



PAULO CÉSAR MENDES SALATIEL **TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO
DE AVARIAS EM MOTORES DE
INDUÇÃO BASEADAS NO
QUADRADO DA CORRENTE
ELÉTRICA ESTATÓRICA**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Eletrotécnica e Computadores**, realizada sob a orientação do Professor Victor Manuel de Carvalho Fernão Pires e coorientação do Professor Armando José Pinheiro Marques Pires

Júri

Presidente - Doutor José Henrique Querido Maia, Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Instituto Politécnico de Setúbal

Orientador - Doutor Victor Manuel de Carvalho Fernão Pires, Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Instituto Politécnico de Setúbal

Vogal – Doutor João Francisco Alves Martins, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Novembro 2019

*“Somos um País grande, Não somos um País pequeno,
Comandamos interesses muitas vezes importantes e isto no mundo
Nós continuamos aferrados a ideia de que somos pequenos,
flamamos em pequeno. Há que fazer tudo em grande
Mas somos para aí uns pobres e parecemos não ter envergadura para isso”*

Professor Doutor Antonio de Oliveira Salazar

Dedicado a minha filha Leonor Cabral Salatiel. Por ti e para ti S2.

Agradecimentos

A realização de um curso de Mestrado representa uma fase muito importante para qualquer aluno e mediante as dificuldades encontradas pelo caminho, gostaria de deixar algumas frases de agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para que eu pudesse concluir este curso e aproveitando a deixa, deixar algumas palavras de agradecimento a outras pessoas que tiveram indiretamente envolvidas.

Primeiramente, um Muito Obrigado ao Deus que sirvo por sempre ter me proporcionado saúde, bem estar, coragem, determinação, espírito resiliente e refrigério nos momentos difíceis. Ao meu Pai deixo o meu muito obrigado pois nada disso seria possível se não fosse da vontade dele.

Ao meu orientador científico, Professor Doutor Vitor Manuel de Carvalho Fernão Pires, por ter aceite esse desafio de me acompanhar/orientar na realização deste trabalho. Agradeço pela exemplar disponibilidade, atenção, paciência, compreensão e profissionalismo mostrados durante a realização dessa dissertação. Agradeço ainda pela amizade, companheirismo, sugestões, ânimo e a vontade de passar a grande experiência que retém.

Ao meu coorientador científico, Professor Doutor Armando José Pinheiro Marques Pires, por ter aceite dar a sua contribuição para realização desta dissertação. A sua experiência e sabedoria no ramo das máquinas elétricas foi de suma importância e deixo aqui frisados os meus sinceros agradecimentos. Gostaria ainda de deixar um agradecimento especial ao Professor Doutor Daniel José Medronho Foito e ao Professor Mestre Sérgio Fernando Pereira Delgado de Sousa por inúmeras vezes terem dado o vosso apoio e ajuda em alguns pontos do trabalho, assim como o companheirismo mostrados.

A empresa Lusonave, Bobinagem e Eletromecânica Industrial e Naval Lda, por ter dispensado os serviços de tornearia, Torneiro Mecânico Georgy Kulchinsky, na realização da placa interface utilizada neste trabalho, por ter fornecido os dois motores de indução trifásicos 4,0 kW utilizados neste trabalho, sendo que um deles foi rebobinado em especial por um dos Bobinadores da Lusonave, Fernando Penela. Um especial agradecimento ao Miguel Santos, Paula Santos e Eng^o Silva Santos pela flexibilidade que tiveram para comigo de modo a que houvesse sempre uma solução quando foi necessário a minha ausência da oficina e por ultimo agradeço pelo apoio, suporte, conselhos, conversas de corredor e acima de tudo a amizade demonstrada. Dentro de inumeras situações que poderia aqui citar, guardo comigo somente aquelas que o dinheiro não é capaz de comprar. Gostaria de deixar tambem um merecido agradecimento a equipa da produção da Lusonave pelo acompanhamento, ensinamentos, conselhos, sugestões, bons temas de conversas e debates, entre outros, ao decorrer deste trabalho. Deixo aqui escritos alguns nomes de modo a que eu nunca venha a me esquecer as pessoas que foram meus colegas e, em inumeras situações, meus tutores no inicio dessa caminhada no mundo da industria (Fernando Madeira, Carlos Alberto, Eng^o Pedro Maria, José Martins, Bruno Carrilho, Paulo Norton, Everaldo Caldeira, José Graça, Ricardo Amaral, Antonio Jorge, André Cardoso, Osair Sousa, Faredin Bechiarli e Aureliano Dias).

Aos meus amigos pessoais, Eng^o David Coelho, Wagner e familia, Lucas e Felipe (Ronaldinhos), João Romão (Vasco ou Vasquinho), João Romão e Leonor Romão, Dna Lourdes e Fernando, Nayston, Kesler e Kamilla, Tio Renato e Familia, Pastor Izac e Esposa, Pastor Otair e Esposa, Pastor Ezequiel e Esposa, entre outros, gostaria de vos agradecer por de uma maneira ou outra terem estado sempre presentes na minha vida, mesmo que não tenham contribuído diretamente para a concretização desta dissertação, tenho muito a agradecer ainda por todos bons momentos passados, por todas as palavras de amizade e incentivo, sugestões, conselhos e disponibilidade.

Agradecimentos

Aos meus Pais, Hebert Rocha, Marina Rocha e Maria Mendes, pela educação, valores, suporte, amor, carinho, afeto, compreensão, ensinamentos e amizade. A minha irmã Laila Dias, pelos conselhos, palavras de incentivo, afabilidade e puxões de orelha. Gostaria de poder conseguir pelo menos uma vez demonstrar a vocês o meu sentimento de gratidão e carinho.

Por ultimo, não menos importante, um agradecimento muito difícil de expressar, a minha família. A Francy, pelo carinho, amizade, compreensão, generosidade, incentivo e por muitas vezes ter servido de suporte nos momentos de grande dúvida, onde sinceramente em algumas situações estive a beira de desistir. Aos meus Filhos, Leonor e Pedro, pelo vosso amor e carinho que sempre desmonstraram de forma espontânea, ainda mais quando na maioria das vezes estive ausente devido a motivos profissionais. A vós beijinhos e abraços de um profundo reconhecimento.

PAULO CÉSAR MENDES SALATIEL



Resumo

Os variados setores da indústria, tendo por objetivo otimizar os processos de produção e evitar custos substanciais devido a perdas de produção não programadas, têm exigido que os setores relacionados com a manutenção dos equipamentos adotem medidas que estão inseridas no âmbito da manutenção preventiva. O Motor de Indução Trifásico representa de momento a máquina elétrica rotativa mais utilizada nos setores industriais. Deste modo, existe a necessidade de adotar sistemas de detecção e diagnóstico de avarias para este tipo de máquinas. O trabalho que irá ser desenvolvido nesta dissertação apresenta, como objetivo principal, propor técnicas de diagnóstico de avarias que têm por base o uso do quadrado do sinal da corrente elétrica estatórica. Através das diversas técnicas apresentadas será efetuado um estudo pormenorizado para se concluir, por um lado, qual a técnica que apresenta um conteúdo espectral com maior informação e, por outro, estabelecer o conceito de índice de severidade e ainda concluir qual técnica que apresenta a melhor relação entre o valor percentual da carga e este índice. Para a implementação experimental deste trabalho, foi desenvolvido um sistema de aquisição de sinais, assim como, foram modificados fisicamente motores, de modo a realizar ensaios em vazio e em carga que se aproximassem das situações de avaria real.

Palavras Chaves: Motores de Indução Trifásicos, Detecção e diagnóstico de Avarias, Sinal da corrente elétrica estatórica ao quadrado, Análise Espectral em Frequência

Abstract

Currently, the various sectors of industry to optimize production processes and avoid substantial costs to companies due to unscheduled production losses have required equipment maintenance sectors to adopt measures that fall within the scope of preventive maintenance. The Three-Phase Induction Motor currently represents the most widely used rotary electric machine in the industrial sectors. Thus, there is a need to adopt fault detection and diagnosis systems for this type of machines. The work that will be developed in this dissertation presents as main objective, to propose fault diagnosis techniques based on the use of the signal square. of the statistical electric current. Through the various techniques presented, a detailed study will be carried out to conclude, on the one hand, which technique has a spectral content with more information, on the other hand, to establish the concept of severity index and to conclude which technique has the best relation between the percentage value of the load and this index. For the implementation of this work, a signal acquisition system was developed, as well as motors that were physically modified to carry out electrical tests under load and nozzle that approached the actual fault situation.

Keywords: Three-Phase Induction Motor, Fault Detectios and diagnosis, Signal of electric current squared of stator, Frequency spectral analysis

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	viii
Abstract	ix
Índice	x
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Siglas e Acrônimos	xxii
Lista de Símbolos	xxiv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 – Preâmbulo.....	1
1.2 – Enquadramento / Objetivo.....	2
1.3 – Estrutura do Trabalho.....	4
Capítulo 2	6
Técnicas de Diagnóstico de Avarias para o Motor de Indução	6
2.1 Introdução.....	6
2.2 – Princípio de Funcionamento do Motor de Indução.....	7
2.3 – Aspectos Construtivos.....	12
○ 2.3.1 – Generalidades.....	12
○ 2.3.2 – Estator.....	13
○ 2.3.3 – Rotor.....	13
2.4 – Tipos de Avarias em Motores de Indução Trifásicos.....	17
○ 2.4.1 – Introdução.....	17
○ 2.4.2 – Avarias Relativas aos Rolamentos.....	18
○ 2.4.3 – Avarias Relativas ao Estator.....	22
○ 2.4.4 – Avarias Relativas ao Rotor.....	30
2.5 – Tipos de Técnicas para Diagnóstico de Avarias em <i>MI</i>	36
○ 2.5.1 – Introdução.....	36

○ 2.5.2 – Métodos Baseados em Modelos.....	38
○ 2.5.3 – Métodos Baseados em Reconhecimento de Padrões.....	41
○ 2.5.4 – Métodos Baseados na Análise Espectral em Frequência.....	48
○ 2.5.5 – MCSA – Métodos Baseados na Análise Espectral da Corrente Elétrica Estatórica	51
Capítulo 3.....	62
Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatórica.....	62
3.1 Introdução.....	62
3.2 – Análise Espectral do Quadrado da Corrente Elétrica Estatórica (MSCSA)	64
○ 3.2.1 - Avarias na Gaiola Rotórica	66
○ 3.2.2 - Excentricidade.....	70
○ 3.2.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator	74
3.3 – Análise Espectral da Soma do Quadrado das Correntes Elétricas Estatísticas (MSSCSA)	79
○ 3.3.1 - Avarias na Gaiola Rotórica	80
○ 3.3.2 - Excentricidade.....	82
○ 3.3.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator	85
3.4 – Técnicas de Análise Espectral das Correntes Elétricas Estatísticas no Sistema $\alpha\beta 0$	88
○ 3.4.1 - Análise Espectral do Sinal $(i\alpha * i\beta)$	91
○ 3.4.2 - Análise Espectral do Sinal $(i\alpha^2 + i\beta^2)$	102
3.5 – Técnica de Análise Espectral das Correntes Elétricas Estatísticas no Sistema $dq0$ – Sistema Convencional	110
○ 3.5.1 - Análise Espectral do Sinal $(id + iq)$	113
○ 3.5.2 - Análise Espectral do Sinal $(id^2 + iq^2)$	128
3.6 – Técnica de Análise Espectral das Correntes Elétricas Estatísticas no Sistema $dq0$ – Sistema Alternativo.....	137
○ 3.6.1 - Análise Espectral do Sinal $i'q$	140
○ 3.6.2 - Análise Espectral do Sinal $i'q^2$	147
3.7 – Resumo das Técnicas Apresentadas.....	179

Capítulo 4	183
Resultados Experimentais	183
4.1 Introdução.....	183
4.2 – Protótipo Desenvolvido.....	183
○ 4.2.1 – Simulações de Avarias na prática.....	186
○ 4.2.2 – Sistema de Aquisições.....	191
4.3 – Resultados Experimentais.....	193
○ 4.3.1 – Barras Fraturadas.....	193
○ 4.3.2 – Excentricidade.....	198
○ 4.3.3 – Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator.....	205
4.4 – Conclusões.....	219
Capítulo 5	221
Conclusões	221
5.1 – Considerações finais.....	221
5.2 – Proposta de Trabalhos Futuros.....	224
Bibliografia	225

Lista de Figuras

FIGURA 2. 1 - MODELO CONCEPTUAL DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO NO SEU ESTADO MAIS SIMPLES [2]	7
FIGURA 2. 2 - ESQUEMA SIMPLIFICADO REPRESENTATIVO DE UM 'MI' [1]	8
FIGURA 2. 3 - PARTES CONSTITUINTES DE UM 'MI' [8]	12
FIGURA 2. 4 - ESTATOR DE UM 'MI' INSERIDO NO INTERIOR DA CARÇAÇA [9].....	13
FIGURA 2. 5 - ASPECTO ILUSTRATIVO DAS BARRAS E ANÉIS CONDUTORES DE UM ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO (CURTO-CIRCUITO) [1]	14
FIGURA 2. 6 - ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO SIMPLES [10]	15
FIGURA 2. 7- IMAGEM REPRESENTATIVA DAS CHAPAS LÂMINADAS QUE COMPÕE O ROTOR EM DUPLA GAIOLA DE ESQUILO	15
FIGURA 2. 8 - ROTOR BOBINADO DE UM 'MI'	16
FIGURA 2. 9 - VERIFICAÇÃO DE EXCESSO DE LUBRIFICAÇÃO APÓS ABERTURA DO 'MI'	18
FIGURA 2. 10 - DIVERSAS FORMAS DE DESALINHAMENTO DOS ROLAMENTOS [12]	19
FIGURA 2. 11 - VISTA MICROSCÓPICA DA PISTA DE UM ROLAMENTO "PICADO" [13]	21
FIGURA 2. 12 - FENÓMENO DESIGNADO POR FLUTING [13]	21
FIGURA 2. 13 - ILUSTRAÇÃO DA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE FOUCAULT EM SITUAÇÃO DE BOM FUNCIONAMENTO [14].	27
FIGURA 2. 14 – ILUSTRAÇÃO DA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE FOUCAULT EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ENTRE CHAPAS DO NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO [14].....	28
FIGURA 2. 15 - TIPOS DE FALHAS NO ESTATOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO [ADAPTADO DE 17].....	29
FIGURA 2. 16 - ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO COM 2 BARRAS FRATURADAS (FIGURA À ESQUERDA) E UMA FRATURA NO ANEL TERMINAL (FIGURA À DIREITA) [19].....	31
FIGURA 2. 17 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DA DIREÇÃO RESULTANTE DA FORÇA UMP [39].....	32
FIGURA 2. 18 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS CENTROS DE ROTAÇÃO E GEOMÉTRICOS DO ESTATOR E DO ROTOR SEM A EXISTÊNCIA DE EXCENTRICIDADE	33
FIGURA 2. 19 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS CENTROS DE ROTAÇÃO E GEOMÉTRICOS DO ESTATOR E DO ROTOR NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE ESTÁTICA	34
FIGURA 2. 20 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS CENTROS DE ROTAÇÃO E GEOMÉTRICOS DO ESTATOR E DO ROTOR NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE DINÂMICA.....	34
FIGURA 2. 21 - MI COM CURTO-CIRCUITO NA FASE B E RESPECTIVO ESPIRA ADICIONAL AO ENROLAMENTO [24].....	40
FIGURA 2. 22 - ENSAIO TERMOGRÁFICO DE UM 'MI' COM GRANDE CAMADA DE SUJIDADE EM SUA SUPERFÍCIE [27]	42
FIGURA 2. 23 - ENSAIO TERMOGRÁFICO DE UM IM APÓS LIMPEZA/BENEFICIAÇÃO GERAL DO MESMO [27].....	42
FIGURA 2. 24 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA COMPONENTE IA EM FUNÇÃO DA COMPONENTE IB PARA UM MOTOR EM BOM ESTADO DE FUNCIONAMENTO [ADAPTADO DE 28]	43
FIGURA 2. 25 - ESTRUTURA ANN UTILIZADA PARA A DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FALTA DE FASE [31].....	45
FIGURA 2. 26 - LOCAIS DEFINIDOS PARA INSERÇÃO DOS SENSORES NA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES [AUTOR]	48
FIGURA 2. 27 - SENSORES DE FLUXO NO INTERIOR INSERIDOS NAS CAVAS DO MI EM CONJUNTO COM OS ENROLAMENTOS DO	

ESTATOR. SENSORES 1, 2 E 3 [38]	50
FIGURA 2. 28 - SISTEMA DE MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DO ESTATOR NA SUA VERSÃO BÁSICA [41]	51
FIGURA 2. 29 - REPRESENTAÇÃO DAS COMPONENTES ADICIONAIS DE FREQUÊNCIA NO CASO DA EXCENTRICIDADE ESTÁTICA [ADAPTADO DE 42]	55
FIGURA 2. 30 - REPRESENTAÇÃO DAS COMPONENTES ADICIONAIS DE FREQUÊNCIA NO CASO DA EXCENTRICIDADE ESTÁTICA E DINÂMICA [ADAPTADO DE 42]	56
FIGURA 2. 31 - IMAGEM ILUSTRATIVA DE UM ROLAMENTO TENDO EM CONTA OS SEUS PARÂMETROS PRINCIPAIS [43]	58
FIGURA 2. 32 - ASPECTO VISUAL DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR APÓS UM CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS [39]	60
FIGURA 3. 1 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA NA PRESENÇA DE AVARIA NA GAIOLA ROTÓRICA – TÉCNICA MSCSA	69
FIGURA 3. 2 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE – TÉCNICA MSCSA	73
FIGURA 3. 3 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS	78
FIGURA 3. 4 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA PRESENÇA DE BARRAS FRATURADAS	82
FIGURA 3. 5 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE	84
FIGURA 3. 6 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....	87
FIGURA 3. 7 - REPRESENTAÇÃO VETORIAL E GEOMÉTRICA DO SISTEMA DE COORDENADAS ABC E AB0 [48]	88
FIGURA 3.8 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS ABC	90
FIGURA 3. 9 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS AB0	90
FIGURA 3. 10 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTES 'IA' E 'IB' NA PRESENÇA DE AVARIA NA GAIOLA ROTÓRICA – TÉCNICA PVPA.....	94
FIGURA 3. 11 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTES 'IA' E 'IB' NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE – TÉCNICA PVPA.....	97
FIGURA 3. 12 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTES 'IA' E 'IB' NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS – TÉCNICA PVPA	101
FIGURA 3. 13 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES 'IA' E 'IB' NA PRESENÇA DE BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA SEPVA.....	104
FIGURA 3. 14 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES 'IA' E 'IB' NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE – TÉCNICA SEPVA.....	106
FIGURA 3. 15 -- ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES 'IA' E 'IB' NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS – TÉCNICA 'SEPVA'	109
FIGURA 3. 16 - REPRESENTAÇÃO VETORIAL E GEOMÉTRICA DO SISTEMA DE COORDENADAS AB E DQ [48]	110
FIGURA 3. 17 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS AB0 ...	112

FIGURA 3. 18 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS DQ0 ..	112
FIGURA 3. 19 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS DQ0 - 'A0' = 0º.....	115
FIGURA 3. 20 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS DQ0 - 'A0' = 30º	115
FIGURA 3. 21 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DAS CORRENTES 'ID' E 'IQ' NA PRESENÇA DE BARRAS FRATURADAS	116
FIGURA 3. 22 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DAS CORRENTES 'ID' E 'IQ' NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE - TÉCNICA 'SPTCA'	119
FIGURA 3. 23 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTE HOMOPOLAR NO SISTEMA DE COORDENADAS DQ0 - 'A0' = 30º	123
FIGURA 3. 24 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DAS CORRENTES 'ID' E 'IQ' NA PRESENÇA DE CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS - TÉCNICA 'SPTCA'	126
FIGURA 3. 25 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE 'IH' NA PRESENÇA DE CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS	127
FIGURA 3. 26 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES 'ID' E 'IQ' NA PRESENÇA DE BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA SSPTCA	131
FIGURA 3. 27 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES 'ID' E 'IQ' NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE – TÉCNICA SSPTCA	133
FIGURA 3. 28 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES 'ID' E 'IQ' NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS – TÉCNICA 'SSPTCA'	136
FIGURA 3. 29 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS DQ0 ..	139
FIGURA 3. 30 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO ESTATOR NO SISTEMA DE COORDENADAS DQ0' .	139
FIGURA 3. 31 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA CORRENTE I'Q NA PRESENÇA DE BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA 'DPTCA'	141
FIGURA 3. 32 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA CORRENTE I'Q NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE– TÉCNICA 'DPTCA'	143
FIGURA 3. 33 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA CORRENTE I'Q NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS– TÉCNICA 'DPTCA'	146
FIGURA 3. 34 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA CORRENTE I'Q2 NA PRESENÇA DE BARRAS FRATURADAS– TÉCNICA 'SDPTCA'	151
FIGURA 3. 35 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DA CORRENTE I'Q2 NA PRESENÇA DE EXCENTRICIDADE – TÉCNICA 'SDPTCA'	154
FIGURA 3. 36 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DO QUADRADO DA CORRENTE I'Q NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS – TÉCNICA 'SDPTCA'	177
FIGURA 3. 37 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL RESULTANTE DO QUADRADO DA CORRENTE I'Q NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS – TÉCNICA 'SDPTCA'	177

FIGURA 4. 1 - CHAPA DE CARACTERÍSTICAS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS....	184
FIGURA 4. 2 - CHAPA DE CARACTERÍSTICAS DO GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	185
FIGURA 4. 3 - MODIFICAÇÃO FÍSICA EFETUADO NAS BARRAS ROTÓRICAS DE MODO A SIMULAR A AVARIA DESIGNADA POR BARRAS FRATURADAS	186
FIGURA 4. 4 - ESQUEMA DE BOBINAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO EM USO	187
FIGURA 4. 5 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA BOBINE MODIFICADA DO PASSO POLAR 1 A 12, INSERIDA NA FASE U	188
FIGURA 4. 6 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA BOBINE MODIFICADA DO PASSO POLAR 1 A 12, INSERIDA NA FASE V	188
FIGURA 4. 7 - PLACA DE LIGAÇÕES INTERATIVA DO MOTOR DE INDUÇÃO MODIFICADO PARA SIMULAR CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS	189
FIGURA 4. 8 - RODA METÁLICA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO DA AVARIA DE EXCENTRICIDADE NA PRÁTICA – RODA EQUILIBRADA COM PARAFUSOS E PORCAS M10 DISTRIBUÍDO IGUALMENTE NA SUA PERIFERIA	190
FIGURA 4. 9 - RODA METÁLICA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO DA AVARIA DE EXCENTRICIDADE NA PRÁTICA – RODA DESEQUILIBRADA COM UM PESO SIGNIFICATIVO INSERIDO EM UM DOS LADOS.....	190
FIGURA 4. 10 - PLACA INTERFACE E RESPECTIVA LEGENDA (VISTA FRONTAL)	191
FIGURA 4. 11 - PLACA DE PROTEÇÃO UTILIZADA E RESPECTIVA LEGENDA (VISTA FRONTAL)	192
FIGURA 4. 12 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA SITUAÇÃO DE BARRAS FRATURADAS - EXPERIMENTAL .	194
FIGURA 4. 13 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA SITUAÇÃO DE BARRAS FRATURADAS – ZOOM A IMAGEM ANTERIOR	194
FIGURA 4. 14 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA MCSA	195
FIGURA 4. 15 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA MSCSA.....	195
FIGURA 4. 16 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA MSSCSA	195
FIGURA 4. 17 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTE ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB – BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA PVPA	195
FIGURA 4. 18 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS - AB BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA SEPVA.....	195
FIGURA 4. 19 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA SPTCA.....	195
FIGURA 4. 20 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA SSPTCA.....	196
FIGURA 4. 21 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVE - BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA DPTCA	196
FIGURA 4. 22 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVE - BARRAS FRATURADAS – TÉCNICA SDPTCA	196

FIGURA 4. 23 - VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE COM A PERCENTAGEM DE CARGA – BARRAS FRATURADAS.....	197
FIGURA 4. 24 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA SITUAÇÃO DE EXCENTRICIDADE- EXPERIMENTAL.....	198
FIGURA 4. 25 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA SITUAÇÃO DE EXCENTRICIDADE – ZOOM DA IMAGEM ANTERIOR	198
FIGURA 4. 26 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – EXCENTRICIDADE – TÉCNICA MCSA.....	200
FIGURA 4. 27 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – EXCENTRICIDADE – TÉCNICA MSCSA	200
FIGURA 4. 28 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – EXCENTRICIDADE – TÉCNICA MSSCSA.....	200
FIGURA 4. 29 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTE ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB – EXCENTRICIDADE – TÉCNICA PVPA.....	200
FIGURA 4. 30 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB - EXCENTRICIDADE – TÉCNICA SEPVA	201
FIGURA 4. 31 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - EXCENTRICIDADE – TÉCNICA SPTCA	201
FIGURA 4. 32 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - EXCENTRICIDADE – TÉCNICA SSPTCA.....	201
FIGURA 4. 33 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - EXCENTRICIDADE – TÉCNICA DPTCA.....	201
FIGURA 4. 34 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - EXCENTRICIDADE – TÉCNICA SDPTCA ..	201
FIGURA 4. 35 - VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE COM A PERCENTAGEM DE CARGA – EXCENTRICIDADE.....	202
FIGURA 4. 36 - VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE COM A PERCENTAGEM DE CARGA – EXCENTRICIDADE – ZOOM A IMAGEM ANTERIOR.....	203
FIGURA 4. 37 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS SEM A PRESENÇA DE AVARIAS - EXPERIMENTAL.....	206
FIGURA 4. 38 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10x ESPIRAS) - EXPERIMENTAL.....	206
FIGURA 4. 39 - SINAL DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICAS NA PRESENÇA DE CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40x ESPIRAS) - EXPERIMENTAL.....	206
FIGURA 4. 40 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA MCSA.....	207
FIGURA 4. 41 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA MCSA.....	207
FIGURA 4. 42 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA MSCSA.....	208
FIGURA 4. 43 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA MSCSA (ZOOM A FIGURA 4.42)	208

FIGURA 4. 44 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA MSCSA	208
FIGURA 4. 45 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA MSCSA (ZOOM A FIGURA 4.44)	208
FIGURA 4. 46 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA MSSCSA	209
FIGURA 4. 47 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA MSSCSA (ZOOM A FIGURA 4.46).....	209
FIGURA 4. 48 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA MSSCSA	209
FIGURA 4. 49 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA MSSCSA (ZOOM A FIGURA 4.48).....	209
FIGURA 4. 50 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTE ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA PVPA	210
FIGURA 4. 51 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTE ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA PVPA (ZOOM A FIGURA 4.50).....	210
FIGURA 4. 52 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTE ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA PVPA	210
FIGURA 4. 53 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO PRODUTO ENTRE AS CORRENTE ELÉTRICAS ESTATÓRICAS – SISTEMA DE COORDENADAS AB – CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA PVPA (ZOOM A FIGURA 4.52)....	210
FIGURA 4. 54 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS AB - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SEPVA	211
FIGURA 4. 55 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS AB - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SEPVA (ZOOM A FIGURA 4.54)	211
FIGURA 4. 56 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS AB - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SEPVA.....	211
FIGURA 4. 57 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS AB - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SEPVA (ZOOM A FIGURA 4.56)	211
FIGURA 4. 58 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SPTCA.....	212
FIGURA 4. 59 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SPTCA (ZOOM A FIGURA 4.58)	212
FIGURA 4. 60 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SPTCA.....	212
FIGURA 4. 61 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SPTCA (ZOOM A FIGURA 4.60)	212

FIGURA 4. 62 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SSPTCA.....	213
FIGURA 4. 63 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SSPTCA (ZOOM A FIGURA 4.62)	213
FIGURA 4. 64 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SSPTCA.....	213
FIGURA 4. 65 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA SOMA DO QUADRADO DAS CORRENTES ELÉTRICAS ESTATÓRICA – SISTEMA DE COORDENADAS DQ - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SSPTCA (ZOOM A FIGURA 4.64)	213
FIGURA 4. 66 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA DPTCA.....	214
FIGURA 4. 67 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA DPTCA (ZOOM A FIGURA 4.66)	214
FIGURA 4. 68 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA DPTCA.....	214
FIGURA 4. 69 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA DPTCA (ZOOM A FIGURA 4.68)	214
FIGURA 4. 70 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SDPTCA	215
FIGURA 4. 71 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SDPTCA (ZOOM Nº 1 A FIGURA 4.70).....	215
FIGURA 4. 72 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (10 ESPIRAS) – TÉCNICA SDPTCA (ZOOM Nº2 A FIGURA 4.70).....	215
FIGURA 4. 73 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SDPTCA.....	216
FIGURA 4. 74 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVO - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SDPTCA (ZOOM Nº1 A FIGURA 4.73).....	216
FIGURA 4. 75 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO SINAL DO QUADRADO DA CORRENTE ELÉTRICA ESTATÓRICA SEGUNDO O EIXO	

EM QUADRATURA – SISTEMA DE COORDENADAS DE PARK ALTERNATIVE - CURTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS (40 ESPIRAS) – TÉCNICA SDPTCA (ZOOM Nº2 A FIGURA 4.73).....	216
FIGURA 4. 76 - VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE COM A PERCENTAGEM DE CARGA – 10X ESPIRAS EM CURTO CIRCUITO	217
FIGURA 4. 77 - VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE COM A PERCENTAGEM DE CARGA - 40X ESPIRAS EM CURTO CIRCUITO	218

Lista de Tabelas

TABELA 2. 1 - FALHAS ASSOCIADAS AO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO NOS PONTOS PRINCIPAIS DE OCORRÊNCIA DE FALHA [17].	17
TABELA 3. 1 - RESUMO DAS COMPONENTES ADICIONAIS DE FREQUÊNCIAS, TENDO EM CONTA AS DIVERSAS TÉCNICAS APRESENTADAS, PARA OS TRÊS TIPOS DE AVARIAS ESTUDADOS	180
TABELA 4. 1 - ELEMENTOS DE BOBINAGEM DO MOTOR EM USO	187

Lista de Siglas e Acrônimos

ANN – *Artificial Neural Network – Rede neuronal Artificial*

BSF – *Ball Spin Frequency – Frequência referente aos corpos rolantes, rolamentos ou rolos*

BPFI – *Ball Pass Frequency Inner – Frequência referente a fricção dos corpos rolantes na pista interna do rolamento ou simplesmente defeito na pista interna do mesmo*

BPFO – *Ball Pass Frequency Outer – Frequência referente a fricção dos corpos rolantes na pista externa do rolamento ou simplesmente defeito na pista externa do mesmo*

CT – *Current Transformer – Transformador de Corrente*

DC – *Direct Current – Corrente Contínua*

DPTCA – *Derived Park Transformer Coordinate Approach – Técnica de diagnóstico e análise de avarias baseado no sinal da componente segundo o eixo em quadratura no sistema de coordenadas de Park Alternativo*

EPVA – *Extended of Park Vector Approach – Técnica de diagnóstico e análise de avarias baseado no sinal do módulo da raiz quadrada da soma das correntes elétricas estatóricas ao quadrado, segundo o sistema de coordenadas $\alpha\beta$*

FFT – *Fast Fourier Transform – Transformada rápida de Fourier*

FTF – *Fundamental Train Frequency – Frequência referente à gaiola do Rolamento*

FMM – *Força magnetomotriz*

MI – *Motor de Indução*

MCSA – *Motor Current Signature Analysis – Técnica de diagnóstico e análise de avarias baseado no sinal da corrente elétrica estatórica*

MSCSA – *Motor Square Current Signature Analysis – Técnica de diagnóstico e análise de avarias baseado no sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica*

MSSCSA – *Motor Sum of Square Currents Signature Analysis – Técnica de diagnóstico e análise de avarias baseado no sinal da soma do quadrado da corrente elétrica estatórica*

PC – *Principal Components – Componentes principais*

PCA – *Principal Components Analysis – Técnica de diagnóstico e análise de avarias baseado na análise das componentes principais*

PLL – *Phase Locked Loop – Circuito de sincronismo*

PVPA – *Park's Vector Product Approach* – Técnica de diagnóstico de avarias baseado no produto entre as correntes elétricas estatóricas, segundo o sistema de coordenadas $\alpha\beta$

Sb – *Side band* – Bandas laterais

SF – *Severity Fault* – Severidade da Falha ou Índice de Severidade

SDPTCA – *Square of Derived Park Transform Coordinates Approach* – Técnica de diagnóstico de avarias baseado no sinal resultante do quadrado da componente segundo o eixo em quadratura no sistema de coordenadas de Park Alternativo

SEPVA – *Square of Extended Park Vector Approach* – Técnica de diagnóstico de avarias baseado no sinal resultante da soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas, segundo o sistema de coordenadas dq

SPTCA – *Sum of the Park Transformer Coordinates* – Técnica de diagnóstico de avarias baseado no sinal resultante da soma das correntes elétricas estatóricas, segundo o sistema de coordenadas dq

SSPTCA – *Sum of the Square Park Transformer Coordinates* - Técnica de diagnóstico de avarias baseado no sinal resultante da soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas, segundo o sistema de coordenadas dq

UMP – *Unbalanced Magnetic Pull* – Somatório das forças distribuídas ao longo do perímetro do Rotor

VFD – *Variable Frequency Drives* – Variadores de Velocidade / Frequência

Lista de Símbolos

α_0	<i>Grandeza genérica referente ao ângulo inicial da componente fundamental do sinal das correntes elétricas do estator</i>
β	<i>Angulo de contacto (Graus °). Referente as características dimensionais de um Rolamento</i>
β_{lower} e β_{upper}	<i>Grandezas genéricas referente ao ângulo inicial das bandas laterais do sinal das correntes elétricas do estator, na situação de avaria</i>
η_{cc}	<i>Parâmetro de detecção referente ao curto circuito entre espiras. Relação entre o numero de espiras em curto circuito e o numero de espiras que compõe o enrolamento sem falha. Técnica de diagnóstico de avarias baseado na estimação de parâmetros</i>
η_0	<i>Parâmetro de detecção referente a barras fraturadas. Relação entre o numero de barras fraturadas e o numero total de barras do rotor</i>
θ_{cc}	<i>Parâmetro de localização da avaria referente ao curto circuito entre espiras. Ângulo em radianos entre o enrolamento que apresenta o curto circuito e o enrolamento da fase a. Técnica de diagnóstico de avarias baseado na estimação de parâmetro</i>
θ_0	<i>Parâmetro de localização da avaria referente a barras fraturadas. Ângulo em radianos entre o eixo da barra quebrada e o eixo da primeira fase do rotor. Técnica de diagnóstico de avarias baseado na estimação de parâmetros</i>
$\mathfrak{F}_a, \mathfrak{F}_b$ e \mathfrak{F}_c	<i>Forças magnetomotrizes pulsantes resultante da circulação de uma corrente elétrica sinusoidal nos enrolamentos da fase A, B e C de um motor de indução genérico</i>
\mathfrak{F}	<i>Força magnetomotriz resultante do somatório das forças magnetomotrizes pulsantes $\mathfrak{F}_a, \mathfrak{F}_b$ e \mathfrak{F}_c</i>
ω	<i>Velocidade angular mecânica, expressa em rad/s</i>
ω_1	<i>Velocidade angular elétrica, expressa em rad/s</i>
ω_r	<i>Velocidade angular do Rotor, expressa em rad/s</i>

