos de potência;
- Problemas na ligação à terra.

Avarias Mecânicas:

- Falhas nos rolamentos;
- Barras rotóricas partidas;
- Danificação do circuito magnético do motor (deterioração das propriedades magnéticas em consequência de temperaturas elevadas, ambientes agressivos, etc);

- Anéis partidos das extremidades das gaiolas rotóricas;
- Entreferros não uniformes;
- Veios torcidos;
- Deslocamento do veio: axial, radial (excentricidades), desalinhamentos.;

Avarias com Origem Exterior:

- Desequilíbrios nas tensões (ou correntes) de alimentação do motor;
- Má seleção do motor;
- Arranques intempestivos ou cortes na alimentação;
- Falhas nos componentes mecânicos de transmissão de potência (e.g., correias, engrenagens);
- Avarias no conversor de potência que alimenta o motor.

Na tabela 2.1, são apresentadas as percentagens relativas das avarias nos principais constituintes do motor com base em dois estudos, um efetuado pelo IEEE [5] e o outro pelo EPRI [6].

Tabela 2.1: Percentagem relativa das avarias em MIT dos constituintes do motor

Organização	Rolamentos	Estator	Rotor	Outras
IEEE	42%	28%	8%	22%
EPRI	41%	36%	9%	14%

As avarias referidas na tabela 2.1 são gerais, ou seja quando se refere ao estator e ao rotor na tabela estão a ser contabilizadas todas as avarias que ocorrem neles. Observando a tabela facilmente se conclui que as falhas mais frequentes ocorrem nos rolamentos e no estator.

É importante salientar também que num MIT várias avarias podem ocorrer simultaneamente, neste caso a determinação do problema inicial torna-se muito difícil de determinar. Efeitos das avarias referidas dão origem a desequilíbrios nas correntes e tensões do estator, oscilações do binário, sobreaquecimento e vibração excessiva [3]. Além disso, estas podem aumentar a magnitude de certas componentes harmónicas das correntes e tensões do motor. A performance do MIT pode ser afetada por qualquer uma destas avarias. De seguida serão abordados causas e efeitos de diferentes falhas nos MIT.

2.2 Barras rotóricas partidas

A gaiola de um MIT consiste em barras rotóricas e dois anéis nas extremidades desta. Este tipo de falhas associa-se a uma ou mais barras rachadas ou partidas ou se algum dos anéis está danificado. Na figura 2.1 é apresentada um imagem de uma e duas barras partidas[7]:



Figura 2.1: Rotor com uma e duas barras partidas

2.2.1 Causas e efeitos:

As principais causas que estão na origem deste tipo de falha são as seguintes [4]:

- Sobrecargas térmicas devido ao sobreaquecimento e distribuições não uniformes da temperatura;
- Forças eletromagnéticas excessivas sobre as barras e os anéis, que também originam ruído e vibrações;
- Stresse residual devido a imperfeições da construção;
- Perturbações dinâmicas originadas pelo binário do veio, pela força centrífuga e pelos ciclos de funcionamento;
- Contaminação e ou corrosão dos materiais devido a químicos os mesmo pela humidade;
- Falhas mecânicas devido a lâminas soltas, partes desgastadas, falhas dos rolamentos etc. . .

É importante referir que se uma das barras partir, as barras ao lado passam a suportar correntes mais altas, o qual leva a um aumento de stresse mecânico e térmico. Se o rotor continuar a funcionar nesta condição, as barras ao lado também poderão rachar, espalhando assim os estragos para múltiplas barras do rotor. Estas rachas poderão ocorrer em várias localizações do rotor como nas barras, nos anéis ou mesmo nos dois. A probabilidade de rachar/partir aumenta com o tempo de arranque do motor e se o motor estiver sujeito a arranques e paragens frequentes [3]. No parágrafo seguinte será explicado o efeito de uma ou mais barras partidas.

De acordo com a teoria generalizada do campo rotativo, motores saudáveis têm enrolamentos simétricos no estator que produzem um campo que roda à frequência de alimentação de f_s , isto induz um campo eletromagnético no circuito do rotor a rodar à frequência sf_s onde s é o deslizamento.

Barras partidas causam assimetrias na resistência e na indutância das fases do rotor, que por sua vez geram assimetrias no campo eletromagnético rotativo entre o estator e o rotor [8]. Consequentemente, barras partidas geram um campo eletromagnético rotativo que gira no sentido contrário ao rotor e induz nestas forças eletromotriz com frequência igual a $-sf_s$, a frequência destas forças induzidas no estator, f_{ind} , é:

$$f_{ind} = f_s(1 - 2s) \quad (2.1)$$

Surgem interações entre campos e as correntes rotóricas que originam componentes alternadas no binário desenvolvido, provocando oscilações na velocidade (dependentes da inércia da carga acionada). Estas oscilações são responsáveis por f.e.m.s induzidas no estator, com a seguinte frequência:

$$f_{osc} = f_s(1 + 2s) \quad (2.2)$$

Esta sequência repete-se de forma cíclica, originando assim o aparecimento de componentes das correntes do estator cuja as frequências, f_b , surgem em torno da frequência fundamental e são dadas por:

$$f_b = f_s(1 \pm 2ks) \quad (2.3)$$

Onde: f_s é a frequência fundamental, s o deslizamento e $k = 1, 2, 3, \dots$

Normalmente, atendendo à atenuação provocada pela inércia da carga sobre estes fenómenos, as frequências laterais $\pm 2sf_s$ são as mais significativas; como referido, a componente associada a f_{osc} é mais dependente da inércia. Por outro lado, a relação entre as amplitudes destas componentes e a amplitude da componente fundamental da corrente, reflete a gravidade da falha ocorrida. Outras componentes espectrais também podem ser observadas na corrente do estator assim como é referido por outros autores, cujos nomes se encontram em [9, 10]:

$$f_b = f_s \left[\frac{k}{p} (1 - s) \pm s \right] \quad (2.4)$$

Onde: f_s a frequência fundamental, p é o numero de polos, s o deslizamento e $k/p = 1, 3, 5, \dots$

2.2.2 Detecção de avarias

Uma barra do rotor partida cria um circuito aberto, estando os anéis ou barras, dependendo do componente que cede, em circuito aberto. No entanto, não estando as barras tipicamente isoladas, é difícil detetar uma avaria nas mesmas nos estados iniciais devido à presença das correntes entre estas. Este tipo de avaria só é detetável se o motor estiver a funcionar em carga, uma vez que em vazio as correntes no rotor são quase nulas [4].

A forma mais comum da deteção destas avarias, e que se tem revelado mais eficaz, é a análise espectral da corrente absorvida pelo motor.

Outra opção seria recorrer ao uso de espiras de pesquisa. Existem trabalhos baseados na análise espectral e temporal das f.e.m.s induzidas nas espiras de pesquisa, que podem ser colocadas

no interior do motor (circuito magnético do estator) ou no exterior (no veio), com o intuito de analisar o fluxo magnético axial.

Alternativamente, é possível efetuar a análise do espectro da tensão aos terminais do motor, após o corte de alimentação. No entanto, este método obriga a que barra partida esteja na proximidade do pico da corrente ao desligar, pois se isto não se verificar pode não ser detetada.

A vibração axial aumenta devido à elevação das correntes entre barras, que se verifica na presença de barras partidas. Desta forma, a análise espectral destas vibrações, pode assim ser considerada como uma alternativa aos métodos anteriores [8].

2.3 Avarias em Rolamentos

Dois conjuntos de enrolamentos são colocados em ambas as pontas de um MIT para suportar o veio rotativo. Estes mantêm o rotor no lugar e ajuda-o a rodar livremente diminuindo as fricções. Cada rolamento consiste num anel interior, exterior e num conjunto de esferas entre estes dois. No caso de um motor, o anel de dentro está preso ao veio e a carga é transmitida através das esferas, reduzindo a fricção. Usando lubrificante (óleo ou gordura) é possível reduzir-se a fricção ainda mais. Os rolamentos são os componentes mais frágeis de um MIT e são a maior causa de avarias deste como foi referido na tabela 1 [3].

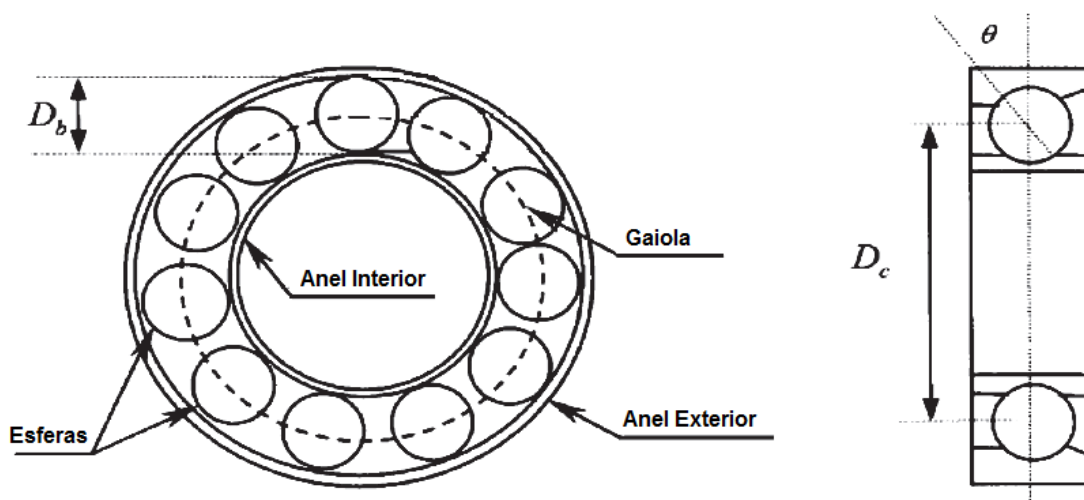


Figura 2.2: Rolamento esférico [1]

2.3.1 Causas e efeitos:

As principais causas que estão na origem deste tipo de falha são as seguintes: [3]:

- Cargas excessivas, veios demasiado grandes e aumento de temperatura excessivo. Todos estes podem enrijecer os anéis e as esferas, podem também degradar ou mesmo destruir o lubrificante e se a carga exceder o limite elástico do material o efeito de Brinnel ocorre;

- Falha devida à fadiga. Ocorre devido à longa utilização dos rolamentos, causa fraturas nos materiais. Acontece de forma progressiva, ou seja, quanto mais tempo estiver em funcionamento o motor com esta falha, mais os estragos se expandem. Causam um aumento da vibração e do ruído do motor;
- Corrosão. Resulta da exposição dos rolamentos a fluidos ou a uma atmosfera corrosiva. Devido à corrosão a fadiga pode começar a impor-se nos rolamentos;
- Falha de lubrificação. Se a fluidez do lubrificante for restrita e não chegar a todas as partes do rolamento ou devido a um aumento de temperatura, dá-se esta falha. Se as temperaturas aumentarem muito, a gordura (o lubrificante) derrete e escorre para fora do rolamento. Anéis e esferas descoloradas são sintomas deste fenómeno;
- Mal alinhamento dos rolamentos. Provoca o desgaste das superfícies das esferas e dos anéis o que resulta num aumento da temperatura.

Como consequência destas falhas, os componentes dos rolamentos são sujeitos a desgaste, que eventualmente causará vibrações mecânicas e ruído no funcionamento do motor e a fricção que provoca um aumento da temperatura e mais uma vez das vibrações. As avarias em cada componente estão associadas a vibrações com frequências próprias. Tratando-se de rolamentos esféricos, tais frequências apresentam as seguintes formulações [4]:

$$\begin{aligned}
 f_{ext} &= \frac{R}{2} f_r \left[1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right] \\
 f_{int} &= \frac{R}{2} f_r \left[1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right] \\
 f_{separador} &= \frac{f_r}{2} \left[1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right] \\
 f_{esferas} &= \frac{D_c}{2D_b} f_r \left[1 + \left(\frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Onde: f_{ext} , f_{int} , $f_{separador}$, e $f_{esferas}$ são as frequências de vibração associadas a avarias, respetivamente, nos anéis exterior e interior, no separador e nas esferas. R , D_b e D_c são, respetivamente, o número de esferas, o diâmetro de cada esfera e o diâmetro do separador; θ corresponde ao ângulo de contacto (figura 2.2) e f_r é a frequência de rotação do veio, associada à velocidade angular do rotor.

2.3.2 Detecção de avarias

Análises de vibrações, ruído e temperatura são os métodos frequentemente mais usados na deteção e prevenção destas avarias, no entanto este requer a instalação de sensores no motor. Enquanto as máquinas de maiores dimensões normalmente já vêm com estes instalados, não é economicamente viável a sua colocação nas máquinas mais pequenas. O que acontece em muitos motores de pequenas e médias dimensões é serem desmontados e verificados periodicamente, algo que não é possível em motores usados em aplicações críticas [4].

As frequências das vibrações descritas em (2.5) provocam desequilíbrios na uniformidade do entreferro do motor, originando fenómenos complexos de excentricidades rotóricas (combinações de excentricidades dinâmicas nos dois sentidos de rotação). Surgem harmónicos na corrente absorvida, pelo que a análise desta é uma técnica não invasiva que permite uma monitorização constante do motor. Os seus espectros contêm frequências f_{rol} relacionadas com (2.5), da seguinte forma [11]:

$$f_{rol} = |f_s \pm mf_v| \quad (2.6)$$

Onde: f_s é a frequência de alimentação, $m=1,2,3\dots$ e f_v uma das frequências de vibração em (2.5).

No entanto, é importante referir que para a utilização desta técnica os estragos devem ser graves, como um buraco num dos anéis, pois se a avaria ainda estiver num estado inicial compromete a eficácia do método [4]. Conclui-se assim que neste caso, este método deve ser usado apenas como um complemento a outros.

2.4 Avarias nos enrolamentos do estator

As avarias no estator estão sempre ligadas a uma falha no isolamento dos enrolamentos, mais concretamente entre as espiras das bobinas. Os diferentes tipos de falhas são:

1. Curto-circuito entre duas espiras da mesma fase;
2. Curto-circuito entre duas bobinas da mesma fase;
3. Curto-circuito entre espiras de fases diferentes;
4. Curto-circuito entre espiras das três fases;
5. Curto-circuito entre os enrolamentos e o núcleo do estator;
6. Circuito aberto quando um dos enrolamentos parte;

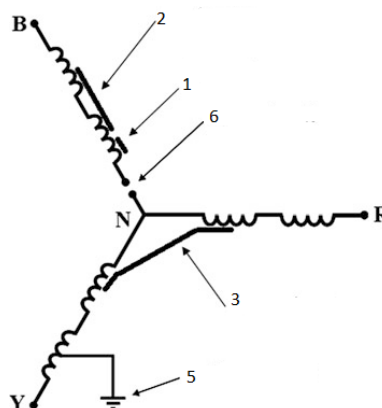


Figura 2.3: Estator ligado em estrela a mostrar os diferentes tipos de falha nos enrolamentos

A característica mais importante dos isolantes é a sua propriedade dielétrica, no entanto na maioria dos casos é necessário que este seja capaz de suportar esforços mecânicos, certas temperaturas e variações da mesma e também ambientes agressivos como se verá no capítulo seguinte [3].