A1A2, B1B2 e C1C2	<i>Enrolamentos das três fases de um Motor de Indução genérico</i>
B_d	<i>Diâmetro do corpo rolante (mm). Referente as características dimensionais de um Rolamento</i>
BR	<i>Numero de barras do rotor</i>
Cg_E e Cg_R	<i>Centro geométrico do Estator e Rotor, respetivamente</i>
Cr_R	<i>Centro de rotação do Rotor</i>
f_1	<i>Frequência da Rede. Componente fundamental do sinal da corrente elétrica do estator</i>
f_{bf}	<i>Grandeza genérica para representa as componentes adicionais de frequência que podem surgir no sinal da corrente elétricas do estator, no caso de avaria nos rolamentos</i>
f_{BPFO}	<i>Frequência referente a fricção dos corpos rolantes na pista externa do rolamento ou simplesmente defeito na pista externa do mesmo</i>
f_{BPFI}	<i>Frequência referente a fricção dos corpos rolantes na pista interna do rolamento ou simplesmente defeito na pista interna do mesmo</i>
f_{BSF}	<i>Frequência referente aos corpos rolantes, esferas ou rolos</i>
f_c	<i>Frequência Central correspondente ao resultado da multiplicação entre o numero de barras do rotor e o valor da frequência fundamental das correntes do estator. Esta grandeza está inserida no estudo da técnica MCSA no caso da excentricidade.</i>
f_{exc_mista}	<i>Grandeza genérica correspondente as componentes adicionais de frequência que podem surgir no sinal da corrente elétrica do estator no caso de excentricidade. Neste caso, considera-se que a excentricidade estática e dinâmica ocorrem em simultâneo</i>
f_{ef}	<i>Grandeza genérica correspondente as componentes adicionais de frequência que podem surgir no sinal da corrente elétrica do estator no caso de excentricidade. Através desta grandeza é possível calcular em separado as componentes referentes a excentricidade estática e dinâmica</i>
f_{FTF}	<i>Frequência referente à gaiola do rolamento</i>
fmm_a, fmm_b e fmm_c	<i>Forças magnetomotrizes originadas pelo eixo dos enrolamentos A1A2, B1B2 e C1C2 de um motor de indução genérico</i>

f_{sb}	<i>Grandeza genérica correspondente as componentes adicionais de frequência que surgem no sinal da corrente elétrica do estator no caso de barras fraturadas</i>
f_{sf}	<i>Grandeza genérica correspondente as componentes adicionais de frequência que surgem no sinal da corrente elétrica do estator no caso de curto circuito entre espiras</i>
f_r	<i>Frequência de rotação do Rotor</i>
f_v	<i>Grandeza genérica corresponde as componentes adicionais de frequência que surgem no sinal da vibração mecânica no caso de avarias nos Rolamentos</i>
$I_{\alpha\beta 0}$	<i>Vetor das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas $\alpha\beta$, após a aplicação da transformação de Clarke Concordia</i>
i_α e i_β ou $i_{\alpha_NoFault}$ e $i_{\beta_NoFault}$	<i>Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de ausência de avaria. Sistema de coordenadas $\alpha\beta$</i>
$i_{\alpha_BrokenBar}$ e $i_{\beta_BrokenBar}$	<i>Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de barras fraturadas. Sistema de coordenadas $\alpha\beta$</i>
$i_{\alpha_Eccentricity}$ e $i_{\beta_Eccentricity}$	<i>Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de excentricidade. Sistema de coordenadas $\alpha\beta$</i>
$i_{\alpha_Interturns}$ e $i_{\beta_Interturns}$	<i>Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de curto circuito entre espiras. Sistema de coordenadas $\alpha\beta$</i>
i_a, i_b e i_c	<i>Valor instantâneo das correntes elétricas que percorrem os enrolamentos A1A2, B1B2 e C1C2, referente ao motor de indução genérico</i>

I_{dq0}	Vetor das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas dq, após a aplicação da transformação de Blondel Park
i_d, i_q, i_h ou $i_{dNoFault}, i_{qNoFault}$ e $i_{hNoFault}$	Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de ausência de avaria. Sistema de coordenadas dq0
i'_d, i'_q ou $i'_{dNoFault}, i'_{qNoFault}$	Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de ausência de avaria. Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0'
$i_{dBrokenBar}, i_{qBrokenBar}$ e $i_{hBrokenBar}$	Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de de barras fraturadas. Sistema de coordenadas dq0
$i_{dEccentricity}, i_{qEccentricity}$ e $i_{hEccentricity}$	Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de excentricidade. Sistema de coordenadas dq0
$i_{dInterturns}, i_{qInterturns}$ e $i_{hInterturns}$	Sinais das correntes elétricas do estator, na situação de curto circuito entre espiras. Sistema de coordenadas dq0
I_d, I_i e I_h	Correntes do estator referentes a três componentes simétricas. Componentes direta, inversa e homopolar
$i_{DPTCABrokenBar}$	Sinal resultante da aplicação da técnica DPTCA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')
$i_{DPTCAEccentricity}$	Sinal resultante da aplicação da técnica DPTCA na situação de excentricidade, ou também, sinal da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')
$i_{DPTCAInterturns}$	Sinal resultante da aplicação da técnica DPTCA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de curto circuito entre espiras (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')
$I_{m\acute{a}x}$	Amplitude máxima da componente fundamental do sinal das correntes elétricas do estator
$I_{m\acute{a}x_{cc}}$	Amplitude máxima da componente fundamental do sinal da corrente elétrica do estator respeitante a fase que se encontra com um curto circuito entre espiras

$I_{m\acute{a}x_{lower}}$ e $I_{m\acute{a}x_{upper}}$	<i>Amplitudes máximas das bandas laterais do sinal das correntes elétricas do estator, na situação de avaria</i>
$I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}$ e $I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}$	<i>Amplitude máxima das bandas laterais do sinal da corrente elétrica do estator respeitante a fase que se encontra com um curto circuito entre espiras</i>
$\dot{i}_{MSCSA_{NoFault}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica MSCSA na situação de ausencia de avaria, ou também, sinal da corrente elétrica do estator elevada ao quadrado na situação de ausencia de avaria (Sistema de coordenadas abc)</i>
$\dot{i}_{MSCSA_{BrokenBar}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica MSCSA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal da corrente elétrica do estator elevada ao quadrado na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas abc)</i>
$\dot{i}_{MSCSA_{Eccentricity}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica MSCSA na situação de excentricidade, ou também, sinal da corrente elétrica do estator elevada ao quadrado na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas abc)</i>
$\dot{i}_{MSCSA_{Interturns}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica MSCSA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal da corrente elétrica do estator elevada ao quadrado na situação de curto circuito entre espiras (Sistema de coordenadas abc)</i>
$\dot{i}_{MSSCSA_{NoFault}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica MSSCSA na situação de ausencia de avaria, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de ausencia de avaria (Sistema de coordenadas abc)</i>

$i_{MSSCSA_{BrokenBar}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica MSSCSA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas abc)
$i_{MSSCSA_{Eccentricity}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica MSSCSA na situação de excentricidade, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas abc)
$i_{MSSCSA_{Interturns}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica MSSCSA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de curto circuito entre espiras (Sistema de coordenadas abc)
$i_{PVPA_{NoFault}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica PVPA na situação de ausência de avaria, ou também, sinal do produto entre as correntes elétricas do estator na situação de ausência de avaria (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
$i_{PVPA_{BrokenBar}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica PVPA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal do produto entre as correntes elétricas do estator na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
$i_{PVPA_{Eccentricity}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica PVPA na situação de excentricidade, ou também, sinal do produto entre as correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
$i_{PVPA_{Interturns}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica PVPA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal do produto entre as correntes elétricas do estator na situação de curto circuito entre espiras (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
I_{s_abc}	Vetor das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas abc
is_a, is_b e is_c	Sinais das correntes elétricas do estator das três fases, na situação de ausência de avaria. Sistema de coordenadas abc
$is_{a_{BB}}, is_{b_{BB}}$ e $is_{c_{BB}}$	Sinais das correntes elétricas do estator das três fases, na situação de barras fraturadas. Sistema de coordenadas abc
$is_{a_{ecc}}, is_{b_{ecc}}$ e $is_{c_{ecc}}$	Sinais das correntes elétricas do estator das três fases, na situação de excentricidade. Sistema de coordenadas abc
$is_{a_{interturns}}, is_{b_{interturns}}$ e $is_{c_{interturns}}$	Sinais das correntes elétricas do estator das três fases, na situação de curto circuito entre espiras. Sistema de coordenadas abc

$i_{SDPTCA_{NoFault}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SDPTCA na situação de ausência de avaria, ou também, sinal do quadrado da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de ausência de avaria (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')</i>
$i_{SDPTCA_{BrokenBar}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SDPTCA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal do quadrado da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')</i>
$i_{SDPTCA_{Eccentricity}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SDPTCA na situação de excentricidade, ou também, sinal do quadrado da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')</i>
$i_{SDPTCA_{Interturns}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SDPTCA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal do quadrado da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura na situação de curto circuito entre espiras (Sistema de coordenadas de Park alternativa dq0')</i>
$i_{SEPVA_{NoFault}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SEPVA na situação de ausência de avaria, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de ausência de avaria (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)</i>

$i_{SEPVA_{BrokenBar}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SEPVA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
$i_{SEPVA_{Eccentricity}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SEPVA na situação de excentricidade, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
$i_{SEPVA_{Interturns}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SEPVA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas $\alpha\beta$)
$i_{SPTCA_{NoFault}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SPTCA na situação de ausência de avaria, ou também, sinal da soma das correntes elétricas do estator na situação de ausência de avaria (Sistema de coordenadas dq)
$i_{SPTCA_{BrokenBar}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SPTCA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal da soma das correntes elétricas do estator na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas dq)
$i_{SPTCA_{Eccentricity}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SPTCA na situação de excentricidade, ou também, sinal da soma das correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas dq)
$i_{SPTCA_{Interturns}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SPTCA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal da soma das correntes elétricas do estator na situação de curto circuito entre espiras (Sistema de coordenadas dq)
$i_{SSPTCA_{NoFault}}$	Sinal resultante da aplicação da técnica SSPTCA na situação de ausência de avaria, ou também, sinal da soma do quadrado das

	<i>correntes elétricas do estator na situação de ausência de avaria (Sistema de coordenadas dq)</i>
$i_{SSPTCA_{BrokenBar}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SSPTCA na situação de barras fraturadas, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de barras fraturadas (Sistema de coordenadas dq)</i>
$i_{SSPTCA_{Eccentricity}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SSPTCA na situação de excentricidade, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas dq)</i>
$i_{SSPTCA_{Interturns}}$	<i>Sinal resultante da aplicação da técnica SSPTCA na situação de curto circuito entre espiras, ou também, sinal da soma do quadrado das correntes elétricas do estator na situação de excentricidade (Sistema de coordenadas dq)</i>
M	<i>Matriz de transformação de Clarke Concordia</i>
N_{bb}	<i>Numero de corpos rolantes. Referente as características dimensionais de um Rolamento</i>
n_d	<i>Ordem da excentricidade</i>
n_e	<i>Numero de espiras de cada enrolamento do Motor de indução genérico</i>
N_{mec} e N_s	<i>Velocidade angular mecânica (Velocidade real do rotor) e velocidade angular elétrica (Velocidade do campo girante), respetivamente. Estas grandezas se expressam em rpm's</i>
NP	<i>Numero de pares de pólos da máquina</i>
n_{sat}	<i>Valor associado ao modelo de saturação magnética. Esta grandeza está inserida no cálculo das componentes adicionais de frequência no caso da excentricidade</i>
P	<i>Matriz de transformação de Blondel Park</i>
P'	<i>Matriz da Transformada alternativa de Park</i>
P_d	<i>Diâmetro Primitivo (mm). Referente as características dimensionais de um Rolamento</i>

R_e e R_r	Raio do estator e raio do rotor, respetivamente
s	Escorregamento. Resultado da diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade real do rotor, a dividir pela velocidade do campo girante.
$SF_{DPTCA_{BrokenBar}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica DPTCA na situação de barras fraturadas
$SF_{DPTCA_{Eccentricity}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica DPTCA na situação de excentricidade
$SF_{DPTCA_{Interturns}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica DPTCA na situação de curto circuito entre espiras
$SF_{MSCSA_{BrokenBar}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica MSCSA na situação de barras fraturadas
$SF_{MSCSA_{Eccentricity}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica MSCSA na situação de excentricidade
$SF_{MSCSA_{Interturns}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica MSCSA na situação de curto circuito entre espiras
$SF_{MSSCSA_{BrokenBar}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica MSSCSA na situação de barras fraturadas
$SF_{MSSCSA_{Eccentricity}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica MSSCSA na situação de excentricidade
$SF_{MSSCSA_{Interturns}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica MSSCSA na situação de curto circuito entre espiras
$SF_{PVPA_{BrokenBar}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica PVPA na situação de barras fraturadas
$SF_{PVPA_{Eccentricity}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica PVPA na situação de excentricidade
$SF_{PVPA_{Interturns}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica PVPA na situação de curto circuito entre espiras
$SF_{SDPTCA_{BrokenBar}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SDPTCA na situação de barras fraturadas
$SF_{SDPTCA_{Eccentricity}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SDPTCA na situação de excentricidade
$SF_{SDPTCA_{Interturns}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SDPTCA na situação de curto circuito entre espiras
$SF_{SEPVA_{BrokenBar}}$	Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SEPVA na situação de barras fraturadas

$SF_{SEPVA_{Eccentricity}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SEPVA na situação de excentricidade</i>
$SF_{SEPVA_{Interturns}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SEPVA na situação de curto circuito entre espiras</i>
$SF_{SPTCA_{BrokenBar}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SPTCA na situação de barras fraturadas</i>
$SF_{SPTCA_{Eccentricity}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SPTCA na situação de excentricidade</i>
$SF_{SPTCA_{Interturns}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SPTCA na situação de curto circuito entre espiras</i>
$SF_{SSPTCA_{BrokenBar}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SSPTCA na situação de barras fraturadas</i>
$SF_{SSPTCA_{Eccentricity}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SSPTCA na situação de excentricidade</i>
$SF_{SSPTCA_{Interturns}}$	<i>Índice de severidade no caso da aplicação da técnica SSPTCA na situação de curto circuito entre espiras</i>
square	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do primeiro paretensis da expressão (3.97), ou, primeira parcela da expressão 3.98</i>
sum1	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do segundo paretensis da expressão (3.97), ou, segunda parcela da expressão 3.98</i>
sum2	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do terceiro paretensis da expressão (3.97), ou, terceira parcela da expressão 3.98</i>
sum3	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do quarto paretensis da expressão (3.97), ou, quarta parcela da expressão 3.98</i>
sum4	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do quinto paretensis da expressão (3.97), ou, quinta parcela da expressão 3.98</i>
sum5	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do sexto paretensis da expressão (3.97), ou, sexta parcela da expressão 3.98</i>
sum6	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do sétimo paretensis da expressão (3.97), ou, sétima parcela da expressão 3.98</i>
sum7	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do oitavo paretensis da expressão (3.97), ou, oitava parcela da expressão 3.98</i>
sum8	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do nono paretensis da expressão (3.97), ou, nona parcela da expressão 3.98</i>
sum9	<i>Grandeza correspondente a conteúdo do décimo paretensis da</i>

	<i>expressão (3.97), ou, décima parcela da expressão 3.98</i>
<i>t</i>	<i>Tempo expresso em segundos</i>
<i>U_d, U_i e U_h</i>	<i>Tensões referentes a três componentes simétricas. Componentes direta, inversa e homopolar</i>
<i>v</i>	<i>Ordem da harmônica da tensão de alimentação</i>
<i>Z_{dd}, Z_{di}</i>	<i>Componentes da matriz de impedâncias próprias e mutuas, referente as componentes simétricas</i>
<i>Z_{dh}, Z_{id}</i>	
<i>Z_{ii}, Z_{ih}</i>	
<i>Z_{hd}, Z_{hi}, Z_{hh}</i>	

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Preâmbulo

Atualmente os Sistemas Eletromecânicos são considerados de grande importância a nível industrial e inserido neste âmbito existem às máquinas elétricas rotativas que produzem maioritariamente a força motriz. Em destaque pode se apresentar a máquina de indução trifásica, na sua utilização como motor.

Como qualquer outro equipamento, a máquina de indução está sujeita a situações de avaria. Assim, deverá ter-se em conta que perante uma situação de avaria, em muitas aplicações, não deve ser posto em causa o sistema de produção, pois a não operacionalidade de uma máquina poderá trazer custos substanciais à empresa. Por outro lado, as condições de funcionamento da máquina não se devem degradar ao ponto das consequências que advém de uma avaria poderem causar a perda total da mesma ou causar danos a outras máquinas que se encontrem a operar junto desta.

A evolução tecnológica trouxe, com efeito, a facilidade da execução de diversas tarefas que até então eram extremamente difíceis de executar sem as ferramentas adequadas, pelo que quando o homem iniciou o manuseamento de equipamentos, a manutenção emergiu quando as primeiras fábricas sentiram a necessidade da criação de equipas que efetuassem as reparações necessárias no menor tempo possível, sendo estas reparações efetuadas apenas quando o equipamento estivesse totalmente fora de serviço. Com o desenrolar dos anos, foram criadas outras técnicas de manutenção visando diminuir o tempo de não operacionalidade de determinada máquina e a não degradação substancial da mesma.

As equipas de manutenção estavam preparadas tecnicamente para realizar as reparações de todos os equipamentos da fábrica, sendo estas intervenções efetuadas no âmbito da eletricidade, mecânica, pneumática e hidráulica. Por outras palavras, as equipas de manutenção estavam altamente preparadas para intervencionar os equipamentos em qualquer ramo de reparação, porém, nos tempos presentes, de modo a diminuir custos à empresa, existe

a necessidade de se ter uma atitude pró ativa. Para contornar a não operacionalidade de uma determinada linha de produção existem equipamentos de reserva que possibilitam que a intervenção em determinados equipamentos sejam realizadas externamente com ausência de pressões associadas ao tempo de reparação e sem que haja custos associados a paragens não programadas. Neste sentido, a monitorização para deteção e diagnóstico de avarias nos acionamentos dos equipamentos é de suma importância para que em paragens programadas, a sua substituição seja realizada em curtos períodos de tempo.

1.2 – Enquadramento / Objetivo

Atualmente, as exigências dos responsáveis de produção visam a que o departamento de manutenção efetue as diversas intervenções sem que haja perdas excessivas de produção devido a situações de avarias não programadas.

A partir do momento em que houve a necessidade de reduzir ao máximo o tempo de não operacionalidade de uma determinada linha de produção, emergiram diversas técnicas de diagnóstico de avarias dos motores elétricos, sendo estas utilitárias de diversas grandezas elétricas, mecânicas ou magnéticas relacionadas com a máquina rotativa. Dentro das técnicas de diagnóstico utilizadas, pode-se destacar a ‘MCSA’ (“*Motor Current Signature Analysis*”) que faz uso do sinal da corrente elétrica estatórica. Esta baseia-se na análise do espectro de frequências da referida corrente, ou seja, na análise das componentes adicionais de frequências que surgem na situação de avaria. Este método de diagnóstico de avarias, apesar de se encontrar profundamente estudado, apresenta diversas limitações, pelo que, diversos investigadores da área desenvolveram novas técnicas que têm por base a técnica ‘MCSA’.

Neste contexto, esta dissertação tem por base uma técnica de diagnóstico de avarias em motores de indução, desenvolvida recentemente e designada por ‘MSCSA’ (“*Motor Square Current Signature Analysis*”), na qual se faz uso do sinal resultante do quadrado da corrente elétrica estatórica. Como poderá ser visto nesta dissertação, esta técnica veio trazer diversas vantagens no que diz respeito à quantidade de informação espectral, assim como melhores sensibilidades das principais componentes adicionais de frequências associadas a cada avaria. Assim, o objetivo desta dissertação é apresentar um estudo pormenorizado acerca de técnicas de diagnósticos de avarias que surgem no seguimento da técnica ‘MSCSA’. Este

estudo irá realizar operações matemáticas entre as correntes elétricas estatóricas na sua forma simples e o quadrado da corrente em diversos sistemas de coordenadas. As razões deste estudo vai ao encontro da análise quantitativa das técnicas apresentadas, nomeadamente a quantiicação do conteúdo espectral em cada tipo de avaria (dando a conhecer as localizações das componentes adicionais de frequência), e à análise qualitativa, relativamente à relação entre a amplitude das componentes de frequências específicas e as respetivas amplitudes das componentes fundamentais dos sinais em estudo.

1.3 – Estrutura do Trabalho

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, com o objetivo de abordar todo o trabalho desenvolvido de uma forma sequencial e lógica, para que o leitor possa encontrar uma escrita que seja de fácil leitura e compreensão. Em seguida, apresenta-se o resumo do conteúdo de cada capítulo:

- Capítulo 1 – Introdução – Na introdução encontra-se inserido o preâmbulo, que introduz o tema principal, o enquadramento / objetivos, que enquadra o tema em um determinado âmbito, assim como, dá a conhecer os respetivos objetivos do trabalho desenvolvido, e a estrutura do trabalho, que mostra como efetivamente a dissertação se encontra organizada;
- Capítulo 2 – Técnicas de diagnóstico de avarias para o motor de indução – Este capítulo, numa primeira parte, faz a descrição pormenorizada do motor de indução trifásico, dando a conhecer o seu princípio de funcionamento, assim como a descrição dos aspetos construtivos da máquina. Numa segunda parte, é dado a conhecer o estado da arte, no que respeita às diversas técnicas de diagnóstico existentes, mais relevantes, dando a conhecer as principais vantagens e desvantagens da aplicação de cada técnica;
- Capítulo 3 – Análise Espectral baseada no quadrado da corrente elétrica estatórica – Neste capítulo é apresentado numa primeira fase, a técnica 'MSCSA' que irá servir de base para todo o estudo e desenvolvimento realizado. A partir deste estudo serão dadas a conhecer diversas técnicas que poderão ser derivadas desta primeira. Tanto no primeiro caso como nos outros, será dado a conhecer as expressões matemáticas dos sinais resultantes da aplicação de cada técnica, o respetivo espectro de frequências, assim como a expressão para o cálculo do índice de severidade. O capítulo termina com o resumo das diversas componentes de frequências, que surgem, tendo em conta as avarias estudadas, na sequência da aplicação das técnicas de diagnóstico apresentadas;

- Capítulo 4 – Resultados Experimentais – Este capítulo, numa primeira parte, apresenta todo o trabalho desenvolvido na prática, nomeadamente, a máquina de indução escolhida para se efetuar os ensaios, as modificações físicas que foram realizadas para se simular as avarias em estudo e, por último, o protótipo desenvolvido que serviu de base para a aquisição do sinal das correntes elétricas estatóricas das três fases. Numa segunda parte é apresentado, para cada tipo de avaria em estudo, o resultado referente aos espectros de frequências dos sinais resultantes da aplicação de cada técnica, de forma a possibilitar a comparação dos mesmos. É ainda apresentado, para cada tipo de avaria, o gráfico que relaciona o valor percentual de carga com o índice de severidade, sendo que neste gráfico estão inseridos os resultados respeitantes a todas as técnicas estudadas. Este gráfico possibilita comparar as diversas técnicas a nível da variação do índice de severidade com a carga, assim como concluir qual a técnica que apresenta uma maior sensibilidade espectral;
- Capítulo 5 – Conclusão – Neste capítulo são dadas a conhecer as diversas conclusões que foram extraídas com a execução deste trabalho. Também é apresentado um subcapítulo que irá dar a conhecer as possibilidades de trabalhos futuros que poderão servir de seguimento da dissertação apresentada.

Capítulo 2

Técnicas de Diagnóstico de Avarias para o Motor de Indução

2.1 Introdução

O conceito de diagnóstico de avarias emergiu quando foi criado o conceito de Manutenção Preditiva, também denominada por condicionada, sendo que este tipo de técnica apresenta-se como uma evolução da Manutenção Preventiva ou Periódica, onde os equipamentos eram retirados de serviço e reparados em intervalos de tempo pré-programados. No caso da Manutenção Preditiva existe a necessidade de monitoramento contínuo de determinado equipamento de modo a que este seja retirado de serviço apenas quando for justificado, pelo que as ações de reparação poderão ser planeadas de acordo com a disponibilidade das equipas de manutenção e recursos [1].

Atualmente, existe uma nova ideia de Manutenção, sendo esta denominada por Manutenção Inteligente ou Pró-Ativa, pelo que esta nova vertente veio complementar as técnicas de intervenção já existentes, na medida em que a aplicação da mesma possibilita a redução da equipa de manutenção, uma diminuição do risco de paragens aleatórias do sistema de produção devido a falhas imprevisíveis, a previsão do tempo de vida útil de determinado equipamento e por fim, a possibilidade de prever o tempo de ocorrência de uma falha.

Um sistema de diagnóstico inteligente, representa uma ferramenta que é capaz de analisar uma determinada avaria, e, deste modo, apresentar uma ação a realizar, com a mesma inteligência e minuciosidade que um Perito ou Técnico altamente qualificado. Em muitos casos, os Sistemas Inteligentes apresentam-se como um complemento que irá servir para auxiliar uma determinada decisão [2]. No seu estado mais simples, um Sistema de Diagnóstico pode ser apresentado através do seu Modelo conceptual de acordo com a imagem da figura 2.1.

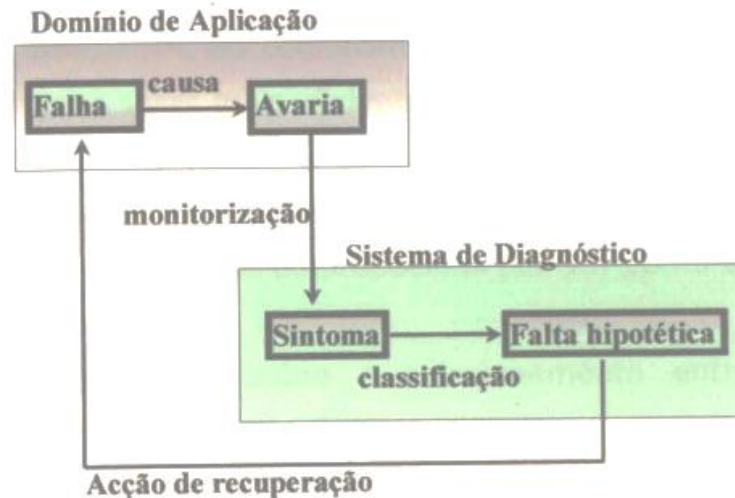


Figura 2. 1 - Modelo Conceitual do Sistema de Diagnóstico no seu Estado mais Simples [2]

2.2 – Princípio de Funcionamento do Motor de Indução

O Motor de Indução Trifásico (*MI*), também designado por Motor Assíncrono Trifásico, é uma máquina elétrica rotativa que recebe energia elétrica através de uma fonte de alimentação alternada sinusoidal trifásica e disponibiliza no seu veio energia mecânica. O surgimento do primeiro Motor de Indução aconteceu com Nikola Tesla em 1883 na cidade de Estrasburgo, França, sendo que este registou a patente apenas em 1888 [3].

A análise ao princípio de funcionamento do *MI* poderá ser realizada através de uma abordagem mais analítica. Para tal é necessário o estudo relativamente à origem do campo magnético girante inserido no interior do *MI*, e isso poderá ser demonstrado tendo por princípio a análise do conceito de força magnetomotriz (*FMM*), que corresponde, se for tido em conta um enrolamento isolado, ao produto entre o número de espiras e a corrente que circula por esse enrolamento. A *FMM* em um circuito magnético é responsável pela existência do fluxo magnético.

Como poderá ser visualizado em [5], ao analisarmos um enrolamento elementar com um certo número de espiras e percorrido por uma corrente, poder-se-à concluir que ao longo da periferia do entreferro existirá uma distribuição da *FMM* que está dependente da posição angular ' θ '. Por outras palavras, esta distribuição de *FMM* poderá ser vista como uma função que relaciona uma componente resultante da circulação de uma corrente, por um enrolamento com um determinado número de espiras, com a posição angular. Esta função,

por sua vez, apresenta uma forte componente sinusoidal desde que o enrolamento tenha uma distribuição sinusoidal.

Tal como o próprio nome indica o 'MI' apresenta-se como uma máquina elétrica que tem no circuito elétrico do estator três enrolamentos que irão compor as fases do motor. Os eixos magnéticos destes enrolamentos encontram-se espacialmente desfasados de 120° (figura 2.2) e os mesmos são alimentados por um sistema trifásico de tensões, de igual modo desfasados de 120° , em termos temporais. Sendo assim, existe um duplo desfasamento, um de natureza espacial e outro temporal. O circuito rotórico é composto, no caso do Rotor em Gaiola de Esquilo, por um circuito elétrico polifásico em que os condutores se encontram adequadamente curto-circuitados [4].

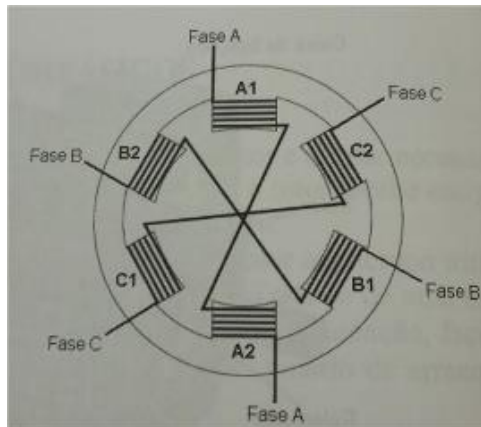


Figura 2. 2 - Esquema Simplificado Representativo de um 'MI' [1]

No caso do 'MI' qualquer ponto genérico do entreferro irá ter a influência de três enrolamentos, sendo estes A1A2, B1B2 e C1C2 no caso da figura 2.2. Cada um destes enrolamentos ao ser percorrido por uma corrente elétrica sinusoidal irá dar origem a uma 'FMM' pulsante que estará dependente do tempo, devido a natureza sinusoidal da corrente elétrica que o percorre, e estará dependente do espaço, devido à distribuição sinusoidal do enrolamento. Nas expressões (2.1), (2.2) e (2.3), poderá ser visualizada a expressão para a 'FMM' pulsante para cada fase do 'MI'.

$$\mathfrak{F}_a = fmm_a * \cos(\theta) \quad (2.1)$$

$$\mathfrak{F}_b = fmm_b * \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.2)$$

$$\mathfrak{F}_c = fmm_c * \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

Na expressões (2.1), (2.2) e (2.3), ' fmm_a ', ' fmm_b ' e ' fmm_c ' representam as forças magnetomotrizes originadas no eixo dos enrolamentos A1A2, B1B2 e C1C2 (Ver imagem da figura 2.2). Estas ' FMM 's por sua vez são função do número de espiras de cada enrolamento e a respetiva corrente que circula em cada enrolamento. Tendo em conta que os enrolamentos apresentam o mesmo número de espiras e são percorridos por uma sistema trifásico de correntes com a mesma amplitude mas desfasados de 120° entre si, nas expressões (2.4), (2.5) e (2.6) poderá ser visualizado as ' FMM 's originada nos eixos dos enrolamentos.

$$fmm_a = n_e * i_a * \cos(\omega t) = F_{m\acute{a}x} * \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

$$fmm_b = n_e * i_b * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = F_{m\acute{a}x} * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

$$fmm_c = n_e * i_c * \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = F_{m\acute{a}x} * \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

Nas expressões (2.4), (2.5) e (2.6), n_e representa o número de espiras de cada enrolamento, sendo que idealmente é considerado igual nos três enrolamentos, $F_{m\acute{a}x}$ representa a amplitude máxima da força magnetomotriz produzida por cada enrolamento, que devido às razões anteriormente apresentadas, também é considerado igual para as três fases. Deste modo, as expressões (2.1), (2.2) e (2.3) poderão ser reescritas e dar origem às expressões (2.7), (2.8) e (2.9).

Capítulo 2 – Técnicas de Diagnóstico de Avarias para o Motor de Indução

$$\mathfrak{S}_a = F_{m\acute{a}x} * \cos(\omega t) * \cos(\theta) \quad (2.7)$$

$$\mathfrak{S}_b = F_{m\acute{a}x} * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) * \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.8)$$

$$\mathfrak{S}_c = F_{m\acute{a}x} * \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) * \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.9)$$

Sendo assim, em um ponto genérico, a f.m.m. resultante da contribuição dos três enrolamentos será a soma das f.m.m. criadas por cada enrolamento isoladamente, pelo que o seu valor poderá se calculado através da expressão (2.10).

$$\mathfrak{S} = \frac{3}{2} * F_{m\acute{a}x} * \cos(\theta - \omega t) \quad (2.10)$$

Ao analisar a expressão (2.10) poder-se-à concluir que em um ponto genérico o valor da f.m.m. resultante apresenta um comportamento sinusoidal, tendo um valor máximo quando ' $\cos(\theta - \omega t)$ ' for igual à unidade. Por outro lado, se fosse possível tirar uma fotografia ao interior da máquina, ou seja, se o valor do tempo for fixo o que era possível visualizar seria uma onda sinusoidal ao longo do entreferro. Sendo assim, pode-se concluir que existe um campo magnético girante onde o valor máximo da f.m.m. gira a uma velocidade angular ' ω ' [5]. A velocidade deste campo magnético girante é denominada por velocidade de sincronismo. Esta velocidade de sincronismo está dependente da frequência da rede e pode também ser denominada por velocidade angular elétrica. Em funcionamento como motor, a velocidade de rotação do rotor da máquina de indução pode ser encontrada se ao valor da velocidade angular elétrica for subtraído o valor da velocidade de escorregamento, tendo em consideração o número de pares de pólos. Através da velocidade de escorregamento poderá se definir o conceito de escorregamento, sendo que este poderá ser encontrado ao estabelecer a divisão entre o valor da velocidade de escorregamento e o valor da velocidade angular elétrica. Em outra palavras, o escorregamento representa o valor percentual da diferença entre as velocidades angular elétrica e velocidade real do rotor, velocidade angular mecânica. Como o rotor do 'MI' roda a uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade angular

elétrica, este tipo de motor também é denominado por Motor Assíncrono Trifásico.

Através da criação do campo magnético girante surgirão forças eletromotrizes rotóricas que darão origem a correntes elétricas que circularão no interior de um campo magnético, o que tem como consequência o aparecimento de forças mecânicas que se exercem sobre os condutores rotóricos. A combinação das diversas forças mecânicas, dá origem a um Binário Eletromagnético que irá fazer o rotor girar. O seu valor é proporcional ao fluxo magnético indutor e à corrente rotórica em causa [4].

2.3 – Aspetos Construtivos

2.3.1 – Generalidades

O 'MI' apresenta-se como a Máquina Elétrica mais utilizada nos sistemas de acionamento eletromecânicos na indústria, sendo superior a 90% [8], comparativamente a outros tipos de motores elétricos. Isto deve-se ao facto destes motores apresentarem uma robustez muito elevada, com uma construção relativamente simples e um baixo custo de manutenção.

O 'MI' é constituído, simplificadamente, por duas partes principais, a parte fixa e a parte móvel. A parte fixa constitui o Estator, onde estão alojadas as bobinas e na qual será aplicado o sistema trifásico de tensões. Na parte móvel, designada por Rotor, tal como explicado anteriormente, surgirão correntes rotóricas que através da combinação de forças mecânicas resultantes farão com que o mesmo rode a uma velocidade ligeiramente inferior a velocidade de sincronismo. Nas soluções mais simples, as partes constituintes do 'MI' poderão ser representadas através da imagem da figura 2.3.

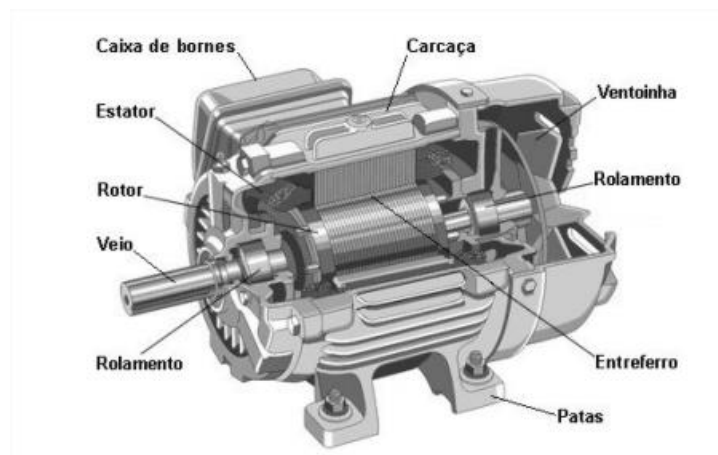


Figura 2. 3 - Partes Constituintes de um 'MI' [8]

2.3.2 – Estator

O estator do 'MI' é composto pelo núcleo ferromagnético e os enrolamentos estatóricos que estão inseridos na parte estacionária da Máquina de indução, e fixados no interior da carcaça. O núcleo ferromagnético é constituído por um cilindro oco formado por finas chapas de ferro empilhadas em formato anelar e isoladas entre si, de modo a diminuir as perdas por Correntes de Foucault [6]. As chapas possuem no seu interior pequenas ranhuras, designadas por cavas ou rasgos, que alojarão os condutores que irão compor os enrolamentos do estator. Na figura 2.4 pode-se observar uma imagem do aspeto frontal de um estator de um 'MI', inserido no interior da Carcaça.



Figura 2. 4 - Estator de um 'MI' inserido no Interior da Carcaça [9]

2.3.3 – Rotor

Os Rotores do 'MI' podem ser divididos em dois grandes grupos, o primeiro, denominado por rotores em curto-circuito, ou em gaiola de esquilo, e o segundo por rotores bobinados. Em ambos os casos, tal como foi descrito no caso do estator, o núcleo é constituído por chapas de ferro empilhadas, sendo que neste caso, as cavas estão inseridas no exterior das chapas.

No caso da máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo, os enrolamentos rotóricos são compostos por barras condutoras, dispostas paralelamente, sendo que neste caso, o curto-circuito das barras é realizado nas extremidades por anéis condutores. O nome dado a este tipo de rotor é justificado pelo seu aspeto exterior, que se assemelha a uma gaiola de um esquilo (Figura 2.5).

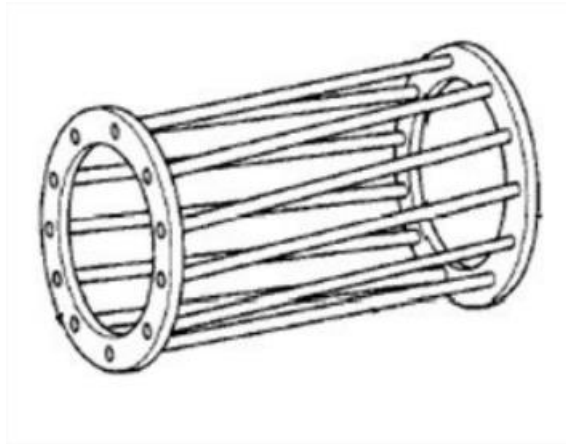


Figura 2. 5 - Aspecto Ilustrativo das Barras e Anéis Condutores de um Rotor em Gaiola de Esquilo (Curto-Circuito) [1]

De salientar que as barras condutoras do rotor em gaiola de esquilo estão ligeiramente inclinadas, de modo a que o campo girante da máquina encontre uma relutância magnética praticamente constante, o que não aconteceria no caso em que as barras ocupassem uma posição totalmente axial [6].

Relativamente aos rotores em gaiola de esquilo, existem três tipos, que se descrevem:

- Rotor Simples;
- Rotor de Gaiola Dupla;
- Rotor de Gaiola Profunda.

De referir que tendo em consideração a forma como são construídos os dois últimos rotores referidos anteriormente, estes permitem melhorar substancialmente as características de arranque face ao ‘MI’ de rotor simples, nomeadamente através da diminuição das correntes e obtenção de um maior binário no transitório de arranque. Em contrapartida, existirá uma redução do respetivo fator de potência e rendimento do motor. Nas figuras 2.6 e 2.7 pode-se observar o aspeto físico de um rotor em gaiola de esquilo simples e a imagem representativa das chapas que compõe o rotor em dupla gaiola, respetivamente.

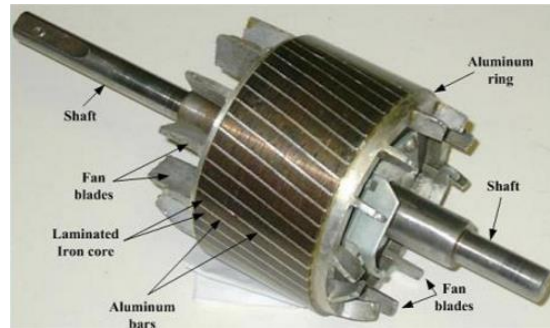


Figura 2. 6 - Rotor em Gaiola de Esquilo Simples [10]

Através da figura 2.6 é possível observar um dos componentes do rotor que não foi referido anteriormente, nomeadamente as pás de ventilação “*Fan Blades*”, i.e, o componente responsável pela ventilação/arrefecimento do rotor.

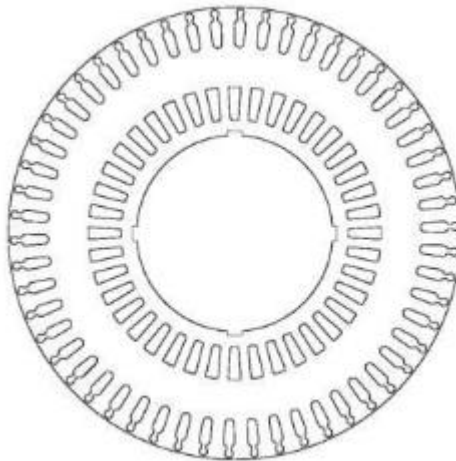


Figura 2. 7- Imagem representativa das chapas laminadas que compõe o Rotor em Dupla Gaiola de Esquilo

Como referido anteriormente, o rotor em gaiola de esquilo apresenta um binário de arranque baixo e grandes correntes estatóricas durante esse período, pelo que, para aplicações de alta potência, que necessitem de um arranque suave, a solução poderá ser o uso de um ‘*MI*’ de rotor bobinado, onde é possível controlar as correntes de arranque através da inserção de resistências em série com os enrolamentos rotóricos. O aspeto físico do mesmo é totalmente diferente do rotor em gaiola de esquilo, podendo este ser observado na figura 2.8.



Figura 2. 8 - Rotor Bobinado de um 'MI'

Como se pode verificar pela imagem da figura 2.8, o rotor bobinado é composto por anéis coletores, onde cada anel servirá para se possibilitar a ligação elétrica entre as fases dos enrolamentos rotóricos e a placa de bornes através de um suporte de escovas. Apesar das vantagens anteriormente referidas, os motores de rotor bobinado apresentam uma grande desvantagem a nível de manutenção, pois estes avariam-se com mais frequência. Por outro lado, o custo da máquina, apresenta valores muito superiores aos dos motores de rotor em gaiola de esquilo.

2.4 – Tipos de Avarias em Motores de Indução Trifásicos

2.4.1 – Introdução

No Subcapítulo anterior, 2.3, foram apresentados os aspetos construtivos do motor de indução trifásico, que, em operação, poderão estar sujeitos a diversos tipos de avarias. Deste modo, neste ponto serão referidos os diversos tipos de avarias que são suscetíveis de ocorrer nas diversas partes integrantes do motor. A grande maioria das avarias podem ocorrer tanto no estator como no rotor, mas como poderá ser verificado neste subcapítulo, as avarias relativas aos rolamentos também ocorrem com grande frequência, sendo por isso aqui abordados, de forma sucinta, os diversos motivos responsáveis por essas avarias, assim como, uma descrição detalhada das avarias mais frequentes.

Sendo assim, para elucidar o desenrolar deste subcapítulo, apresenta-se na tabela 2.1 os tipos de falhas mais comuns tendo em conta o elemento onde ocorre tais avarias.

Tabela 2. 1 - Falhas associadas ao Motor de Indução Trifásico nos pontos principais de ocorrência de falha [17].

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

Deve-se salientar que as falhas relativas ao Veio da máquina, serão abordadas no desenrolar deste trabalho, nomeadamente na parte das falhas relativas aos rolamentos.

2.4.2 – Avarias Relativas aos Rolamentos

Os Rolamentos representam um importante componente para qualquer máquina elétrica rotativa. Eles são uma das peças mais importantes do conjunto das partes rotativas do motor, nomeadamente onde o veio do rotor gira em torno de um eixo fixo. O veio do rotor está inserido dentro dos rolamentos, no qual, estes estão inseridos nas chamadas caixa dos rolamentos. De acordo com [11], um estudo estatístico realizado a motores elétricos de alta tensão, utilizados nas plataformas petrolíferas e indústrias petroquímicas, apontam para a existência de cerca de 52% das avarias ocorrerem nos rolamentos dos motores.

Em ambiente industrial, os motores elétricos operam, muitas vezes, em ambientes agressivos e em condições extremas. A presença de água, ácido, humidade e outros tipos de materiais são as principais razões para a degradação precoce dos rolamentos, assim como os efeitos abrasivos da presença destes elementos fazem com que se crie buracos e desgastes das paredes das esferas e até das pistas do mesmo [12]. A falha dos rolamentos também pode ocorrer por falta de lubrificação, que causa um gradiente excessivo de calor, ou por outro lado, pela lubrificação excessiva, que pode até causar outras avarias no motor, figura 2.9.



Figura 2. 9 - Verificação de Excesso de Lubrificação após abertura do 'MI'

No ramo das intervenções e reparações dos 'MI', observa-se que o uso contínuo do mesmo provoca, ao longo do tempo, folgas mecânicas nas caixas dos rolamentos e na própria zona do veio onde os rolamentos se encontram inseridos. A ação a ser colocada em prática para solucionar este problema é o encasquilhamento das tampas, geralmente realizado com casquilho em aço ou ferro fundido, e o enchimento por processo de soldadura seguido da retificação do veio, de modo a eliminar as folgas anteriormente referidas.

A falta de calibrações nos micrómetros e erros no processo de reparação, podem levar a que, durante o encasquilhamento das tampas, estas fiquem demasiado apertadas, ou durante o enchimento dos veios estes fiquem com medida superior ao desejado. Isto leva a que, no caso de tampas apertadas, a pista exterior do rolamento irá exercer uma grande pressão sobre as esferas. Por outro lado, no caso do veio com uma camada de soldadura acima da sua espessura harmonizada, a pista interior do rolamento irá exercer pressão sobre as esferas. Tanto num caso, como no outro, este tipo de situação levará a uma elevação considerável do ruído dos rolamentos em regime de funcionamento normal. Por sua vez, este facto irá dar origem a que estes operem continuamente com um elevado gradiente térmico devido à pressão exercida sobre as esferas, e isto poderá levar a uma falha precoce dos mesmos.

A montagem incorreta dos rolamentos e outros fatores poderão levar ao desalinhamento dos rolamentos em relação ao eixo horizontal, fazendo com que as esferas dos mesmos sejam pressionadas, de quatro maneiras possíveis [12].

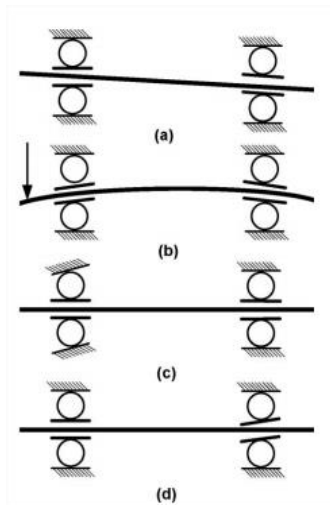


Figura 2. 10 - Diversas Formas de Desalinhamento dos Rolamentos [12]

Na figura 2.10 apresenta-se as quatro formas possíveis para o desalinhamento dos rolamentos, que, tal como referido, terá como consequência a existência de uma pressão sobre as esferas dos mesmos, dando origem a ruído e a uma futura avaria. As diversas formas de desalinhamento são descritas de seguida:

- Figura 2.10 a) – Neste caso houve uma falha no processo de reparação da tampa direita por encasquilhamento, provocando assim o descentramento da tampa. Esta ação, realizada de forma errada, levará a que o veio se posicione de forma oblíqua no

interior do estator, fazendo com que haja pressão das esferas sobre a pista interior do rolamento. É de salientar que em algumas situações esta falha pode causar o arrastamento do rotor na superfície ferromagnética do estator, podendo dar origem a outros tipos de avarias, tais como, danos nas barras do rotor, danos nas bobinas do estator ou também, danos no ferromagnético do estator. Por outro lado, o desalinhamento que se observa neste caso irá causar a excentricidade no entreferro, que será aprofundado no desenrolar dessa dissertação.

- Figura 2.10 b) – Neste caso o veio do rotor encontra-se empenado, o que faz com que haja pressão das esferas sobre a pista interior do rolamento, em ambos os lados do motor. Na maioria das situações, os ‘MI’ são equipados com anilhas de compensação atrás dos rolamentos para compensar folgas axiais existentes no interior do motor e também para fazer com que o rotor volte à sua posição de origem, uma vez que durante o arranque o rotor tem tendência a se deslocar horizontalmente num determinado sentido, dependente da posição em que o motor é montado. A existência de anilhas de compensação em excesso, faz com que o rotor seja comprimido, estabelecendo o mesmo efeito sobre as esferas dos rolamentos.
- Figura 2.10 c) Nesta situação, o Rolamento da esquerda encontra-se devidamente montado no veio. Porém não está devidamente assente na caixa de rolamento, fazendo com que a pista exterior do mesmo se encontre inclinada relativamente ao eixo horizontal. Com isso, pode-se concluir que houve uma falha no processo de montagem da Tampa.
- Figura 2.10 d) – Neste caso, pode-se observar que o rolamento da direita foi montado de forma incorreta, fazendo com que a pista interior do mesmo se encontre inclinada relativamente ao eixo horizontal, apesar deste se encontrar devidamente assente na caixa de rolamento.

Por último, em acionamentos de velocidade variável, os ‘MI’ são utilizados juntamente com os variadores de velocidade (*VFD – Variable Frequency Drives*), em alternativa ao uso de motores de corrente contínua. Com o uso dos *VFD*'s para se proceder ao controlo do ‘MI’ surgiram diversas vantagens, como o arranque suave e o aumento do binário de arranque através, por exemplo, da aplicação da técnica *V/F* constante. Porém o uso continuado do mesmo, faz com que surjam f.e.m. induzidas nos veios dos rotores, sendo que estas são

descarregadas para a terra através dos rolamentos sempre que a f.e.m. induzida seja suficiente para superar a resistência de isolamento da lubrificação do mesmo [13].

As correntes induzidas através destas descargas podem levar a picos (pequenas crateras), crateras (*Fluting*, marcas em intervalos regulares ao longo da pista do rolamento), ruído excessivo e consequentemente a falha do motor. Na figura 2.11 e 2.12 pode ser observada a pista de um rolamento após 5400 horas de funcionamento, em conjunto com um VFD, e o fenómeno designado por *Fluting*, respetivamente.

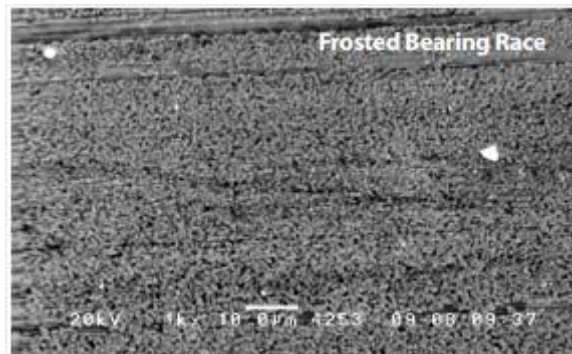


Figura 2. 11 - Vista Microscópica da Pista de um Rolamento “Picado” [13]



Figura 2. 12 - Pista interior de um Rolamento com marcas regulares, evidenciado o fenómeno designado por *Fluting* [13]

2.4.3 – Avarias Relativas ao Estator

Os estatores dos motores de indução representam um dos componentes mais importantes da máquina, pelo que é necessário efetuar um estudo acerca dos diversos tipos de avarias que podem ocorrer no mesmo e as causas respetivas. As avarias nos estatores podem ocorrer efetivamente em duas áreas distintas, no núcleo ferromagnético e nos enrolamentos do estator, sendo que nesta última acontece a maior parte dos defeitos.

De acordo com um estudo referido no subcapítulo anterior, as avarias relativamente aos enrolamentos do estator apresentam uma percentagem de 25% [11], sendo a segunda maior causa de avarias no ‘MI’. Primeiramente serão apresentados as principais causas para tais avarias acima mencionadas, sendo que as mesmas podem ser resumidas em quatro grandes grupos:

- Agentes Ambientais;
- Agentes Térmicos;
- Agentes Elétricos
- Agentes Mecânicos.

Numa segunda fase serão abordadas os tipos de avarias suscetíveis de ocorrências no Estator, tanto no Núcleo ferromagnético, como nos enrolamentos do mesmo.

2.4.3.1 – Principais causas das Avarias no Estator

Os ‘MI’ operam, na maioria das aplicações, sob condições extremas, encontrando-se sujeitos a ações de natureza térmica, elétrica, mecânica e ambiental. Sendo assim, é necessário descrever de uma forma sucinta os vários tipos de fadiga que podem levar à degradação dos enrolamentos do estator ou até mesmo do núcleo ferromagnético.

2.4.3.1.1 – Agentes Ambientais

Uma das fadigas aos quais os ‘MI’ estão sujeitos são de natureza ambiental, pois estes operam muitas vezes em ambientes com elevado nível de poeira, ambientes ácidos, ambientes com elevado teor de humidade. Devido a esses fatores, por vezes é difícil manter

em bom estado de preservação os enrolamentos estáticos. Para prevenir as infiltrações de agentes poluidores líquidos, existem vedantes designados por retentores ou *Vring's*, apesar destes serem utilizados em primeira estância para proteção dos rolamentos. Em alguns casos, quando o motor é dimensionado para operar em ambientes ácidos, a impregnação dos enrolamentos, numa situação de rebobinagem dos mesmos, é realizado com um verniz diferente daquele que é utilizado em situações normais, de modo a precaver uma falha precoce devido ao ambiente no qual a máquina está inserida. No caso da indústria Naval, por exemplo, a grande parte dos motores são equipados com resistências de aquecimento que servem para retirar a humidade que se pode instalar na bobinagem do estator, pois neste caso os motores operam num ambiente com um elevado nível de humidade.

2.4.3.1.2 – Agentes Térmicos

Os agentes térmicos, como o próprio nome indica, são as causas de avarias nos enrolamentos do estator que derivam de um sobreaquecimento. São diversos os fatores que podem levar a um aquecimento exagerado da bobinagem trifásica, pelo que é importante dar a conhecer as respetivas causas principais.

O grande problema dos elevados gradientes de temperatura é a perda parcial ou total das características isolantes dos materiais utilizados no sistema de isolamento da bobinagem de motores elétricos. Um sistema de isolamento envelhecido por motivos térmicos apresenta, geralmente, um aspeto ressequido e quebradiço. De acordo com [16], um aumento de temperatura de 8° a 10° no isolamento, reduz a vida útil do material para metade. Sendo assim, serão de seguida descritas as principais causas que poderão dar origem ao sobreaquecimento dos enrolamentos do estator:

- A alimentação do 'MI' com sistema de tensões desequilibradas tem como consequência a inserção de uma componente harmónica inversa na tensão de alimentação, o que irá provocar um binário eletromagnético oscilatório, fazendo com que se estabeleça um sobreaquecimento no rotor do motor. A maior parte do calor libertado é transmitido ao estator, afetando o isolamento dos enrolamentos. Deve-se salientar que a aplicação de um sistema de tensões com um desequilíbrio acima de

3,5% faz com que a fase que opera com maior corrente aumente em 25% a temperatura [17].

- O Arranque direto repetitivo de alguns motores pode levar a regimes de sobreaquecimento, pois no transitório de arranque a respetiva corrente pode chegar a 10 vezes o valor da sua corrente nominal. Neste caso, os motores não têm a possibilidade de dissipar o excesso de calor gerado no período de arranque e por isso operam constantemente em alta temperatura. Uma das técnicas a ser aplicada neste caso é a inserção de um motor de ventilação forçada fixado na tampa de ventilação (Resguardo).
- As variações das tensões também podem causar regimes de sobreaquecimento. No caso de uma cava de tensão em que a tensão aplicada ao motor é inferior à sua tensão nominal, existe uma perda de binário/potência. Este facto pode levar a que o motor opere em regime de sobrecarga, pois neste caso não dispõe de potência útil suficiente para a potência mecânica solicitada. No caso de uma sobretensão, as correntes do estator poderão elevar-se para um valor acima da corrente nominal, fazendo com que as bobinas entrem em sobreaquecimento, podendo acontecer, no caso limite, a falha do motor. Variações de 10% do valor da tensão podem levar a regimes de sobreaquecimentos do '*MI*'.
- O deslocamento horizontal do núcleo ferromagnético do estator, inserido no interior da carcaça, pode levar a que as correntes do estator se elevem para um valor acima do valor nominal em regime permanente pois, nesta situação, a força contra eletromotriz produzida pelo rotor será menor. Por outro lado, o curto-circuito entre as chapas do núcleo ferromagnético pode apresentar um motivo para o aparecimento de um gradiente de temperatura nos enrolamentos do estator.

Estas são algumas das situações mais comuns que podem dar origem a que o '*MI*' opere em regime de sobreaquecimento. Porém, este regime também poderá ser originado por outras causas, tais como [17]:

- Prisão do rotor, sendo estes casos comuns em Eletrobombas Submersíveis e Motores Ventiladores;
- Comprometimento da ventilação natural do motor, por obstrução da entrada de ar, provocada, por exemplo, por excesso de sujidade que se aloja na tampa de ventilação;

- Excesso de camadas de pinturas no motor, que poderá diminuir a capacidade de dissipação de calor;
- Operação sobre a influência de altas temperaturas ambiente;
- Operações em regime de sobrecarga, onde o motor inserido em determinado acionamento não possui binário suficiente para a carga requerida.

2.4.3.1.3 – Agentes Elétricos

Os Agentes Elétricos correspondem aos fatores ou causas de origem elétrica que levam a avarias nos enrolamentos do estator. Existem diversas causas que podem levar a um dos tipos de avaria referidos anteriormente no subcapítulo ‘2.4.3.2’ porém a causa principal que é responsável por este tipo de falha é a operação em regime de sobretensão. Deste modo, será apresentada uma análise da origem e causas de sobretensões nas alimentações. Existem diversas causas para as sobretensões, sendo que de seguida se apresentam as principais:

- Descargas Atmosféricas;
- Entrada em serviço de bancos de condensadores;
- Saída de serviço de máquinas de grande potência;
- Recolocação em serviço de troços da rede elétrica após defeito.

Os materiais isolantes que compõem o sistema de isolamento dos enrolamentos do estator são projetados para suportarem os níveis de tensão nominais com os quais os motores operam. Sendo assim, a operação de um ‘MI’ em regime de sobretensão poderá desencadear as seguintes situações[4]:

- Curto-circuito entre um grupo de bobinas ou um grupo de espiras – Se o valor da tensão estiver acima do suportado pelo verniz de impregnação e o verniz de fábrica inserido na superfície dos condutores de cobre. É de salientar que a impregnação deficiente dos enrolamentos do estator, pode levar à existência de bolhas de ar no verniz isolante, facilitando assim a ocorrência desta avaria.
- Curto-circuito entre fases – Se o valor da tensão estiver acima do suportado pelo material isolante, inserido entre as diferentes fases.
- Curto-Circuito à massa – Se o valor da tensão estiver acima do suportado pelo cartão isolante inserido no fundo das cavas do estator.

No que toca aos agentes elétricos, pode ainda referir-se a situação de falta de uma fase no sistema de alimentação, sendo que o efeito da mesma corresponderá a um circuito aberto numa determinada fase do enrolamento do estator. É de salientar que em contexto industrial, a falta de fase é reconhecida através da inspeção das bobinas do estator após defeito, sendo que no caso em que as bobinas se encontrem com uma ligação em estrela, então esta falha irá ocasionar um sobreaquecimento em duas fases, até o ponto destas curto-circuitarem. No caso dos enrolamentos do estator se encontrarem ligados em triângulo, então ocasionará um sobreaquecimento em apenas uma das fases, até ao ponto desta entrar em curto-circuito.

Deve-se ainda referir que a operação sobre um alto nível de humidade e um sistema de isolamento envelhecido pode proporcionar uma maior ocorrência de avarias nos enrolamentos do estator, causados pelos agentes elétricos.

2.4.3.1.4 – Agentes Mecânicos

Os agentes mecânicos, como o próprio nome indica, representam fatores de natureza mecânica que levam à degradação, seguida de avaria, dos enrolamentos do estator. Sendo assim, podem-se destacar as seguintes causas:

- Danos causados pela existência de materiais perfurantes no interior dos motores elétricos, como por exemplo, os estilhaços de um rolamento destruído.
- Contato físico entre o estator e o rotor, causando danos na região de contato e podendo levar a uma avaria tanto no núcleo ferromagnético como no enrolamento do estator. Este efeito pode ser causado pela montagem incorreta dos rolamentos, desalinhamento entre o estator e o rotor e excentricidade estática, dinâmica ou mista.
- No caso dos arranques diretos repetitivos, além do sobreaquecimento referido anteriormente, poderá ocorrer a deslocação da cabeça das bobinas, por intermédio das forças eletrodinâmicas de elevada amplitude criadas no momento do arranque. Estas forças levam a vibração excessiva no período de arranque, levando a que haja deslocação das bobinas na direção radial e tangencial [4] [16].

2.4.3.2 – Núcleo Ferromagnético

Como dito anteriormente, o núcleo ferromagnético do estator é composto por finas chapas empilhadas, sendo que estas apresentam cavas onde estarão alojados os enrolamentos estatóricos. Neste caso, uma avaria que é bastante suscetível de ocorrer é a degradação da região interlaminar do núcleo (curto-circuito entre chapas), provocando assim os chamados “Pontos Quentes” enquanto a máquina se encontra em operação, o que levará a que as chapas mais próximas venham também a degradar-se, caso o defeito se prolongue por um longo período de tempo.

A construção do núcleo com chapas laminadas, apesar de diminuir consideravelmente, não elimina totalmente as correntes de Foucault. Em situação de bom funcionamento, existirão correntes induzidas de Foucault circulando apenas no interior de cada chapa, como pode ser visto na imagem da figura 2.13.

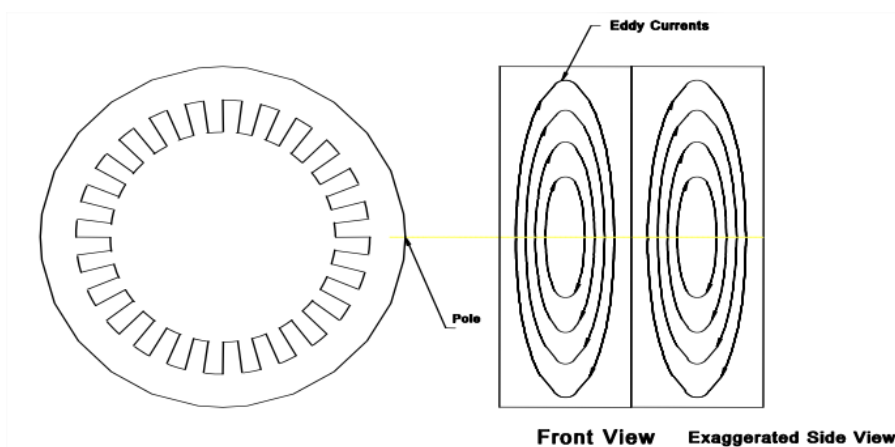


Figura 2. 13 - Ilustração da circulação de Correntes de Foucault em situação de bom funcionamento [14]

Na situação de curto-circuito entre chapas do núcleo, existirá um aumento considerável das correntes de Foucault nas duas chapas, tendo em conta o aumento da secção transversal do material disponível para circulação destas correntes. Sendo assim, na zona de contato entre chapas existirá um elevado sobreaquecimento. No caso limite, este sobreaquecimento poderá dar origem a uma degradação do isolamento dos enrolamentos estatóricos e até mesmo degradação das barras ou bobinas do rotor. Na figura (2.14) pode ser visualizada a circulação das correntes de Foucault em situação de curto-circuito entre chapas do núcleo.

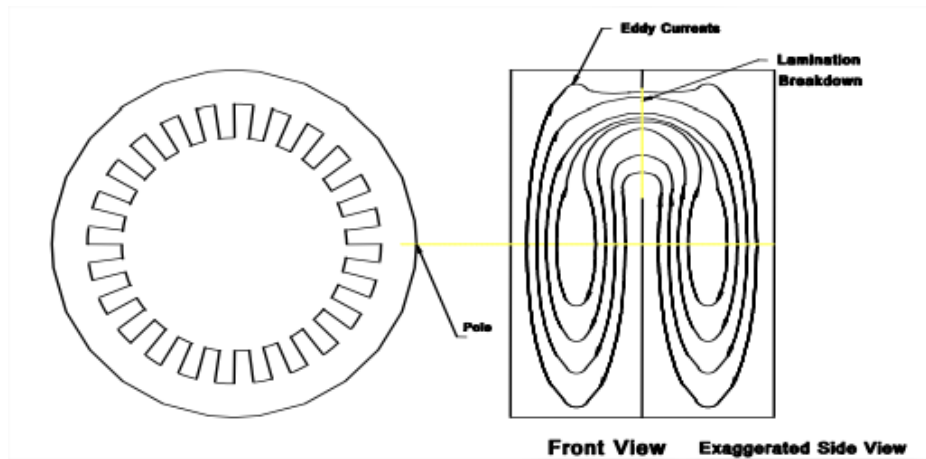


Figura 2. 14 – Ilustração da circulação de Correntes de Foucault em situação de curto-circuito entre chapas do núcleo de material ferromagnético [14]

De salientar que o surgimento de curto-circuitos entre chapas do núcleo ferromagnético acontece na sequência de curto-circuitos diversos originados nos enrolamentos do estator, fricção do rotor com o núcleo ferromagnético do estator, elementos contundentes no entreferro (originados por exemplo por danos totais dos rolamentos da máquina), etc. Nestas situações, a reparação das chapas do núcleo apresenta-se como uma intervenção com um elevado custo, pelo que somente em algumas situações, por exemplo nas máquinas de elevada potência, se justifica a reparação. Em motores de baixa potência, o custo acessível da obtenção de equipamentos novos, pode ser uma solução mais vantajosa para a Empresa/Fábrica.

2.4.3.3 – Enrolamentos do Estator

Tal como referido anteriormente, os enrolamentos do estator são os responsáveis pela criação do campo magnético girante do interior do mesmo. Estes enrolamentos, tais como os outros componentes da máquina já referidos, também estão sujeitos a diversos tipos de falhas, nomeadamente:

- a) - Curto-Circuito entre Espiras ou entre Bobinas;
- b) - Curto-Circuito entre Fases;
- c) - Curto-Circuito à Massa;
- d) - Circuito Aberto.

Para uma melhor visualização das avarias acima referidas, na figura 2.15 apresentam-se estes tipos de avarias.