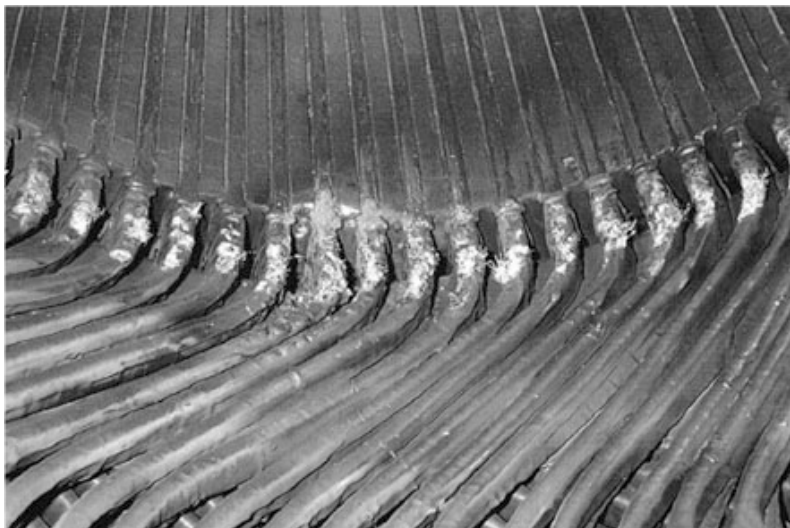


Figura 2.4: Foto de um enrolamento danificado

2.4.1 Causas e efeitos:

As principais causas que estão na origem deste tipo de avaria podem ser divididas em mecânicas, elétricas, térmicas e ambientais. De seguida cada uma dessas causas será abordada com mais detalhe [3]:

- Causas mecânicas têm origem no movimento das bobinas do estator e do rotor embatendo contra o estator. A movimentação das bobinas ocorre devido à corrente do estator, pode folgar a ligação com a carcaça e também danificar os condutores de cobre e o seu isolamento. As razões que estão por detrás do embate do rotor com o estator são o mal alinhado entre os dois, a deflexão do veio ou falhas nos rolamentos, força do impacto leva a que as laminas do estator furem o isolamento das bobinas o que causa um curto-circuito entre os enrolamentos e o núcleo do estator. Grandes vibrações mecânicas podem desconectar os enrolamentos do estator originando um circuito-aberto.
- Causas elétricas são as descargas parciais (arcos elétricos que surgem no interior do próprio isolante ou entre condutores e isolante) estes ocorrem como consequência de falhas nos isolamentos, devido ao uso de disjuntores ou devido a variações de frequência. Estas descargas desgastam e reduzem o tempo de vida dos enrolamentos, deterioram os materiais isolante e podem causar curtos-circuitos entre espiras ou com o núcleo do estator.

- Causas térmicas, o sobreaquecimento é a maior causa de deterioração dos isolamentos dos enrolamentos do estator. Tem origem no fluxo de corrente elevada demais (normalmente devido a uma falha), temperaturas ambientais elevadas demais, ventilação obstruída ou devido a uma tensão de alimentação desequilibrada.
- Causas ambientais, estes tipos de causas têm origem no funcionamento da máquina em ambientes hostis, ou muito quentes, ou muito frios ou húmidos. A presença de material contaminador pode também ter impacto no isolamento dos enrolamentos, reduzindo o seu tempo de vida útil, e também afetar a dissipação de calor aumentando a temperatura.

2.4.2 Detecção de avarias

Varias técnicas de diagnóstico têm sido desenvolvidas ao longo do tempo baseadas em diferentes abordagens. Algumas destas são a análise da matriz de impedâncias do motor, a análise da potencia elétrica instantânea, análise espectrais (tensões, corrente, binário eletromagnético e fluxo magnético axial) e aplicação de inteligência artificial etc... É necessário fazer a distinção entre os métodos intrusivos, que requerem a paragem do motor, e os não intrusivos, que podem ser realizados com o motor em funcionamento .

Métodos intrusivos:

O método mais comum para identificar a condição dos materiais isolantes é a medição das suas características (medição da resistência ohmica, rigidez dielétrica, capacidade entre os condutores estatóricos e o circuito magnético do estator ligado à terra e o fator de perdas do dielétrico ($\tan(\delta)$). Outros métodos consistem em realizar ensaios de impulsos e de descargas parciais.

O grande inconveniente destes métodos é, como foi referido antes a necessidade de que o motor esteja parado, sendo essa a razão do interesse dos métodos não intrusivos [12].

Métodos não intrusivos:

A forma mais evidente é a monitorização da temperatura dos enrolamentos do estator, e utilizá-la para analisar o estado de deterioração dos isolantes. Isto consegue-se com a instalação de sensores de temperatura ou utilizando câmaras termográficas. Além do mais com este método é possível determinar outras avarias através de aumentos de temperatura anormais em certas partes do motor não apenas no estator.

Existe uma relação entre a deterioração dos isolamentos e o aparecimento de uma componente de sequência negativa na corrente absorvida pelo motor, a amplitude desta corrente é um sintoma do aparecimento de avarias. No entanto, esta técnica não é muito usada pois assenta na existência de um sistema de alimentação perfeitamente equilibrado, sendo que um pequeno desequilíbrio leva ao aparecimento de uma componente, o que torna muito difícil a distinção entre desequilíbrio e avarias.

Outra solução eficaz é a monitorização das descargas parciais como forma de antecipar avarias resultantes do envelhecimento dos isolantes estatóricos. A ocorrência destas produz ozono pelo que a monitorização deste gás indica o aparecimento destas avarias. Outra justificação da utilização deste método é o facto de a instalação de sensores e equipamentos só ser necessária em

equipamentos de grande potência. No entanto, é importante referir que fenómeno ocorre pouco antes da avaria logo deve ser apenas usado de forma complementar a outro método [8][13].

A análise espectral do fluxo magnético axial do motor é uma possibilidade. Numa máquina ideal de indução o fluxo axial do motor é nulo (com exceções das extremidades da máquina onde os efeitos das bobinas são responsáveis pelo aparecimento de fluxos axiais). Num motor real, as imperfeições de construção provocam o aparecimento de fluxos axiais, embora reduzidos em condição normal de funcionamento. As assimetrias nos circuitos magnéticos e elétricos, resultantes das avarias, intensificam este fluxo. Em particular, no caso de curto-circuitos entre espiras surgem componentes no fluxo axial, dependentes do regime de carga do motor, associadas às seguintes frequências [14][8]:

$$f(f_{axial}) = f_s[k \pm \frac{n}{p}(1-s)] \quad (2.7)$$

Onde: s o deslizamento associado ao regime de funcionamento do motor, p o número de pares de polos magnéticos, $k=1, 3$ e $n=1, 2, 3, \dots, (2p-1)$.

É importante referir que diversos métodos baseados na análise espectral das correntes absorvidas foram propostos. No entanto, como as frequências mais significativas relacionadas com avarias no estator são semelhantes a outro tipo de falhas, não é possível identificar corretamente a avaria ocorrida [8].

Após o corte da alimentação, a energia armazenada nos campos magnéticos da máquina não se extingue instantaneamente. As correntes que circularão no circuito rotórico e entre as espiras estatóricas curto-circuitadas estão submetidas a constantes de tempo, cujos valores são afetados pela ocorrência das avarias mencionadas. Nas espiras curtas-circuitadas, são induzidas f.e.m.s correspondentes aos harmónicos de força magneto motriz do rotor. De acordo com os resultados experimentais obtidos na referência anterior, as tensões medidas aos terminais de alimentação do motor no período transitório – consequência das f.e.m. anteriores – contêm componentes cujas frequências são dadas por [4]:

$$f_{tensao} = f_{off}[k \frac{N_R}{p} \pm 1] \quad (2.8)$$

Onde: $k \in \mathbb{N}$; f_{off} a frequência das f.e.m induzidas, função da velocidade do motor (decrecente) e N_R o número de barras rotóricas.

Deste modo, consegue-se uma identificação mais fiável da avaria, quando comparado com a análise do espectro das correntes referida anteriormente. Deve-se ter em conta que a sua aplicabilidade industrial poderá ser comprometida pelos seguintes aspetos:

- Conhecimento detalhado de características construtivas do motor o que poderá não ser facilmente acessível;
- Necessidade de desligar o motor, o que, dependendo dos processos em causa, poderá não ser viável (e.g., funcionamentos contínuos – 24 h/dia);
- Necessidade de instalar sensores de tensão aos terminais estatóricos do motor, o que poderá ser restritivo em termos de custos.

Resumindo, o desenvolvimento de métodos de diagnóstico de falhas cuja eficácia seja imune a desequilíbrios nas tensões, assimetrias construtivas e a variações de carga, é fundamental. Com efeito, os fenómenos referidos colocam sérias restrições ao correto diagnóstico de avarias, sendo ainda mais agravado em funcionamentos com cargas variáveis .

2.5 Excentricidade rotórica

É a condição de desigualdade do espaço que existe entre o estator e o rotor. Quando esta é grande, resulta em forças radiais desequilibradas que podem causar com que estes entrem em contacto um com o outro, o que origina estragos em ambos [3]. A excentricidade pode ser de dois tipos, estática e dinâmica. Na figura 2.5 encontra-se um exemplo de cada.

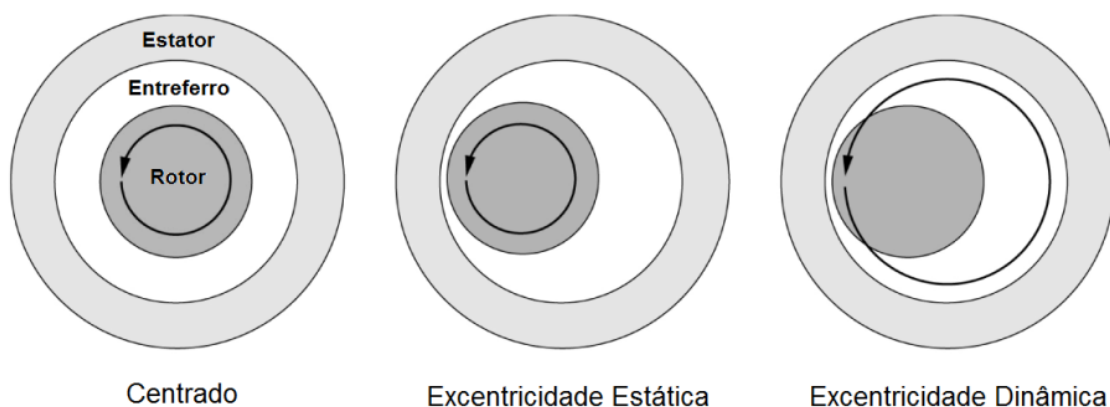


Figura 2.5: Tipos de excentricidade

2.5.1 Causas e efeitos:

No caso da excentricidade estática, a posição do veio coincide com o centro do rotor, mas não com o do estator. A distribuição espacial do entreferro é constante no tempo, variando consoante o ângulo ao centro considerado. Este tipo de excentricidade pode ser causado pelo facto de o interior do estator apresentar características ovais e pelo posicionamento incorreto do rotor ou do estator na montagem (alinhamento incorreto).

No caso da excentricidade dinâmica, a posição do veio não coincide com o centro do rotor, e a posição onde o entreferro é menor varia. Várias causas podem estar na origem desta excentricidade, veio do rotor dobrado ou inclinado em relação ao eixo do motor, montagem defeituosa, rolamentos desgastados ou mal alinhados, vibrações com frequências de ressonância etc. . .

Na realidade estes dois tipos de excentricidade coexistem. A não ser que sejam detetadas no estado inicial podem evoluir e causar estragos severos na máquina. A distribuição do fluxo magnético no entreferro deixa de ser uniforme, uma vez que, à semelhança das avarias anteriores, ocorrem alterações nas características de simetria do motor. Como tal, surgem componentes com

frequências características nas correntes absorvidas, revelando-se por isso a análise espectral como uma grande mais valia no diagnóstico destas avarias [8].

2.5.2 Detecção de avarias

Como foi referido no capítulo anterior, a análise espectral é uma grande mais valia e por isso tem sido explorada. A equação que descreve a frequência das componentes da corrente (f_e) associadas a esta falha é [8] :

$$f_e = f_s[(kR \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm v] \quad (2.9)$$

Onde: $k=1,2,3,\dots$; R é número de barras (ranhuras) rotóricas; $n_d=0$ no caso da excentricidade estática; $n_d=1,2,3,\dots$ (excentricidade dinâmica); n_d é conhecido por ordem de excentricidade; s é deslizamento; p o numero de pares de polos magnéticos; v é a ordem dos harmónicos temporais associados à alimentação do motor e f_s é a frequência de alimentação.

Como foi referido, os dois tipos de excentricidade ocorrem em simultâneo, isto dificulta e limita a utilização da expressão anterior (2.9). No entanto, foi demonstrado que apenas máquinas que apresentem uma relação particular entre pares de polos e numero de barras rotóricas, irão gerar uma componente excêntrica significativa só estática ou só dinâmica. Essa relação é dada por:

$$N_R = 2p[3(m \pm q) \pm r] \pm k \quad (2.10)$$

Onde: $m \pm q = 0, 1, 2, 3, \dots$; $r=0$ ou 1 $k=1$ ou 2

Se ambas as excentricidades existirem juntas, manifestam-se em torno das componentes de baixas frequências perto da frequência de alimentação do motor:

$$f_e = |f_s \pm k f_r| \quad (2.11)$$

Onde: f_s é a frequência de alimentação; f_r é a velocidade rotórica; $k=1,2,3,\dots$

Sinais de vibração também podem ser monitorizados para detetar este tipo de avarias. As componentes de alta frequência das vibrações para a excentricidade dinâmica e estática são dadas por:

$$f_e = 2f_s \pm f_r \quad (2.12)$$

Onde: f_s é a frequência de alimentação; f_r é a velocidade rotórica;

No entanto em muitos casos não é economicamente viável a instalação de sensores de vibração, existem também casos onde o ambiente não permite que se façam medições corretas desta grandeza mesmo com os sensores.

Capítulo 3

Processamento de sinal e métodos para análise de falhas

3.1 Introdução

Atualmente devido à grande necessidade de alta confiança no funcionamento dos motores, o interesse em técnicas preditivas, que avaliem a condição, o estado e o desempenho destes tem aumentado. Técnicas de detecção e diagnóstico de avarias são aplicadas com o objetivo de identificar e diagnosticar o estado dos motores, para evitar paragens não programadas, garantir que o motor não esteja a funcionar em condição de falha durante muito tempo e reduzir custos.

Na secção 3.3 são explorados alguns dos métodos convencionais que se utilizam na detecção de avarias, cujo objetivo é a identificação de falhas para evitar paragens. Apesar de neste capítulo se fazer referência a algumas falhas em específico, pois são referidas nos trabalhos citados nesta secção, o estudo aprofundado de cada uma delas foi no capítulo 2 e por isso não será feito neste.

3.2 Processamento de sinal para avaliar falhas

As técnicas de diagnóstico de falhas em MIT, são uma combinação de sistemas de aquisição de dados com algoritmos de processamento de sinal. A análise dos sinais adquiridos pode ser feita em vários domínios: tempo, frequência e tempo-frequência.

3.2.1 Domínio temporal

As avarias elétricas e mecânicas que ocorrem nos MIT podem originar modulações na amplitude e fase das correntes absorvidas. Existem vários trabalhos publicados onde está evidenciado que vários problemas desde barras partidas a excentricidades estão associados a modulação de amplitude, no entanto a modulação da fase está associada a oscilações mecânicas da carga. A transformada de Hilbert é uma ferramenta eficaz para o tratamento de sinais modulados em amplitude e fase, esta permite separar a componente fundamental do sinal das componentes restantes, ficando assim facilitada a detecção dos componentes associadas a falhas [15].

A transformada de Hilbert $H[g(t)]$ de um sinal $g(t)$ é definida como:

$$H[g(t)] = g(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(t - \tau)}{\tau} d\tau \quad (3.1)$$

A transformada de Hillbert de $g(t)$ é a convulsão de $g(t)$ com $1/\pi t$. É a resposta a $g(t)$ de um filtro linear invariante no tempo, chamado transformador de Hillbert, tendo uma resposta ao impulso de $1/\pi t$ [16].

O cálculo do integral apresenta problemas, pois além de se tratar de um integral com limites infinitos, também assumem valores infinitos dentro do intervalo de integração o que é uma singularidade. De forma contornar este problema, divide-se o integral em duas partes:

$$H[g(t)] = \frac{1}{\pi} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_{-t-1/\varepsilon}^{1-\varepsilon} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau \int_{t+\varepsilon}^{t+1/\varepsilon} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau \right) \quad (3.2)$$

Excluindo-se do cálculo um intervalo simétrico de comprimento 2ε em torno da singularidade, esta técnica é conhecida por valor principal de Cauchy da integral [16].

3.2.2 Domínio das Frequências

A representação no domínio das frequências (referida muitas vezes como análise espectral), permite averiguar a existência de diferentes componentes de frequência no sinal, bem como obter informação sobre a magnitude dessas componentes [17]. Normalmente a análise das grandezas físicas associadas ao funcionamento do motor é efetuada no domínio das frequências.

A transformada de Fourier rápida é um algoritmo eficaz capaz de determinar a Transformada de Fourier discreta (DFT), que é definida como:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.3)$$

Onde $K \in \mathbb{Z}$, N o número de instantes amostrados do sinal $x(t)$.