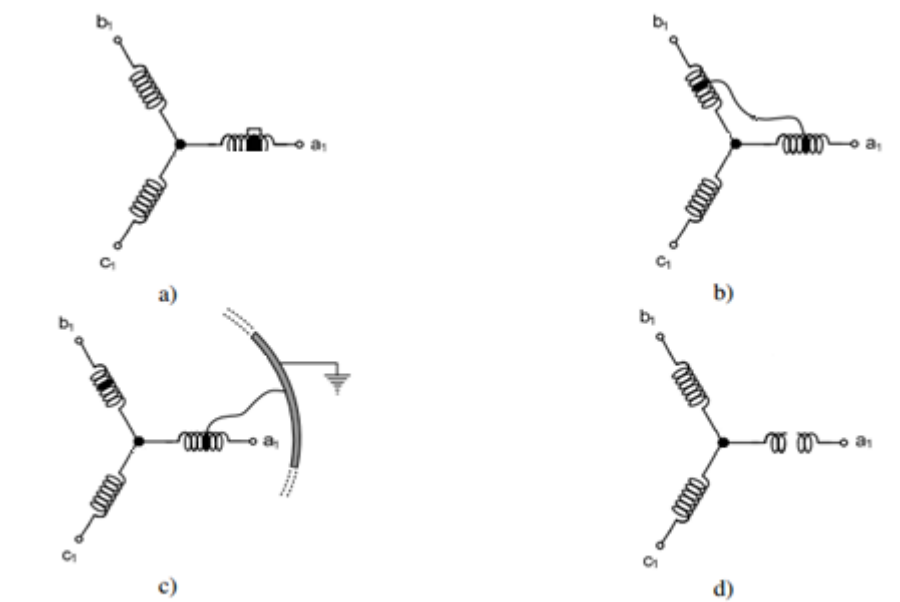


Figura 2. 15 - Tipos de Falhas no Estator de um motor de indução [Adaptado de 17]

2.4.4 – Avarias Relativas ao Rotor

2.4.4.1 – Introdução

O rotor do 'MI', como parte rotativa da máquina, representa um elemento tão importante quanto o estator no que diz respeito ao bom funcionamento do mesmo, pois é através deste que poderá ser entregue a uma determinada carga a potência mecânica requerida. Como referido no capítulo 2.3.3, no 'MI' existem dois tipos de rotores, nomeadamente o rotor em curto-circuito e o rotor bobinado.

Relativamente ao rotor em curto-circuito, as avarias localizam-se maioritariamente nas barras e nos anéis do mesmo, pelo que, devido à importância deste tipo de falha será dedicado um subcapítulo somente para explicitar e dar a conhecer as causas e efeitos das mesmas. Por outro lado, os rotores bobinados apresentam avarias nos enrolamentos rotóricos, tanto na bobinagem quanto na interligação à placa de ligações através dos anéis coletores. As avarias relativas ao rotor com os respetivos enrolamentos bobinados, são semelhantes às avarias relativas aos enrolamentos no estator [4]. Assim, será analisado apenas as avarias relativas ao rotor em gaiola de esquilo.

Existirá ainda um subcapítulo que servirá para explicar de uma forma sucinta uma avaria muito comum neste âmbito que é a excentricidade do rotor. A excentricidade do rotor pode ocorrer de três formas distintas, excentricidade estática, dinâmica e mista (junção das últimas duas referidas). Com isso, será fundamentado neste subcapítulo todos os tipos de excentricidade existentes, assim como as respetivas causas e efeitos.

2.4.4.2 – Rotor em Curto-circuito

Os rotores em curto-circuito, são formados por barras de material condutor, geralmente de cobre, alumínio ou outras ligas provenientes destes elementos [4] e por anéis terminais que são utilizados para realizar a ligação elétrica e mecânica das barras condutoras. Devido a esse tipo de estrutura, as falhas associadas ao rotor em curto-circuito podem-se manifestar nas duas zonas, anteriormente referidas, através da rutura total ou parcial destes elementos.

A existência de barras fraturadas no rotor em gaiola afetará as características de movimento do motor, apresentando uma descida do valor do binário médio e um aumento substancial das oscilações, tanto no binário como na velocidade do motor, o que leva a

regimes de funcionamentos com grande nível de vibração mecânica [17] [18]. O aumento da vibração poderá levar a que as barras adjacentes à barra fraturada venham também a se danificar, o que fará com que a amplitude das oscilações se eleve proporcionalmente. No caso limite, o número de barras fraturadas poderá causar danos substanciais à máquina, levando à perda total da mesma. Na figura 2.16, pode-se visualizar, a título exemplificativo, as zonas onde podem ocorrer as avarias no rotor em curto-circuito.

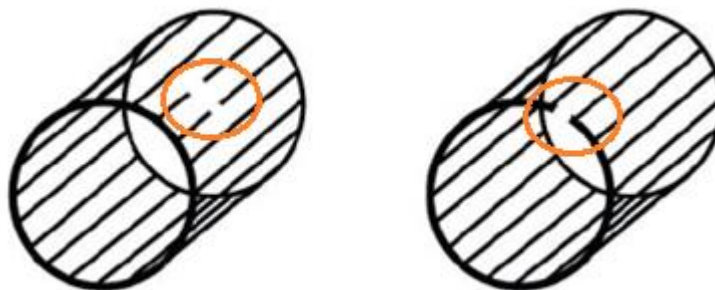


Figura 2. 16 - Rotor em Gaiola de Esquilo com 2 barras fraturadas (figura à esquerda) e uma fratura no anel terminal (figura à direita) [19]

É de salientar que a existência de uma barra fraturada no rotor em curto-circuito, pode ser vista como uma assimetria no mesmo, pelo que levará ao surgimento de um campo girante em sentido contrário ao campo girante principal, o que causará, além das causas referidas anteriormente, o aumento substancial das correntes rotóricas que circulam nas barras adjacentes e conseqüentemente ao aumento da temperatura geral do motor [19]. Deste modo é importante a detecção precoce de fraturas na gaiola, pois estas começam com pequenas fissuras e levarão, devidos às forças centrífugas elevadas, a que as barras fraturadas se soltem, causando danos às outras barras ou até mesmo danos nos enrolamentos do estator.

De forma similar ao caso do estator, no caso das avarias relativas ao rotor em curto-circuito (ruptura de barras e/ou anéis) as causas/efeitos responsáveis pelas mesmas podem-se distinguir em três grupos distintos:

- Efeitos Térmicos;
- Efeitos Mecânicos;
- Efeitos Ambientais.

Existe ainda um último grupo, que representa os efeitos magnéticos, sendo que neste caso pode-se resumir às seguintes causas/efeitos [17]:

- Ruído Eletromagnético;

- Existência de Excentricidades no Entreferro;
- Forças Magnéticas que causam desequilíbrios no rotor.

2.4.4.3– Excentricidade

O conceito de excentricidade está totalmente relacionado com uma das partes importantes do 'MI', que é o entreferro. Simplificadamente, a excentricidade pode ser classificada como uma folga desigual entre o estator e o rotor, i.e., representa a não linearidade da largura do entreferro, causando assim, assimetrias no circuito magnético da máquina e podendo ainda, no caso limite, levar a que se estabeleça contato físico entre o estator e o rotor [19] [20].

Por outro lado, a existência de excentricidade faz com que dê origem a forças distribuídas ao longo do perímetro interno do rotor cuja resultante é diferente de zero (esta resultante é geralmente denominada por *UMP – Unbalanced Magnetic Pull*). A força resultante, referida anteriormente, estará sempre direcionada para a zona de menor entreferro (Figura 2.17) e em alguns casos pode levar ao bloqueamento do rotor, no período de arranque (efeito semelhante a um íman). No caso da excentricidade estática, a força *UMP* é constante no espaço e no tempo mas leva a que haja deflexões tanto no estator quanto no rotor. Já no caso da excentricidade dinâmica, a força *UMP* gira em um referencial solidário com o Rotor e isto leva a que haja um aumento acentuado na vibração mecânica que se transmite à estrutura do motor [21].

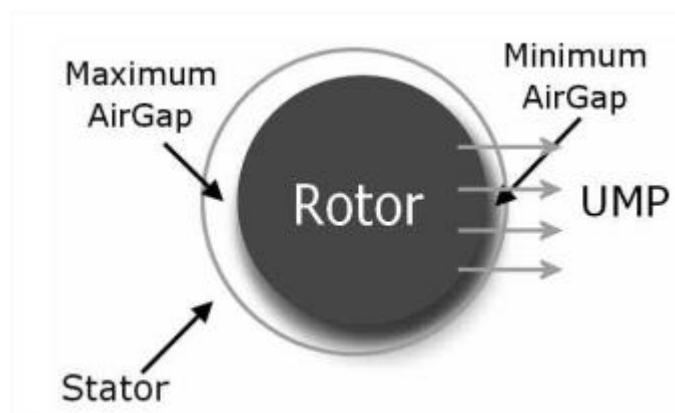


Figura 2. 17 - Esquema Ilustrativo da direção resultante da Força UMP [39]

Existem três tipos distintos de excentricidade, a estática, a dinâmica e a combinação das duas anteriores (mista), sendo que na maior parte das vezes, todos os motores apresentam alguma percentagem de excentricidade devido ao processo de fabrico dos mesmos. No que diz respeito a um motor elétrico, existem dois centros geométricos importantes, o do Estator (Cg_E) e o do Rotor (Cg_R), e apenas um centro de Rotação do Rotor (Cr_R), pois representa a parte rotativa da máquina.

Num motor sem nenhum grau de excentricidade (Figura 2.18) os centros geométricos do estator e do rotor, assim como o centro de rotação do rotor, coincidem, formando um alinhamento axial entre o estator e o rotor, onde o entreferro se mantém com o mesmo espaçamento em qualquer parte do motor. Neste caso a força UMP resultante é igual a zero.

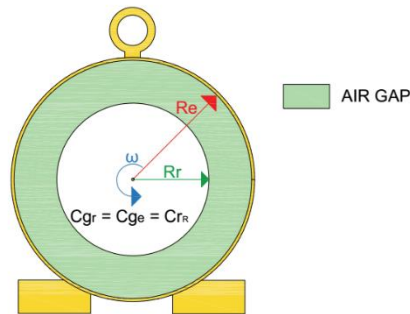


Figura 2. 18 - Esquema representativo dos Centros de Rotação e Geométricos do Estator e do Rotor sem a existência de excentricidade

Na figura 2.18, R_e representa o raio do estator, e R_r representa o raio do rotor. No caso da excentricidade estática, existe um deslocamento do rotor na posição vertical no interior do Estator, ou seja, o centro de rotação do Rotor Cr_R coincide com o respetivo centro geométrico Cg_R , porém ambos estão deslocados relativamente ao centro geométrico do estator Cg_E . Por outras palavras, a largura mínima do entreferro permanecerá fixa ao longo do tempo, levando a que haja deformação do rotor nessa direção. Na figura 2.19 apresenta-se o esquema representativo do 'MI' na presença de excentricidade estática.

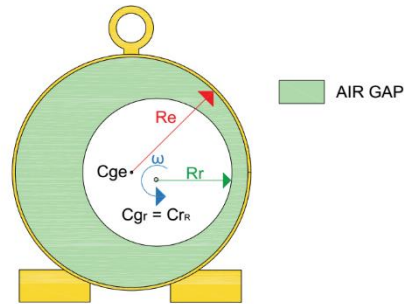


Figura 2. 19 - Esquema representativo dos Centros de Rotação e Geométricos do Estator e do Rotor na presença de Excentricidade Estática

Já no caso da excentricidade dinâmica, o rotor encontra-se enviesado no interior do estator, ou seja, o centro de rotação do rotor Cr_R encontra-se deslocado relativamente ao seu centro geométrico Cg_R porém coincide com o centro geométrico do Estator Cg_E . Nestas condições, a largura do entreferro na posição mínima gira ao longo do perímetro interno do estator [4]. Na figura 2.20 pode ser visualizado o Esquema Representativo do 'MI', com vista em corte, na presença de excentricidade dinâmica.

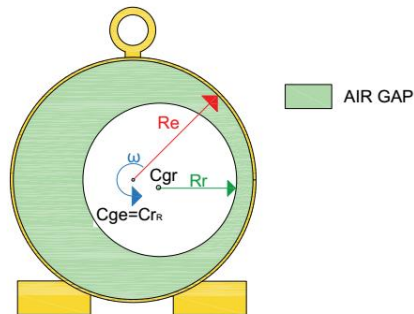


Figura 2. 20 - Esquema representativo dos Centros de Rotação e Geométricos do Estator e do Rotor na presença de Excentricidade Dinâmica

Por último, no caso da excentricidade mista, o rotor encontra-se totalmente deformado, estando sob condições de empeno. Nestas condições, não existe coincidência entre o centro geométrico do rotor Cg_R , centro geométrico do estator Cg_E e o centro de rotação do rotor Cr_R . Deste modo, nestas condições, o ponto que correspondente à largura mínima radial também gira em conjunto com o rotor.

Relativamente à presença da excentricidade nos rotores dos motores de indução, podem-se destacar alguns fatores que dão origem a esse tipo de avaria [4]:

- Folgas Mecânicas nos diversos componentes da máquina, tais como a caixa de alojamento dos rolamentos, zona do veio onde estes operam;
- Posicionamento incorreto do rotor relativamente ao estator devido a erros durante a montagem;
- Folgas mecânicas causadas por desgaste excessivo;
- Erro no processo de encasquilhamento das caixas de alojamento dos rolamentos, dando origem a que as mesmas se encontrem descentradas, o que por sua vez obriga a que o rotor fique deslocado da sua posição original;
- Desalinhamentos nas polias e uniões, podendo estas ser do tipo paralelo, angular ou mista [17];
- Sobreaquecimentos no rotor, levando a deformações na sua forma construtiva (Empeno)

2.5 – Tipos de Técnicas para Diagnóstico de Avarias em *MI*

2.5.1 – Introdução

O conceito que está relacionado com o Diagnóstico de Avarias advém da ideia de se aplicar em contexto industrial um tipo de Técnica de Manutenção que se denomina de Condicionada. De um modo diferente, quando comparado com as outras técnicas existentes, a aplicação da manutenção condicionada possibilita o conhecimento atualizado do estado de funcionamento de um determinado equipamento de modo a intervir em tempo oportuno, eliminando as causas de avarias [4]. Deste modo, é necessário aplicar a uma máquina em funcionamento, um sistema que realiza o levantamento de diversas grandezas, tais como correntes do estator, aceleração ou até mesmo fluxo magnético, para realizar uma monitorização do bom estado de funcionamento do '*MI*' ou, em caso de avaria, localizar e dar a conhecer que, mesmo estando em funcionamento, um determinado equipamento necessita de intervenção técnica. No que toca às Técnicas existentes para tal efeito, o fator preponderante é a grandeza que irá ser analisada pois, em alguns casos, como o caso das correntes do estator, poder-se-à aplicar um método não invasivo em que não é necessário ter acesso à máquina para adquirir os dados da grandeza em análise. Por outro lado, algumas grandezas, como o fluxo magnético, deverão ser analisadas aplicando métodos invasivos, onde o utilizador deverá ter acesso à máquina e ter, neste caso, a necessidade de abrir a mesma de modo a aplicar sensores que realizam a leitura da grandeza pretendida no interior da máquina.

O sistema de Diagnóstico de Avarias é composto, geralmente, por quatro diferentes grupos, sendo que inicialmente deverá existir um bloco de aquisição de sinais, seguido de um bloco para realizar o processamento dos sinais adquiridos, e finalmente um bloco para realizar a deteção e o diagnóstico.

Atualmente, existem diversas técnicas para realizar a detecção e o diagnóstico dos diversos tipos de avarias presentes no 'MI', sendo que estes podem ser agrupados em três grupos [17]:

- Métodos baseados em modelos;
 - Métodos baseados na impedância de sequência inversa;
 - Métodos baseados na estimação de parâmetros
- Métodos baseados no reconhecimento de padrões;
 - Termografia
 - Métodos baseados no Vetor de Park
 - Métodos baseados na análise das componentes principais
 - Métodos baseados em redes neurais artificiais
 - Métodos baseados em lógica Fuzzy
 - Métodos baseados em sistemas híbridos Neuro Fuzzy
- Métodos Baseados na Análise Espectral em Frequência;
 - Análise Espectral das Vibrações;
 - Análise Espectral do Fluxo Magnético do Estator
 - Análise Espectral das Correntes do Estator;

2.5.2 – Métodos Baseados em Modelos

2.5.2.1 – Métodos Baseados na Impedância de Sequência Inversa

Os diagnósticos de avarias baseados na Impedância de Sequência Inversa advêm da decomposição do Sistema trifásico convencional do motor de indução em três componentes designada por simétricas. O método das componentes simétricas mostra que qualquer circuito trifásico desequilibrado ou equilibrado pode ser decomposto em três componentes, a componente direta, inversa e homopolar. A impedância de sequência inversa pode ser obtida através das componentes simétricas da tensão e da corrente do ‘MI’, (2.11).

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_i \\ U_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{di} & Z_{dh} \\ Z_{id} & Z_{ii} & Z_{ih} \\ Z_{hd} & Z_{hi} & Z_{hh} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_h \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Geralmente, o ‘MI’ apresenta os seus enrolamentos, em regime nominal, ligados em triângulo ou em estrela sem neutro acessível. Nestas condições a componente homopolar apresenta o valor nulo e assim, o modelo da máquina em estudo pode ser decomposto nas outras duas componentes referidas anteriormente, a componente direta e inversa, (2.12). É de salientar que esta simplificação só é válida se for considerado que a máquina em estudo é perfeitamente simétrica, pois, caso contrário, a eficácia dos métodos utilizando a impedância de sequência inversa é questionável em situações de desequilíbrio [22].

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{di} \\ Z_{id} & Z_{ii} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} U_d \\ U_i \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Na expressão (2.12), a corrente I_i , referente à corrente segundo a componente inversa, pode alterar o seu valor com variações da fonte de alimentação, com assimetrias no circuito magnético da máquina e com a variação da carga. Por outro lado, a existência de curto-circuito entre espiras nos enrolamentos do estator de um ‘MI’ faz com que o mesmo se torne assimétrico, no que toca ao fluxo magnético no seu interior. Sendo assim, a deteção de avarias

baseada nesta técnica pode-se estabelecer fazendo a análise da corrente I_i e da impedância de sequência inversa Z_i , (2,13).

$$Z_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (2.13)$$

A presença de harmônicas de sequência inversa ($h = 2,5,8,11,\dots, 3h+2$) na forma de onda da tensão de alimentação faz com a máquina opere sobre um regime que se assemelha a um defeito, porém a sua origem encontra-se na elevada distorção harmônica presente na forma de onda da tensão. A presença das mesmas faz com que o escorregamento do rotor, relativamente à velocidade síncrona do campo girante, aumente com o aumento dessas harmônicas, fazendo com que aumente a oscilação do binário eletromagnético e conseqüentemente, o ruído e as vibrações do mesmo [23]. Sendo assim, para aplicação de técnicas de diagnóstico de avarias baseado na impedância de sequência inversa, é necessário estabelecer métodos, como por exemplo a aplicação da Transformada rápida de Fourier (*FFT – Fast Fourier Transform*) para extrair as componentes fundamentais da tensão e da corrente.

2.5.2.2 – Métodos Baseados na Estimação de Parâmetros

O diagnóstico de avarias baseado na estimação de parâmetros é utilizado para detetar/localizar avarias específicas no estator e no rotor do 'MI', nomeadamente, curto-circuito entre espiras e barras quebradas. Esta técnica faz uso de alguns fatores, sendo estes chamados de parâmetros de desvio, de modo a localizar com grande eficácia o local onde está situada a avaria, assim como dar a conhecer ao utilizador o grau de severidade da mesma.

Para fazer uso desta técnica é necessário utilizar um modelo matemático adequado para falhas do 'MI'. Neste caso é adicionada uma espira de curto-circuito com cada enrolamento do estator [16][23]. De modo a exemplificar geometricamente, na figura 2.21 pode-se observar um motor trifásico com 1 par de pólos, no caso em que existe um curto-circuito entre espiras na fase b.

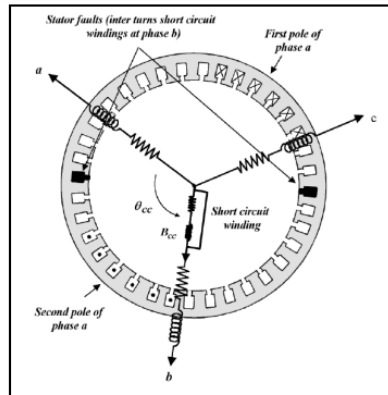


Figura 2. 21 - MI com curto-circuito na fase b e respetivo espira adicional ao enrolamento [24]

De referir, que relativamente à figura 2.21 a grandeza θ_{cc} representa o parâmetro de localização da avaria, na medida em que este dá a conhecer o ângulo em radianos, entre o enrolamento que apresenta um curto-circuito entre espiras e o enrolamento da fase a). Este parâmetro apenas poderá assumir 3 valores, nomeadamente 0 , $2\pi/3$ e $4\pi/3$. Estes resultados apresentam os seguintes significados:

- $\theta_{cc} = 0$ – Curto-Circuito entre Espiras na Fase a);
- $\theta_{cc} = 2\pi/3$ – Curto-Circuito entre Espiras na Fase b);
- $\theta_{cc} = 4\pi/3$ – Curto-Circuito entre Espiras na Fase c).

Ainda existe a grandeza η_{cc} , que se denomina como parâmetro de deteção, na medida em que este dá a conhecer o nível de gravidade do curto-circuito entre espiras em determinada fase. O parâmetro η_{cc} representa a relação entre o número de espiras em curto-circuito e o número de espiras que compõe o enrolamento sem falha [17].

De uma forma similar ao caso da falha no estator, no caso da existência de barras quebradas no rotor do 'MI', também é possível estimar dois parâmetros que irão dar a conhecer a falha. Um deles, θ_0 , representa o ângulo formado entre o eixo da barra quebrada e o eixo da primeira fase do rotor, sendo que este parâmetro irá aumentar o valor da resistência elétrica do rotor em caso de defeito. O outro parâmetro, n_0 , representa a relação entre o número de barras partidas e o número total de barras no rotor, de modo a poder estimar a severidade da falha.

2.5.3 – Métodos Baseados em Reconhecimento de Padrões

2.5.3.1 – Termografia

Como o próprio nome indica, os métodos baseados na Termografia, utilizam como fator principal a temperatura da máquina e a sua respetiva radiação de modo a poder detetar e analisar elevadas temperaturas ou acréscimos anormais de temperatura, que poderão indiciar uma situação de avaria.

A Termografia representa um método de ensaio não destrutivo, que através de aparelhagem que captam à radiação infravermelha dá a conhecer ao utilizador, o perfil térmico e a medição das variações de calor emitidas pelas diversas partes constituintes de um determinado equipamento [25]. Esta técnica substitui com grande eficácia a utilização de sensores/detetores de temperatura por causa da sua natureza não invasiva, pois a aplicação de transdutores térmicos no motor requer o conhecimento dos pontos críticos de aplicação dos mesmos. Por outro lado a natureza metálica destes transdutores pode vir a trazer problemas, no que toca ao seu isolamento elétrico, quando são aplicados em ambientes que operam com tensões elevadas [4].

Existe na Indústria, uma técnica designada por comparação termográfica, onde através da comparação de fatores/valores de temperatura do equipamento em bom funcionamento, é possível retirar conclusões se em determinada área do mesmo existe algum indício de avaria [26]. Dentro da comparação termográfica pode-se destacar dois modos de análise:

- Análise Qualitativa – Este modo de análise é realizado de forma superficial, onde através da visualização do ensaio termográfico é possível detetar alterações da temperatura superficial do equipamento, em determinada área;
- Análise Quantitativa – Este modo de análise é muito mais rigoroso que o referido anteriormente, na medida em que neste caso é realizado a medição das temperaturas superficiais do equipamento através da imagem termográfica e cálculos analíticos.

Nas imagens das figuras 2.22 e 2.23 podem-se visualizar a análise termográfica de um motor de indução com bomba. Na figura 2.22 pode-se constatar que o equipamento em causa se encontra numa situação de sobreaquecimento, atingindo temperaturas de 70°C em alguns pontos [27]. Esta situação advém do facto de que o motor está a operar com grande camada

de sujidade na carcaça, o que prejudica substancialmente a dissipação natural do calor do mesmo, prejudicando também a entrada de ar na tampa de ventilação o que em situação prolongada, poderá levar a diversas avarias. Por outro lado, na figura 2.23 pode-se verificar que o motor, após a limpeza/beneficiação geral do mesmo, se encontra em situação de funcionamento normal, onde a temperatura do mesmo é significativamente inferior.

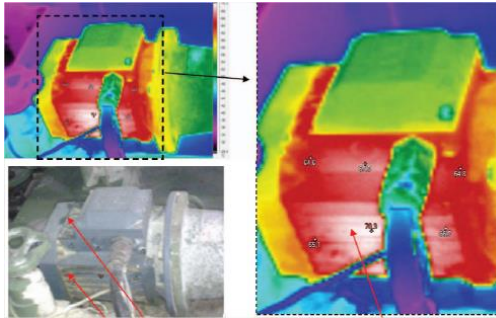


Figura 2. 22 - Ensaio Termográfico de um 'MI' com grande camada de sujidade em sua Superfície [27]

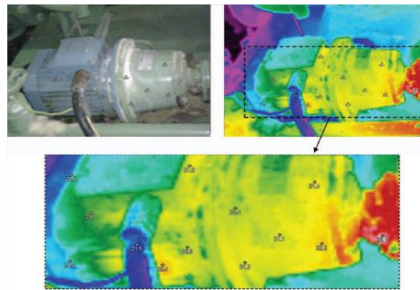


Figura 2. 23 - Ensaio Termográfico de um IM após limpeza/beneficiação geral do mesmo [27]

2.5.3.2 – Métodos Baseados no Vetor de Park

De uma forma análoga ao método baseado na impedância de sequência inversa, descrito no subcapítulo 2.5.2.1, a técnica de diagnóstico de avarias que faz uso do Vetor de Park (*PVA* – “*Park Vector Approach*”), requer a aplicação de uma transformação de referencial, sendo que neste caso será aplicado a Transformada de Clarke/Concordia no sistema trifásico das correntes do estator.

Tal como explicado anteriormente, geralmente os ‘*MI*’ encontram-se com os enrolamentos do estator ligados em triângulo ou em estrela sem neutro, o que leva a desprezar a componente homopolar, uma vez que a não existência do neutro faz com que esta componente seja aproximadamente zero. Com isso, as correntes do estator podem ser representadas num sistema bidimensional (plano $\alpha\beta$) composto por duas componentes em quadratura.

Em situação de funcionamento normal da máquina e sendo esta alimentada com um sistema trifásico de tensões equilibradas e devidamente desfasadas de 120° , obtém-se no plano $\alpha\beta$ um resultado que corresponde a uma circunferência centrada na origem e de raio constante [17], como é possível verificar através da figura 2.24. De referir que o raio desta circunferência depende da carga do motor.

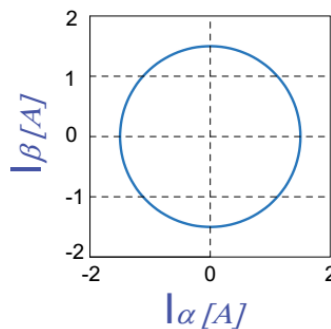


Figura 2. 24 - Representação gráfica da Componente I_α em função da componente I_β para um Motor em bom estado de funcionamento [Adaptado de 28]

Em situação de curto-circuito num dos enrolamentos do estator, o ‘*MI*’ ir-se-á comportar como uma carga desequilibrada e a representação gráfica das correntes no plano $\alpha\beta$ apresentará uma forma elíptica com alguma excentricidade [27]. Por outro lado, a alimentação do ‘*MI*’ com um sistema trifásico de tensões desequilibradas pode ser confundido como uma avaria deste tipo, o que representa uma grande desvantagem deste

método.

Por fim, também é possível a detecção de avarias no rotor e nos rolamentos da máquina, fazendo uso deste método. Nestes casos, a existência desses defeitos resultará numa componente de baixa frequência associada à componente fundamental da corrente do estator, pelo que graficamente a curva padrão ficará com um traço ligeiramente mais grosso. À medida que a severidade da avaria aumenta, maior será a espessura do traço desta curva. É de salientar que no caso destas avarias, é vantajoso aplicar este método em regimes próximo ao nominal, onde a presença da componente de baixa frequência ganha alguma ênfase.

2.5.3.3 – Métodos Baseados na Análise das Componentes Principais

Relativamente à detecção de avarias pelo reconhecimento de padrões, um dos problemas associados a esta gama de técnicas é a necessidade de operadores especialistas. O método só por si não permite uma identificação automática da existência de falha. Contudo, a partir dos diversos padrões é possível obter automaticamente a existência de falha e respetivo índice de severidade através de algoritmos de reconhecimento de padrões. Um dos métodos que permite efetuar a respetiva identificação de padrões baseia-se na análise das componentes principais (*PCA – “Principal Components Analysis”*) [17, 28]. Esta técnica foi introduzida por Pearson em 1901 e foi amplamente utilizada em teoria da comunicação.

O Método ‘*PCA*’, corresponde a uma técnica estatística que reduz o número original das variáveis que estão correlacionadas, i.e. variáveis que apresentam uma relação mútua entre as mesmas, num novo conjunto de variáveis não-correlacionadas denominadas por Componentes Principais (*PC – “Principal Components”*), sob a condição de se manter a máxima variância presente nos dados. Esta técnica de redução de variáveis para fins de detecção e diagnóstico de avarias tem sido estudado por diversos estudiosos académicos e investigadores industriais. Por outras palavras, a técnica ‘*PCA*’ é utilizada para extrair a partir de enormes conjuntos de dados, a informação mais relevante para a análise, pelo que neste caso, as ‘*PC*’ serão calculadas através de combinações lineares das variáveis originais e, naturalmente, terá um valor geralmente inferior ao original. [29].

No caso da aplicação deste algoritmo à detecção de avarias em ‘*MI*’, utiliza-se apenas a primeira e segunda componentes principais para identificar a existência de falha e respetivo

tipo. Assim, se a primeira e a segunda componente principais forem iguais então isto significa que se está perante a existência de uma circunferência, indicando deste modo que não existe falha no ‘MI’. Se a primeira e a segunda componentes principais forem diferentes, então isto indica a existência de uma elipse, pelo que se pode concluir que se está perante uma falha nos enrolamentos do estator.

2.5.3.4 – Métodos Baseados em Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (ANN - “Artificial Neural Network”) representam estruturas de processamento (Figura 2.25), cujo a sua constituição integram unidades simples de processamento interligadas, sendo estas denominadas por neurónios. De uma forma análoga à forma de aprendizagem do cérebro humano, estas estruturas têm a capacidade de adquirir conhecimento a partir do ambiente em que se encontram. Uma característica importante das Redes Neurais é o local de armazenamento do conhecimento adquirido, sendo que nos casos mais simples, este se encontra armazenado nos pesos sinápticos, ou também conhecidos como forças de conexão que existe entre os neurónios. Com isso, esta aprendizagem apresenta como objetivo o reajustamento dos pesos sinápticos, i.e. ao longo deste processo existe uma alteração sucessiva dos pesos sinápticos até que as respostas dadas aos estímulos sejam coerentes com valores pretendidos [30].

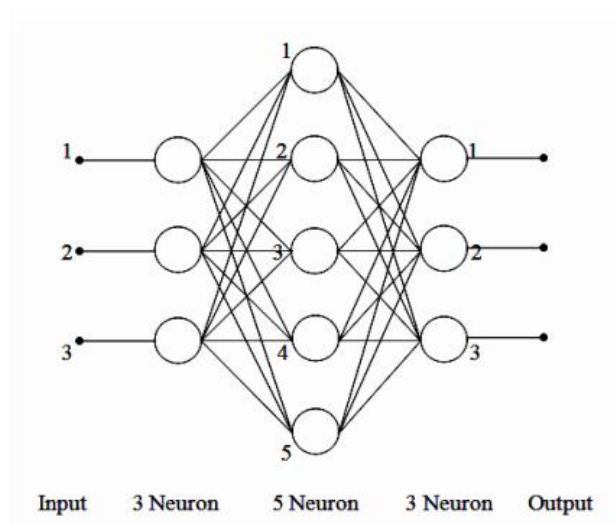


Figura 2. 25 - Estrutura ANN utilizada para a deteção e identificação de falta de Fase [31]

As *ANN's* podem ser utilizadas em diversas aplicações, sendo que a sua principal vantagem é a representação da função da dinâmica de um determinado sistema, através da aprendizagem e aproximação universal, em situações onde a complexidade dos problemas físicos dificultam a modelização do sistema em expressões matemáticas. Sendo assim, pode-se concluir que as estruturas de modelos baseadas em *ANN's* são generalizações de modelos lineares, quando estas são aplicadas em modelos não lineares.

As excelentes capacidades das *ANN's* no reconhecimento de padrões, estabilidade e processamento paralelo leva a que este método seja eficazmente utilizado no diagnóstico de falhas em motores de indução. Neste caso, esta técnica permite identificar o aparecimento de falhas no 'MI', assim como dar a conhecer uma situação de bom funcionamento do mesmo. No entanto inicialmente é necessário fazer uma seleção apropriada das entradas e saídas da rede, a estrutura de processamento a ser utilizada e os dados convenientes para a aprendizagem. Como sinais de entrada pode-se utilizar diversas grandezas associadas à máquina, tais como binário, velocidade mecânica, tensões e correntes estatóricas. A seleção da entrada adequada, assim como a quantidade de neurónios, permite discriminar as falhas a serem detetadas. Em [32], pode-se visualizar as vantagens em se utilizar as *ANN's* assim como a modelação da mesma. Um dos problemas associados às redes neuronais é a necessidade de efectuar inicialmente uma aprendizagem. No entanto, em [33] foi apresentado uma técnica de diagnóstico utilizando uma rede neuronal mas sem necessidade de uma aprendizagem inicial.

2.5.3.5 – Métodos Baseados em Lógica Fuzzy e Neuro-Fuzzy

Os Métodos baseados em lógica Fuzzy advém da necessidade de resolução de problemas complexos através da tradução da forma humana de pensar em valores numéricos. De uma forma diferente da lógica binária onde os valores lógicos apenas podem assumir o "Verdadeiro" e "Falso", a lógica Fuzzy agrega multi-valores lógicos, tais como "Verdade, Muito Verdade, Não Falso..." etc. [34].

Por outro lado, técnicas de controle fazendo uso da lógica Fuzzy são bastante práticas, pois é possível a criação de estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos, através da introdução da experiência de operadores humanos. Sendo assim, em situações repetitivas, um sistema baseado em lógica Fuzzy tem a capacidade de aprender a forma como

um determinado processo atua numa situação dinâmica e posteriormente tomar decisões de modo a proceder-se a resolução de algum problema similar [35]

Em [35], pode-se visualizar um exemplo de aplicação da Lógica Fuzzy, onde inicialmente o autor estabelece os parâmetros de entrada do sistema e através da simulação de algumas falhas associadas ao 'MI', é possível visualizar o comportamento de algumas grandezas associadas ao motor, sendo estas o módulo da corrente de linha, defasagem entre a tensão e a corrente e por fim, a velocidade do motor. Para as diversas avarias é avaliado se as grandezas anteriormente citadas “aumentam” ou “diminuem” com a existência dos defeitos.

Ainda existem técnicas de diagnóstico baseadas em sistemas Neuro-Fuzzy. Estas técnicas advém da combinação das duas técnicas anteriormente referidas, as *ANN's* e a lógica Fuzzy. O objetivo desta junção é a formação de um sistema que apresenta as vantagens e benefícios, tanto das Redes Neurais quanto da lógica Fuzzy, de modo a eliminar as desvantagens individuais das mesmas.

2.5.4 – Métodos Baseados na Análise Espectral em Frequência

2.5.4.1 – Análise de Vibrações

Dentro do grupo das máquinas elétricas, as máquinas rotativas apresentam em funcionamento um determinado nível de vibração e/ou ruído, sendo que geralmente parte deste comportamento pode ser originado por forças adversas de origem mecânica e/ou eletromagnética. No projeto do equipamento deverão ser estabelecidos quais os níveis vibratórios adequados à funcionalidade do mesmo, para que os resultados de análises de vibrações realizadas venha a ter em conta a correta interpretação dos dados recolhidos [36].

Numa primeira estância, os métodos de diagnóstico de avarias baseados na análise de vibrações apresentam como objetivo inicial a sua utilização para detetar e analisar avarias de origem mecânica, tais como falhas nos rolamentos, excentricidade do entreferro, etc... Porém, podem-se distinguir as avarias de origem magnética, pois o fluxo magnético que flui no entreferro origina forças de interação entre o estator e o rotor [4] que por sua vez origina grandes níveis de vibração no caso de avarias.

A vibração mecânica pode ser definida como o movimento esporádico, periódico ou aleatório de um corpo em relação a uma posição de referência [36], pelo que para monitorizar, qualificar e quantificar este movimento, a análise de vibrações apresenta-se como uma tecnologia muito utilizada para o efeito. Esta técnica é não invasiva, onde os sensores a serem aplicados são colocados no lado de fora da máquina em áreas estritamente definidas, figura (2.26).

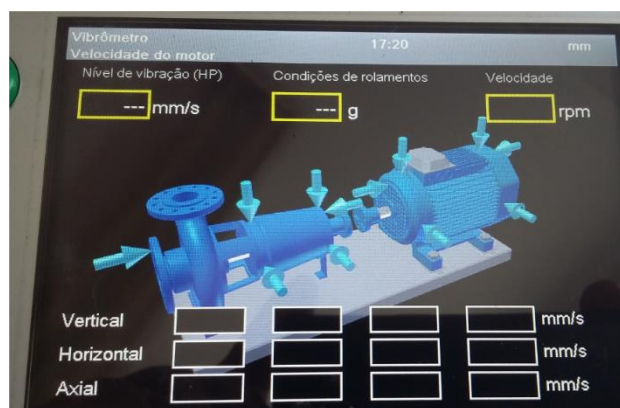


Figura 2. 26 - Locais definidos para Inserção dos Sensores na Análise de Vibrações [Autor]

Através da utilização de um sensor para a medição de vibração, é possível separar as frequências de vibração, sendo estas utilizadas para descrever o que se encontra de errado com a máquina, assim como obter a severidade relativa de uma determinada avaria. Deve-se salientar que os sensores devem converter a vibração num sinal que pode ser processado e analisado ao longo do tempo. Por sua vez o sinal no domínio do tempo deverá ser transformado para o domínio da frequência para que se possa conhecer o espectro de vibração da máquina. A frequência de vibração pode ainda ser extremamente útil no que toca a localizar a zona de avaria da máquina pois existem frequências de vibração que só se manifestam quando determinado tipo de avaria ocorre, sendo que no caso dos rolamentos é possível detetar se a avaria ocorre na pista interior, pista exterior, esferas ou gaiola [37] [11].

2.5.4.2 – Métodos Baseados na Análise do Fluxo Magnético Axial

Os métodos de diagnóstico de avarias baseados na Análise do Fluxo Magnético, como o próprio nome já incita, são baseados na análise do fluxo magnético no entreferro, sendo que as distorções provocadas por situações adversas anómalas, pode indicar com bastante precisão a existência de avarias [4].

As técnicas de diagnóstico de avarias mais populares fazem uso da análise das correntes estatóricas e da análise de vibrações para deteção de falhas nos 'MI'. Porém a grande dificuldade consiste na sua utilização em contexto industrial, onde, existindo diversos tipos de avarias, é complicado determinar o real problema da máquina. No caso das técnicas que analisam o fluxo magnético, não é necessário conhecer a carga do motor, o número de barras do rotor e número de cavas para, por exemplo, detetar um curto-circuito entre espiras [38].

Para análise do fluxo magnético é necessário proceder à sua leitura, pelo que deverão ser aplicados sensores no interior ou exterior da máquina. Por sua vez, estes sensores deverão ser associados a um sistema de aquisição de sinais, de forma a serem analisados no domínio da frequência, através da aplicação de, por exemplo, uma *FFT*. Através da análise do espectro de frequência, será possível detectar e analisar as possíveis avarias que ocorrem no 'MI', de uma forma análoga ao caso da análise vibracional.

Mesmo em situações de funcionamento em regime normal, o fluxo magnético da máquina apresenta pequenas assimetrias, devido às imperfeições da mesma assim como

harmônicas de sequência negativa inseridas nas formas de onda das tensões de alimentação. Para efetuar a respetiva medição do fluxo magnético, geralmente, são utilizadas algumas bobinas concêntricas inseridas nas cavas em conjunto com os enrolamentos do estator que servirão de sensores de fluxo tal como pode se observar na figura 2.27.

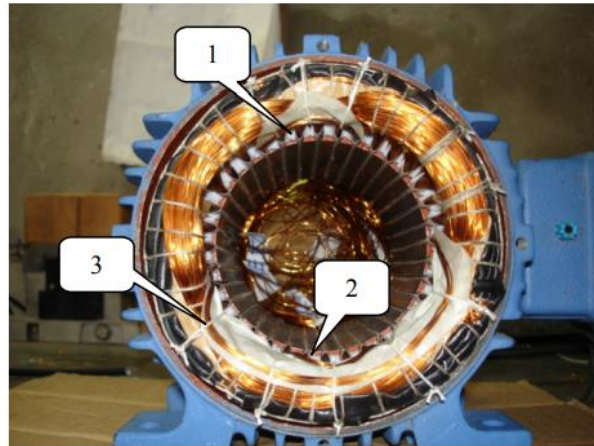


Figura 2. 27 - Sensores de Fluxo no Interior inseridos nas Cavas do MI em conjunto com os Enrolamentos do Estator. Sensores 1, 2 e 3 [38]

A detecção de avarias fazendo uso desta técnica será possível fazendo a análise das harmônicas e inter-harmônicas presentes nos sinais adquiridos pelos sensores, na medida em que cada tipo de avaria existente resultará na presença de sinais de frequências múltiplas específicas. Esta técnica apresenta uma grande desvantagem, na medida que sendo a mesma uma técnica invasiva ao motor de indução, no caso de uma possível rebobinagem será necessário recolocar as bobines utilizadas como sensores de fluxo magnético.

2.5.5 – MCSA – Métodos Baseados na Análise Espectral da Corrente Elétrica Estatórica

2.5.5.1 – Introdução

Um dos métodos mais utilizados para a deteção e diagnóstico de avarias em ‘MI’ baseia-se na análise espectral da corrente elétrica do estator. Através deste método é efetuado um monitoramento das correntes do estator enquanto o motor se encontra operacional ou com princípio de avaria, de modo a detetar possíveis avarias que, caso sejam tratadas precocemente, possam evitar a degradação parcial ou até mesmo total da máquina.

A técnica designada por MCSA (“Motor Current Signature Analysis”) apresenta-se como uma técnica de natureza não invasiva e bastante simples, na medida em que é necessário adquirir o sinal da corrente de apenas uma fase. Ao sinal de corrente adquirido é efetuada uma análise espectral de forma a detetar, qualificar e quantificar uma possível avaria no ‘MI’ [39, 40]. Na sua versão mais básica um sistema de monitoramento da corrente elétrica estatórica pode ser visualizado na imagem da figura (2.28).

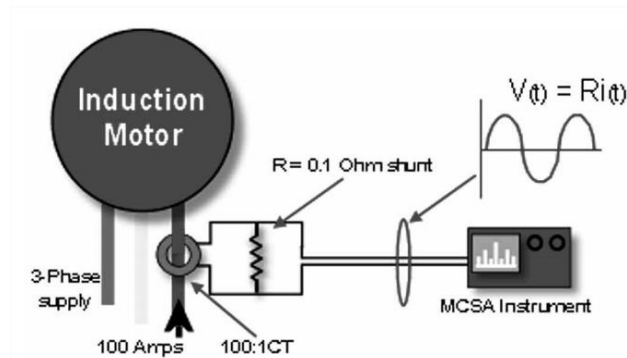


Figura 2. 28 - Sistema de Monitoramento da Corrente Elétrica do Estator na sua Versão Básica [41]

Através da figura 2.28, é possível verificar que o sistema de monitoramento apresentado é composto pelos seguintes componentes:

- Transformador de corrente *CT* (*Current Transformer*) para aquisição do sinal alternado da corrente elétrica do estator;
- Resistência *R* para que o sinal de saída recolhido pelo *CT* possa ser convertido num sinal de tensão;
- *MCSA Instrument* composto pelo sistema de aquisição de sinais e por um sistema de processamento de dados que irá produzir o espectro de frequência.

2.5.5.2 – Avarias na Gaiola Rotórica – Análise

No Subcapítulo 2.4.5.2, “Rotor em Curto-circuito”, foi dado a conhecer uma pequena introdução aos dois componentes que estão na base da ocorrência de avarias no que diz respeito aos rotores em curto-circuito, nomeadamente as barras e os anéis terminais. No âmbito deste capítulo, será efetuada uma análise mais detalhada do método relativamente às barras rotóricas fraturadas. Assim, como referido anteriormente, a existência de barras rotóricas e anéis terminais fraturados irão dar origem à presença de um campo girante no sentido inverso. A frequência das grandezas no rotor estão em função do escorregamento ‘ s ’ do motor, pelo que este sofre alterações quando existe alteração na frequência das tensões de alimentação e quando existe alteração no regime de carga. Assim, tal como no caso do estator, as correntes induzidas no rotor produzem um campo magnético girante, sendo que este gira a uma velocidade que está dependente da frequência de rotação (f_r) (2.14).

$$f_r = \frac{s \cdot f_1}{NP} \text{ [Hz]} \quad (2.14)$$

Na expressão (2.14), ‘ s ’, representa o escorregamento e pode ser encontrado estabelecendo a diferença entre a velocidade real do rotor ‘ N_{mec} ’ a velocidade do campo girante síncrono ‘ N_s ’ criado pelo estator. É de salientar que na expressão (2.15), o escorregamento ‘ s ’ encontra-se como proporção do valor de ‘ N_s ’. O valor da velocidade do campo girante síncrono está dependente do número de pares de pólos ‘ NP ’ da máquina e este pode ser representado pela expressão (2.16). Ainda na expressão (2.14), ‘ f_1 ’ representa a frequência da componente principal da tensão de alimentação.

$$s = \frac{N_s - N_{mec}}{N_s} \quad (2.15)$$

$$N_s = \frac{f \cdot 60}{NP} \text{ [rpm's]} \quad (2.16)$$

Na situação de inexistência de avarias no rotor, o campo magnético girante produzido

por este apresenta apenas uma componente, sendo esta no sentido direto, com uma frequência (f_2). Por outro lado, em situação de avaria, barras fraturadas ou anéis terminais quebrados, será gerado um campo magnético girante de sentido inverso em relação ao sentido de marcha do rotor, causando como consequência oscilações do binário eletromagnético médio da máquina. Com isso, a criação de um campo magnético girante no sentido inverso, devido a uma situação de avaria no rotor, induzirá uma corrente no enrolamento do estator com uma frequência que pode ser calculada a partir da expressão (2.17) [4].

$$f_{sb} = f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1 \quad (2.17)$$

Na expressão 2.17, ' f_{sb} ' corresponde as frequência características da corrente no caso de avaria no Rotor. Deve-se salientar que a sigla ' sb ' advém do facto de que as formas de onda originadas nestas situações apresentam frequências que são denominadas por bandas laterais ('*sideband*'), ou também, no caso de alguma literatura, por inter-harmónicas.

2.5.5.3 – Excentricidade – Análise

Como referido no subcapítulo 2.4.5.3, a excentricidade apresenta-se como um dos tipos de avarias que são suscetíveis de ocorrência nos 'MI', sendo esta localizada no Rotor/Veio da Máquina. Como foi ainda referido, existem três tipos de excentricidade, a estática, a dinâmica e a mista, que representa a junção das duas primeiras citadas. A técnica 'MCSA' pode ser utilizada de uma forma fiável para a deteção de níveis anormais de excentricidade, na medida em que o método baseia-se na ocorrência de assimetrias no circuito magnético da máquina quando existe um desequilíbrio na largura do entreferro. Por um lado, até mesmo um motor de indução que acaba de ser fabricado já tem presente em seu interior algum nível de excentricidade, pelo que é considerável como limite máximo um valor de 10% de excentricidade. Por outro lado, níveis de excentricidade acima de 25% podem ser consideradas extremamente perigosas para o Motor Elétrico e as consequências provenientes de uma situação de excentricidade são manifestadas no espectro de frequências da corrente estatórica, na medida em que são originadas as seguintes componentes de frequências [42]:

$$f_{ef} = f_1 * \left[(n.BR \pm n_d) * \frac{1-s}{NP} \pm 2.n_{sat} \pm v \right] \quad (2.18)$$

Na expressão (2.18), ' n ' representa um numero natural (1,2,3...), ' BR ' representa o número de Barras do rotor, ' n_d ' representa a ordem da excentricidade sendo 0 no caso da excentricidade estática e 1, 2, 3... no caso da excentricidade dinâmica; ' NP ' representa o número de pares de Pólos e ' v ' representa a ordem da harmónica da tensão de alimentação (1,3,5,7,...). A parcela $2.n_{sat}$ representa um valor que está associado ao modelo de saturação magnética considerado sendo que geralmente este valor não é levado em conta, sendo que para fins de simplificação essa parcela assume o valor '0' e deixa de existir.

Através da expressão (2.18) pode ainda ser rearranjada para estabelecer a deteção isolada da excentricidade estática ou dinâmica, pelo que é necessário estabelecer algumas manipulações aritméticas para o efeito, (2.19).

$$f_{ef} = f_1 * \left(n \cdot BR \cdot \frac{1-s}{p} \pm v \right) \pm f_1 * \left(n_a \cdot \frac{1-s}{p} \right) \quad (2.19)$$

De acordo com [42], a primeira parcela inserida no interior dos parêntesis reto corresponde à situação em que as componentes de frequência originadas na situação de excentricidade estática são iguais às harmónicas referentes às barras do rotor. A segunda parcela relaciona-se com as componentes adicionais de frequência em torno das harmónicas referente as Barras do rotor, criadas pela presença de excentricidade dinâmica.

Existe ainda o conceito relativo a frequência central ' f_c ', sendo que esta representa a frequência que deriva da multiplicação de ' BR ', pelo valor da frequência ' f_1 '. Na imagem da figura (2.29), pode se observar a representação da excentricidade estática no que toca as componentes adicionais de frequência em torno da frequência central.

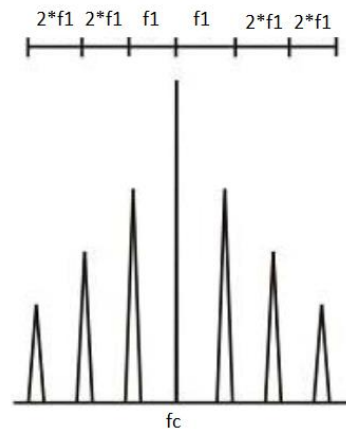


Figura 2. 29 - Representação das componentes adicionais de frequência no caso da Excentricidade Estática [Adaptado de 42]

Da mesma forma, a excentricidade dinâmica também pode ser representada no espectro de frequências, tendo em conta que esta apresenta componentes adicionais de frequência nas bandas laterais das componentes adicionais de frequência no caso da excentricidade estática. Estas bandas laterais estão distanciadas desta ultima o valor da frequência rotórica f_r . Para se ter uma melhor percepção, pode-se visualizar a imagem da figura 2.30.

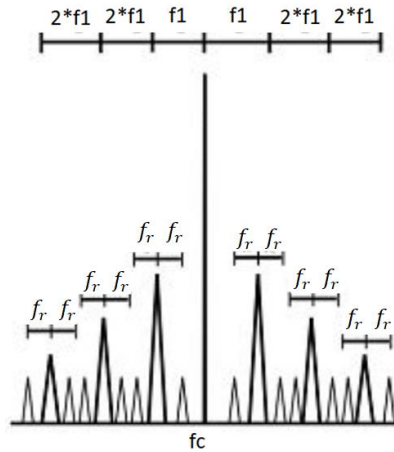


Figura 2. 30 - Representação das componentes adicionais de frequência no caso da Excentricidade Estática e Dinâmica [Adaptado de 42]

Em [42] está demonstrado que a utilização da técnica ‘MCSA’ fazendo uso da expressão (2.15) e (2.16) apresentam algumas desvantagens, pelo que na prática, a existência da excentricidade estática e dinâmica ocorrem simultaneamente, ou seja, é considerado para fins de análise excetricidade mista. Com isso, na presença de excentricidade mista, as componentes adicionais de frequência podem ser visualizadas na expressão (2.20).

$$f_{exc_mista} = f_1 \pm n * f_r \quad (2.20)$$

Em (2.20) ' f_r ' representa a frequência de rotação do rotor, e esta será melhor apresentada no próximo capítulo.

2.5.5.4 – Rolamentos – Análise

Como referido anteriormente, dentro dos diversos componentes suscetíveis a avarias nos 'MI', os rolamentos apresentam-se como um dos de elevada incidência. Para que possa ser conhecido as componentes adicionais de frequência inseridas na corrente elétrica estatórica na situação de avaria nos rolamentos, o ponto de partida será analisar o expetro de frequências do sinal da vibração mecânica.

No que toca ao expetro de frequências do sinal da vibração mecânica, são considerados quatro tipos de frequências relacionadas com as localizações suscetíveis de ocorrência de avarias nos rolamentos, sendo estas:

- f_{FTF} (“*Fundamental Train Frequency*”) – Frequência referente à gaiola do rolamento;
- f_{BSF} (“*Ball Spin Frequency*”) – Frequência referente aos corpos rolantes, esferas ou rolos;
- f_{BPFO} (“*Ball Pass Frequency Outer*”) – Frequência referente a fricção dos corpos rolantes na pista externa do rolamento ou simplesmente defeito na pista externa do mesmo;
- f_{BPFI} (“*Ball Pass Frequency Inner*”) – Frequência referente a fricção dos corpos rolantes na pista interna do rolamento ou simplesmente defeito na pista interna do mesmo.

As componentes de frequência referidas anteriormente podem ser determinadas por (2.21) , (2.22), (2.23) e (2.24) . Deve-se salientar que as expressões que serão apresentadas têm em conta os casos mais comuns onde a pista interior é móvel e a pista exterior é fixa em relação ao Motor [11].

$$f_{\text{FTF}} = \frac{1}{2} * f_2 \left(1 - \frac{B_d}{P_d} * \cos(\beta) \right) \quad (2.21)$$

$$f_{\text{BSF}} = \frac{f_2}{2} * \frac{P_d}{B_d} \left(1 - \left[\frac{B_d}{P_d} * \cos(\beta) \right]^2 \right) \quad (2.22)$$

$$f_{\text{BPFO}} = \frac{N_{bb}}{2} * f_2 \left(1 - \frac{B_d}{P_d} * \cos(\beta) \right) \quad (2.23)$$

$$f_{\text{BPFI}} = \frac{N_{bb}}{2} * f_2 \left(1 + \frac{B_d}{P_d} * \cos(\beta) \right) \quad (2.24)$$

Nas expressões anteriores, foram apresentadas as expressões para cálculo das componentes adicionais de frequência no espectro de vibração, no caso de avarias nos rolamentos, em quatro situações distintas, pelo que abaixo é apresentado o significado das grandezas desconhecidas:

- B_d – Diâmetro do corpo rolante (mm);
- P_d – Diâmetro Primitivo (mm)
- β – Ângulo de Contato (Graus °)
- N_{bb} – Número de corpos rolantes (“*Number of bearing balls*”)

Para uma melhor compreensão, apresenta-se na figura 2.31 uma imagem ilustrativa do rolamento tendo em conta as grandezas acima referidas.

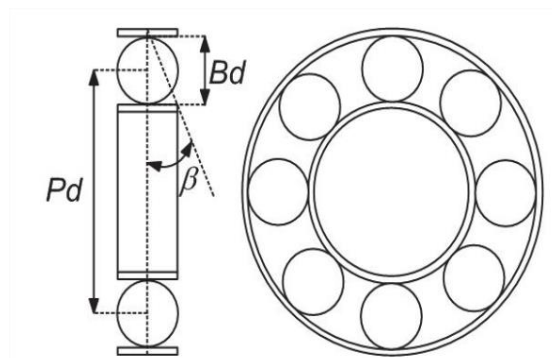


Figura 2. 31 - Imagem ilustrativa de um rolamento tendo em conta os seus parâmetros principais [43]

Tendo as expressões para cálculo das componentes adicionais de frequências no sinal da vibração mecânica, poderá ser calculado as bandas laterais específicas no sinal da corrente elétrica estatorica, nas quatro situações acima mencionadas, expressão (2.25).

$$f_{bf} = |f_1 \pm n * f_v| \quad (2.25)$$

Na expressão 2.25, ' n ' representa um número natural ($n = 1,2,3, \dots$) e ' f_v ' representa uma das quatro componentes de frequências calculadas em (2.21), (2.22), (2.23) ou (2.24). Por exemplo, se na expressão (2.25) substituir ' f_v ' pela expressão (2.21), então poderá se encontrar a componente adicional de frequência no sinal da corrente estatórica, cuja a avaria está relacionado com a gaiola do Rolamento, e assim sucesivamente.

2.5.5.5 – Enrolamentos do Estator – Análise

Como foi referido anteriormente, são vários os tipos de avarias que são suscetíveis de ocorrência nos enrolamentos do estator. A bobinagem trifásica que compõe o enrolamento do estator do 'MI' é responsável pela criação do campo magnético girante principal, pelo que é de extrema importância proceder à deteção, análise, qualificação e quantificação de uma possível avaria no mesmo. Como dito anteriormente, as avarias relativas aos enrolamentos do estator podem-se manifestar de cinco formas distintas, porém os curto-circuitos entre espiras da mesma bobina ou curto-circuitos entre bobinas do mesmo grupo apresentam-se como o ponto inicial para o desenrolar de outras falhas nos enrolamentos do estator [44].

De acordo com [45], usualmente, entre as espiras adjacentes que compõe uma determinada bobina, estão presentes diferenças de potencial que podem rondar entre 10 a 100 V. Por outro lado, a espessura do isolamento entre as mesmas é de apenas 0,5 mm, pelo que em operações de comutação, entradas em serviço ou mudança do regime de carga, fazem com que as tensões transitórias possam levar a que haja degradação do isolamento entre espiras. Na grande maioria das situações, as falhas relativas aos estatores dos 'MI' são consequência de curto-circuitos diversos nos enrolamentos do mesmo causado pela destruição parcial ou total dos isolamentos entre espiras de bobinas da mesma fase. Na imagem da figura (2.32) é possível visualizar o aspecto de uma bobinagem de um 'MI' após a ocorrência de um curto-circuito entre espiras.



Figura 2. 32 - Aspecto visual dos enrolamentos do estator após um curto circuito entre espiras [39]

No caso de um curto-circuito entre espiras será gerado na zona do curto-circuito um elevado gradiente térmico, assim como a geração de uma corrente de curto-circuito que circula no enrolamento danificado. Com isso, é gerado um campo girante de sentido inverso, i.e. é gerada uma força magnetomotriz inversa que reduz a força magnetomotriz média resultante do 'MI'. Consequentemente, o fluxo magnético do entreferro fica assimétrico, por causa das componentes adicionais de frequência que são criadas com o curto-circuito entre espiras. Estas componentes dependem do tipo de motor e poderão ser calculados de acordo com (2.26).

$$f_{sf} = \left\{ \frac{n}{NP} * (1 - s) \pm k \right\} * f_1 \quad (2.26)$$

Na expressão (2.26), 'n' representa um numero natural, 'NP' representa o número de pares de pólos, 's' representa o escorregamento e 'k' representa a ordem da harmónica.

Capítulo 3

Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas diversas técnicas de diagnóstico de avarias, inseridas no âmbito da análise espectral em frequência. No entanto, as técnicas propostas farão uso do quadrado da corrente elétrica estatística. O diagnóstico de avarias que será apresentado irá focar-se sobre as três mais importantes e recorrentes avarias que ocorrem nos MI, nomeadamente, barras fraturadas, excentricidade e curto-circuito entre espiras.

O desenvolvimento das diversas técnicas que serão apresentadas será realizado de uma forma metódica, ou seja, será seguido um certo padrão de apresentação:

- Apresentação das expressões das correntes elétricas estatísticas para os diversos tipos de avarias em estudo, nos quatro sistemas de coordenadas anteriormente referidos abc , $\alpha\beta 0$, $dq0$ e $dq0'$;
- Realização das conjugações analíticas entre as correntes elétricas do estator e obtenção das expressões resultantes para cada tipo de técnica em estudo;
- Análise detalhada das diversas componentes adicionais de frequências e os respetivos espectros de frequência que surgirão para as diversas técnicas, tendo em conta os três tipos de avarias mencionados anteriormente. Sempre que necessário, serão apresentadas as formas de onda das correntes do estator em questão;
- Finalmente, dar a conhecer o índice de severidade de cada técnica, associado a cada tipo de avaria apresentado. O índice de severidade será utilizado para comparar, para um determinado tipo de avaria, a sensibilidade entre as diversas técnicas relativas ao diagnóstico de avarias.

No final deste capítulo, será apresentado um subcapítulo que será utilizado como uma

espécie de conclusão/resumo das técnicas de diagnóstico de avarias utilizados, de modo a que possam ser facilmente analisados/comparados os seguintes fatores:

- As diversas componentes adicionais de frequências que surgem fazendo uso das diversas técnicas que serão apresentadas;
- A análise qualitativa das técnicas de diagnóstico, i.e., a quantidade de informação a nível espectral que se consegue extrair fazendo uso das diversas técnicas;
- A comparação entre as diversas técnicas a nível da sensibilidade/índice de severidade de cada técnica, tendo em conta o mesmo valor de escorregamento.

3.2 – Análise Espectral do Quadrado da Corrente Elétrica Estatórica (MSCSA)

No capítulo anterior, nomeadamente no subcapítulo 2.5.5, ‘MCSA – Métodos Baseados na Análise Espectral da Corrente Elétrica Estatórica’, foi efetuado um estudo acerca da análise espectral do sinal da corrente elétrica estatórica, i.e. um estudo acerca da aplicação da técnica MCSA, dando a conhecer as principais vantagens e desvantagens desta ferramenta de diagnóstico de avarias, assim como as principais componentes adicionais de frequência tendo em conta os vários tipos de avarias. No desenrolar deste subcapítulo irá ser apresentada uma técnica de diagnóstico de avarias que deriva da técnica MCSA. Esta técnica, designada de MSCSA (‘Motor Square Current Signature Analysis’), utiliza para realizar o diagnóstico e análise das diversas avarias associadas ao MI, não o sinal da corrente estatórica mas o quadrado da mesma. Serão apresentadas as diversas vantagens e desvantagens comparativamente com a técnica MCSA, assim como o desenvolvimento das componentes espectrais do sinal da corrente estatórica ao quadrado, em situação de bom funcionamento e em situação de avaria.

Em condições ideais e de bom funcionamento do equipamento, como visto anteriormente, a corrente elétrica estatórica (i_{s_a}) pode ser representada no domínio do tempo a partir da expressão (3.1).

$$i_{s_a}(t) = I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \quad (3.1)$$

Na expressão (3.1) ‘ $I_{m\acute{a}x}$ ’ representa a amplitude máxima do sinal das correntes estatóricas, ‘ ω_1 ’ corresponde à frequência angular elétrica do campo girante, ‘ t ’ representa o tempo, em segundos e ‘ α_0 ’ representa o ângulo inicial da corrente, ou seja, representa a defasagem em radianos da corrente do estator relativamente à tensão de alimentação.

Fazendo uso do sinal da expressão (3.1) ao quadrado e após se efetuarem as simplificações e manipulações necessárias, o sinal do quadrado da corrente estatórica da fase ‘a’ no sistema de coordenadas ‘abc’ ($i_{MSCSANOFault}$), é dado pela expressão (3.2).

$$i_{MSCSANOFault}(t) = \frac{I_{m\acute{a}x}^2}{2} + \frac{I_{m\acute{a}x}^2}{2} * \sin\left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.2)$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

A partir da análise da expressão (3.2) pode-se concluir que ao elevar o sinal da corrente estatística ao quadrado irá aparecer uma componente contínua no seu espectro de frequências, sendo esta dada pela primeira parcela, assim como uma componente alternada com uma frequência que é o dobro do valor da frequência fundamental do sinal da corrente estatística.

Para se chegar às componentes adicionais de frequência para os diversos tipos de avaria, serão inicialmente utilizadas as expressões da corrente estatística no domínio do tempo em situação de avaria. A partir destas expressões será obtido o quadrado das mesmas de modo a obter as frequências adicionais características de cada tipo de avaria estudada.

3.2.1 - Avarias na Gaiola Rotórica

Anteriormente, no subcapítulo 2.5.5.2, ‘Avarias na Gaiola Rotórica – Análise’, foi dado a conhecer a dedução das componentes adicionais de frequência no espectro de frequências do sinal da corrente elétrica estatórica, na situação de Avaria na Gaiola Rotórica, barras fraturadas.

Sabe-se que na situação de avaria na gaiola rotórica, as componentes adicionais de frequência situam-se em torno da componente fundamental, expressão (2.7). Considerando a fase ‘a’ como a que se utiliza para análise das avarias, para este tipo de avaria obtém-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} i s_{aBB}(t) = & I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\ & + I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin[(1 - 2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower}] \\ & + I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin[(1 + 2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Deve-se se salientar que independentemente da avaria que irá ser estudada, sempre que se referir ‘ $I_{m\acute{a}x_{lower}}$ ’ e ‘ β_{lower} ’, estas grandezas representam a amplitude máxima e o ângulo de início da corrente, respetivamente, referente à banda lateral inferior. Por outro lado ‘ $I_{m\acute{a}x_{upper}}$ ’ e ‘ β_{upper} ’ representam a amplitude máxima e o ângulo de início da corrente, respetivamente, referente à banda lateral superior.

Elevando ao quadrado a expressão (3.3) e após algumas simplificações, a expressão que se obtém no domínio do tempo, para a situação de avaria na gaiola rotórica, será dada pela expressão (3.4), [39].

$$\begin{aligned}
 i_{MSCSA_{BrokenBar}} = & \left(\frac{I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2}{2} \right) \\
 & + \left(\frac{I_{m\acute{a}x}^2}{2} \right) * \sin \left(2\omega_1 * t - 2 * \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left(2\omega_1 * t - \beta_{lower} - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left(2 * s * \omega_1 * t - \alpha_0 + \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left(2 * s * \omega_1 * t + \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left(4 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \tag{3.4} \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left[(2 - 2 * s) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left[(2 + 2 * s) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{I_{m\acute{a}x_{lower}}^2}{2} \right) * \sin \left[(2 - 4 * s) * (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{I_{m\acute{a}x_{upper}}^2}{2} \right) * \sin \left[(2 + 4 * s) * (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned}$$

A expressão (3.4) é composta por dez parcelas distintas, pelo que em [38] esta se encontra sob a forma simplificada pois o autor não tem em conta os ângulos de início das correntes (α_0, β_{lower} e β_{upper}) referente à componente fundamental do sinal e as respetivas bandas laterais. Tal como pode ser observado, a primeira parcela do sinal corresponde à componente contínua do sinal, pelo que facilmente se pode concluir que esta representa uma forte componente no respetivo espectro de frequências.

A segunda e terceira parcelas irão contribuir para a componente fundamental do sinal, sendo que esta apresenta uma frequência de $2 * f_1'$, ou seja, 100 Hz. Comparativamente ao valor da amplitude da componente fundamental inserida na expressão (3.2), pode-se observar que existe um aumento no valor desta, o que poderá ser também um indicador da presença de alguma avaria, que não necessariamente barras fraturadas.

Em relação à quarta, quinta e sexta parcelas do sinal, estas representam componentes de frequências que estão próximas da componente de corrente contínua DC, pois estas apresentam valores de frequência baixas comparativamente com as restantes parcelas do sinal. A quinta e sexta parcela irão contribuir para a mesma componente adicional de frequência, sendo que esta apresenta uma frequência em $2 * s * f_1'$. Por outro lado, a sétima parcela contribuirá com uma componente de frequência que é o dobro do valor da componente anterior, i.e., esta apresenta uma frequência de $4 * s * f_1'$. Como é citado pelo autor [46], é estabelecido o conceito de Zona primordial da avaria de barras fraturadas, na medida que se for considerado um escorregamento máximo até 5%, as componentes de frequência resultante das parcelas em questão surgirão sempre entre os 0 e 10 Hz, sendo este intervalo denominado pela citada Zona primordial.

A restantes parcelas do sinal, referentes à sétima, oitava, nona e décima parcelas, referem-se às típicas bandas laterais que surgem em torno da componente fundamental do sinal do quadrado da corrente elétrica estatística, sendo estas componentes de frequências específicas. Nestas parcelas, a amplitude do sinal poderá ser um bom indicador da presença de avaria na medida em que poderá realizar-se uma análise qualitativa ao nível da avaria. Com isso, as componentes de frequências em causa surgirão em:

- A sétima parcela surgirá em $2f_1 - 2 * s * f_1'$;
- A oitava parcela surgirá em $2f_1 + 2 * s * f_1'$;
- A nona parcela surgirá em $2f_1 - 4 * s * f_1'$;
- A décima parcela surgirá em $2f_1 + 4 * s * f_1'$;

Para melhor compreensão da análise efetuada anteriormente, na imagem da figura 3.1 será apresentado o espectro de frequências do sinal $i_{MSCSA_{BrokenBar}}$, considerando um escorregamento $s = 4 \%$.