A grande diferença entre a FFT e a DFT é a velocidade de processamento. Cooley e Tukey mostraram que é possível dividir a DFT em duas partes mais pequenas:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.4)$$

$$X_k = \sum_{m=0}^{N/2-1} x_{2m} e^{-j \frac{2\pi km}{N/2}} + e^{-j \frac{2\pi kN}{N}} \sum_{m=0}^{N/2-1} x_{2m+1} e^{-j \frac{2\pi km}{N/2}} \quad (3.5)$$

A DFT foi dividida em dois termos. Cada termo consiste em $N/2 * N$ operações, para um total de N^2 . Usando as simetrias em cada um destes termos, como $0 \leq K < N$, enquanto $0 \leq n < M = N/2$, conclui-se pelas propriedades simétricas referidas em cima que apenas são necessárias metade das operações para cada sub-problema. As N^2 operações passam para M^2 operações, onde $M = N/2$.

Enquanto as transformadas de Fourier mais pequenas tiverem um número M par, pode-se replicar o processo anterior, dividindo em dois o número de operações de cada vez, aproximando-se de $N * \log(N)$ operações [18].

Embora possa trazer muitas informações, a FFT de um sinal também tem limitações, sendo importante conhecê-las e saber como se pode melhorar a visualização do sinal, usando o janelamento. Muitas vezes o sinal adquirido não é formado por um número inteiro de períodos. Dessa forma, a aquisição pode resultar numa forma de onda truncada, com características diferentes do sinal original contínuo no tempo, o que pode introduzir transições abruptas no sinal medido. É possível minimizar os efeitos do uso de um número não inteiro de ciclos numa FFT utilizando uma técnica chamada janelamento. O janelamento reduz a amplitude das descontinuidades nas bordas de cada sequência finita adquirida. O janelamento consiste na multiplicação do registo de tempo por uma janela de comprimento finito que varia de maneira uniforme e gradual até chegar a zero nas bordas. Com isso, os pontos extremos da forma de onda encontram-se e a forma de onda será contínua, sem transições abruptas [19].

3.2.3 Domínio do Tempo-Frequências

Em processamento de sinal, a análise em tempo-frequência consiste em estudar o sinal tanto em tempo como em frequência simultaneamente, usando varias representações. Este tipo de análise é útil pois métodos como análise de Fourier assume que os sinais são infinitos no tempo ou periódicos, enquanto que na realidade muitos sinais são de curta duração e mudam durante a sua duração. [20]. Uma distribuição em tempo-frequência de um sinal dá informação sobre como o conteúdo espectral do sinal evolui com o tempo, sendo assim uma ferramenta ideal para analisar sinais não estacionários. De entre as técnicas mais conhecidas pode-se destacar a transformada de wavelet.

A transformada de wavelet é conhecida como sendo um método alternativo para analisar sinais não estacionários além da convencional STFT. Quando a STFT é aplicada o sinal não estacionário é dividido em pequenas janelas de igual tempo onde a TF é aplicada a cada segmento de tempo que vai ser examinado, fazendo com que seja possível uma análise multi resolução. Na figura 3.1 assume-se que as baixas frequências estão presentes durante a duração completa do sinal, enquanto as altas aparecem ocasionalmente em pequenas rajadas o que é normalmente o caso em aplicações práticas.

Uma wavelet é uma forma de onda de curta duração com um valor médio nulo, comparando-as com as sinusoides, que são a base da análise de Fourier, temos que as sinusoides não têm duração limitada estendendo-se até mais infinito, e que são previsíveis enquanto que as wavelets são irregulares e assimétricas.

A análise wavelet calcula a correlação entre o sinal que está a ser analisado e a função wavelet $\psi(t)$. A similaridade entre o sinal e a função wavelet analisadora é computada separadamente para diferentes intervalos de tempo resultando numa representação bidimensional. A função wavelet analisadora é também chamada de wavelet mãe [21].

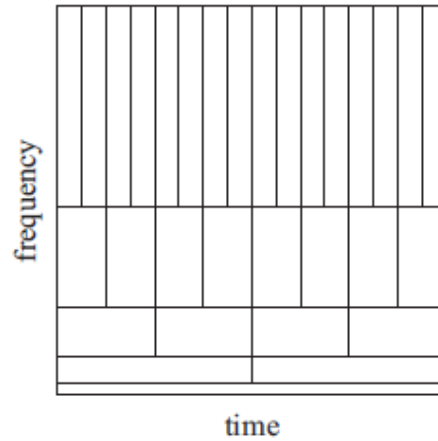


Figura 3.1: Janela multi resolução tempo-frequência

Uma função analisadora $\psi(t)$ é classificada como wavelet se os seguintes critérios forem satisfeitos:

- Uma wavelet tem que ter energia finita

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dt < \infty \quad (3.6)$$

- Se $\Psi(f)$ é a transformada de fourier da wavelet $\psi(t)$, então a seguinte condição deve ser verdade:

$$C_{\psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{f} df < \infty \quad (3.7)$$

Isto implica que a wavelet não tem nenhuma componente de frequência zero ($\Psi(0) = 0$).

- Para wavelets complexas a transformada de fourier $\Psi(f)$ tem que ser real e desaparecer para frequências negativas.

3.3 Métodos de identificação de falhas:

Das técnicas convencionais de identificação de falhas em MIT existentes serão abordadas neste capítulo o vetor de Park, o "ExtendedParkVector" (EPVA) e a análise de padrões da corrente do motor ("MotorCurrentSignalAnalysis"- MCSA).

3.3.1 Transformada de Park e EPVA

O Vetor de Park é uma forma de diagnóstico de falhas em MIT. A aplicação desta transformada (também conhecida como transformada dq) num circuito de três fases equilibradas, transfere as três fases AC para um único referencial rotacional para eliminar o efeito das variáveis que variam com o tempo e transforma as três fases em duas DC.

As componentes do vetor de Park são representadas por i_d e i_q , que são obtidas pelos valores das correntes das três fases do motor i_a, i_b, i_c :

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} * i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c \quad (3.8)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \quad (3.9)$$

Em condições ideais, as componentes i_d e i_q são calculadas segundo as equações:

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} i_M * \sin(\omega t) \quad (3.10)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} i_M * \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (3.11)$$

Onde i_M é o valor máximo da corrente da fase de alimentação, ω é a frequência angular de alimentação e t é a variável de tempo.

A corrente de um motor saudável utilizando o vetor de Park, é esboçada de forma circular centrada na origem do eixo das coordenadas e é formada pelas componentes i_q (eixo das abcissas) e i_d (eixo das ordenadas). Quando existe uma falha no motor este padrão deixa de ser visível sendo substituído por outro que varia consoante a falha, como se pode ver no exemplo da figura 3.2 [22]:

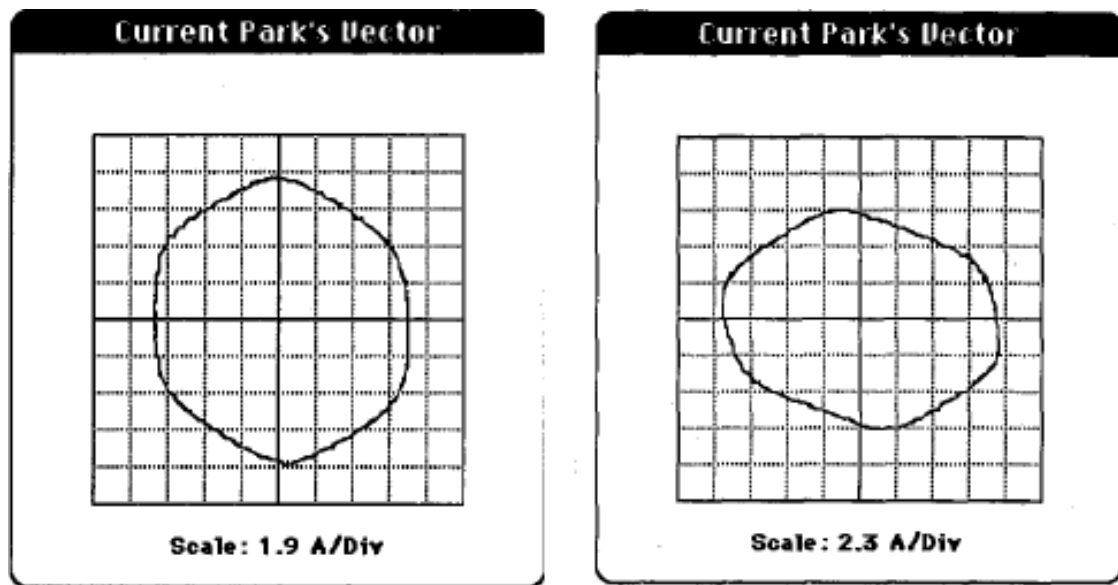


Figura 3.2: Padrão da corrente de Park correspondente a um motor saudável e a um com dezoito enrolamentos curto-circuitados na fase C

Outro exemplo é o caso das barras partidas onde o vetor de Park na presença desta, aumenta a espessura do círculo como se pode ver na figura 3.3 [23]:

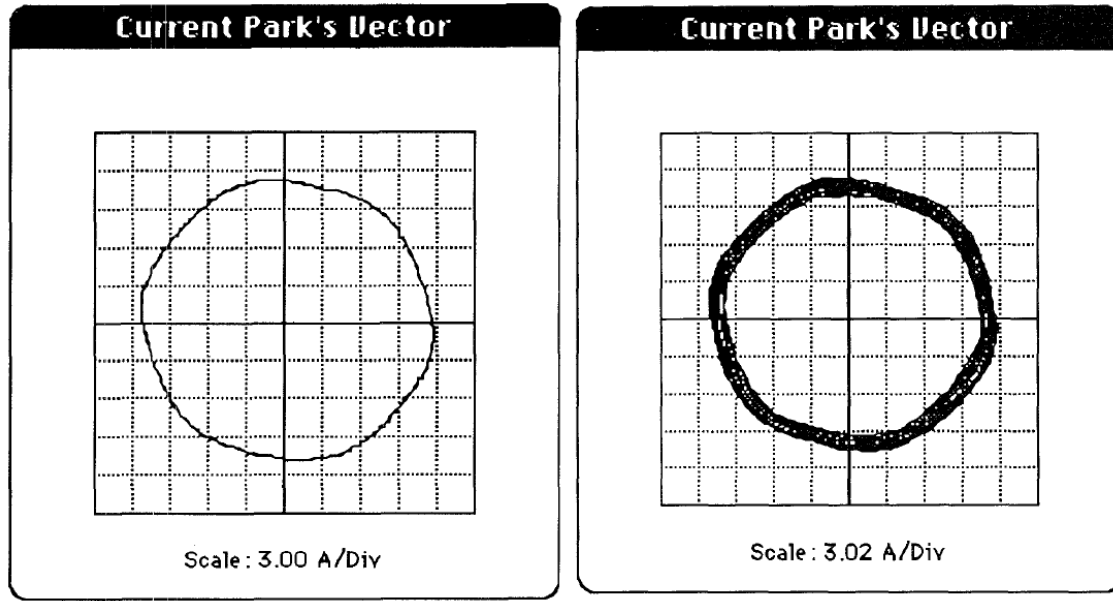


Figura 3.3: Padrão da corrente de Park correspondente a um motor saudável e a um com quatro barras partidas seguidas.

Resumindo, o Vetor de Park identifica a falha com a variação do gráfico produzido pelas componentes i_d e i_q .

O EPVA baseia-se na análise espectral da componente AC do módulo do Vetor de Park:

$$i_{EPVA} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3.12)$$

Num motor saudável, calculando o EPVA apenas se encontra presente uma componente DC. No entanto a presença de uma falha origina uma componente espectral. No caso da ocorrência de curto circuitos entre-espiras surge uma componente espectral com o dobro da frequência de alimentação do motor. Um indicador do grau de assimetria pode ser definido como o rácio entre a amplitude da componente espectral à frequência de $2f_s$ e a componente DC da corrente do vetor de Park. O fator de severidade proposto é dado por [24, 25]:

$$SF = \frac{I_{EPVA2f}}{I_{EPVADC}} \quad (3.13)$$

3.3.2 Análise de padrões da corrente do Motor

A análise da corrente do motor tem provado ser uma ferramenta de análise preditiva muito eficaz. Consiste num processo em que as correntes do motor lidas são guardadas e analisadas no domínio das frequências. As correntes são gravadas no domínio do tempo e representada num gráfico onde o eixo das abcissas representa o tempo e o das ordenadas a amplitude, sendo que o resultado típico é uma onda sinusoidal.

De forma a analisar os dados é necessário utilizar a transformada de Fourier rápida (FFT), para extrair a informação das frequências do domínio do tempo e transformá-la para o domínio das frequências [26].

Um exemplo da utilização deste método, é a detecção de barras partidas no rotor, que constitui a principal falha que se tenta detetar usando MCSA. Fazendo a análise espectral à corrente do estator, de forma a verificar assimetrias no rotor, as falhas são percebidas na corrente do estator, sendo possível estimar as condições de funcionamento do motor, evitando assim a paragem do motor para inspeção ou para aceder à parte interna da máquina. As assimetrias do rotor referidas, originam uma adição às componentes espectrais na corrente do estator denominadas bandas laterais. A quebra de uma barra rotória ou dos anéis que se encontram nas extremidade destas alteram o valor da correntes que circulam nas referidas bandas laterais. Estas componentes adicionais manifestam-se em ambos os lados da frequência fundamental com as seguintes frequências:

$$f = f_s(1 \pm 2s) \quad (3.14)$$

Onde f_s é a frequência fundamental e s é o deslizamento.

A componente do lado esquerdo é diretamente originada pelos estragos na barra enquanto que a direita é causada pelo ripple na velocidade [27].

Diferentes falhas manifestam-se de formas distintivas nas correntes do motor sendo que por isso este método apresenta melhores resultado na detecção de umas falhas mais que outras, algo que foi estudado mais a fundo no capítulo 2.

3.3.3 Método das componentes simétricas

O método das componentes simétricas (também conhecido como Teorema de Fortescue) é um método matemático usado para o estudo de sistemas polifásico desequilibrados. Consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases, em parcelas iguais, mas com ângulos de fase diferente [28]. No caso do sistema trifásico existem três componentes simétricas (chamadas de zero, positiva e negativa) que são usadas para calcular as condições de desbalanço do sistema, sendo este transformado em sistemas trifásico equilibrados diminuindo a dificuldade de análise do sistema. As três correntes de linha I_a, I_b e I_c são transformadas em três vetores equilibrados [29]:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Onde: I_p é a sequência positiva I_n é a sequência negativa, I_0 é a sequência zero, $\alpha = e^{j\Theta}$ e $\Theta = 2/\pi 3$

No entanto as componentes simétricas têm mais valor além da sua conveniência matemática. Sabe-se que a presença de corrente de sequência negativa pode causar problemas. A corrente de sequência negativa, gera um campo magnético no motor que gira com uma rotação de fase oposta à

direção da sequência positiva (cujo o fluxo produzido pela corrente desta sequência é estacionário em relação ao rotor), induzindo uma tensão que gera uma corrente substancial no rotor. Sendo assim, é possível medir o desequilíbrio existente no sistema de potência. Quando a corrente de sequência zero circula nos enrolamentos do estator, a corrente e a força magnetomotriz das três fases atingem um valor máximo nesse instante. O fluxo resultante é muito pequeno, mas faz com que exista reatância de sequência zero e gere um fluxo no entreferro.

Resumindo, os valores de sequência positiva são aqueles presentes durante em condições de equilíbrio. As correntes de sequência negativa medem a quantidade de desequilíbrio no sistema de potencia e as grandezas de sequência zero estão associadas a situações de falhas que geram desequilíbrio no sistema [30, 31].

O método da componente simétrica é por isso considerado como um bom procedimentos para a identificação de diferente falhas em MIT. Destacando-se a identificação de tensões desequilibradas, curtos-circuitos nos enrolamentos do estator, assimetrias nos enrolamentos, tensões desequilibrada e excentricidades [29, 31]

3.3.4 Simulated Annealing

O Simulated annealing é um método probabilístico proposto por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi em 1983 e por Cerny em 1985 para encontrar mínimos globais de uma função custo, que pode possuir vários mínimos locais. Este método simula o processo físico em que um sólido é lentamente arrefecido até congelar, desta forma o arrefecimento acontece usando a configuração mínima de energia [32].