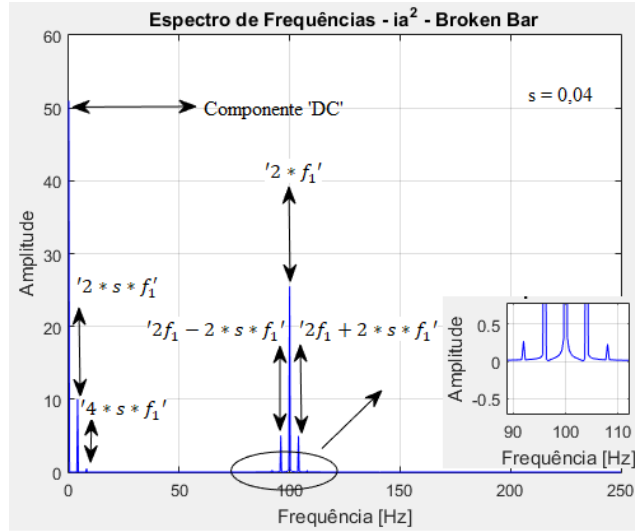


Figura 3. 1 - Espectro de frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatística na presença de avaria na gaiola rotórica – Técnica MSCSA

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘MSCSA’, nomeadamente na frequência $2 * f_1$, e a componente adicional de frequência específica para a avaria referente a barras fraturadas de maior amplitude (com frequência $2 * s * f_1$), então poderá definir-se um índice de severidade de acordo com a expressão (3.5). Deve-se salientar que o índice de severidade SF (Severity Fault) se altera com o regime de carga do ‘MI’.

$$SF_{MSCSA_{BrokenBar}} = \frac{|i_{MSCSA_{BrokenBar}}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{MSCSA_{BrokenBar}}\{f(2 * f_1)\}|} \quad (3.5)$$

3.2.2 - Excentricidade

De uma forma análoga ao caso anterior (3.2.1), no decorrer deste subcapítulo irão ser apresentadas as componentes adicionais de frequência no sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica, na presença de excentricidade. Como dito anteriormente, a excentricidade do entreferro num ‘MI’ pode ocorrer de três formas distintas, estática, dinâmica e mista. Em termos de simplificação ir-se-à considerar que a excentricidade estática e dinâmica ocorrem simultâneamente, pelo que a expressão (2.10) servirá de base para todo o dimensionamento das expressões.

Sabe-se que quando o ‘MI’ apresenta uma condição de excentricidade, os sinais das correntes elétricas estatóricas podem ser descritas no domínio do tempo, nomeadamente através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 iS_{a_{ecc}}(t) = & I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\
 & + I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left[\left(1 - n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 & + I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left[\left(1 + n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Na expressão (3.6), ω_r' representa a velocidade angular do Rotor, sendo que a mesma é função do escorregamento e do número de pares de pólos. No desenrolar de todo o capítulo, sempre que a avaria a ser estudada for excentricidade ou curto circuito entre espiras, subtende-se que o ‘MI’ apresenta dois pares de pólos. A expressão para o cálculo da velocidade angular ω_r' , pode ser observada em (3.7). A partir desta expressão facilmente consegue-se chegar à expressão da frequência f_r' , ou seja, a expressão da frequência de rotação do rotor será dada por (3.8).

$$\omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_1 * s}{NP} \tag{3.7}$$

$$f_r = \frac{\omega_r}{2 * \pi} \tag{3.8}$$

Na expressão (3.7), NP' representa o nº de Pares de Pólos da Máquina. Sendo assim, ao

e elevar a expressão (3.6) ao quadrado obtém-se no domínio do tempo uma expressão do sinal que irá traduzir o comportamento do quadrado da corrente da fase ‘a’ na condição de excentricidade $i'_{MSCSA_{Eccentricity}}$, sendo esta apresentada na expressão (3.9).

$$\begin{aligned}
 i_{MSCSA_{Eccentricity}} &= \left(\frac{I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2}{2} \right) \\
 &+ \left(\frac{I_{m\acute{a}x}^2}{2} \right) * \sin \left(2\omega_1 * t - 2 * \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left(2\omega_1 * t - \beta_{lower} - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left(n * \omega_r * t - \alpha_0 + \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left(n * \omega_r * t + \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left(2 * n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \tag{3.9} \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left[\left(2 - n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left[\left(2 + n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 &+ \left(\frac{I_{m\acute{a}x_{lower}}^2}{2} \right) * \sin \left[\left(2 - 2 * n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) * (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 &+ \left(\frac{I_{m\acute{a}x_{upper}}^2}{2} \right) * \sin \left[\left(2 + 2 * n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) * (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned}$$

As parcelas que compõem a expressão (3.9) apresentam amplitudes que irão ser similares às amplitudes das parcelas que compõem o sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica no caso de barras fraturadas. Porém, como expectável, as componentes adicionais de frequências irão estar posicionadas em frequências caraterísticas específicas para o caso da avaria referente à excentricidade.

Tal como no caso anterior, a primeira, segunda e terceira parcelas do sinal, apresentam-

se como componente contínua e componente fundamental do sinal (duas últimas).

A quarta e quinta parcelas do sinal correspondem à componente de frequências que estarão posicionadas em ' $n * f_r$ ' e ' $2 * n * f_r$ '. Estando estas diretamente dependentes da frequência de rotação do rotor, estas também estarão dependentes do regime de carga e estarão próximas de 25 e 50 Hz, respetivamente. Estas parcelas poderão com efeito diferenciar-se se a máquina estiver a operar na presença de excentricidade ou barras fraturadas, pois as mesmas só surgem na presença de excentricidade. As restantes parcelas do sinal, referentes à sétima, oitava, nona e décima parcelas, referem-se às típicas bandas laterais que surgem em torno da componente fundamental do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica, sendo estas componentes de frequências específicas. Nestas parcelas, a amplitude do sinal poderá ser um bom indicador da presença de avaria, na medida em que poderá realizar-se uma análise qualitativa ao nível da avaria. Com isso, as componentes de frequências em causa surgirão em:

- A sétima parcela surgirá em ' $2f_1 - nf_r$ ';
- A oitava parcela surgirá em ' $2f_1 + nf_r$ ';
- A nona parcela surgirá em ' $2f_1 - 2 * nf_r$ ';
- A décima parcela surgirá em ' $2f_1 + 2 * nf_r$ ';

Tal como poderá ser visto em [38] os autores definem uma Zona primordial da avaria referente à excentricidade, sendo que esta está definida no intervalo de frequência entre 47 e 53 Hz, considerando um escorregamento máximo de 5%. Para a Zona primordial estará contribuindo a sexta ($2 * n * f_r$) e nona parcela do sinal ($2f_1 - 2 * nf_r$). Esta Zona é muito importante para a deteção da avaria por excentricidade, na medida em que são componentes de frequência que surgem nesta zona apenas na presença de excentricidade. Para melhor compreensão da análise efetuada anteriormente, na figura 3.2 será apresentado o espectro de frequências do sinal ' $i_{MSCSA_{Eccentricity}}$ ', considerando um escorregamento ' $s = 2,5 \%$ ' e ' $n = 1$ '.

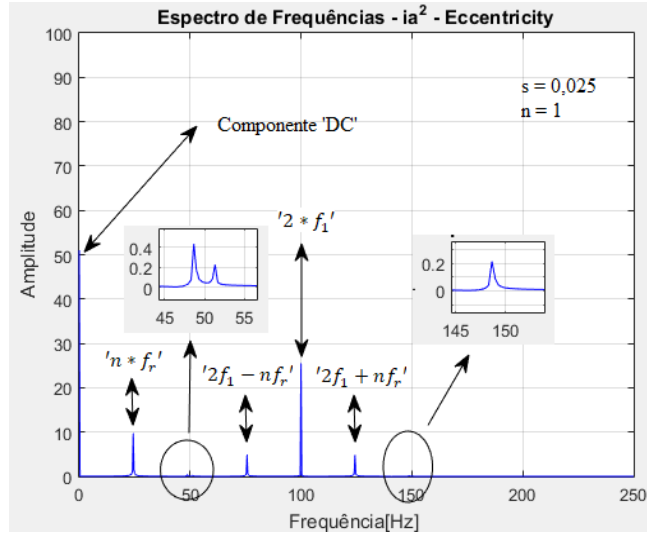


Figura 3.2 - Espectro de frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatística na presença de excentricidade – Técnica MSCSA

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘MSCSA’, inserida a $'2 * f_1'$, e a componente adicional de frequência específica, para a avaria referente à excentricidade mais influente inserida em $'n * f_r'$, então poderá estabelecer-se a expressão (3.10) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{MSCSA_{Eccentricity}} = \frac{\left| i_{MSCSA_{Eccentricity}} \{f(n * f_r)\} \right|}{\left| i_{MSCSA_{Eccentricity}} \{f(2 * f_1)\} \right|} \quad (3.10)$$

3.2.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

No capítulo anterior foi apresentada a técnica ‘MCSA’ para a detecção de avarias nos Enrolamentos do estator. Na expressão (2.13), podem ser obtidas as componentes adicionais de frequências típicas para um tipo de avaria específica relacionado com o Estator, nomeadamente, o curto circuito entre espiras.

Quando o ‘MI’ está a operar com algum curto circuito entre espiras, os sinais das correntes elétricas estatóricas $'i_{s_{a_{interturns}}}(t)'$, $'i_{s_{b_{interturns}}}(t)'$ e $'i_{s_{c_{interturns}}}(t)'$ apresentam um comportamento que pode ser traduzido a partir de expressões (3.11), (3.12) e (3.13). [47].

Diferentemente das outras duas avarias, barras fraturadas e excentricidade, no caso de um curto circuito entre espiras, o valor máximo da corrente de linha da fase onde está inserido o curto circuito se altera para um valor superior ao das restantes fases. Por outro lado, existem também alterações nas defasagens entre as correntes elétricas estatóricas deixando de ser 120° . Porém, para fins de simplificação, será considerado que, por um lado a fase em curto-circuito apresenta uma amplitude cujo valor máximo difere das restantes correntes (empregase as três parcelas que compõem o sinal) e, por outro, que a defasagem entre as correntes se mantêm em 120° . No caso das expressões a seguir apresentadas, será considerado que o curto circuito entre espiras irá ocorrer na fase ‘a’.

$$\begin{aligned}
 i_{s_{a_{interturns}}}(t) &= I_{m\acute{a}x_{cc}} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\
 &+ I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower}\right] \\
 &+ I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper}\right]
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 i_{s_{b_{interturns}}}(t) &= I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 &+ I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{2\pi}{3}\right] \\
 &+ I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{2\pi}{3}\right]
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
 i_{s_{\text{interturns}}}(t) &= I_{\text{máx}} * \sin\left(\omega_1 * t - \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \\
 &+ I_{\text{máx}_{\text{lower}}} * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k\right)(\omega_1 * t) - \beta_{\text{lower}} + \frac{2\pi}{3}\right] \\
 &+ I_{\text{máx}_{\text{upper}}} * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k\right)(\omega_1 * t) - \beta_{\text{upper}} + \frac{2\pi}{3}\right]
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Onde ' $I_{\text{máx}_{cc}}$ ', ' $I_{\text{máx}_{\text{lower}_{cc}}}$ ' e ' $I_{\text{máx}_{\text{upper}_{cc}}}$ ' correspondem ao valor máximo da corrente da componente fundamental, banda lateral inferior e banda lateral superior, respetivamente, na fase onde está inserido o curto circuito, neste caso a fase 'a'. Com isso, ao elevar a expressão (3.11) ao quadrado, irá obter-se um sinal cuja expressão contém dez parcelas, sendo esta descrita por (3.14).

$$\begin{aligned}
 i_{MSCSA_{Interturns}}(t) = & \left(\frac{I_{máx_{cc}}^2 + I_{máx_{lower_{cc}}}^2 + I_{máx_{upper_{cc}}}^2}{2} \right) \\
 & + \left(\frac{I_{máx_{cc}}^2}{2} \right) * \sin \left(2\omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(I_{máx_{lower_{cc}}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(I_{máx_{lower_{cc}}} \right. \\
 & \left. * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) * \sin \left(\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(\frac{I_{máx_{lower_{cc}}}^2}{2} \right) * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{I_{máx_{upper_{cc}}}^2}{2} \right) * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lower_{cc}}} \right) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lower_{cc}}} \right) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 + \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 + \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Relativamente aos três tipos de avarias (avaria na gaiola rotórica, excentricidade e curto circuito entre espiras), a primeira e a segunda parcela são semelhantes pois o sinal da corrente elétrica estatórica, na situação de avaria, apresenta a primeira parcela igual nos três casos (correspondente à componente fundamental do sinal), e após a aplicação do quadrado da soma de três parcelas, consegue-se constatar este facto, após as devidas simplificações.

Tal como visto anteriormente, a primeira e segunda parcelas do sinal da expressão (3.14) correspondem à componente contínua e componente fundamental do sinal, respetivamente,

sendo que para qualquer tipo de avaria, ao analisar o quadrado da corrente elétrica estatórica, estas componentes surgem sempre, variando apenas as respectivas amplitudes. No caso do curto circuito entre espiras, irão surgir novas componentes adicionais de frequências diferentes das avarias anteriores. Para análise mais pormenorizada das componentes adicionais de frequências que irão surgir para as restantes parcelas, será considerado ' $(k = 1)$ ', ' $(n = 1)$ ' e ' $(p = 2)$ '. Será também considerado que o 'MI' está a operar numa rede de 50 Hz e num regime de baixo escorregamento, até ao limite de 5%. De acordo com estas considerações, verifica-se que:

- A terceira parcela do sinal irá contribuir com uma componente de frequência que irá surgir em ' $2 * kf_1$ ', pelo que nas condições anteriormente delineadas, a mesma irá contribuir com a componente fundamental do sinal inserida nos 100 Hz, sendo que poderá surgir em outras frequências para diferentes valores de ' k '.
- A quarta parcela do sinal irá contribuir com uma componente que estará inserida em $f_1 * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s)\right)$, pelo que esta componente de frequência irá surgir entre 47,5 e 50 Hz, exclusive.
- A quinta e sexta parcela do sinal representam bandas laterais em torno da componente fundamental $2 * f_1$, na medida em que as mesmas irão surgir, no respetivo espectro de frequências, em $f_1 * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) - 2 * k\right)$. No caso da quinta parcela, esta terá lugar entre 50 e 52,5 Hz, inclusive e a sexta parcela terá lugar entre 147,5 e 150 Hz, exclusive.
- A sétima e décima parcelas do sinal, nas condições apresentadas anteriormente, acabarão por contribuir para a mesma componente de frequência adicional, situada em $f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s)\right)$. Esta frequência estará situada entre 23,75 e 25 Hz.
- Em relação à oitava e nova parcelas, tal como no caso da quinta e sexta parcelas, estas representam bandas laterais em volta da componente fundamental, na medida em que as mesmas irão surgir em $f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k\right)$ e $f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k\right)$. Estas surgirão entre 123,75 e 125 Hz, exclusive e 75 e 76,25, inclusive, respetivamente.

No caso da avaria referente ao curto circuito entre espiras, irão surgir componentes de frequências específicas que possibilitará uma análise fiável e eficaz para a deteção deste tipo

de avaria. Estas frequências poderão ser utilizadas para concluir se um determinado 'MI' se encontra a operar sobre uma situação de curto circuito entre espiras. Para melhor se visualizar o que foi explicado anteriormente, na imagem da figura 3.3 poderá ser visualizado o espectro de frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatística, numa situação de curto circuito entre espiras.

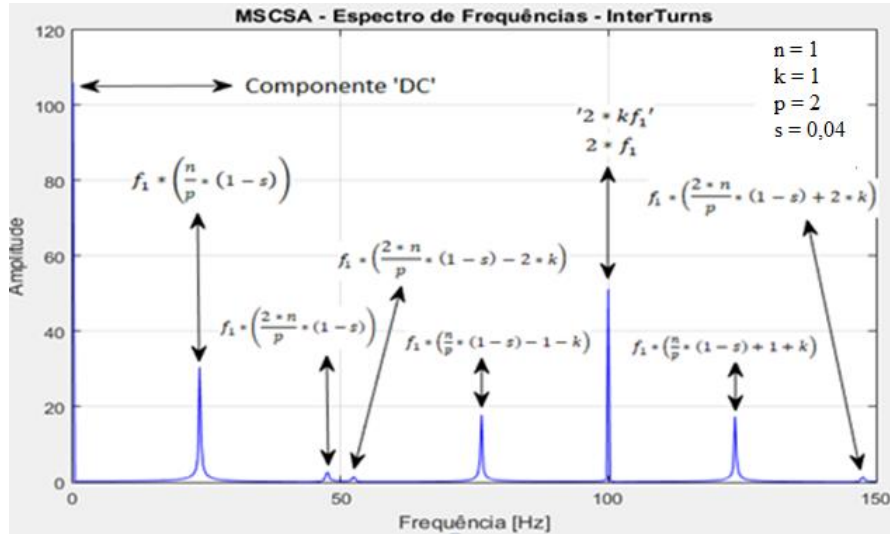


Figura 3. 3 - Espectro de frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatística na presença de curto circuito entre espiras

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica 'MSCSA', inserida a ' $2 \cdot f_1$ ', e a componente adicional de frequência específica, para a avaria referente a curto circuito entre espiras, mais influente, inserida a ' $f_1 \cdot \left(\frac{n}{p} \cdot (1-s)\right)$ ', então poderá estabelecer-se a expressão (3.15) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{MSCSA_{Interturns}} = \frac{\left| i_{MSCSA_{Interturns}} \left\{ f \left(f_1 \cdot \left(\frac{n}{p} \cdot (1-s) \right) \right) \right\} \right|}{\left| i_{MSCSA_{Interturns}} \{ f(2 \cdot f_1) \} \right|} \quad (3.15)$$

3.3 – Análise Espectral da Soma do Quadrado das Correntes Elétricas Estatóricas (MSSCSA)

No subcapítulo anterior, foi efetuado um estudo acerca da análise espectral do quadrado do sinal da corrente estatórica (técnica *MSCSA*), nomeadamente para três tipos de avarias distintos (Avaria na Gaiola Rotórica, Excentricidade e Curto circuito entre espiras). Através deste estudo foi possível verificar quais as componentes adicionais que surgem no respetivo espectro de frequências, quando o ‘MI’ está a operar em modo de avaria. Neste subcapítulo será apresentada uma abordagem complementar, nomeadamente através da análise espectral do sinal da soma do quadrado das três correntes elétricas estatóricas (*MSSCSA – Motor Sum Square Currents Signature Analysis*) para os três tipos de avarias citados anteriormente. Para tal, como no caso da técnica *MSCSA*, serão obtidas as expressões matemáticas que irão resultar para os três tipos de avarias já estudados anteriormente.

Numa situação ideal, considerando um sistema de tensões de alimentação totalmente sinusoidal, e equilibrado, e o ‘MI’ a operar sem a presença de avarias, o sinal da soma do quadrado das três correntes estatóricas ($i_{MSSCSANoFault}$), pode ser expresso por (3.16).

$$\begin{aligned}
 i_{MSSCSANoFault}(t) &= i_s^2 + i_b^2 + i_c^2 \\
 &\equiv (I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0))^2 \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{2 * \pi}{3}\right) \right)^2 \\
 &+ \left(I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\omega_1 * t - \alpha_0 + \frac{2 * \pi}{3}\right) \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

A partir da expressão (3.16), e após as devidas simplificações e manipulações matemáticas, consegue-se chegar à expressão (3.17) que representa uma constante, i.e., no respetivo espectro de frequências, este sinal terá apenas uma componente contínua.

$$i_{MSSCSANoFault}(t) = \frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x}^2 \tag{3.17}$$

Como no caso anterior, serão apresentadas as expressões matemáticas generalizadas da soma do quadrado das correntes para os três tipos de avarias e depois as expressões já simplificadas, de modo a que possam ser analisadas as respectivas componentes de frequências que irão surgir nestas situações.

3.3.1 - Avarias na Gaiola Rotórica

Como já referido anteriormente, na situação de avaria na gaiola rotórica, o sinal da corrente elétrica estatórica irá apresentar duas componentes adicionais de frequência, que correspondem às típicas bandas laterais que surgem na presença deste tipo de avaria em específico. O objetivo principal é estabelecer a expressão para a soma do quadrado das correntes estatóricas para a avaria em estudo, de modo a que se possa analisar as componentes de frequências que irão surgir.

No subcapítulo 3.2.2, para o método ‘*MSSCSA*’, foi apresentado através da expressão (3.5) o sinal correspondente à corrente elétrica do estator da fase ‘a’, na presença de avaria na gaiola rotórica. Considerando que as correntes estatóricas das outras fases encontram-se, em relação à fase ‘a’, desfasadas de um terço de período, para esta nova técnica é necessário elevar os sinais das correntes estatóricas das três fases ao quadrado e depois somá-los. Posto isto, na expressão (3.18), pode-se observar a expressão do sinal da soma do quadrado das correntes ($i_{MSSCSA_{BrokenBar}}$) para a situação de avaria na gaiola rotórica, nomeadamente, barras fraturadas (*Broken Bars*). Na expressão (3.19) pode-se observar o mesmo sinal, mas após se efetuarem simplificações e manipulações matemáticas. Deve-se ainda salientar que as simplificações das expressões foram realizadas fazendo uso do software MATLAB a partir da função ‘*sym*’.

$$i_{MSSCSA_{BrokenBar}}(t) = i_{s_{aBB}}^2 + i_{s_{bBB}}^2 + i_{s_{cBB}}^2 \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned}
 i_{MSSCSABrokenBar}(t) = & \left[\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(2 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-2 * s * \omega_1 * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.19) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(4 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Neste caso particular, o sinal da soma do quadrado das correntes apresenta como componente fundamental a componente contínua (DC) do mesmo, pois representa a componente com maior amplitude relativamente às restantes parcelas.

Na expressão (3.19), pode-se observar que no caso da avaria na gaiola rotórica para além da componente fundamental do sinal irão surgir apenas duas componentes adicionais. Estas componentes são de baixa frequência que surgem em $'2 * s * f_1'$ e $'4 * s * f_1'$. Considerando regimes de carga em que o escorregamento apresenta um valor máximo de 5%, pode-se concluir que estas componentes irão surgir sempre no intervalo entre 0 e 10 Hz, sendo a segunda sempre o dobro da primeira. Tal como acontece na técnica 'MSCSA', poderá ser estabelecida uma zona primordial para este tipo de avaria em específico, na medida em que, nas condições acima apresentadas, as componentes adicionais de frequência surgirão sempre no mesmo intervalo de frequências.

De acordo com a análise efetuada acima, para melhor compreensão, na figura 3.4 apresenta-se o espectro de frequências do sinal $'i_{MSSCSABrokenBar}'$, correspondente à soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas na situação de barras fraturadas.

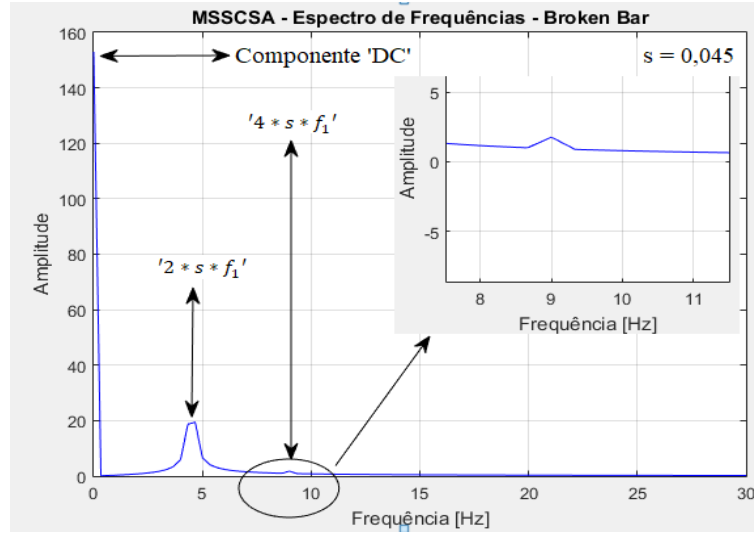


Figura 3. 4 - Espectro de frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas na presença de Barras Fraturadas

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘MSSCSA’, inserida a 0 Hz, e a componente adicional de frequência específica, para a avaria referente a barras fraturadas com maior amplitude, ou seja, localizada em $2 * s * f_1$, pode-se estabelecer a expressão (3.20) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{MSSCSABrokenBar} = \frac{|i_{MSSCSABrokenBar}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{MSSCSABrokenBar}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.20)$$

3.3.2 - Excentricidade

De uma forma análoga ao caso anterior, para a obtenção dos sinais correspondentes na presença de excentricidade, será mais uma vez necessário elevar os sinais das correntes estatóricas ao quadrado e depois somá-los. Posto isto, na expressão (3.21) pode-se observar a expressão do sinal da soma do quadrado das correntes ($i_{MSSCSAEccentricity}$) para a situação de avaria referente a excentricidade. Na expressão (3.22) pode-se observar o mesmo sinal, porém após as devidas simplificações e manipulações matemáticas.

$$i_{MSSCSAEccentricity}(t) = i_{s_{aecc}}^2 + i_{s_{becc}}^2 + i_{s_{cecc}}^2 \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned}
 i_{MSSCSA_{Eccentricity}}(t) = & \left[\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-n * \omega_r * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.22) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(2 * n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Tal como era expectável, a primeira parcela do sinal ' $i_{MSSCSA_{Eccentricity}}$ ' representa a componente fundamental do mesmo, i.e., a componente fundamental do sinal é a componente contínua. Por outro lado, tal como pode ser observado na expressão (3.22), as parcelas resultantes acabam por apresentar similaridades em relação às parcelas do sinal ' $i_{MSSCSA_{BrokenBar}}$ ', com a grande diferença de que no caso da excentricidade, as componentes adicionais de frequência estão dependentes do valor de ($n = 1,2,3 \dots$) e do valor da frequência ' f_r' ' (que depende do escorregamento), enquanto que no caso anterior, as componentes adicionais de frequência no caso de avaria na gaiola rotórica estavam dependentes apenas do escorregamento ' s' '.

No caso da excentricidade, irão surgir no respetivo espectro de frequências componentes adicionais específicas, nomeadamente, em ' $n * f_r'$ ' e ' $2 * n * f_r'$ ' pelo que para um valor de ($n = 1$), as componentes adicionais de frequência irão variar entre 0 e 50 Hz, sendo que a segunda e terceira parcelas irão surgir próximas a 25 Hz, e a quarta parcela irá surgir próxima aos 50 Hz. Para melhor compreensão, na figura 3.5 pode-se observar o espectro de frequências do sinal ' $i_{MSSCSA_{Eccentricity}}$ ', correspondente à soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas na situação de excentricidade.

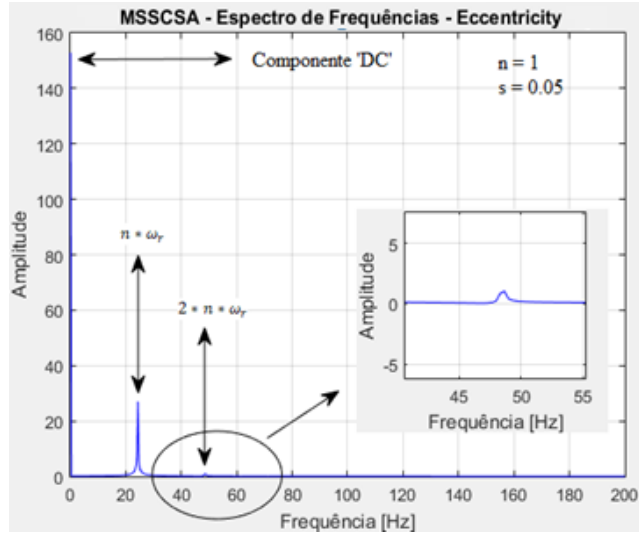


Figura 3. 5 - Espectro de frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatísticas na presença de Excentricidade

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘MSSCSA’, inserida a 0 Hz, e a componente adicional de frequência específica de maior amplitude ‘ $n * f_r$ ’, pode-se estabelecer a expressão (3.23) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{MSSCSA_{Eccentricity}} = \frac{\left| i_{MSSCSA_{Eccentricity}} \{f(n * f_r)\} \right|}{\left| i_{MSSCSA_{Eccentricity}} \{f(DC \text{ Component})\} \right|} \quad (3.23)$$

3.3.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

Para a obtenção dos sinais correspondentes na situação de falha no estator, nomeadamente na presença de curto circuito entre espiras, será necessário, mais uma vez, elevar os sinais das correntes estatóricas ao quadrado e depois somá-los. De acordo com isto, obtém-se a expressão (3.24) $(i_{MSSCSAInterturns}(t))$ para a situação deste tipo de falha. Na expressão (3.25) pode-se observar o mesmo sinal, porém após as devidas simplificações e manipulações matemáticas.

$$i_{MSSCSAInterturns}(t) = iS_{a_{interturns}}^2 + iS_{b_{interturns}}^2 + iS_{c_{interturns}}^2 \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} i_{MSSCSAInterturns}(t) = & (I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2) \\ & + (I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 - I_{m\acute{a}x}^2) * \sin\left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\ & + (I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}) * \sin\left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2}\right) \\ & + (I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}) * \sin\left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s)\right)(\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right] \\ & + (I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 - I_{m\acute{a}x_{lower}}^2) * \sin\left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k\right)(\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower}\right] \\ & + (I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 - I_{m\acute{a}x_{upper}}^2) * \sin\left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k\right)(\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper}\right] \\ & + (I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} - I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k\right)(\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower}\right] \\ & + (I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k\right)(\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper}\right] \\ & + (I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + 2 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k\right)(\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower}\right] \\ & + (I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + 2 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k\right)(\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper}\right] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Diferentemente dos outros dois tipos de avaria, no caso do curto circuito entre espiras, ao estabelecer a soma do quadrado das correntes, o sinal resultante apresenta diversas parcelas, sendo que a primeira parcela corresponde ao valor da componente fundamental do sinal, que é a componente contínua. No caso da segunda e terceira parcela, as componentes de frequência resultantes da contribuição destas duas parcelas irão estar inseridas em $'2 * f_1'$

e $'2 * k f_1'$, respetivamente. Como se pode observar, estas duas componentes são similares e no caso de se considerar $'(k = 1)'$, a segunda e terceira parcelas do sinal irão estar inseridas em 100 Hz.

Para se efetuar a análise da localização das componentes de frequências que são originadas pela contribuição das parcelas do sinal resultante, será considerado $'(k = 1)'$, $'(n = 1)'$ e $'(p = 2)'$. Será ainda considerado que o 'MI' opera na presença de regimes de funcionamento cujo escorregamento apresenta um valor máximo de 5%.

- No caso da quarta parcela do sinal, a componente de frequência irá estar inserida em $'f_1 * \frac{2*n}{p} * (1 - s)'$ pelo que no respetivo espectro de frequências esta irá apresentar uma amplitude relativamente pequena, devido ao facto desta ser resultante da diferença de duas amplitudes. Através dessa parcela será originada uma banda lateral que surgirá sempre no intervalo]47,5;50[Hz.
- A quinta e sexta parcelas apresentam componentes de frequência que irão surgir em $'f_1 * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k\right)'$. Para as condições apresentadas anteriormente, através dessas parcelas, serão originadas duas bandas laterais que surgirão sempre entre]50;52,5[e]147,5;150[Hz, respetivamente. Estas componentes também apresentam amplitudes relativamente pequenas devido ao facto de as mesmas serem resultado da diferença do quadrado de duas amplitudes que apresentam valores próximos. A sua tão pequena amplitude poderá levar a que estas componentes sejam facilmente confundidas com ruído.
- A sétima e oitava parcelas apresentam componentes de frequência que irão surgir em $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 \pm k\right)'$. Para as condições apresentadas anteriormente, através dessas parcelas serão originadas duas bandas laterais que surgirão sempre entre]123,75;125[e]23,75;25[Hz, respetivamente.
- A nona e décima parcelas apresentam componentes de frequência que irão surgir em $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 \pm k\right)'$. Para as condições apresentadas anteriormente, através dessas parcelas, serão originadas duas bandas laterais que surgirão sempre entre]23,75;25[e]75;76,25[Hz, respetivamente. Como se pode facilmente concluir, a nona parcela do sinal $'i_{MSSCSA_{Interturns}}'$ irá contribuir com a oitava parcela analisada

anteriormente, na medida em que ambas irão surgir em $'f_1 * \frac{n}{p} * (1 - s)'$ após as devidas simplificações.

Após a análise efetuada acima, e para melhor compreensão, pode-se observar na figura 3.6 o espectro de frequências do sinal $'i_{MSSCSA_{Interturns}}'$, correspondente à soma do quadrado das correntes elétricas estatísticas na situação de curto circuito entre espiras.

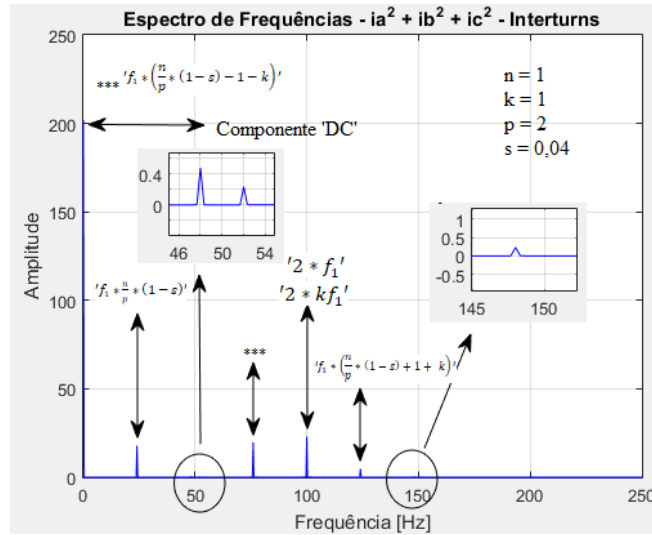


Figura 3. 6 - Espectro de frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatísticas na presença de curto circuito entre espiras

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica 'MSSCSA', inserida em 0 Hz, e a componente adicional de frequência específica associada a esta falha com maior amplitude $'2 * f_1'$, pode-se estabelecer a expressão (3.26) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{MSSCSA_{Interturns}} = \frac{|i_{MSSCSA_{Interturns}}\{f(2 * f_1)\}|}{|i_{MSSCSA_{Interturns}}\{f(DC \text{ Component})\}|} \quad (3.26)$$

3.4 – Técnicas de Análise Espectral das Correntes Elétricas Estatóricas no Sistema $\alpha\beta$

Nos subcapítulos anteriores foi efetuado um estudo acerca de duas técnicas relacionadas com a análise espectral, sendo que a primeira (*MSCSA*) realiza a análise do espectro de frequências do quadrado da corrente elétrica estatórica, e a segunda (*MSSCSA*) a análise do espectro de frequências da soma do quadrado das correntes do estator.