Esta técnica é utilizada em problemas de otimização combinatória, $\min_x f(x)$, $x \in S$, onde $f : S \rightarrow \mathbb{R}$, S finito. Neste contexto, o processo de otimização é realizado por níveis, simulando os níveis de temperatura no arrefecimento. Em cada nível, dado um ponto $u \in S$, vários pontos na vizinhança de u são gerados e o correspondente valor de f é calculado. Cada ponto gerado é aceite ou rejeitado de acordo com uma certa probabilidade. Esta probabilidade de aceitação decresce de acordo com o nível do processo, ou equivalentemente, com a temperatura [33].

A grande vantagem deste algoritmo é a sua capacidade de evitar ficar preso num mínimo local. O que é conseguido deixando o algoritmo aceitar não só soluções melhores mas também piores com uma determinada probabilidade. A grande desvantagem, é o facto de a definição de alguns parâmetros iniciais ser um bocado subjetiva. O que significa que o algoritmo tem que ser calibrado de forma a maximizar a sua eficiência. Um fluxograma de um algoritmo exemplo pode ser visto na figura [34].

Em [35] é proposto um sistema de monitorização da condição em MIT usando este método estocástico de procura. Estes inserem num modelo matemático da máquina a tensão nominal e dados sobre a posição do rotor retirados de uma máquina experimental. As saídas do modelo são as três correntes da armadura da máquina. Estas são comparadas com as medidas, de forma a produzir um conjunto de erros que serão posteriormente integrados e somados, com o objetivo da obtenção de um erro geral. Quando a máquina está saudável, os seus parâmetros coincidem com os do modelo e o erro calculado é pequeno. Se uma falha ocorrer nos enrolamentos da máquina os

seus parâmetros elétricos são modificados, quando as correntes medidas forem comparadas com as saídas do modelo o erro de cálculo será grande, sendo este um indicador da presença de uma falha. A identificação da falha é feita ajustando os parâmetros do modelo usando, um método estocástico de procura como o simulated annealing para minimizar os erros de calculo. O novo conjunto de parâmetros do modelo define a natureza da falha e a sua localização.

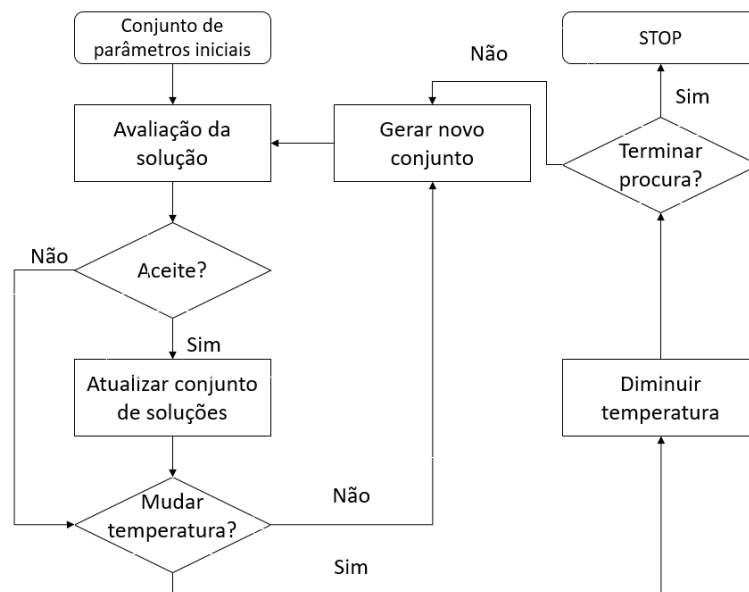


Figura 3.4: Fluxograma de um algoritmo de simulated annealing

3.4 Inteligência Artificial na identificação de falhas

Inteligência Artificial é a inteligência similar à humana exibida por mecanismos ou software, é definida por sistemas computacionais que resolvem problemas usando metodologias análogas às utilizadas pelo cérebro humano. De entre os sistemas inteligentes conhecidos destacam-se as redes neurais artificiais, a lógica fuzzy e os algoritmos genéticos. O uso destas técnicas também permite relacionar parâmetros atuais da condição da máquina com registros passados, auxiliando assim a detecção e prevenção de falhas com base na análise de padrões e tendências do motor.

3.4.1 Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais Artificiais (RNA) são uma das abordagens de inteligência artificial, que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neuronal de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Estas são formadas por neurónios artificiais, que são as unidades processadoras, interligados por várias conexões. Os neurónios estão organizados em múltiplas camadas, camada de entrada, de saída e escondidas, o número destas últimas varia

conforme a complexidade da rede e é nestas onde é feita a maior parte do processamento. As conexões entre cada camada possuem um valor, peso sintático, que varia durante a fase de treino. A propriedade mais importante destas é a sua capacidade de aprender, a aprendizagem é um processo iterativo de ajustes aos pesos sintáticos, para que a rede atinja as saídas desejadas face às entradas.

As RNA diferenciam-se pelo número de camadas e pelo modo de treino. Existem três métodos de treino [36]:

- Aprendizagem Supervisionada: É apresentado um conjunto de treino com as entradas e as saídas desejadas;
- Aprendizagem por Reforço: Para cada entrada, é produzida uma indicação (reforço) sobre a adequação das saídas correspondentes produzidas pela rede;
- Aprendizagem Não-supervisionada: A rede atualiza seus pesos sem o uso de um conjunto de entradas e saídas desejadas e sem indicações sobre a adequação das saídas produzidas

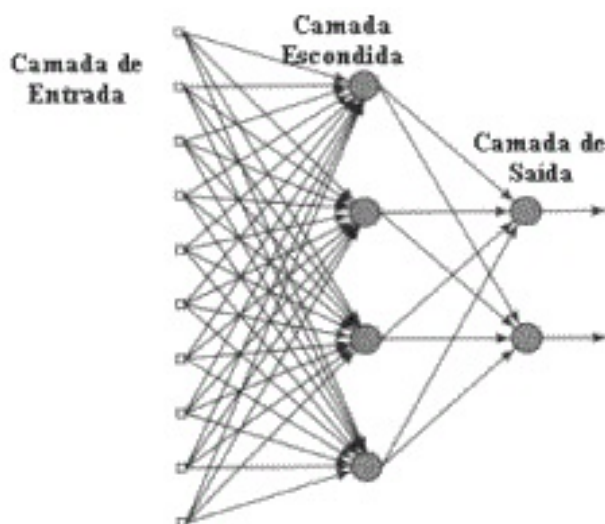


Figura 3.5: Exemplo de uma rede neuronal "feedforward multi camadas"

Como foi referido as RNA aprendem com a apresentação de dados durante a fase de treino, e com o conhecimento adquirido conseguem classificar dados novos. Desta forma as RNA conseguem aprender as características dos sinais, detetar e diagnosticar falhas nos motores. Estas têm sido frequentemente aplicadas no desenvolvimento sistemas de identificação de avarias em MIT, desde curto-circuitos no estator a barras rotóricas partidas como foi descrito [37, 38, 39, 40].

3.4.2 Lógica Fuzzy

Em lógica binária as proposições são unicamente verdadeiras ou falsas. Na lógica fuzzy estas podem ter valores intermédios, admite graus de pertinência, admite a existência de estados

intermédios entre o verdadeiro e falso. É uma maneira de tentar solucionar o processo de representação de conhecimento impreciso, tem como principal objetivo a modelação computacional do raciocínio humano, impreciso, ambíguo e vago [41].

As variáveis que representam as condições do motor são convertidas em conjuntos fuzzy, de forma a poderem ser analisadas pelo conjunto de regras do sistema, formuladas anteriormente.

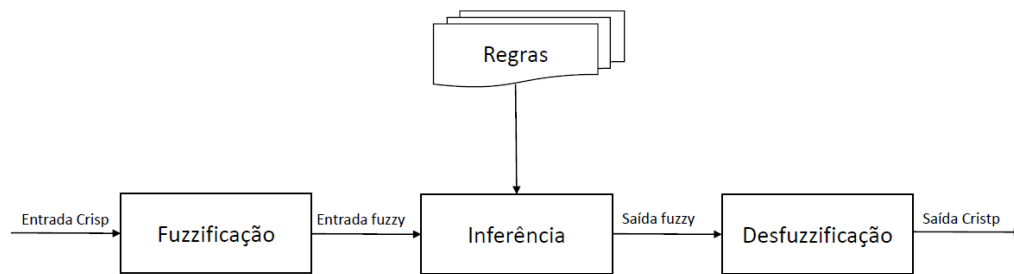


Figura 3.6: Exemplo de um diagrama esquemático de um sistema fuzzy

O conhecimento armazenado nestes sistemas torna possível a tomada de decisões que querem dados qualitativos do processo e gera resultados percentuais com alta precisão.

Este tipo de inteligência artificial tem vindo a ser aplicada em muitos trabalhos para a deteção de diferentes falhas. Em [42, 43, 44] a lógica difusa é usada na deteção de falhas no estator e no rotor, estes processam os sinais das correntes do estator e introduzem-nos numa sistema de decisão fuzzy que consegue resultados precisos.

Capítulo 4

Monitorização e análise da condição de falha

4.1 Introdução

Como foi referido no capítulo 1, o objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de monitorização e análise de condição em MIT usando as corrente do estator. Para isso foram estudados os diferentes modos de falha destes motores, os diferentes métodos de processamento de sinal e os vários métodos de identificação de falhas já existentes e em utilização. Usando as conclusões retiradas desses estudos, foi estruturada e desenvolvida uma aplicação de software onde, introduzindo as correntes do estator e mais alguns dados sobre a máquina em questão, esta produz um relatório sobre o estado da máquina, detetando a existência de falhas e identificando duas falhas específicas.

Neste capítulo será detalhada a estrutura do sistema desenvolvido, desde a forma como é processado o sinal até aos diferentes métodos de identificação de falhas usados. Serão ainda expostas as razões da escolha de cada um dos processos e métodos referidos.

4.2 Estrutura do sistema

As correntes trifásicas do motor são a fonte de dados, sendo necessário extrair os seus dados e introduzi-los no sistema de diagnóstico. Os sinais destas correntes são extraídos e entram no sistema, sob a forma de um conjunto de pontos. Estes são processadas de duas formas diferentes, o processamento é uma fase necessária e que antecede a aplicação dos diferentes métodos de deteção de falhas, como se pode ver na figura 4.1.

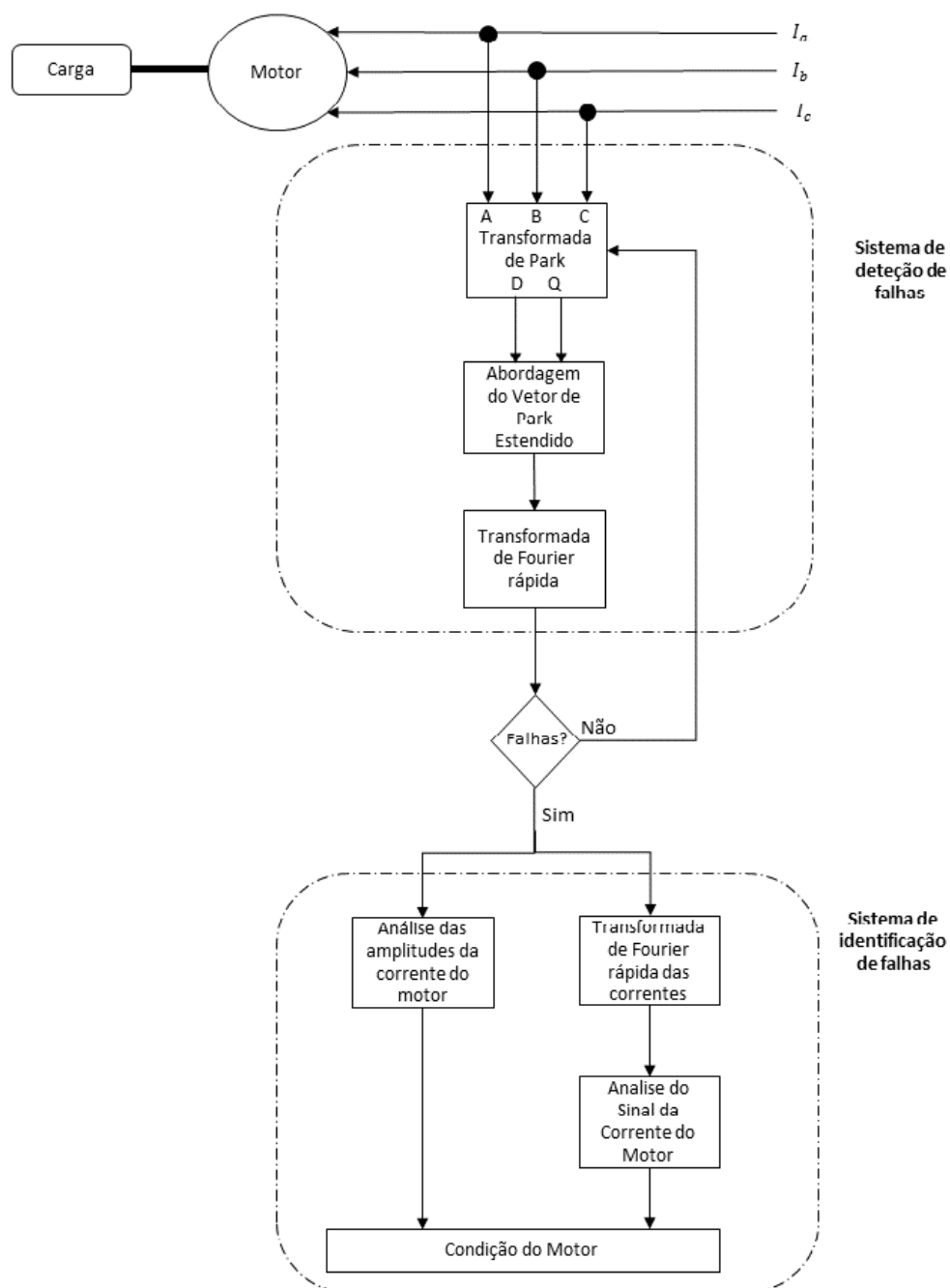


Figura 4.1: Esquema do sistema de diagnóstico

Durante a fase de planeamento foram estudados vários modos de falha diferentes, tendo-se identificado três como as mais frequentes, razão pela qual foram seleccionados para posteriormente serem detetados. Este é um dos objetivos do projeto como foi referido no capítulo 1. Essas três falhas são: barras rotóricas partidas, curto-circuitos nos enrolamentos do estator e falhas nos rolamentos. Outro critério de destaque, é explorar o máximo de técnicas de processamento de sinal e métodos de deteção possíveis. Para os curto-circuitos, o processamento dos dados é feito de

duas formas: no domínio das frequências onde é realizada a sua detecção e no domínio do tempo onde é identificada a fase onde se encontra a falha. No caso das barras partidas e das falhas nos rolamentos, o processamento é feito no domínio das frequências. As considerações para a escolha destes domínios será exposta mais abaixo neste capítulo. No entanto as falhas nos rolamento não chegaram a ser contempladas neste estudo por falta de tempo.

Como se pode ver pela figura 4.1, o sistema global está dividido em dois sistemas: um primeiro, onde se detetam as falhas no motor e um segundo, onde estas são identificadas. Na primeira parte começa-se por fazer a transformada de Park, de seguida, usando as componentes I_d e I_q , calcula-se o EPVA, termina-se aplicando uma FFT aos valores do EPVA e analisando as frequências e magnitude provenientes desta para a detecção de falhas. Sabendo da existência de uma falha, a segunda parte do sistema procede à sua identificação utilizando dois métodos diferentes. Como foi referido no capítulo 2, um curto-circuito nos enrolamentos do estator manifesta-se no espetro de frequência do EPVA com um aumento da componente de $2f_s$. Assim com as informações do primeiro sistema fica-se a saber da existência desta falha, faltando conhecer a fase onde se encontra, para isso analisam-se as correntes do motor. O outro métodos consiste no MCSA mas para isso é necessário aplicar primeiro a FFT às correntes do motor como está representado na figura 4.1.