Neste subcapítulo pretende-se propor e realizar um estudo acerca de duas técnicas também relacionadas com análise espectral. Porém, neste caso, irá proceder-se a uma mudança do sistema de variáveis '*abc*' para um sistema de duas dimensões, nomeadamente através da aplicação da transformação de Clarke-Concordia, ou transformada $\alpha\beta$. Geralmente, os '*MI*' são operados com ligação dos enrolamentos estatóricos em triângulo ou em estrela sem neutro acessível, pelo que nestes casos, poderá desprezar-se a componente homopolar. As correntes estatóricas ' I_{α}' e ' I_{β}' são correntes que operam sobre um plano fixo no espaço, encontrando-se desfasadas de 90° . Para melhor compreensão, a representação geométrica e vetorial do sistema de coordenadas '*abc*' e ' $\alpha\beta$ ' pode ser visualizado na figura 3.7.

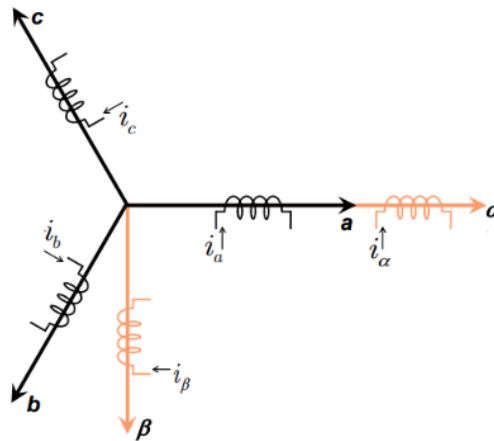


Figura 3. 7 - Representação Vetorial e geométrica do sistema de coordenadas *abc* e $\alpha\beta$ [48]

A transformada de Clarke-Concordia é realizada efetuando a multiplicação da matriz de Clarke-Concordia ' M ' pelo vetor das correntes do estator, pelo que nas expressões (3.27) e (3.28) poderão ser visualizadas as expressões correspondentes às correntes no sistema $\alpha\beta$ e a matriz de Clarke-Concordia, respetivamente.

$$I_{\alpha\beta 0} = M * I_{s_abc} \quad (3.27)$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Na expressão (3.27) ' $I_{\alpha\beta 0}$ ' corresponde às correntes estatóricas após a aplicação da transformada de Clarke-Concordia. Sendo assim, a expressão extendida para as correntes do estator no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ pode ser observada na expressão (3.29).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Considerando o motor a operar em boas condições de funcionamento e com um sistema de alimentação equilibrado, obtêm-se as seguintes expressões para as correntes estatóricas no plano $\alpha\beta$:

$$i_{\alpha_NoFault}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \quad (3.30)$$

$$i_{\beta_NoFault}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.31)$$

Em termos de representação gráfica, nas figuras 3.8 e 3.9 pode-se visualizar as correntes elétricas estatóricas no sistemas de coordenadas 'abc' e ' $\alpha\beta$ '.

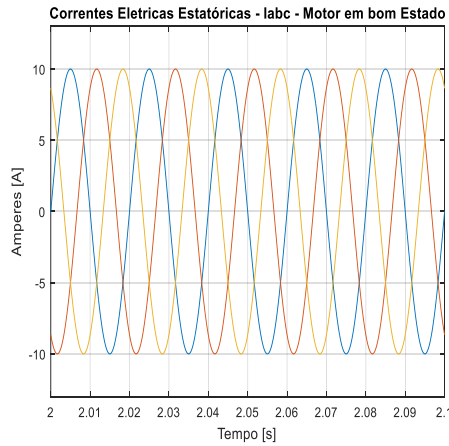


Figura 3.8 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas abc

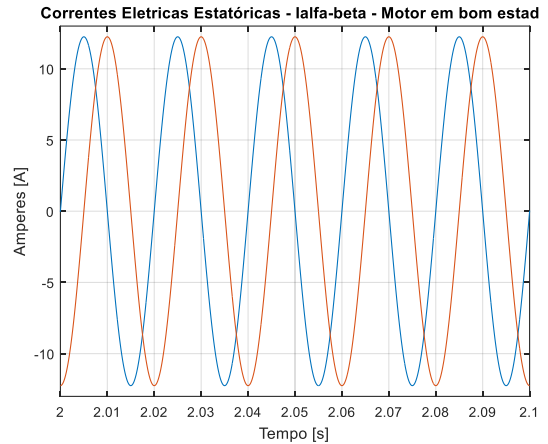


Figura 3.9 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas $\alpha\beta$

É de salientar que no caso da transformação de Clarke-Concordia, a componente fundamental do sinal se mantem, ou seja, a componente fundamental é igual a 50 Hz e geralmente para efeitos de simplificação esta transformação é aplicada de forma a que a corrente ' i_{α}' ' esteja sincronizada com a corrente ' i_{sa}' '.

3.4.1 - Análise Espectral do Sinal ($i_\alpha * i_\beta$)

Após ter sido estudado anteriormente o desenvolvimento das expressões dos sinais das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', neste subcapítulo será apresentado o estudo acerca do sinal resultante quando se procede ao produto entre as correntes ' i_α ' e ' i_β ', no caso do ' MI ' em bom funcionamento, motor com barras fraturadas, motor com excentricidade e motor com espiras em curto circuito no enrolamento da fase 'a'.

Em [49] foi apresentado um estudo acerca desta técnica de modo a poder mostrar que esta apresenta uma sensibilidade superior, comparativamente a outros métodos clássicos, tais como *MCSA*, *MSCSA*, *PVSM* (*Park's Vector Square Modulus*) e *PH* (*Park-Hilbert*). Neste mesmo artigo, os autores denominam esta técnica por '*PVPA*' (*Park's vector product approach*).

Primeiro serão apresentadas as expressões para o caso do ' MI ' a operar em bom estado de funcionamento e nos próximos subcapítulos irão ser apresentadas as expressões do sinal em estudo no caso das avarias anteriormente referidas, e em seguida, a respetiva representação gráfica do espectro de frequências do mesmo.

Numa situação ideal, e de uma forma análoga ao considerado no estudo dos outros sinais, em condições de bom funcionamento e tendo em conta as expressões (3.30) e (3.31) o sinal do produto das correntes estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ' ($i_{PPVCNoFault}$), após as devidas simplificações e manipulações matemáticas, pode ser observada na expressão (3.32).

$$i_{PVPA_{NoFault}}(t) = \frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x}^2 * \sin(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \pi) \quad (3.32)$$

A primeira observação importante de referir ao observar a expressão do sinal ($i_{PVPA_{NoFault}}$) é que esta apresenta uma componente fundamental inserida em ' $2 * f_1$ ', porém, ao contrário da técnica *MSCSA*, o espectro de frequências deste método não apresenta componente contínua. Em termos de desequilíbrio nos enrolamentos do estator, este é verificado, somente quando o ' MI ' está a operar com a presença de algum curto circuito entre espiras. Em relação aos outros dois tipos de avaria em estudo, barras fraturadas e excentricidade, apesar destas terem como consequência o surgimento de componentes de

frequências adicionais no seu respectivo espectro de frequências, o que se verifica é uma modelação na amplitude das correntes.

3.4.1.1 – Avaria na Gaiola Rotórica - Análise

Para a aplicação desta técnica de diagnóstico é necessário proceder numa primeira instância à aplicação da transformação de Clarke-Concordia e em seguida efetuar a multiplicação das respectivas componentes. Assim, ao realizar a aplicação da transformada de Clarke-Concordia obtêm-se as seguintes correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ‘ $\alpha\beta$ ’ e no caso de avaria na gaiola rotórica:

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha_BrokenBar}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_lower} * \sin[(1 - 2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower}] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_upper} * \sin[(1 + 2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper}]
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

$$\begin{aligned}
 i_{\beta_BrokenBar}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_lower} * \sin\left[(1 - 2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_upper} * \sin\left[(1 + 2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right]
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

Como pode ser visualizado através das expressões (3.33) e (3.34), as formas de onda do sinal das correntes elétricas estatóricas apresentam a mesma amplitude e frequência, sendo a única diferença o desfasamento de 90° entre as duas. Com isso, em caso de barras fraturadas, o sinal resultante do produto entre a corrente $i_{\alpha_BrokenBar}$ e $i_{\beta_BrokenBar}$, pode ser observado na expressão (3.35).

$$\begin{aligned}
 i_{PVPA_{BrokenBar}}(t) = & \left(\frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x}^2\right) * \sin(2\omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \pi) \\
 & + \left(\frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) * \sin(2\omega_1 * t - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \pi) \\
 & + \left(\frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}\right) \\
 & * \sin\left((2 - 2 * s) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) \\
 & * \sin\left((2 + 2 * s) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2\right) \\
 & * \sin\left((2 - 4 * s) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - 2 * \beta_{lower} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2\right) \\
 & * \sin\left((2 + 4 * s) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - 2 * \beta_{upper} + \pi\right)
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

Tal como pode ser observado na expressão (3.35), o sinal resultante $i_{PVPA_{BrokenBar}}$ apresenta seis parcelas distintas, sendo que a primeira e a segunda parcela contribuem para a componente fundamental do sinal a $2 * f_1'$, e as restantes parcelas constituem as típicas bandas laterais que surgem em torno desta. As bandas laterais existentes irão surgir em $f_1 * (2 - 2 * s)$, $f_1 * (2 + 2 * s)$, $f_1 * (2 - 4 * s)$ e $f_1 * (2 + 4 * s)$ e estas, para valores de escorregamento até um limite de 5%, terão lugar sempre entre 90 e 110 Hz.

Para melhor compreensão das componentes existentes no sinal $i'_{PVPABrokenBar}$, pode-se visualizar na figura 3.10 o espectro de frequências do mesmo, considerando um escorregamento de 4,5%.

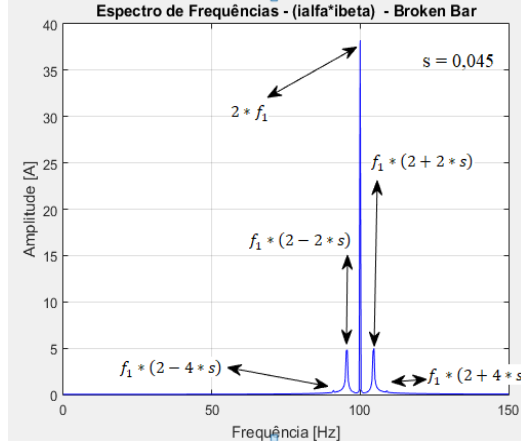


Figura 3. 10 - Espectro de frequências do sinal resultante do produto entre as correntes i'_α e i'_β na presença de avaria na gaiola rotórica – Técnica PVPA

Tal como acontece no caso da técnica ‘MSCSA’, a baixa amplitude das componentes das bandas laterais inseridas em $f_1 * (2 - 4 * s)$ e $f_1 * (2 + 4 * s)$ pode levar a que estas sejam facilmente confundidas com ruído no sinal, pelo que é necessário analisar esta componente em pelo menos dois regimes de funcionamento, de modo a visualizar-se, por um lado, com o aumento de carga, se a amplitude destas aumentam e, por outro, se as respetivas componentes adicionais de frequência se distanciam da componente fundamental com o aumento do escorregamento.

Outro fator importante a ser estudado é estabelecer a expressão para o cálculo do índice de severidade $SF_{PVPABrokenBar}$. Com isso, tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘PVPA’, inserida a $2 * f_1$, e a componente adicional de frequência específica, para a avaria referente a barras fraturadas, a mais influente inserida a $f_1 * (2 \pm 2 * s)$, então poderá estabelecer-se a expressão (3.36) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{PVPABrokenBar} = \frac{|i_{PVPABrokenBar}\{f(f_1 * (2 \pm 2 * s))\}|}{|i_{PVPABrokenBar}\{f(2 * f_1)\}|} \quad (3.36)$$

3.4.1.2 - Excentricidade

De uma forma equivalente ao caso anterior, para verificar o impacto deste tipo de avaria no método em análise, será aplicada a transformada de Clarke-Concordia aos sinais das correntes elétricas do estator no caso de avaria por excentricidade. Assim, as correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ‘ $\alpha\beta$ ’, no caso de excentricidade, são expressas por:

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha_{Eccentricity}}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left[\left(1 - n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left[\left(1 + n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}
 i_{\beta_{Eccentricity}}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin \left(\omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left[\left(1 - n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left[\left(1 + n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

Tendo as expressões das correntes elétricas estatóricas no sistema ‘ $\alpha\beta$ ’, o segundo objetivo será obter a expressão resultante quando se efetua o produto entre estas duas componentes. Com isso, na expressão (3.39) poderá ser visualizado a expressão do sinal ‘ $i_{PVPA_{Eccentricity}}$ ’ que irá ser utilizado para se analisar as respectivas componentes adicionais de frequências, quando o ‘ MI ’ está a operar com a presença de excentricidade.

$$\begin{aligned}
 i_{PVPA_{Eccentricity}}(t) = & \left(\frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x}^2\right) * \sin(2\omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \pi) \\
 & + \left(\frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) * \sin\left(2\omega_1 * t - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}\right) * \sin\left(\left(2 - n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{2} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) * \sin\left(\left(2 + n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2\right) * \sin\left(\left(2 - 2 * n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - 2 * \beta_{lower} + \pi\right) \\
 & + \left(\frac{3}{4} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2\right) * \sin\left(\left(2 + 2 * n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right) * (\omega_1 * t) - \alpha_0 - 2 * \beta_{upper} + \pi\right)
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

Como pode ser visualizado na expressão (3.39), as expressões resultantes do produto entre as correntes elétricas estatóricas, no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', no caso da avaria referente a excentricidade, são muito similares às expressões no caso de avaria na gaiola rotórica, tendo por diferença apenas o posicionamento das componentes adicionais de frequência. Tal como no caso anterior, a primeira e segunda parcela irão contribuir para a componente fundamental do sinal inserida em ' $2 * f_1'$ '. As restantes parcelas constituem as típicas bandas laterais em torno da componente fundamental, pelo que no caso da excentricidade, verifica-se o seguinte (considerando ' $n = 1'$):

- Em relação à terceira e quarta parcelas do sinal, as respetivas componentes de frequências estarão inseridas em ' $2 * f_1 - n * f_r'$ ' e ' $2 * f_1 + n * f_r'$ ', sendo que estas surgirão próximas a 75 Hz e 125 Hz, respetivamente.

- Em relação à quinta e sexta parcelas do sinal, as respetivas componentes de frequências estarão inseridas em ' $2 * f_1 - 2 * n * f_r'$ ' e ' $2 * f_1 + 2 * n * f_r'$ ', sendo que estas surgirão próximas a 50 Hz e 150 Hz, respetivamente.

Para melhor compreensão, o espectro de frequências do sinal ' $i_{PVPA_{Eccentricity}}'$,

considerando um escorregamento de 3% e para um ' $n = 1$ ' poderá ser visualizado na figura 3.11

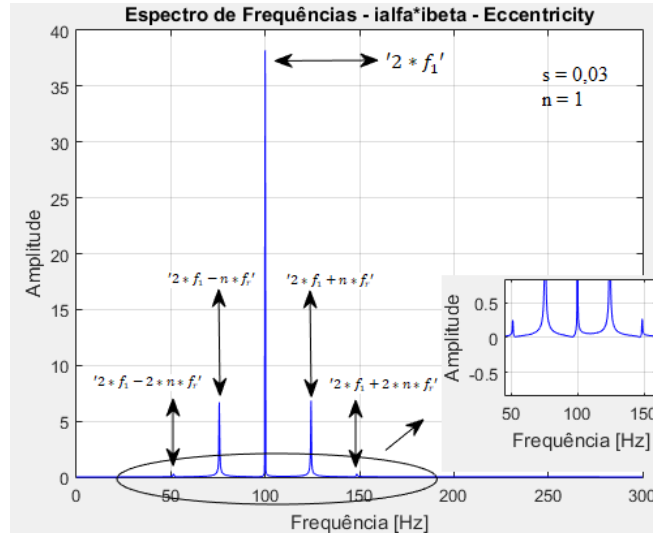


Figura 3. 11 - Espectro de frequências do sinal resultante do produto entre as correntes ' i_{α} ' e ' i_{β} ' na presença de excentricidade – Técnica PVPA

Como pode se observar na figura 3.11, no caso de excentricidade as componentes adicionais de frequências que surgem por contribuição da quinta e sexta parcelas também apresentam pequenos valores de amplitudes, pelo que facilmente poderá se confundir com ruído inserido no sinal.

Outro fator importante a ser estudado, é estabelecer a expressão para cálculo do índice de severidade ' $SF_{PVPA_{Eccentricity}}$ '. Com isso, tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica 'PVPA', inserida em ' $2 * f_1$ ', e a componente adicional de frequência específica mais influente ' $(2 * f_1 \pm n * f_r)$ ', pode-se estabelecer a expressão (3.40) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{PVPA_{Eccentricity}} = \frac{\left| i_{PVPA_{Eccentricity}} \{f(2 * f_1 \pm n * f_r)\} \right|}{\left| i_{PVPA_{Eccentricity}} \{f(2 * f_1)\} \right|} \quad (3.40)$$

3.4.1.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

Neste tipo de avaria em especial, foram considerados, para as técnicas *MSCSA* e *MSSCSA*, que a fase em curto-circuito apresenta um valor máximo diferente das restantes correntes e que a defasagem entre as correntes se mantém em 120° , pelo que para a análise da técnica *PVPA*, para esta avaria específica, se manterão as mesmas considerações, tendo em conta os mesmos fins simplificativos. Posto isso, nas expressões (3.41) e (3.42), são apresentadas as correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', na situação de curto-circuito entre espiras.

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha_{Interturns}}(t) = & \left(\sqrt{\frac{1}{6}} * I_{m\acute{a}x} + \sqrt{\frac{2}{3}} * I_{m\acute{a}x-cc} \right) * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\
 & + \left(\sqrt{\frac{1}{6}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \sqrt{\frac{2}{3}} * I_{m\acute{a}x_{lower-cc}} \right) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 & + \left(\sqrt{\frac{1}{6}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \sqrt{\frac{2}{3}} * I_{m\acute{a}x_{upper-cc}} \right) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned}
 i_{\beta_{Interturns}}(t) = & \left(\sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} \right) * \sin \left(\omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(\sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

A partir das expressões (3.41) e (3.42) será então possível chegar à expressão resultante do produto entre as correntes estatóricas, tendo em conta o sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', expressão (3.43).

$$\begin{aligned}
 i_{PVPA_{Interturns}}(t) = & \left(\frac{1}{\sqrt{16}} I_{máx}^2 + \frac{1}{2} I_{máx} * I_{máx_{cc}} \right) * \sin(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0) \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{lower_{cc}}} * I_{máx_{upper}} - I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) * \sin(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper}) \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{lower_{cc}}} * I_{máx_{upper}} + \frac{2}{\sqrt{2}} * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} \right] \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{lower}} * I_{máx_{lower_{cc}}} + \frac{1}{2} * I_{máx_{lower}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} \right] \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{upper}} * I_{máx_{upper_{cc}}} + \frac{1}{2} * I_{máx_{upper}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} \right] \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lower_{cc}}} + \frac{2}{\sqrt{2}} * I_{máx} * I_{máx_{lower}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} \right] \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{upper_{cc}}} + \frac{2}{\sqrt{2}} * I_{máx} * I_{máx_{upper}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} \right] \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lower}} - I_{máx} * I_{máx_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} \right] \\
 & + \frac{1}{2} * \left(I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper}} - I_{máx} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.43}$$

Como pode ser constatado na expressão (3.43), esta assemelha-se muito ao sinal resultante da soma do quadrado das correntes (expressão 3.25), tendo em conta o sistema de coordenadas 'abc'. Porém, tal como referido anteriormente, no caso da utilização da técnica 'PVPA', o sinal resultante não apresenta componente contínua mas sim, uma componente fundamental inserida em $2 * f_1'$. No que diz respeito à localização das restantes componentes adicionais de frequências, o sinal $i_{PVPA_{Interturns}}'$ apresentará um espectro de frequências com grandes similaridades ao espectro de frequências resultantes da utilização da expressão (3.25), técnica 'MSSCSA', pelo que a análise destas componentes poderá ser efetuada de uma forma análoga. Deste modo, verifica-se o seguinte:

- A segunda parcela do sinal terá uma componente inserida em $2 * k * f_1'$;
- A terceira parcela do sinal terá uma componente inserida em $f_1' * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) \right)'$;
- A quarta e quinta parcela do sinal terão componentes inseridas em $f_1' * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) \mp 2 * k \right)'$;
- A sexta e sétima parcela do sinal terão componentes inseridas em $f_1' * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 \mp k \right)'$;
- A oitava e nona parcela do sinal terão componentes inseridas em $f_1' * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 \mp k \right)'$;

Para melhor compreensão, o espectro de frequências do sinal $i_{PVPA_{Interturns}}'$, considerando um escorregamento 's' de 5%, $n = 1'$, $k = 1'$ e $p = 2'$ poderá ser visualizado na figura 3.12

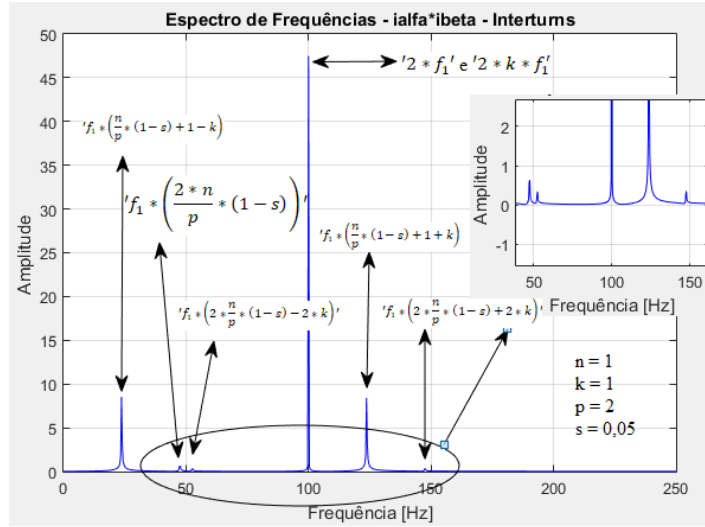


Figura 3. 12 - Espectro de frequências do sinal resultante do produto entre as correntes i_{α} e i_{β} na presença de curto circuito entre espiras – Técnica PVPA

Outro fator importante a ser estudado é estabelecer a expressão para o cálculo do índice de severidade $SF_{PVPA_{Interturns}}$. Com isso, tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘PVPA’, inserida em $2 * f_1$, e a componente adicional de frequência específica mais influente

$f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right)$, pode-se obter a expressão (3.44) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{PVPA_{Interturns}} = \frac{\left| i_{PVPA_{Interturns}} \left\{ f \left(f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right) \right) \right\} \right|}{\left| i_{PVPA_{Interturns}} \{ f(2 * f_1) \} \right|} \quad 3.44$$

3.4.2 - Análise Espectral do Sinal ($i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2$)

No subcapítulo anterior foi apresentado o estudo acerca do produto entre as correntes elétricas estatóricas, tendo por base o sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', sendo esta técnica designada por '*PVPA*'. Outra vertente que irá ser abordada no desenrolar deste subcapítulo será o estudo acerca da soma do quadrado das correntes, não no domínio '*abc*', como estudado anteriormente no caso da técnica '*MSSCSA*', mas sim das suas componentes em ' $\alpha\beta$ '.

Em [50] os autores fazem um estudo acerca da técnica '*EPVA*' ('*Extended of Park Vector Approach*'), que estabelece o módulo do conhecido vetor de Park, i.e., estabelece um estudo acerca da raiz quadrada da soma do quadrado das correntes estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ '. Neste mesmo artigo, os autores relatam que a técnica '*EPVA*' apresenta-se como uma sequência da técnica apresentada no subcapítulo 2.5.3.2, ou seja, a técnica '*PVA*' ('*Park Vector Approach*'), na medida que esta última realiza deteções de avarias a partir do reconhecimento de padrões. Já a técnica '*EPVA*' estabelece a deteção de avarias através da análise espectral em frequência. Por outro lado, a técnica '*PVA*' apenas faz deteção de avarias referente a barras fraturadas e curto circuito entre espiras, pelo que a técnica '*EPVA*' veio possibilitar também a deteção de sistemas de tensões desbalanceados, cargas mecânicas desalinhas, quando estas ocorrem em separado e simultaneamente. Fazendo uso do sinal resultante do módulo do vetor de Park, os autores descobriram que na presença de um curto circuito entre espiras, irá ser criada uma componente de sequência negativa que estará inserida em duas vezes a frequência da componente fundamental do sinal das correntes elétricas estatóricas.

De modo a dar a conhecer uma resultante da técnica *EPVA*, neste subcapítulo irá ser apresentado o quadrado do módulo do vetor de park, ou, por outras palavras, a soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema ' $\alpha\beta$ '. Sendo assim, a técnica a ser desenvolvida irá ser denominada por *SEPVA* ('*Square of Extended of Park Vector Approach*').

Numa situação ideal, em condições de bom funcionamento, o sinal da soma do quadrado das correntes no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ' ($i_{SEPVA_{NoFault}}$), após as devidas simplificações e manipulações matemáticas, é dado pela seguinte expressão:

$$i_{SEPVA_{NoFault}}(t) = \frac{3}{2} * I_{máx}^2 \quad (3.45)$$

A primeira observação importante é que neste caso o sinal obtido é igual ao sinal da expressão (3.22), ou seja, a componente fundamental do sinal também estará inserida a 0 Hz.

3.4.2.1 – Avaria na Gaiola Rotórica

Para a obtenção dos sinais, no caso de uma avaria na gaiola rotórica, serão utilizadas as expressões 3.33 e 3.34. Sendo assim, o sinal resultante da soma do quadrado das correntes ' $i_{SEPVA_{BrokenBar}}$ ', será expresso por:

$$\begin{aligned} i_{SEPVA_{BrokenBar}}(t) = & \left[\frac{3}{2} * \left(I_{máx}^2 + I_{máx_{lower}}^2 + I_{máx_{upper}}^2 \right) \right] \\ & + 3 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} * \sin \left(2 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\ & + 3 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} * \sin \left(-2 * s * \omega_1 * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\ & + 3 * I_{máx_{lower}} \\ & * I_{máx_{upper}} \sin \left(4 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Como pode ser visualizado na expressão (3.46), o sinal resultante da soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', apresenta similaridade ao sinal resultante da expressão (3.19), técnica '*MSSCSA*'. A análise do sinal resultante e a respetiva localização das componentes adicionais de frequências poderá ser efetuada de uma forma análoga à realizada no subcapítulo (3.3.2).

Como esperado, a representação gráfica do espectro de frequências do sinal ' $i_{SEPVA_{BrokenBar}}$ ' apresentará de igual modo muita semelhança ao do espectro apresentado na figura 3.4, se for considerado o mesmo valor de escorregamento. Para o sinal em questão, será considerado um escorregamento de 4,5% e o respetivo espectro de frequências pode ser

observado na figura 3.13.

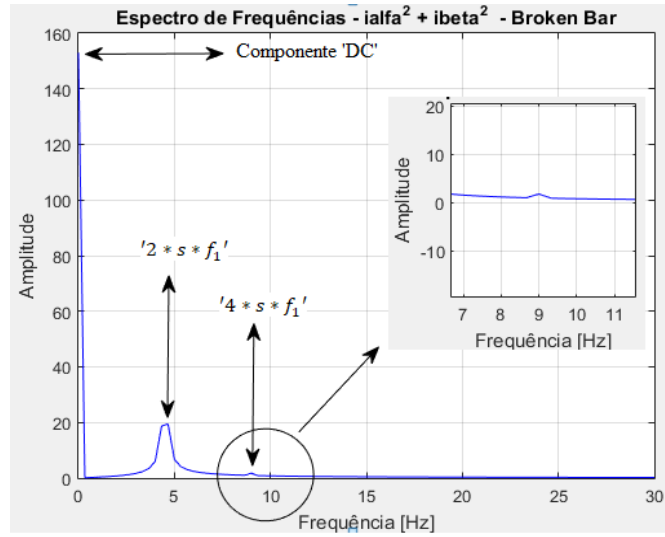


Figura 3.13 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma do quadrado das correntes i_{α} e i_{β} na presença de barras fraturadas – Técnica SEPVA

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘SEPVA’, inserida em 0 Hz, e a componente adicional de frequência específica mais influente, inserida em $2 * s * f_1'$, então poderá estabelecer-se a expressão (3.53) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{SEPVA_{BrokenBar}} = \frac{|i_{SEPVA_{BrokenBar}}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{SEPVA_{BrokenBar}}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.47)$$

3.4.2.2 – Excentricidade

As expressão do sinal da corrente resultante para este método, no caso da excentricidade, será obtido a partir das expressões 3.37 e 3.38. Deste modo, o sinal resultante da soma do quadrado das correntes ' $i_{SEPVA_{Excentricity}}$ ', é expresso por:

$$\begin{aligned}
 i_{SEPVA_{Excentricity}}(t) = & \left[\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-n * \omega_r * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.48) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(2 * n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Tal como foi observado no caso das barras fraturadas, no caso da operação do motor em presença de excentricidade, o sinal resultante da soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', apresenta similaridade ao sinal resultante da expressão (3.22), técnica '*MSSCSA*'. A análise do sinal resultante e a respetiva localização das componentes adicionais de frequências poderá ser efetuado de uma forma análoga à realizada no subcapítulo (3.3.3).

Como esperado, a representação gráfica do espectro de frequências do sinal ' $i_{SEPVA_{Excentricity}}$ ' apresentará de igual forma uma elevada semelhança relativamente ao espectro apresentado na figura 3.5, se for considerado o mesmo valor de escorregamento. Para o sinal em questão, será considerado um escorregamento de 5,00% e o respetivo espectro de frequências pode ser observado na figura 3.14.

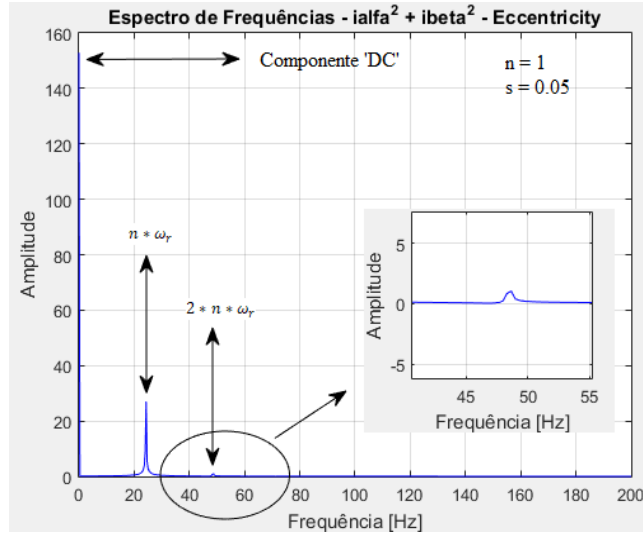


Figura 3. 14 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma do quadrado das correntes i_{α}' e i_{β}' na presença de Excentricidade – Técnica SEPVA

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘SEPVA’, inserida em 0 Hz, e a componente adicional de frequência específica mais influente inserida em $n * f_r$, estabelece-se a expressão (3.49) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{SEPVA_{Eccentricity}} = \frac{\left| i_{SEPVA_{Eccentricity}} \{f(n * f_r)\} \right|}{\left| i_{SEPVA_{Eccentricity}} \{f(DC \text{ Component})\} \right|} \quad 3.49$$

3.4.2.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

Para a obtenção do sinal resultante da soma do quadrado das correntes ' $i_{SEPVA_{Interturns}}$ ' serão utilizadas as expressões (3.41) e (3.42). Assim, partindo destas expressões obtém-se a expressão (3.50).

Como pode ser constatado pela expressão (3.56), esta é muito similar à obtida para o sinal resultante da soma do quadrado das correntes (expressão 3.25). Assim, verifica-se que a componente fundamental também está inserida em 0 Hz, diferentemente do que acontece no caso da técnica *PVPA*, que apresenta a componente fundamental do sinal em ' $2 * f_1$ '.

No que diz respeito à localização das restantes componentes adicionais, o sinal ' $i_{SEPVA_{Interturns}}$ ' apresentará um espectro de frequências com grandes similaridades ao espectro de frequências resultantes da utilização da expressão (3.25), técnica '*MSSCSA*', tendo apenas diferenças em termos de amplitude das componentes de frequência, pelo que a análise destas componentes, em termos da localização, poderá ser efetuada de uma forma análoga à realizada no subcapítulo (3.3.4).