4.2.1 Sistema de detecção de falhas

A transformada de Park, como foi referida no capítulo 3, é um método eficaz de detecção de curto-circuitos nos enrolamentos do estator. Em condições de funcionamento normal saudável, esboçando o vetor de Park (I_d por I_q) obtém-se uma forma circular quase perfeita, forma esta que muda na presença de falhas, como por exemplo, a adoção de uma forma elíptica na presença de curto-circuitos ou o aumentando da sua espessura no caso de barras partidas. No entanto requer que se verifique visualmente esta forma o que não a torna viável na maior parte dos sistemas de detecção automáticos.

Para contornar o problema referido no parágrafo anterior, faz-se uso do EPVA, este como foi referido no capítulo 3, é o modulo das componentes I_d e I_q e quando o motor se encontra em condições de funcionamento normal apenas apresenta uma componente DC. No entanto na presença de falhas passa a ter componentes AC. Aplicando a FFT e monitorizando a componente espectral deteta-se a presença de uma falha. No entanto na prática, verificam-se sempre pequenos picos no espetro das frequências, mesmo no caso do motor funcionar sem falhas, que apesar de terem magnitudes desprezáveis estão presentes. Fazendo então a média das componentes de todas as frequências para quando o motor se encontra saudável e usando um valor relativamente mais alto que esse como limite, podesse passar a usar este método como uma forma de identificar falhas. Na presença de falhas os componentes I_d e I_q vão-se alterar, alterando o EPVA e as magnitude das suas frequências que ao ultrapassar o limite definido apontam para uma falha. Na presença de uma falha passa-se para a próxima fase, a sua identificação que é realizada pelo segundo sistema.

4.2.2 Sistema de identificação de falhas

A identificação de falhas recorre neste caso a dois métodos diferentes um para cada uma das falhas testadas que serão abordados de seguida.

4.2.2.1 Identificação de curto-circuitos nos enrolamentos do Estator

Aproveitando a análise espectral do EPVA, deteta-se curtos-circuitos nos enrolamentos do estator, pois estes manifesta-se com uma frequência de duas vezes a fundamental no espectro das frequência do EPVA, como foi referido no capítulo 2. Então fazendo à análise espectral, recorrendo à FFT, e monitorizando as componentes espectrais, pode-se não só verificar a presença da referida frequência de $2f_s$ como também de outras falhas. Tendo isto em conta viu-se o valor desta componente quando o motor está a funcionar de forma saudável e a partir desse valor definiu-se um limite, o qual se for ultrapassado significa que o motor tem um curto-circuito nos enrolamentos de uma das fases.

Tendo-se identificado a falha, de seguida é necessário determinar em que fase esta se encontra. Para isso recorre-se à análise das amplitudes das três correntes recolhidas. Sabendo que existe um curto-circuito e a forma como este se manifesta nas correntes, comparam-se as amplitudes de cada uma, e aquela com maior valor será onde se encontra a falha. Este sistema mede a severidade da falha utilizando o método referido no capítulo 2, em que o fator de severidade é dado por $SF = I_{EPVA_{2f}}/I_{EPVA_{DC}}$. No entanto utilizando a análise das amplitudes também se pode estimar a severidade da falha pela diferença entre elas.

4.2.2.2 Identificação de barras rotóricas partidas

Sabe-se que barras partidas originam o aparecimento de componentes no espectro das frequências das correntes do estator nas frequências seguintes: $f_s(1 \pm 2ks)$. Logo analisando a componente espectral das correntes do motor e procurando estas frequências é possível identificar barras partidas. A frequência com maior magnitude é a de $f_s(1 \pm 2s)$, ou seja basta estar atento a esta componente para a identificação de barras partidas. É isso mesmo que este segundo sistema faz, começa por aplicar a FFT às correntes do motor, de seguida faz a análise desta procurando a frequência $f_s(1 \pm 2s)$ e medindo a sua magnitude. Se a magnitude desta frequência for um pico e superior ao limite estabelecido, significa que se encontra uma barra partida. A percentagem entre a magnitude desta frequência e a fundamental, foi implementada como fator de severidade para esta falha, no entanto tem algumas limitações, como será explorado no capítulo 6, pois a posição das barras partidas influencia a magnitude de $f_s(1 \pm 2s)$.

Capítulo 5

Aplicação da metodologia em Motores de Indução Trifásicos

5.1 Introdução

Neste capítulo serão expostos os passos necessários à implementação da metodologia descrita no capítulo anterior. Em primeiro lugar será explicado como foi simulado o motor e os modos de falha referidos, utilizando o software ANSYS Maxwell. De seguida, será apresentada uma explicação detalhada da aplicação desenvolvida, assim como o seu funcionamento.

5.2 ANSYS®Maxwell

O ANSYS Maxwell é um software de simulação de campos eletromagnéticos para engenharia, nomeadamente para quem trabalha, quem cria ou analisa dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos, como por exemplo motores, atuadores, transformadores, sensores, bobinas etc... O RMXprt também desenvolvida pela ANSYS, é uma ferramenta de desenho à base de templates de máquinas elétricas que oferece um rápido cálculo analítico da performance da máquina assim como a passagem para o modelo geométrico em 2-D e 3-D para cálculo detalhado de elementos finitos. [45].

Nesta secção entrarei em algum detalhe sobre como se simula o MIT neste software, pois é uma ferramenta que foi adotada recentemente pela instituição. Por isso outro objetivo deste capítulo é o de fornecer alguma documentação sobre esta ferramenta nomeadamente para a simulação de MIT.

5.3 Desenho de um MIT com gaiola esquilo usando o RMXprt

Usando o RMXprt foi criado um motor de indução trifásico gaiola esquilo de 30kW com uma frequência de 50Hz e 380V. Nas tabelas 5.15.2 são mostrados os parâmetros do motor começando pelo estator e depois apresentando o rotor.

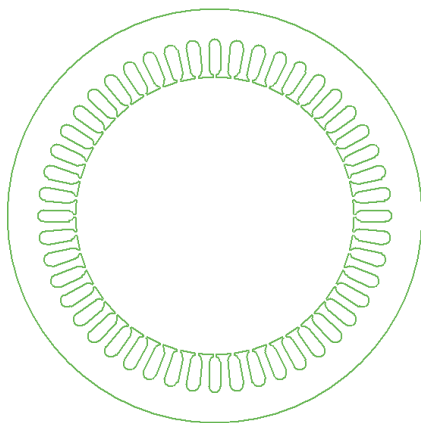


Figura 5.1: Estator

Tabela 5.1: Parâmetros do Estator

Parâmetro:	Dimensão:
Diâmetro exterior	349mm
Diâmetro interior	235mm
Comprimento	144mm
Fator de empilhamento	0.95
Tipo de ranhura	1
Ranhuras	48

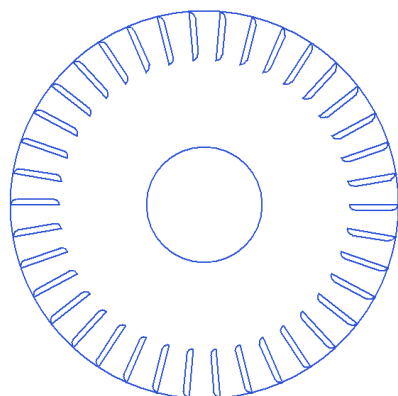


Figura 5.2: Rotor

Tabela 5.2: Parâmetros do Rotor

Parâmetro:	Dimensão:
Fator de empilhamento	0.95
Ranhuras	38
Diâmetro Exterior	233.6mm
Diâmetro Interior	70mm
Comprimento	144m

O material usado tanto para o estator como para o rotor é o aço DW310_35 . As barras do rotor foram selecionadas como alumínio e as espiras dos enrolamentos do estator como cobre.

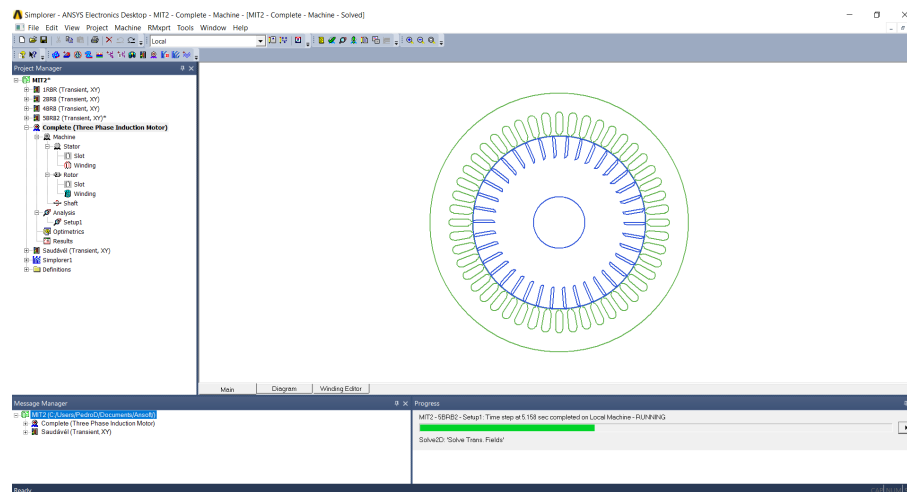


Figura 5.3: Interface do RMXpr

Os resultados principais da análise do motor são apresentados na tabela 5.3:

Tabela 5.3: Resultados da análise

Potência de saída	30.0008kW
Perdas totais	3.150550kw
Binário limite	398Nm
Eficiência	90.4965%
Resistência do Estator	0.0100656 ohm
Corrente das fases do Estator	62.6908A

De seguida são apresentados os gráficos da Corrente VS Velocidade (1), Eficiência VS Potencia de saída (2), Binário VS Velocidade (3) e Potencia de saída VS Velocidade(4) respetivamente:

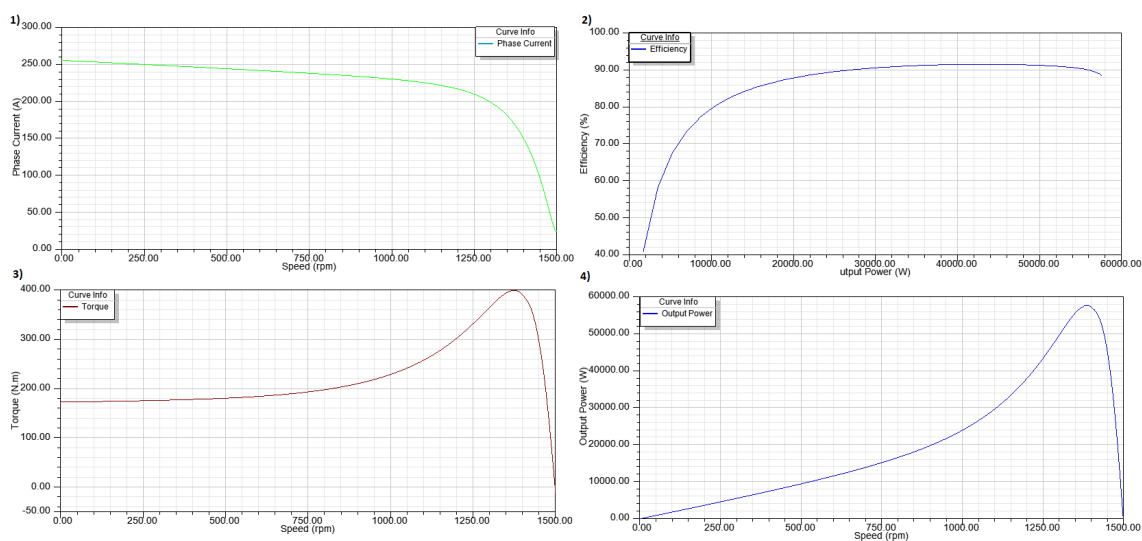


Figura 5.4: Gráficos do RMxpirt

5.4 Desenho de um MIT com gaiola esquilho usando o Maxwell

O Maxwell usa o método dos elementos finitos para resolver campos eletromagnéticos e elétricos estáticos e variantes no domínio da frequência e do tempo. Como se vê na imagem 5.5 facilmente se converte o modelo do RMxpirt para o Maxwell.

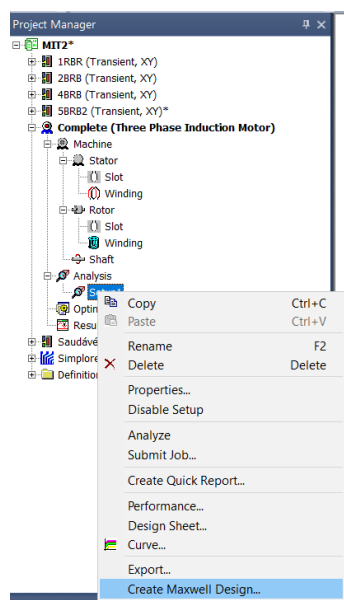


Figura 5.5: Opção de criação do Maxwell a partir de um setup

Os parâmetros são os mesmos dos apresentados na secção anterior. O mecanismo de compatibilização automática do Maxwell 2-D entra em ação e converte o desenho para duas dimensões. Esse desenho pode ser visto na figura 5.6.

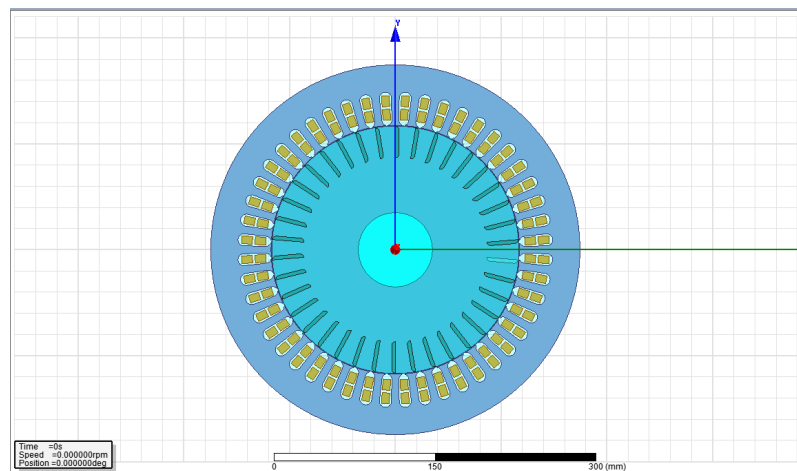


Figura 5.6: Modelo a 2-D do motor de 30kW

Após a conversão, validando o modelo irá surgir um erro em "Bounderies and Exitations", pois é necessário induzir correntes de Foucault (Efeito de eddy) nas barras da gaiola.

O motor foi carregado com uma carga de 300Nm (a carga é colocada em "MotionSetup" que é um sub-menu do "Model"), as simulações tiveram uma duração de 11 segundos com steps de 2 milissegundos. Como resultado da análise foram obtidos os seguintes 5.7 5.8 de corrente vs tempo, Binário vs tempo e velocidade vs tempo:

Nota: Para melhor se poder ver a evolução das ondas apenas se mostra 2 segundos apesar de terem sido simulados 11 segundos de funcionamento.

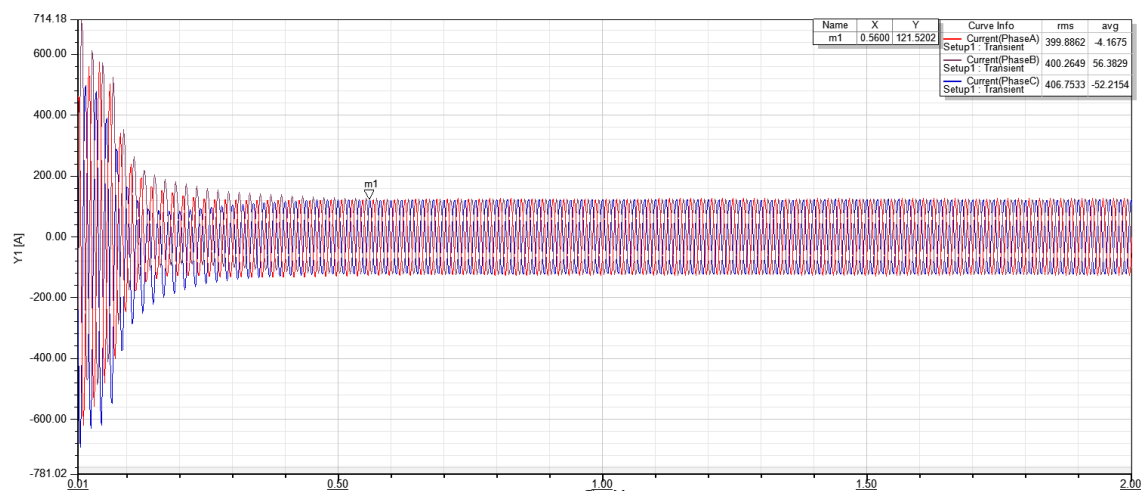


Figura 5.7: Corrente da fase vs Tempo

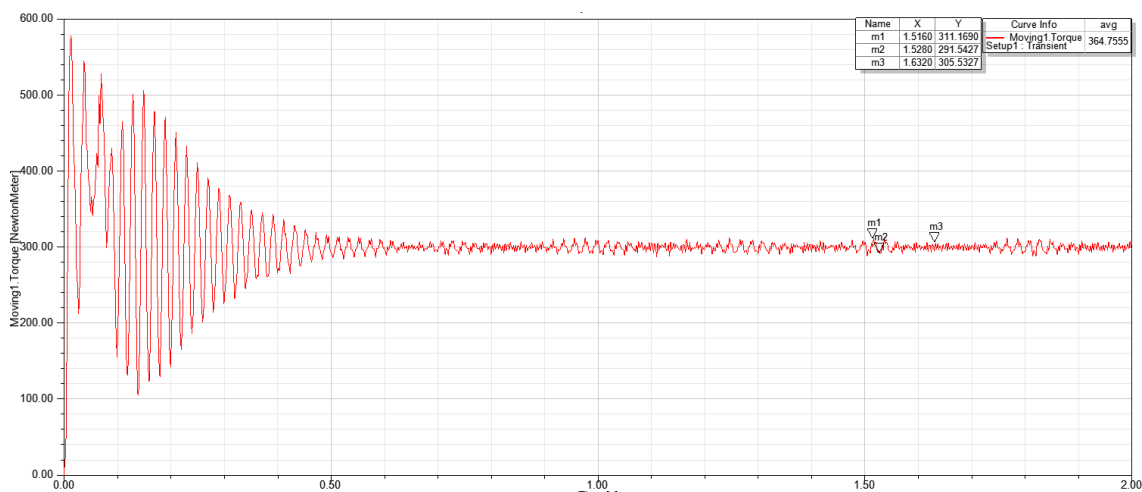


Figura 5.8: Binário vs Tempo

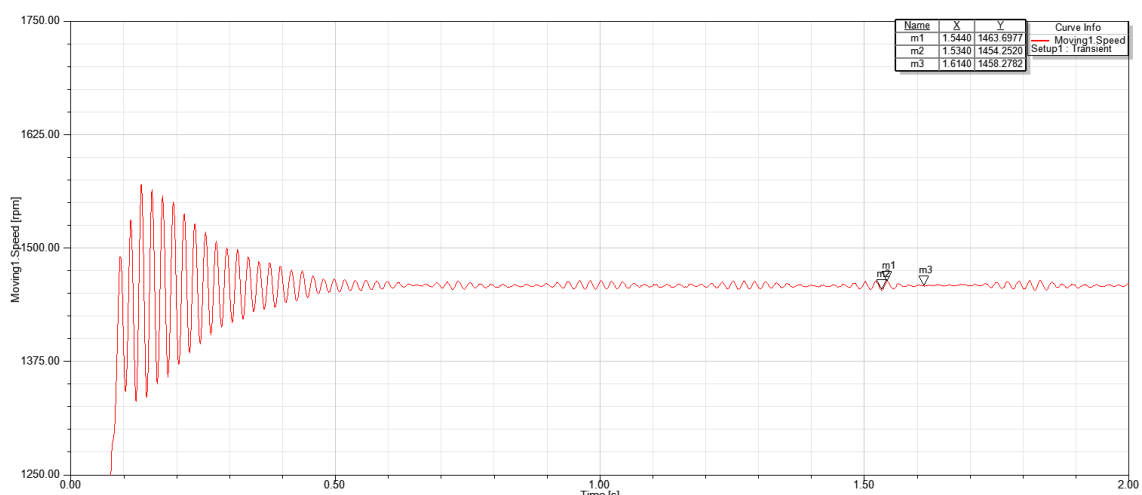


Figura 5.9: Velocidade vs Tempo

Analisando os resultados obtidos, consegue-se ver que o motor entra em regime nominal aos 600 milissegundos. O motor com 300Nm de carga gira a uma velocidade média de 1460 rpm e a corrente de fase nominal é 121,5A. Os valores estão de acordo com os resultados da análise apresentados na tabela 5.3.

5.4.1 Simulação de falhas em MIT

A simulação dos diferentes modos de falha é uma parte essencial deste projeto, visto ser a partir desta que se pode comprovar a eficácia das técnicas escolhidas e a eficiência da aplicação desenvolvida ou seja se pode avaliar o trabalho desenvolvido. Nesta secção será descrito o processo que é necessário executar para a simulação de barras rotóricas partidas e de curto-circuitos

nos enrolamentos do estator. Por outro lado, também serão exploradas algumas ferramentas incorporadas no Maxwell que permitem analisar os resultados das simulações diretamente fornecendo um bom ponto de comparação com os resultados da aplicação.

5.4.1.1 Simulação de barras rotóricas partidas

O processo de simulação de barras partidas é muito simples, basta ir ao modelo em 2D do motor e apagar as barras desejadas. As barras partidas passam a ter o aspeto que é mostrado na figura 5.10.

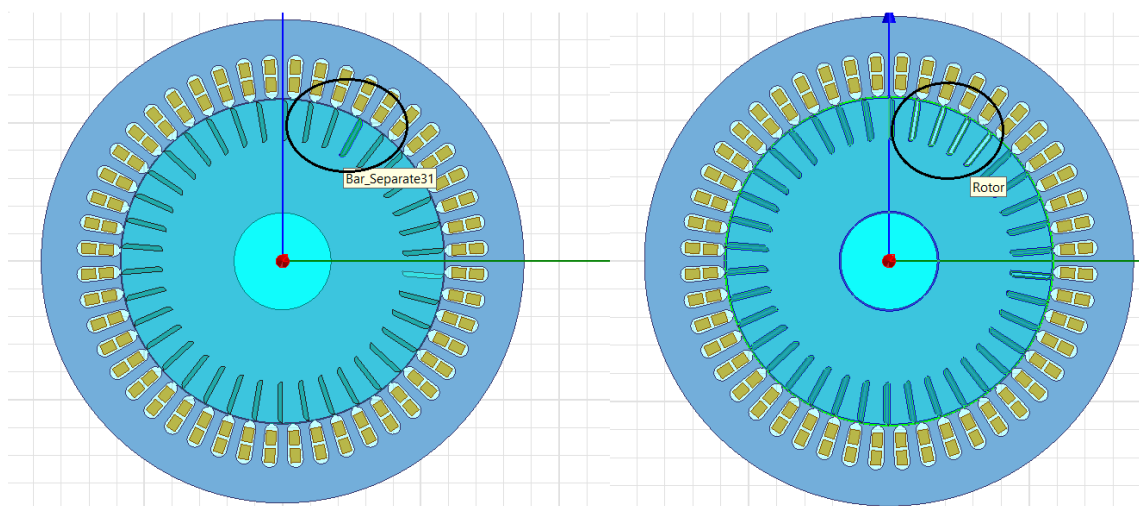


Figura 5.10: Motor sem barras partidas na esquerda e com quatro barras partidas na direita

Como se pode ver apagando as barras os espaços destas ficam vazios. Para confirmar que tudo correu como se esperava, pode-se ver que os resultados das simulações no separador de resultados, assim como criar gráficos e janelas personalizadas como por exemplo aplicar uma FFT. Para isso basta selecionar resultados e criar um "transient report" com os dados que se quer analisar. Por exemplo no caso das barras partidas é importante confirmar os resultados da FFT aplicada pela aplicação desenvolvida de forma a verificar que esta tinha sido aplicada corretamente. O Maxwell como foi referido permite fazer isto. Os resultados desta para a condição do motor apresentado na figura 5.10 pode ser visto nas figuras 5.11 e 5.12.

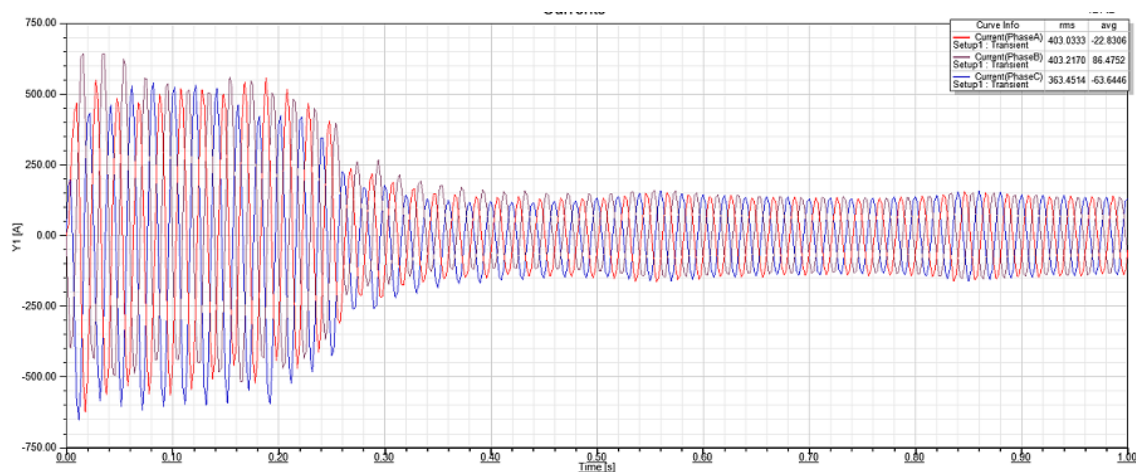


Figura 5.11: Gráfico da evolução das três correntes durante um segundo de simulação com quatro barras partidas

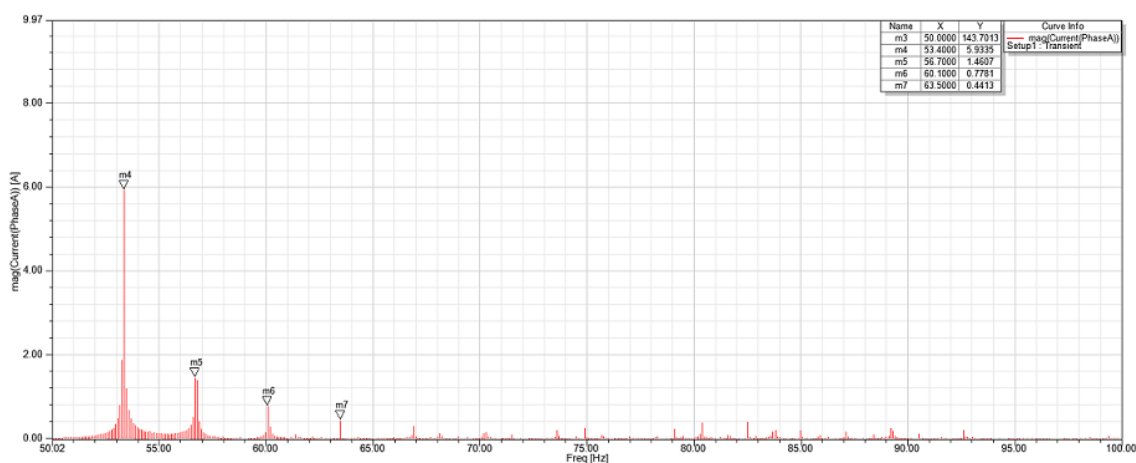


Figura 5.12: FFT do motor com quatro barras partidas (só considerando o regime permanente)

5.4.1.2 Simulação de curto-circuito nos enrolamentos do estator

Tal como a simulação de barras partidas, a simulação de curto-circuitos no estator não é complicada. Basta manualmente ir a cada bobine da fase à qual se quer provocar o curto-circuito e mudar o número de enrolamentos (o menu para fazer isto encontra-se em "excitations"), como se pode ver na figura 5.13.

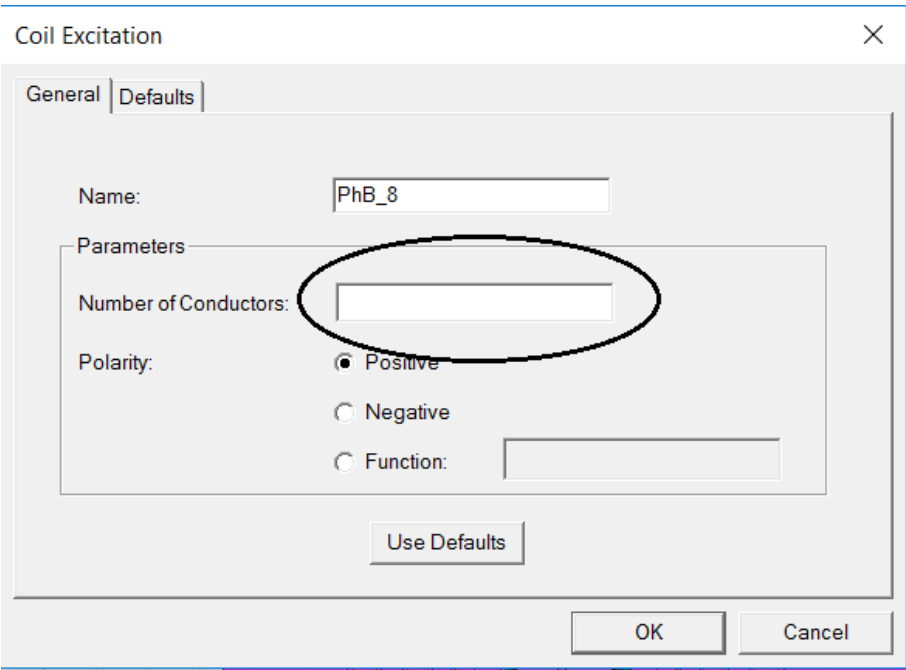


Figura 5.13: Menu para curto-circuitar enrolamentos

Na figura 5.14 apresenta-se um segundo de simulação das correntes com 11% dos enrolamentos da fase A curto-circuitados.

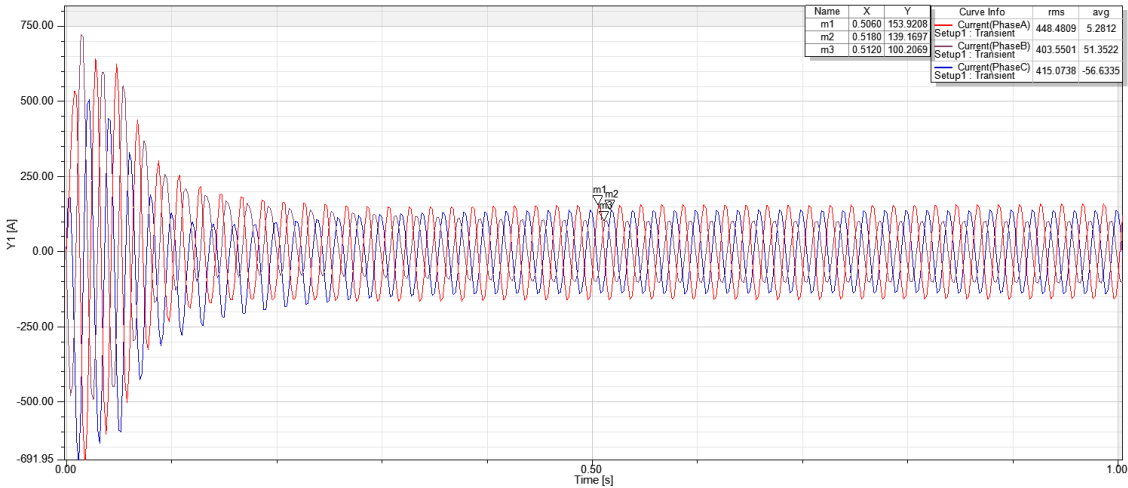


Figura 5.14: Graficos das correntes para 1 segundo de funcionamento com fase A 11% curto-circuitada

5.5 Desenvolvimento e funcionamento da aplicação

No capítulo 4, já foi abordada a estrutura da aplicação. O objetivo desta secção é então descrever de forma concisa e sucinta o desenvolvimento da aplicação, como foram desenvolvidas as suas diferente fases e processos e o seu funcionamento.

Para o desenvolvimento da aplicação foi usada a linguagem c++. A escolha desta linguagem foi devida à sua versatilidade visto poder ser usada para resolver quase todo o tipo de situações e problemas que sejam necessários. Outra razão é a facilidade de adaptação desta linguagem para a sua implementação em diferentes micro controladores, que desde o início foi pensado como um possível trabalho futuro.

Como foi referido anteriormente, esta aplicação está dividida em duas grande fases diferentes. Uma primeira onde se deteta a existência de falhas e uma segunda onde se identificam quais são.

A primeira tarefa da aplicação é recolher os dados provenientes do simulador, este exporta os dados sob o formato ".csv" num documento com quatro colunas: tempo; corrente da fase A; corrente da fase B e corrente da fase C. Este ficheiro é lido, processado e as suas componente gravadas separadamente em vetores.

Conforme estão a ser lidas as três correntes (I_a, I_b, I_c), a aplicação está a calcular e a guardar num vetor as componentes I_d e I_q do vetor de Park e ainda ao mesmo tempo a usar essas componentes para calcular o vetor do EPVA, este vetor é obtido fazendo o módulo da soma das componentes I_d e I_q). O próximo passo é a análise espectral das componentes do vetor do EPVA, para isso é aplicada uma FFT. A FFT à qual esta aplicação recorre é a "KISSFFT". Esta é rápida, relativamente pequena, eficiente e tem uma licença BSD ou seja é considerada de domínio publico e com permissão para ser modificada sem nenhuma restrição. A componente das frequência e das magnitudes são gravadas, e de seguida percorridas, o valor da magnitude de cada frequência é acrescido numa variável e no final do vetor dividida pelo número de amostras obtendo assim a média. Esta é posteriormente comparada com o limite estipulado, a partir do qual se conclui que se está ou não na presença de uma falha. É também guardado o valor da magnitude da frequência de $2f_s$, pois esta frequência identifica diretamente a presença de um curto-circuito numa das fases do estator quando ultrapassado um certo limite estipulado previamente. Não sendo ultrapassado o limite a aplicação avisa que a máquina está em condição saudável.

Se existir uma falha a aplicação procede à sua identificação usando dois métodos distintos. Se se tiver verificado que a frequência de $2f_s$ passa o limite, tomando conhecimento de um curto-circuito nos enrolamentos de uma das fases, a aplicação identifica a fase onde este ocorre. O método usado para a identificação consiste em somar as amplitudes de cada uma das três correntes e calcular as suas médias, somar o valor das três médias, usar essa soma como base, dividir cada média individual pela base e multiplicar cada um dos três resultados por cem para saber a que percentagem dessa base corresponde cada uma das médias. Num sistema equilibrado cada uma dessas percentagens deveria ter um valor perto de 33%, no entanto na presença de curto-circuitos a fase onde este se encontra tem correntes com amplitudes superiores às outras fazendo com que tenha uma percentagem superior às outras todas. Para calcular o o fator de seriedade da falha este faz a divisão entre a magnitude da frequência de $2f_s$ e divide pela média das amplitudes do vetor do EPVA que corresponde ao I_{EPVADC} . Por fim imprime o resultado da análise onde inclui o tipo, a fase e o fator de severidade.

No segundo método, a aplicação volta a fazer uso da "KISSFFT". No entanto, desta vez é aplicada no vetor de umas das três correntes (neste caso usa a corrente I_a mas poderia ser outra

qualquer), obtendo assim o espectro das frequências. De seguida, faz a análise das frequência das correntes do motor, percorrendo o vetor gerado pela FFT, localizando a frequência de $f_s(1 + 2s)$ e verifica se a sua amplitude ultrapassa o valor estipulado. Se sim imprime que existem barras partidas e divide o valor dessa magnitude pelo valor da magnitude da frequência fundamental para obter o grau de severidade da falha. No final imprime o resultado da análise e o fator de severidade.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Introdução

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos pela aplicação durante a fase de experimentação. Os resultados serão analisados, assim como os valores obtidos durante as fases intermédia que a aplicação passa até obter um resultado final.

Os resultados serão apresentados em duas secções diferentes. Uma para a deteção e uma para a identificação de cada uma das falhas, desta forma consegue-se analisar com maior detalha cada uma destas fases.

Como foi referido no capítulo 4, o sistema de deteção e de identificação de falhas funciona comparando valores e magnitude de certas variáveis e frequências medidas calculadas, com limites pré estabelecidos através do estudo do motor a funcionar de forma saudável. Na tabela 6.1 estão expostos quais são essas variáveis e quais os seus limites.

Tabela 6.1: Valores medidos para o motor saudável e limites estabelecidos

Variável	Valor medido	Limite definido
Média das magnitudes das frequências do vetor do EPVA	0.0100024A	0.011A
Magnitude da frequência de $2f_s$	0.0470754A	3.5A
Magnitude da frequência de $f_s * (1 + 2s)$	0.277679A	1A

6.2 Resultados da deteção de falhas

Nesta primeira secção vão ser apresentados e analisados os resultados da deteção de diferentes falhas a diferentes graus de severidade. Nas tabelas 6.2 e 6.3 estão expostos os valores e os resultados apresentados pelo sistema de identificação de falhas. A primeira tabela é referente a barras rotóricas partidas e a segunda a curto-circuitos nos enrolamentos do estator (neste caso os resultados apresentados são apenas para falhas na fase A).

As tabelas são apresentadas separadamente para possam ser analisadas individualmente antes de se tirarem conclusões gerais. Cada tabela divide-se em três colunas, uma com a falha que foi

simulada, outra com a magnitude média do espectro das frequências do vetor do EPVA (Magnitude M. EPVA) e outra com o resultado da análise.

Tabela 6.2: Resultados da deteção da falha em caso de barras partidas

Falha	Magnitude M. EPVA	Resultado
1 barra partida	0.0153892A	Detetada
2 barras partidas (juntas)	0.0239429A	Detetada
2 barras partidas (separadas 45°)	0.0214171A	Detetada
3 barras partidas (juntas)	0.0322409A	Detetada
3 barras partidas (separadas 45° e 180°)	0.0455433A	Detetada
4 barras partidas (juntas)	0.0472447A	Detetada
4 barras partidas (separadas 45°)	0.0314491A	Detetada
5 barras partidas (separadas 45° e 2 juntas)	0.0260023A	Detetada

Olhando para a tabela 6.2, a primeira conclusão que se pode tirar é que a aplicação conseguiu detetar estas falhas em todos os graus de gravidade simulados. O que seria de esperar olhando para a primeira simulação, pois se deteta a falha no nível mais baixo de gravidade, como o aumento da severidade da falha está relacionada com o aumento das magnitudes das componentes espectrais do vetor do EPVA, mais facilmente se detetam as falhas a níveis de gravidade mais altos.

A segunda conclusão que se retira desta análise é o facto da magnitude variar de forma diferente quando as barras partidas se encontram seguras e quando estão separadas. O que significa que com o mesmo número de barras partidas dependendo da posição destas uma em relação as outras a forma como as correntes se manifestam não é igual. Para a deteção desta falha esta informação não tem qualquer efeito negativo, mas vai ser uma limitação para o fator de severidade proposto anteriormente, algo que será analisado e discutido na secção seguinte.

Focando agora na tabela 6.3, mais uma vez se pode concluir que a aplicação detetou todas as falhas com sucesso. No entanto são encontradas algumas inconsistências, a primeira verifica-se quando se curto-circuita 2% dos enrolamentos do estator, seria de esperar que a magnitude da média do espectro do EPVA aumentasse com o aumento da severidade da falha, o que não foi verificado tanto neste como no caso dos 5%.

Tabela 6.3: Resultados da detecção da falha em caso de curto-circuitos nas fases do estator (neste caso todos são na fase A)

Falha	Magnitude M. EPVA	Resultado
1% curto-circuito	0.0110368A	Detectada
2% curto-circuito	0.0107181A	Detectada
3% curto-circuito	0.0116789A	Detectada
4% curto-circuito	0.0134532A	Detectada
5% curto-circuito	0.0120723A	Detectada
10% curto-circuito	0.026225A	Detectada

Verificou-se que a magnitude média do espectro das frequências do vetor do EPVA da falha correspondente a 2% dos enrolamentos curto-circuitados, não ultrapassa o valor definido como limite na tabela 6.1, sendo por isso inicialmente considerado como um falso negativo, apesar de este valor ser ultrapassado para o 1%. Esta falha nos primeiros graus de gravidade tem um impacto muito pequeno na ondulação da corrente do motor, manifestando-se de forma muito ligeira, estando ainda dentro dos limites sobre os quais a sua detecção é afetada pelas oscilações provenientes do ruído de medição, no entanto neste caso como apenas se utilizou simulações isto não acontece. No entanto devido as sucessivas aproximações dos valores, ao serem calculados pelo simulador, ao serem convertidos para csv, ao serem importados e tratados pela aplicação, são originadas pequenas variações nos valores o que poderia ser a razão para se verificar o falso negativo, dificultando assim a sua detecção.

No entanto, é importante a detecção de todas as condições de falha o mais cedo possível, de forma a garantir que se possa agir sobre estas diminuindo ao máximo o impacto negativo sobre o motor. Por esta mesma razão, e para garantir uma detecção mais eficiente, devido a estas situações foi adicionada uma condição. Quando se tem um impacto ainda muito pouco perceptível usando este método, e atendendo ao facto de que a detecção curto-circuitos nos enrolamentos é realizada medindo a magnitude da frequência de $2f_s$ no espectro das frequências do vetor do EPVA, a aplicação grava a magnitude desta frequência e quando chega à fase de comparar a média das magnitudes com o limite estipulado, também compara a magnitude de $2f_s$ com o seu limite. Desta forma mesmo nos casos de menor severidade é possível detetar a falha pois esta magnitude manifesta-se de uma forma bastante perceptível no domínio das frequência mesmo nos estados iniciais da falha (sendo esta a razão pela qual a falha de 2% foi detetada como se verá melhor na subsecção 6.4).

6.3 Resultados da identificação de barras partidas

Nesta secção irão ser analisados os resultados da identificação de barras rotóricas partidas. Na tabela 6.4 são apresentados os valores importantes calculados pela aplicação, utilizados na identificação de barras partidas. Estes valores são a magnitude média resultante da análise espectral do vetor do EPVA (Magnitude M. EPVA, que também se encontra na secção anterior), a magnitude da frequência de sincronismo, a magnitude da frequência de barras partidas e o fator de severidade da falha.

Foram feitas simulações até cinco barras partidas, fazendo sempre uma simulação onde as barras partidas se encontravam juntas, e outra onde estavam separadas. Apesar do número de combinações das posições que as barras partidas podem assumir ser elevado, e a posição destas variar os efeitos que têm, desta forma consegue-se sempre um ponto de comparação para se poderem tomar conclusões. Para o caso de cinco barras partidas a simulação foi feita apenas com as barras separadas pois na presença de cinco barras partidas seguidas o motor não conseguia entrar em regime permanente. A razão de isto acontecer é o facto do tamanho do espaço onde deixa de existir campo girante ser muito grande. Nesta situação de gravidade, existe uma queda de velocidade e de binário muito grande na zona onde as barras se encontram partidas, tanto que o motor não consegue estabilizar.

Tabela 6.4: Resultados da identificação de barras partidas

Falha	Magnitude M. EPVA	Magnitude de f_s	Magnitude de $f_s(1 + 2s)$	SF
1 barra partida	0.0153892A	126.856A	1.091A	0.86%
2 barras partidas (juntas)	0.0239429A	135.532A	2.263A	1.67%
2 barras partidas (separadas 180°)	0.0214171A	127.622A	2.343A	1.86%
3 barras partidas (juntas)	0.0322409A	132.394A	3.813A	2.88%
3 barras partidas (separadas 45° e 180°)	0.0455433A	128.381A	2.951A	2.29%
4 barras partidas (juntas)	0.0472447A	143.702A	5.932A	4.12%
4 barras partidas (separadas 45°)	0.0314491A	128.959A	3.521A	2.70%
5 barras partidas (separadas 45° e 2 juntas)	0.0260023A	137.875A	5.56A	4.03%

Antes de avançar nesta secção é importante relembrar que o fator de severidade proposto para esta falha no capítulo 4, é $SF = f_s(1 \pm 2s)/f_s$.

Ao analisar a tabela 6.4 chama a atenção a diferença entre os valores quando as barras partidas estão juntas e quando estão separadas. Para melhor se visualizar esta diferença na figura 6.1 são apresentados dois gráficos entre a falha e o respetivo fator de severidade de barras juntas e separadas. Comparando estes dois gráficos, verifica-se que o aumento do fator de severidade com número de barras partidas é mais linear no caso de as barras estarem juntas, também se verifica que o fator de severidade assume um valor mais elevado no caso das barras partidas consecutivas em relação ao mesmo número de barras separadas. Outra observação importante é quando se passa de quatro para cinco barras partidas o fator de severidade tem um aumento substancialmente maior do que na passagem de duas para três e de três para quatro. Tendo isto tudo em atenção chega-se à conclusão que o fator de severidade proposto inicialmente não oferece um bom nível de eficiência

pois, como se pode ver, varia bastante com posição das barras, sendo por isso muito difícil usá-lo para fazer estimativas do número de barras partidas e da severidade da falha com precisão.

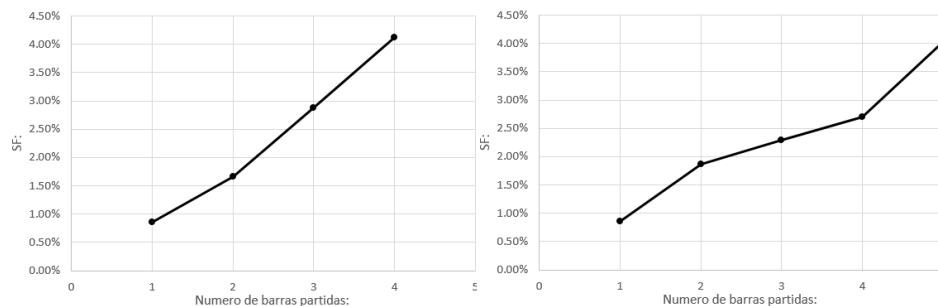


Figura 6.1: Relação entre o número de barras partidas e o fator de severidade, para barras partidas juntas e separadas respetivamente

Concluindo, como se pode ver a aplicação deteta e identifica com sucesso a presença de barras rotóricas partidas. Apesar de o fator de severidade proposto se ter mostrado pouco preciso, variando com a posição da localização das diferentes barras partidas, devido à gravidade a que corresponde uma única barra partida pode-se considerar que um fator de severidade é desnecessário. De facto mal se identifique uma barra partida deve-se parar o motor e trocar a barra, pois os resultados de estar em funcionamento com uma barra partida é desastroso como foi referido no capítulo 2.

6.4 Resultados da identificação de curto-circuitos nas fases

A última análise a fazer é referente aos resultados da identificação de curto-circuitos. Estes resultados são apresentados em duas tabelas diferentes a 6.6 e a 6.7. Na primeira, são mostrados os resultados referentes à falha em três fases diferentes e na segunda a evolução da severidade da falha na mesma fase.

Na tabela 6.5 são apresentados os valores utilizados para a identificação de curto-circuitos mas com o motor saudável. Assim é conseguido um ponto de comparação com os valores obtidos na presença de falhas. Tal como se pode observar neste caso, e como foi referido no capítulo 5 todas as percentagens têm valores perto dos 33%. Também se observa que o fator de severidade apesar de muito pequeno não é zero, no entanto é desprezável pois nem chega a 1% e nenhum dos limites foi ultrapassado.

Tabela 6.5: Valores da análise de curto-circuitos com motor estar saudável

	Magnitude de $2f_s$	SF	% A	% B	% C
Saudável	0.0471A	0.030%	33.80%	33.06%	33.128%

Na tabela 6.6 estão expostos os valores calculados pela aplicação e usados na identificação de curto-circuitos e da fase onde ocorre. Estes valores são a magnitude de $2f_s$, que corresponde á magnitude associada a curtos circuitos, a fase onde ocorre a falha e o fator de severidade, relembra-se que o fator proposto para estas falhas é obtido por $SF = I_{EPVA2f}/I_{EPVADC}$, ou seja pela divisão entre a magnitude da frequência de duas vezes a fundamentais a dividir pela componente DC das correntes do EPVA que é o modulo da soma das correntes de PARK capítulo 3. Como explicado no capítulo 5, a forma como se distingue a fase onde se encontra o curto-circuito, é através da soma das médias das três correntes e calculando a percentagem que corresponde a cada média individual em relação á soma das três. A percentagem de maior valor representa a fase onde se encontra a falha.

Tabela 6.6: Resultados da identificação da fase curto-circuitada

Falha:	Magnitude de $2f_s$	Fase:	SF:	% A	% B	% C
10% curto-circuito (Fase A)	39.3673A	A	23.71%	39.71%	26.33%	33.96%
10% curto-circuito (Fase B)	35.6585A	B	21.72%	34.60%	38.16%	27.24%
10% curto-circuito (Fase C)	36.7752A	C	22.18%	26.22%	34.69%	39.09%

Analisando a tabela 6.6, conclui-se que os valores fazem sentido, não havendo nenhuma inconsistência. Os valores das magnitudes e dos fatores de severidade são muito parecidos, o que era de esperar pois apesar de ser em fases diferentes têm o mesmo número de espiras curto-circuitadas. O mesmo ocorre com as percentagens onde, tal como se esperava, existe uma com o valor superior às outras, sendo esta onde se encontra o curto-circuito.

Focando agora na tabela 6.7, onde se encontram apresentados vários graus de severidade de curto-circuitos na fase A. Podem-se encontrar os mesmos valores que na 6.6 menos as percentagens pois neste caso todas as falhas ocorrem na fase A.

A inconsistência que se observa na coluna Magnitude M. EPVA, mais especificamente no caso dos 2% e 5% já foi referida na secção 6.3, e foi dito que para manter a deteção de falhas eficiente, verifica-se logo a magnitude de $2f_s$ pois esta manifesta-se com uma magnitude que ultrapassa o limite estipulado mesmo nas situações em que a falha é muito pequena. Prevenindo-se assim dos casos em que a falha se encontra numa fase inicial, onde não se manifesta de forma a ser detetada pelo EPVA, evitando que passe despercebida.

Prestando atenção ao fator de severidade, vê-se pela análise dos seus valores e pela figura 6.2 que este aumenta de forma quase linear. Ao contrário do proposto para as barras partidas na secção anterior, este prova ser eficiente pois o seu crescimento está diretamente relacionada com o aumento da condição de falha.

Tabela 6.7: Evolução dos resultados com o aumento da severidade da falha na fase A

Falha	Magnitude M. EPVA	Magnitude de $2f_s$	Fase:	SF
Saudável	0.010024A	0.0471A	A	0.03%
1% curto-circuito	0.0110368A	4.941A	A	3.18%
2% curto-circuito	0.0107181A	6.392A	A	4.12%
3% curto-circuito	0.0116789A	9.771A	A	6.22%
4% curto-circuito	0.0134532A	13.01A	A	8.36%
5% curto-circuito	0.0120723A	16.60A	A	10.52%
10% curto-circuito	0.026225A	39.37A	A	23.0%

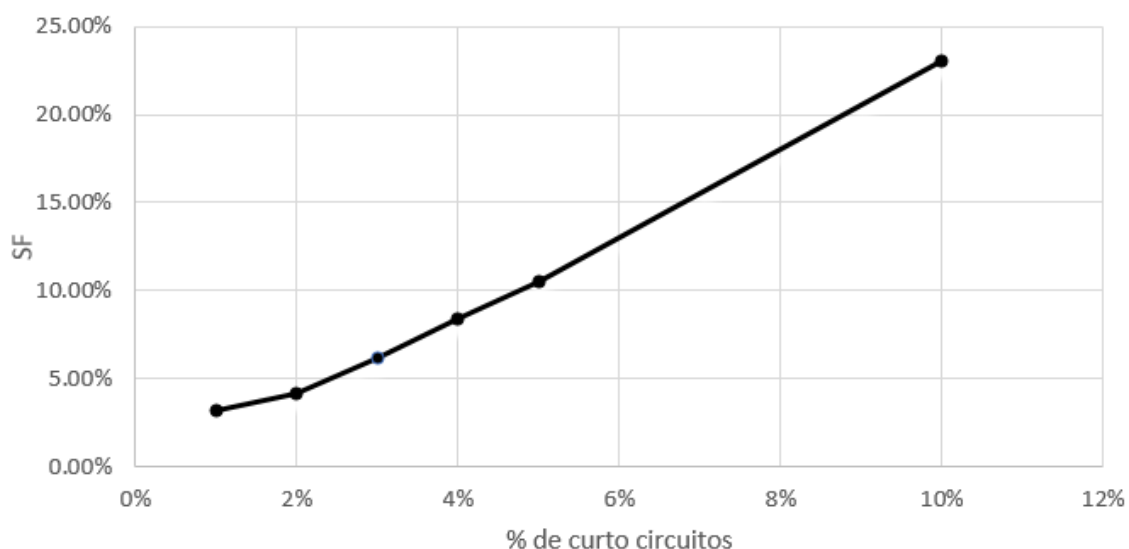


Figura 6.2: Relação entre a percentagem de curto-circuitos na fase A (eixo das abcissas) e o fator de severidade (eixo das ordenadas)

É importante referir que a razão pela qual não se estipula um valor limite para o fator de severidade a partir do qual se deve parar o motor é porque este valor pode variar consoante o motor e a tarefa à qual se destina. Ou seja, dependendo do motor e da tarefa, em questão o valor que o indivíduo pode considerar como aceitável para o ripple do binário varia e por isso o fator de severidade da falha pode ser maior ou mais pequeno, outra opção é gravar o fator de severidade e verificar se esta agrava com o tempo ou se está estável e decidir através desses dados se .

Concluindo, a aplicação conseguiu detetar e identificar a fase de todos os curto-circuitos. Outro aspeto positivo que se retirou destas simulações foi que o fator de severidade, ao contrário do proposto nas barras partidas mostrou ser eficaz e uma boa forma de estimar a gravidade da falha.

6.5 Conclusões

Na detecção de falhas, pode-se considerar que todos os teste realizados obtiveram resultados positivos, apesar de se ter encontrado algumas inconsistências na detecção de curto-circuitos nos enrolamentos do estator. No entanto estas inconsistências permitiram que ficasse claro que nos casos de falhas pouco severas, ou seja com pouca influência nas correntes do motor, como no caso de 2% de curto-circuitos, a sua detecção pelo método do EPVA podia estar comprometida pelas oscilações provenientes do ruído de medição, ou neste caso pelas aproximações feitas em cada etapa do sistema. Estando ciente deste problema uma correção foi aplicada acrescentando na detecção, a verificação da magnitude da frequências associada a curto-circuitos nos enrolamentos no espectro das frequência do EPVA.

A identificação de barras rotóricas partidas foi feita com sucesso para cada um dos testes realizados. O único aspeto menos positivo destes resultados, foi terem provado que o fator de severidade proposto para este tipo de falhas não ser eficiente, pois varia com a posição das barras partidas. No entanto, como foi referido devido à gravidade deste tipo de falha, mesmo apenas uma barra partida implica a paragem do motor para ser trocada logo antes que possa ter consequências muito mais prejudiciais para o motor. Por isso não é muito necessário existir um fator de severidade para se definir um limite de funcionamento.

Quanto a identificação de curto-circuitos, tudo correu em conformidade com o esperado, todos os teste foram realizados com sucesso. Neste caso ao contrário do proposto para as barras partidas, o fator de severidade proposto mostrou ser eficaz. Concluindo todos os resultados foram positivos.

Capítulo 7

Conclusões e trabalhos futuros

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de análise e monitorização de condição em MIT, tendo como requisito que este fosse capaz de detetar e identificar três falhas das mais comuns, apenas utilizando as três correntes do estator.

Inicialmente foi realizado um estudo das condições de falha em MIT, das diferentes técnicas de processamento de sinal e métodos de deteção de falhas em utilização. Foi projetada uma estrutura para o sistema e desenvolvida uma aplicação usando-a.

A aplicação foi testada para dois tipos de falhas diferentes, curto-circuitos nos enrolamentos do estator e barras rotóricas partidas, ambas simuladas usando o software Maxwell da ANSYS. Uma das três falhas não chegou a ser abordada, falhas nos rolamentos, por questões de tempo, isto pois o tempo cedido para aprendizagem do software de simulação foi mais do que o esperado, ela falta de documentação existente.

Da análise dos resultados obtidos, pode concluir-se que a aplicação é capaz de detetar nos estados iniciais as falhas testadas, apesar de se ter concluído que no caso dos curto circuitos em níveis menos severos de gravidade a deteção, isto é, no começo da degradação do funcionamento, a sua deteção é muito influenciada pelo ruído da medição. Para contornar este problema foi à aplicado um método específico baseado na análise espectral para a aplicação ser robusta face ao ruído nestas condições.

Em conformidade foi desenvolvida uma aplicação de análise e identificação de falhas baseada na monitorização orientada à condição do motor de indução, que foi validada para dois tipos diferentes de falhas, uma no estator e uma no rotor.

No entanto para validar de forma completa este método, este trabalho deveria ser completado aplicando o método que suporta esta aplicação ao conjunto de falhas restante do motor de indução que foram identificadas no capítulo 2. Por último, estando a aplicação munida de meios de deteção e identificação de todos os tipos de falhas possíveis, o último passo seria a sua implementação num micro-controlador que seria ligado e testado diretamente num motor real em condições industriais.

Referências

- [1] Pedro Miguel Azevedo de Sousa Melo. Manutenção condicionada e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos. Relatório técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [2] Petruzella Frank. *Motores Elétricos e Acionamentos*. . Bookman, 2013.
- [3] Surajit Chattopadhyay Madhuchhanda Mitra Karmakar, Subrata e Samarjit Sengupta. *Induction Motor Fault Diagnosis: Approach through Current Signature Analysis*. Singapore: Springer, 2016.
- [4] Hamid A. Toliyat. *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. CRC Press, FL: Taylor & Francis, 2012.
- [5] McCoy RM Owen EL Allbrecht PF, Appiarius JC. Assessment of the reliability of motors in utility applications—updated. *IEEE Trans Energy Convers*, páginas 39–46, 1986.
- [6] Al Kazzaz SAS Singh GK. Induction machine drive condition monitoring and diagnostic researc. *Electr Power Syst Res*, páginas 145–158, 2003.
- [7] F Gu A Alwodai e A D Ball. 'a comparison of different techniques for induction motor rotor fault diagnosis. *Journal of Physics: Conference Series*, página 3, 2012.
- [8] H. Toliyat S. Nandi e X. Li. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, página 719–729, December 2005.
- [9] J. Stein R. D. Endicott G. B. Kliman, R. A. Koegl e M.W. Madden. 'noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors'. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 1988.
- [10] B. G. Gaydon. 'an instrument to detect induction motor rotor circuit defects by speed fluctuation measurements'. *Instrumentation—Testmex Conf. Papers, 1979*, pp. 5–8., 1979.
- [11] Farrukh Kamran and Robert G. Bartheld Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler. Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE*, December 1995.
- [12] G.B. Kliman S. Lee. An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings. *IEEE Transactions on Energy Conversions*, December 2005.
- [13] Sérgio M. A. Cruz. *Diagnóstico e Análise de Avarias nos Enrolamentos Estatóricos de Motores de Indução Trifásicos Através da Aplicação do Método dos Referenciais Múltiplos*. Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 2004.
- [14] Rasool Sharifi e Mohammad Ebrahimi. Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring. *ISA Transactions*, página Pages 14–20, January 2011.

- [15] Gérard-André Capolino Fiorenzo Filippetti, Alberto Bellini. 'condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: State of art and future perspectives'. *IEEE*, 2013.
- [16] Frank R. Kschischang. *The Hilbert Transform*. University of Toronto, 2006.
- [17] Rui Manuel da Fonseca Pinto. Novas abordagens ao estudo de sinais biomédicos: Análise em tempo-frequencia e transformada de hilbert-huang. Relatório técnico, UNIVERSIDADE DE LISBOA Faculdade de Ciências, 2009.
- [18] DANIEL N. ROCKMORE DAVID K. MASLEN. *The Cooley–Tukey FFT and Group Theory*. MSRI Publications, 1965.
- [19] National Instruments. Ffts e janelamento (windowing) [online]. 07/01/2017. URL: <http://www.ni.com/white-paper/4844/pt/>.
- [20] Pankaj K. Das Agostino Abbate, Casimer M. DeCusatis. *Wavelets and Subbands Fundamentals and Applications*. SpringerScience+Business Media,LLC, 2002.
- [21] R.J.E. Merry. *Wavelet Theory and Applications*. Eindhoven University of Technology, 2005.
- [22] D. S. B. Fonseca A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by park's vector approach. *IEEE Trans Energy Conversion*, 1999.
- [23] J. F. S. Carvalho E. S. Saraiva A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz. 'rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by park's vector approach'. *Universidade de Coimbra*, 2010.
- [24] Luís Oliveira A. J. Marques Cardoso. Extended park's vector approach-based differential protection of three-phase power transformers. *IET Electric Power Applications*, 2012.
- [25] IEEE Sérgio M. A. Cruz, Student Member e IEEE A. J. Marques Cardoso, Senior Member. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended park's vector approach. *IEEE*, 2001.
- [26] Dallas Fossum". Identifying mechanical faults with motor current signature analysis [online]. 07/01/2017. URL: <http://www.reliableplant.com/Read/28633/motor-current-signature-analysis>.
- [27] Mark Fenger William T. Thompson. 'current signature analysis to detect induction motor faults'. *IEEE Pulp and Paper Industry Conference*, 2000.
- [28] Charles L. Fortescue. *Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*. American Institute of Electrical Engineers, 28 July 1918.
- [29] Gérard Champenois Monia Ben Khader Bouzid. 'new expressions of symmetrical components of the induction motor under stator faults'. *IEEE*, 2013.
- [30] H. P.; KAGAN N. ;ROBBA E. J. OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT. *Introdução aos Sistemas de Potência, Componentes Simétricas*. Egard Bluncher, 1996.
- [31] Frederick C. Trutt Jeffery L. Joseph Sottile. 'alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors'. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992.

- [32] John Tsitsiklis Dimitris Bertsimas. 'simulated annealing'. *Statistic Science*, 1993.
- [33] M. GOMES–RUGGIERO G. HAESER. *Aspectos Teóricos de Simulated Annealing e um Algoritmo duas Fases em Otimização Global*. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 2008.
- [34] Armando Araújo Rui Chibante e Adriano Carvalho. *Parameter identification of power semiconductor device models using metaheuristics*. Sciyo, 2010.
- [35] P.P. Acarnleyt K.P. Zakaria e B. Zahawi. 'condition monitoring of an induction machine using a stochastic search technique'. *IEEE*, 2006.
- [36] ZSOLT L KOVACS. *REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES*. Livraria da Física, 2006.
- [37] Vilas N. Ghate e Sanjay V. Dudul. 'fault diagnosis of three phase induction motor using neural network techniques'. *Second International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 2009.
- [38] Myung-Hyun Song Member Bulent Ayhan, Mo-Yuen Chow. 'multiple discriminant analysis and neural-network-based monolith and partition fault-detection schemes for broken rotor bar in induction motors'. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2006.
- [39] Sanjay V. Dudul Vilas N. Ghate. 'cascade neural network based fault classifier for three phase induction motor'. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011.
- [40] DUDUL S. V GHATE, V. N. 'optimal mlp neural network classifier for fault detection of three phase induction motor'. *Expert Systems with Applications*, 2010.
- [41] Everton R. de Sousa Cavalcante Giuliana Silva Bezerra Rômulo de Oliveira Nunes Alessandro Assi Marro, Alyson Matheus de Carvalho Souza. *Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- [42] Javad Poshtan Hamid Fekri Azgomi. *Induction Motor Stator Fault Detection via Fuzzy Logic*. Iran University of Science and Technology, 2013.
- [43] E. Akin* M. Karaköse*, I. Aydin*. The intelligent fault diagnosis frameworks based on fuzzy integral. *International Symposium on Power Electronics*, 2010.
- [44] Prashant Kumar Choudhary Vijay Prakash Pandey. Induction motor condition monitoring using fuzzy logic. *ISSN*, 2009.
- [45] Deniz Bolukbas Alperen Usudum. 'the performance analyses of an induction motor due to specified fault conditions'. *Okan University*, 2010.