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 i_{SEPVAInterturns}(t) = & \left(\frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + \frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 \right. \\
 & \left. + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 + & \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} \right) * \sin \left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 + & \left[\left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \\
 + & \left\{ \left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Para melhor compreensão, o espectro de frequências do sinal $i_{SEPVAInterturns}'$, considerando um escorregamento 's' de 5%, 'n = 1', 'k = 1' e 'p = 2' poderá ser visualizado na figura 3.15

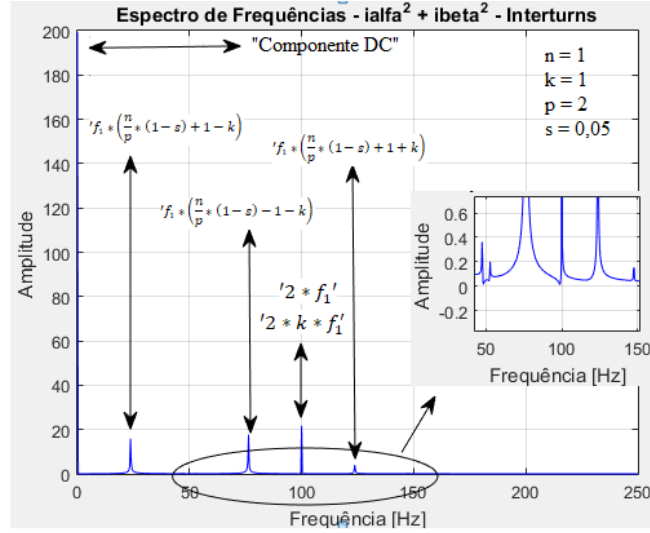


Figura 3. 15 — Espectro de frequências do sinal resultante da soma do quadrado das correntes i_{α}' e i_{β}' na presença de curto circuito entre espiras – Técnica ‘SEPVA’

Tendo em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante da aplicação da técnica ‘SEPVA’, inserida em 0 Hz, e a componente adicional de frequência específica mais influente, inserida em $2 * f_1$, pode-se estabelecer a expressão (3.51) que representa o cálculo do índice de severidade.

$$SF_{SEPVAInterturns} = \frac{|i_{SEPVAInterturns}\{f(2 * f_1)\}|}{|i_{SEPVAInterturns}\{f(DC \text{ Component})\}|} \quad (3.51)$$

3.5 – Técnica de Análise Espectral das Correntes Elétricas Estatóricas no Sistema dq0 – Sistema Convencional

No capítulo anterior, foi efetuado um estudo acerca de duas técnicas relacionadas com a análise espectral, sendo que em ambas as técnicas, 'PSPA' e 'SEPSA', estas foram efetuadas fazendo uso das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ '. Neste capítulo irá ser apresentado um estudo acerca de duas técnicas relacionadas com a análise espectral, sendo que estas serão realizadas no domínio ' $dq0$ ', i.e., será efetuada a transformação de Blondel-Park como ferramenta principal para aplicação das técnicas propostas. Tal como poderá ser visualizado na figura 3.16, os vetores das correntes ' i_d ', referente ao eixo direto, e ' i_q ', referente ao eixo em quadratura, encontram-se desfasados de 90° e estes rodam solidariamente com o referencial.

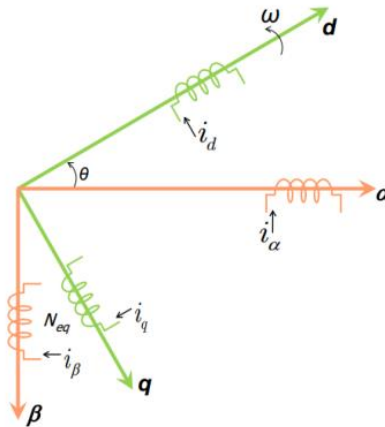


Figura 3. 16 - Representação Vetorial e geométrica do sistema de coordenadas $\alpha\beta$ e dq [48]

Geralmente, a transformação de Park é efetuada em duas etapas, sendo que numa primeira fase é aplicada a transformação de Clarke-Concordia e em seguida, multiplica-se as coordenadas de corrente resultante pela Matriz de Park. Sendo assim, considerando numa fase inicial um 'MI' sem a presença de avarias e sendo este alimentado por um sistema de tensões balanceados, para se aplicar esta mudança do sistema de variáveis, serão utilizadas as expressões (3.30) e (3.31).

A transformada de Park é realizada efetuando a multiplicação da matriz de Park ' P ' pelo vetor das correntes do estator, pelo que nas expressões (3.52) e (3.53) poderão ser

visualizadas as expressões correspondentes às correntes no sistema 'dq' e a matriz de Park, respectivamente.

$$I_{dq0} = P * I_{\alpha\beta 0} \quad (3.52)$$

$$P = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Onde ' I_{dq0} ' corresponde às correntes estatóricas após a aplicação da transformada de Park na sua forma reduzida e ' θ ' corresponde à posição angular mecânica. Sendo assim, a expressão genérica e estendida para as correntes do estator no sistema de coordenadas 'dq0' pode ser observada na expressão (3.54).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad 3.54$$

Sendo conhecidas as expressões para as correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta 0$ ', as expressões do sinal das correntes do estator no sistema 'dq0' podem ser obtidas a partir daquele sistema de coordenadas tal como se apresenta em (3.55), (3.56) e (3.57).

$$i_{dNoFault}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\alpha_0 + \pi) \quad (3.55)$$

$$i_{qNoFault}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (3.56)$$

$$i_{hNoFault}(t) = i_{0NoFault} \quad (3.57)$$

Como facilmente se pode constatar na expressão (3.54), as componentes homopolar tanto no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta 0$ ', sinal ' i_0 ', quanto no sistema de coordenadas 'dq0',

sinal ' i_h ', apresentam igualdade. Tal como foi referido no subcapítulo (3.4), nos casos em que existe um equilíbrio nas correntes elétricas do estator, a componente homopolar poderá ser desprezada, pois esta assume um valor nulo. No entanto, a manifestação da componente homopolar, tanto num caso como no outro só irá ser verificado quando houver desequilíbrio nos enrolamentos do estator e isto, em termos de avarias no ' MI ', só pode ser constatado quando o mesmo estiver a operar em presença de algum curto circuito entre espiras. Por isso, é de suma importância que os sistemas de alimentação não apresentem desequilíbrios acentuados.

Em termos de representação gráfica, nas figuras 3.17 e 3.18, pode-se visualizar as correntes elétricas estatóricas no sistemas de coordenadas ' $\alpha\beta$ ' e ' dq '.

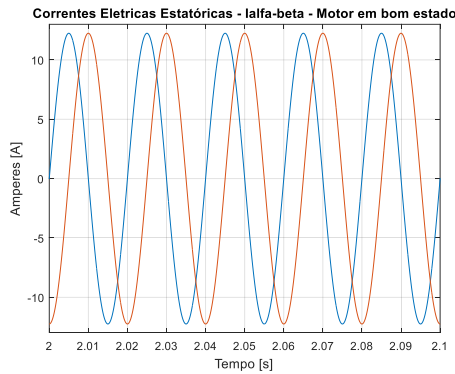


Figura 3. 17 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas $\alpha\beta$

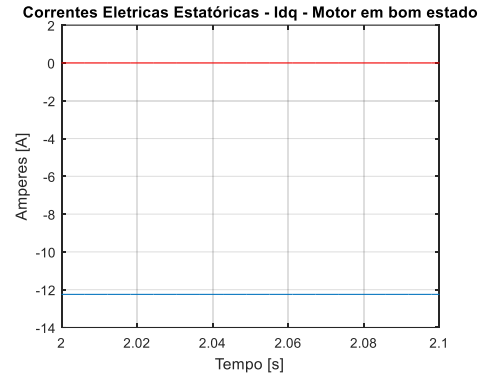


Figura 3. 18 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas dq

Tal como referido anteriormente e como pode ser constatado na figura 3.18, o sinal das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ' dq ' representam constantes, o que não irá acontecer quando o ' MI ' estiver a operar em presença de alguma avaria, sendo que isto será mostrado no decorrer deste capítulo.

3.5.1 - Análise Espectral do Sinal ($i_d + i_q$)

Após ter sido estudado anteriormente o desenvolvimento das expressões dos sinais das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ‘ $dq0$ ’, neste subcapítulo será apresentado o estudo acerca do sinal resultante quando se procede à soma das correntes ‘ i_d ’ e ‘ i_q ’, no caso do motor a funcionar sem falhas, motor com barras fraturadas, motor com excentricidade e motor com espiras em curto circuito no enrolamento da fase ‘a’. Para esta técnica em particular será atribuído o nome de *SPTCA* (“*Sum of the Park Transformer Coordinates Approach*”). Sendo assim, irão ser apresentadas as expressões para o caso do ‘MI’ operar em bom estado de funcionamento e com os tipos de falhas já referidas, sendo estes resultados suportados pela respetiva representação gráfica do espectro de frequências.

Numa situação ideal, e de uma forma análoga ao considerado no estudo dos outros métodos, em condições de bom funcionamento, tendo em conta as expressões (3.55) e (3.56), o sinal da soma das correntes estatóricas no sistema ‘ $dq0$ ’ ($i_{SPTCANoFault}$), após as devidas simplificações e manipulações matemáticas poderá ser expressa por:

$$i_{SPTCANoFault}(t) = \sqrt{3} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\alpha_0 + \frac{5\pi}{4}\right) \quad (3.58)$$

Tal como espectável, na expressão (3.58), o sinal resultante apresenta-se também como uma constante que terá, no respetivo espectro de frequências, apenas uma componente, i.e., a componente fundamental do sinal será a componente contínua.

3.5.1.1 – Avaria na Gaiola Rotórica

No subcapítulo 3.4.1.1 foram apresentados, através das expressões (3.33) e (3.34), os sinais correspondentes às correntes elétricas do estator na presença de avaria na gaiola rotórica, no sistema de coordenadas ‘ $\alpha\beta0$ ’. Assim, para esta análise, será apenas necessário efetuar uma transformação do referencial ‘ $\alpha\beta0$ ’ para ‘ $dq0$ ’ e, de seguida, efetuar a soma das correntes estatóricas. Posto isso, ao efetuar a aplicação da transformada de Park, fazendo uso das expressões (3.33) e (3.34), obtém-se as expressões analíticas do sinal das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ‘ $dq0$ ’ no caso de avaria na gaiola rotórica,

conforme se pode verificar através de (3.59) e (3.60). Apresenta-se ainda a expressão (3.61), onde é possível verificar o sinal resultante da corrente homopolar ($i_{h_{BrokenBar}}$) na situação da avaria referida acima.

$$\begin{aligned}
 i_{d_{BrokenBar}}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\alpha_0 + \pi) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_lower} * \sin[(-2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower}] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_upper} * \sin[(2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper}]
 \end{aligned} \tag{3.59}$$

$$\begin{aligned}
 i_{q_{BrokenBar}}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2}\right) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_lower} * \sin\left[(-2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_upper} * \sin\left[(2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right]
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

$$i_{h_{BrokenBar}}(t) = i_{0_{BrokenBar}} = 0 \tag{3.61}$$

Tal como pode ser observado nas expressões (3.59) e (3.60), o sinal resultante das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ‘dq0’ apresenta uma componente fundamental dos sinais inseridas em 0 Hz, i.e., a componente fundamental do sinal é a componente contínua.

Tal como já foi referido anteriormente, mesmo na presença de avaria na gaiola rotórica, não existirá um desequilíbrio dos enrolamentos do estator e respetivas correntes, pelo que neste caso o sinal $i_{h_{BrokenBar}}$ também assumirá o valor nulo (Expressão 3.61). Em contrapartida, os sinais das correntes estatóricas no plano ‘dq0’, que anteriormente com o ‘MI’ em boas condições de funcionamento apresentavam valores constantes, na presença de barras fraturadas, a componente q irá apresentar um comportamento oscilatório em redor destes valores. Para melhor compreensão, poderá ser analisado o gráfico da figura 3.19.

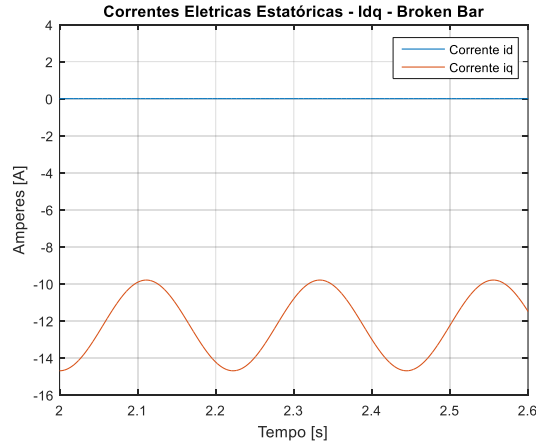


Figura 3. 19 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas dq0 - ' α_0' = 0°

Como pode ser constatado no gráfico da figura 3.19, a componente de corrente segundo o eixo direto manteve o seu valor nulo, isto deve-se ao facto de que na simulação em questão foi considerado nulo o valor do ângulo ' α_0' '. No gráfico da figura 3.20, pode-se observar um caso diferente, i.e., pode-se observar o comportamento dos sinais das correntes elétricas do estator para um ângulo ' α_0' ' igual a 30°.

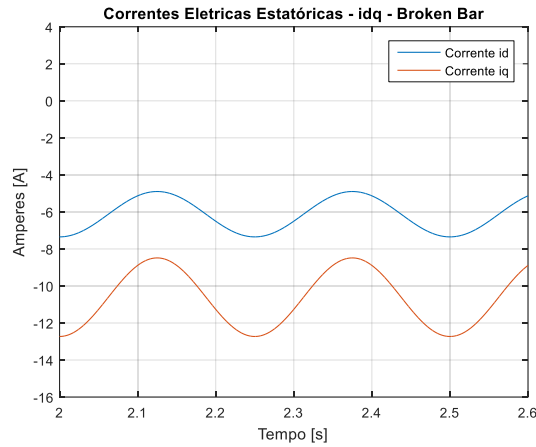


Figura 3. 20 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas dq0 - ' α_0' = 30°

Tendo as expressões das correntes elétricas estatóricas no sistema ' dq ', o objetivo nesta fase será obter a expressão resultante, quando se efetua a soma das correntes estatóricas. Com isso, na expressão (3.62) poderá ser visualizado o sinal ' $i_{SPTCABrokenBar}$ ' que irá ser utilizado para se analisar as respectivas componentes adicionais de frequências, quando o ' MI ' está a operar em presença de barras fraturadas.

$$\begin{aligned}
 i_{SPTCABrokenBar}(t) = & \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\alpha_0 + \pi) \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2}\right) \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin\left[(-2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower}\right] \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin\left[(-2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin\left[(2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper}\right] \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin\left[(2 * s)(\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right]
 \end{aligned}
 \tag{3.62}$$

O sinal resultante da soma das correntes do estator, segundo o plano $'dq0'$, apresenta seis componentes distintas, pelo que a primeira e a segunda parcela do sinal irão contribuir para a componente fundamental do sinal, ou seja, irão contribuir para a componente contínua do mesmo. Em relação às quatro parcelas restantes, todas irão contribuir para a mesma componente de frequência inserida em $'2 * s * f_1'$.

Esta técnica de diagnóstico de avarias apresenta pouca informação no que diz respeito ao respetivo espectro de frequências, pelo que, para melhor compreensão, na figura 3.21 é apresentado o espectro de frequências do sinal $'i_{SPTCABrokenBar}'$, considerando um escorregamento $'s = 4 \%'$.

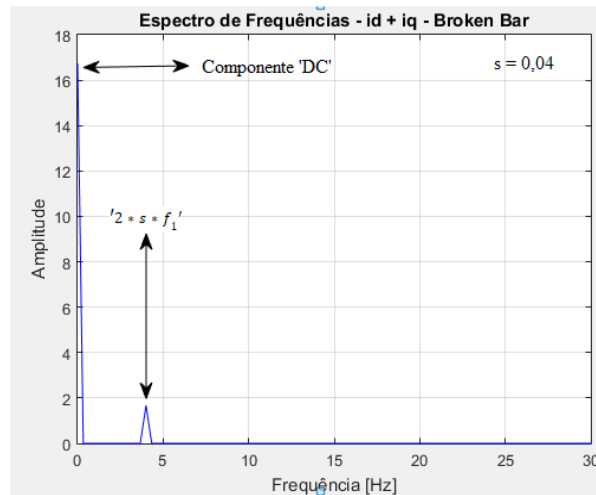


Figura 3. 21 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma das correntes $'i_d'$ e $'i_q'$ na presença de barras fraturadas

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

De uma forma análoga às técnicas anteriores, para o cálculo do índice, deverá ter-se em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante após a aplicação da técnica ‘SPTCA’, sendo esta inserida em 0 Hz, e a banda lateral que apresenta a maior influência a nível de amplitude, sendo esta em ‘ $2 * s * f_1$ ’. Com isso, a partir da expressão (3.63), poderá ser calculado o índice de severidade.

$$SF_{SPTCA_{BrokenBar}} = \frac{|i_{SPTCA_{BrokenBar}}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{SPTCA_{BrokenBar}}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.63)$$

3.5.1.2 – Excentricidade

De uma forma análoga ao caso anterior, o objetivo principal nesta fase é realizar a aplicação da transformada de Park nas correntes do estator quando o 'MI' se encontra a operar em presença de excentricidade, sendo que estas poderão ser realizadas fazendo uso das expressões (3.37) e (3.38):

$$\begin{aligned}
 i_{d_{Eccentricity}}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\alpha_0 + \pi) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_lower} * \sin \left[\left(-n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_upper} * \sin \left[\left(n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.64}$$

$$\begin{aligned}
 i_{q_{Eccentricity}}(t) &= \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin \left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2} \right) \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_lower} * \sin \left[\left(-n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 &+ \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_upper} * \sin \left[\left(n * \frac{\omega_r}{\omega_1} \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.65}$$

$$i_{h_{Eccentricity}}(t) = i_{0_{Eccentricity}} = 0 \tag{3.66}$$

De um modo semelhante ao que se verificou no caso referente a barras fraturadas, nesta situação de excentricidade verifica-se o seguinte:

- A componente fundamental dos sinais resultantes da transformação de Park, está inserida em 0 Hz;
- Não existirá desequilíbrio entre as correntes elétricas estatóricas, pelo que novamente a componente ' $i_{h_{Eccentricity}}$ ' também assumirá um valor nulo;

Tendo as expressões das correntes elétricas estatóricas no sistema 'dq', o objetivo nesta fase será obter a expressão resultante, quando se efetua a soma das duas componentes. Com

isso presente, na expressão (3.67) obtém-se o sinal $i_{SPTCA_{Eccentricity}}$.

$$\begin{aligned}
 i_{SPTCA_{Eccentricity}}(t) = & \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin(\alpha_0 + \pi) \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x} * \sin\left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2}\right) \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin\left[\left(-n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right)(\omega_1 * t) - \beta_{lower}\right] \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin\left[\left(-n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right)(\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin\left[\left(n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right)(\omega_1 * t) - \beta_{upper}\right] \\
 & + \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin\left[\left(n * \frac{\omega_r}{\omega_1}\right)(\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right]
 \end{aligned} \tag{3.67}$$

O sinal resultante da soma das correntes do estator, segundo o plano $'dq'$, apresenta seis componentes distintas, pelo que a primeira e a segunda parcela do sinal irão contribuir para a componente fundamental do sinal, sendo esta inserida a 0 Hz. Em relação às quatro parcelas restantes, todas irão contribuir para a mesma componente de frequência inserida a $'n * f_r'$.

Para melhor compreensão, na figura 3.22 é apresentado o espectro de frequências do sinal $i_{SPTCA_{Eccentricity}}$, considerando um escorregamento $'s = 5\%'$.

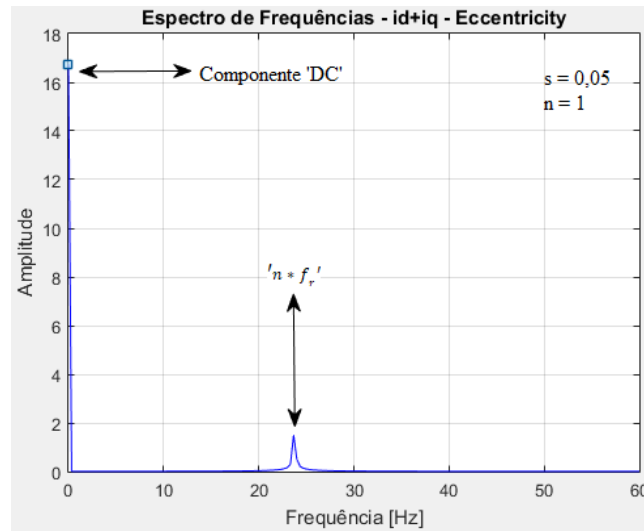


Figura 3. 22 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma das correntes $'i_d'$ e $'i_q'$ na presença de excentricidade - Técnica $'SPTCA'$

De acordo com as frequências que surgem no caso da avaria de excentricidade, para o cálculo do índice de severidade será considerada a relação entre a componente associada à frequência ' $n * f_r$ ' e a componente contínua, conforme é possível verificar em (3.68).

$$SF_{SPTCA_{Eccentricity}} = \frac{|i_{SPTCA_{Eccentricity}}\{f(n * f_r)\}|}{|i_{SPTCA_{Eccentricity}}\{f(DC \text{ Component})\}|} \quad (3.68)$$

3.5.1.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

À imagem do que foi feito nos subcapítulos anteriores, de modo a verificar o impacto que uma avaria no estator origina no método proposto, serão novamente desenvolvidas as expressões temporais das correntes mas para este tipo de falha. Deste modo, a partir das expressões das correntes no sistema de coordenadas ‘ $\alpha\beta$ ’ para uma situação de curto-circuito de espiras estatísticas, (3.41) e (3.42), obtêm-se as correntes no sistema de coordenadas ‘ $dq0$ ’, conforme se pode verificar pelas equações seguintes:

$$\begin{aligned}
 i_{d_{Interturns}}(t) = & \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{máx_{cc}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{máx} \right) * \sin(\alpha_0 + \pi) \\
 & + \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{máx_{cc}} - I_{máx}) * \sin(2 * \omega_1 * t - \alpha_0) \\
 & + \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{máx_{lower_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{máx_{lower}} \right) \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 & + \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{máx_{upper_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{máx_{upper}} \right) \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{máx_{lower_{cc}}} - I_{máx_{lower}}) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{máx_{upper_{cc}}} - I_{máx_{upper}}) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.69}$$

$$\begin{aligned}
 i_{q_{Interturns}}(t) = & \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{máx_{cc}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{máx} \right) * \sin \left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2} \right) \\
 & + \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{máx_{cc}} - I_{máx}) * \sin \left(2 * \omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{máx_{lower_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{máx_{lower}} \right) \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{máx_{upper_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{máx_{upper}} \right) \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{máx_{lower_{cc}}} - I_{máx_{lower}}) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{máx_{upper_{cc}}} - I_{máx_{upper}}) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

$$\begin{aligned}
 i_{h_{Interturns}} = & \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{máx_{cc}} - I_{máx}) * \sin(\omega_1 * t - \alpha_0) \\
 & + \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{máx_{lower_{cc}}} - I_{máx_{lower}}) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} \right] \\
 & + \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{máx_{upper_{cc}}} - I_{máx_{upper}}) * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} \right]
 \end{aligned} \tag{3.71}$$

Ao contrário do que se verifica nos outros dois tipos de avarias analisados pode-se reparar através da expressão (3.77) que a avaria referente ao curto-circuito entre espiras acaba por ter influência direta na componente homopolar do sinal da corrente estatórica. Assim, nesta situação, esta componente deixa de ser nula (figura 3.23), nomeadamente devido ao desequilíbrio causado nas correntes estatóricas. Outro fator que pode causar o desequilíbrio das correntes será operar com o ‘MI’ em sistemas de tensões desequilibradas e distorcidas.

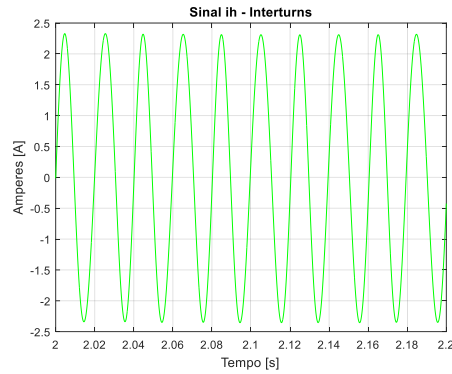


Figura 3. 23 - Representação gráfica das corrente homopolar no sistema de coordenadas $dq0 - \alpha_0 = 30^\circ$

Realizando nesta fase a aplicação da técnica ‘SPTCA’, em (3.72) pode-se visualizar a expressão para a soma das correntes estatóricas na situação de curto circuito entre espiras.

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_{SPTCAInterturns}(t) &= \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{m\acute{a}x_{cc}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{m\acute{a}x} \right) * \sin(\alpha_0 + \pi) \\
 &+ \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{m\acute{a}x_{cc}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{m\acute{a}x} \right) * \sin\left(\alpha_0 + \frac{3\pi}{2}\right) \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{m\acute{a}x_{cc}} - I_{m\acute{a}x}) * \sin(2 * \omega_1 * t - \alpha_0) \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{m\acute{a}x_{cc}} - I_{m\acute{a}x}) * \sin\left(2 * \omega_1 * t - \alpha_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\
 &+ \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 1 - k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower}\right] \\
 &+ \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 1 - k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 &+ \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 1 + k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper}\right] \\
 &+ \left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 1 + k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} - I_{m\acute{a}x_{lower}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + 1 - k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower}\right] \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} - I_{m\acute{a}x_{lower}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + 1 - k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2}\right] \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - I_{m\acute{a}x_{upper}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + 1 + k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper}\right] \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{6}} (I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - I_{m\acute{a}x_{upper}}) * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + 1 + k\right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2}\right]
 \end{aligned} \tag{3.72}$$

Tal como aconteceu no caso dos outros dois tipos de avarias, o sinal resultante inserido na expressão (3.72), referente à soma das correntes estatóricas segundo o eixo direto e em quadratura, foi criado a partir de uma simples adição de todas as componentes das expressões (3.69) e (3.70). A partir destas duas últimas, pode-se realizar uma análise às diversas parcelas resultantes, sendo que para tal irá ser considerado que ' $n = 1'$ ', ' $s = 4\%$ ' e ' $p = 2'$ '

- A primeira e segunda parcelas estão associadas à componente fundamental do sinal ' $\dot{i}_{SPTCAInterturns}'$, inserida em 0 Hz, ou seja, a componente contínua;

- A terceira e quarta parcelas irão contribuir para uma componente de frequência que irá surgir a $'2 * f_1'$, ou seja, a 100 Hz. Deve-se salientar que esta parcela só surge efetivamente por causa do desequilíbrio inserido nos enrolamentos do estator, devido ao curto circuito entre espiras;
- A quinta e sexta parcelas do sinal resultante irão contribuir com uma componente que estará inserida em $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k\right)'$, pelo que esta surgirá próxima aos 75 Hz, sendo que com o aumento do escorregamento o valor da componente de frequência irá se afastar no sentido ascendente em relação ao último valor referido.
- A sétima, oitava, nona e décima parcelas do sinal resultante irão contribuir com uma componente que estará inserida em $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k\right)'$, pelo que esta surgirá próxima aos 25 Hz, sendo que com o aumento do escorregamento, o valor da componente de frequência irá se afastar no sentido decrescente em relação ao último valor referido.
- A décima primeira e décima segunda parcelas do sinal resultante irão contribuir com uma componente que estará inserida em $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k\right)'$, pelo que esta surgirá próxima aos 125 Hz, sendo que com o aumento do escorregamento, o valor da componente de frequência irá se afastar no sentido decrescente em relação ao último valor referido.

Para melhor compreensão, apresenta-se na figura 3.24 o espectro de frequências do sinal $'i_{SPTCA_{Interturns}}'$, considerando um escorregamento $'s = 4 \%'$.

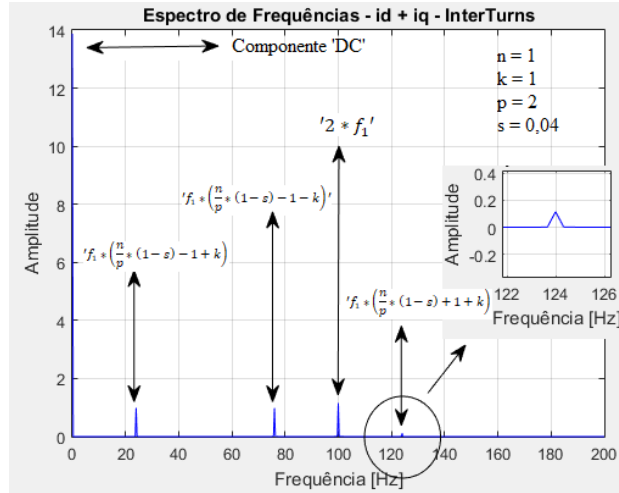


Figura 3. 24 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma das correntes ' i_d ' e ' i_q ' na presença de curto-circuito entre espiras - Técnica 'SPTCA'

Nesta fase do estudo desta técnica, no caso da avaria referente ao curto circuito entre espiras, resta realizar o cálculo do índice de severidade, tendo em conta a relação associada à frequência ' $2 * f_1$ ' e a componente contínua, sendo esta estabelecida em (3.73).

$$SF_{SPTCA_{Interturns}} = \frac{|i_{SPTCA_{Interturns}}\{f(2 * f_1)\}|}{|i_{SPTCA_{Interturns}}\{f(DC \text{ Component})\}|} \quad (3.73)$$

Tendo a técnica 'SPTCA' sido caracterizada para o caso de avaria nos enrolamentos do estator, será apresentada abaixo a análise espectral da corrente homopolar ' $i_{h_{Interturns}}$ '. Realizando em primeira instância a análise à expressão (3.71), pode-se observar que o sinal da corrente homopolar apresenta na primeira parcela a componente fundamental do sinal inserido à frequência da rede ' f_1 ' e na segunda e terceira parcela as típicas bandas laterais que surgem no desenvolvimento desta avaria em particular, estando estas inseridas em ' $f_1 * (\frac{n}{p} * (1 - s) - k)$ ' e ' $f_1 * (\frac{n}{p} * (1 - s) + k)$ ', respetivamente. Por outro lado o respetivo espectro de frequências da corrente homopolar (figura 3.25) é similar ao espectro de frequências que se obtém fazendo uso da técnica 'MCSA'. Contudo, neste caso, a existência de uma componente com a frequência da rede é indicativo de uma falha no estator, mais especificamente curto-circuito entre espiras. Deste modo, verifica-se que a componente homopolar também poderá ser utilizada para a detecção de falha no estator.

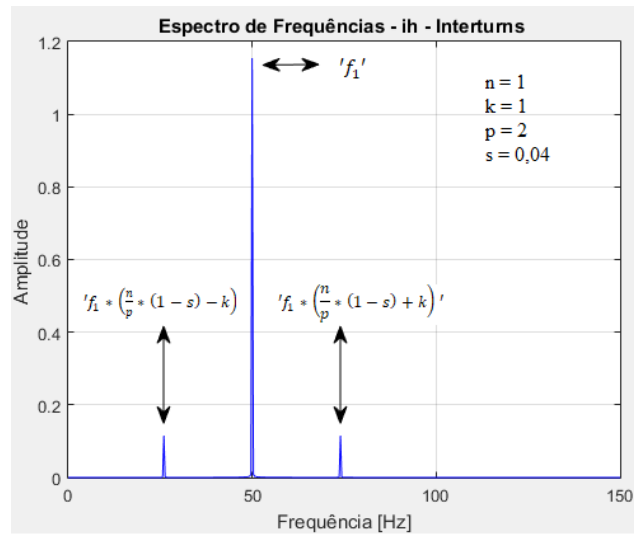


Figura 3. 25 - Espectro de frequências do sinal da corrente i_h na presença de curto-circuito entre espiras

3.5.2 - Análise Espectral do Sinal ($id^2 + iq^2$)

No subcapítulo imediatamente anterior foi efetuado um estudo acerca do sinal resultante da soma das correntes elétricas estatóricas (Técnica SPTCA), tendo em conta o sistema de coordenadas 'dq0'. Por outro lado, ao longo deste documento já foi dado a conhecer a análise espectral da soma do quadrado das correntes, tendo em conta dois sistemas de coordenadas distintos, sendo estes:

- Sistema de coordenadas 'abc', subcapítulo (3.3.3);
- Sistema de coordenadas 'αβ0', subcapítulo (3.4.2.3).

Posto isso, neste subcapítulo será proposta uma nova abordagem para a deteção de avarias em motores de indução, nomeadamente, através da análise espectral da soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema de coordenadas 'dq0'.

Em relação a esta técnica, que também está inserida na análise espectral, não existe literatura existente, pelo que a análise da soma do quadrado das correntes elétricas do estator, fazendo uso das correntes no sistema 'dq' apresenta-se como uma inovação neste documento. Para esta técnica em particular será atribuído o nome de *SSPTCA* ("Sum of the Square Park Transformer Coordinates Approach").

Numa situação ideal, e de uma forma análoga ao apresentado no estudo da abordagem 'dq' em condições de bom funcionamento, as expressões que irão ser obtidas com este método serão obtidas a partir das expressões (3.55) e (3.56). Assim, o sinal do quadrado da soma das correntes estatóricas no sistema 'dq0' ($i_{SSPTCA_{NoFault}}$), após as devidas simplificações e manipulações matemáticas, será descrito por:

$$i_{SSPTCA_{NoFault}}(t) = \frac{3}{2} * I_{máx}^2 \quad (3.74)$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

A primeira observação importante de referir ao observar a expressão (3.74), é que este sinal é igual ao sinal ($i_{MSSCSANoFault}$) inserido na expressão (3.17), e ao sinal $i_{SEPVANoFault}$ inserido na expressão (3.45), o que mostra que mesmo com a aplicação da transformação de Park são válidas as mesmas expressões para o caso do 'MI' em bom estado, sendo que neste caso a componente fundamental do sinal também estará inserida em 0 Hz, ou seja, também representará uma componente contínua.

3.5.2.1 – Avaria na Gaiola Rotórica

De modo a obter os sinais a analisar para este tipo de método e para a situação de avaria na gaiola rotórica, serão utilizadas as expressões 3.59 e 3.60. Sendo assim, a partir destas expressões obtém-se o sinal resultante da soma do quadrado das correntes $i_{SSPTCA_{BrokenBar}}$ como se pode verificar pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 i_{SSPTCA_{BrokenBar}}(t) = & \left[\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(2 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-2 * s * \omega_1 * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.75) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(4 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Como pode ser visualizado na expressão (3.75), o sinal resultante da soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema de coordenadas ‘dq’, é similar aos sinais resultantes da expressão (3.19), técnica ‘MSSCSA’ e da expressão (3.46), técnica ‘SEPVA’. A análise do sinal resultante e a respetiva localização das componentes adicionais de frequência poderá ser efetuado de uma forma análoga à realizada no subcapítulo 3.3.1.

Como esperado, a representação gráfica do espectro de frequências do sinal $i_{SSPTCA_{BrokenBar}}$ apresenta similaridade ao do espectro apresentado nas figuras 3.4 e 3.13, se for considerado o mesmo valor de escorregamento. Para o sinal em questão, foi considerado um escorregamento de 2,5% e o respetivo espectro de frequências pode ser observado na figura 3.26.

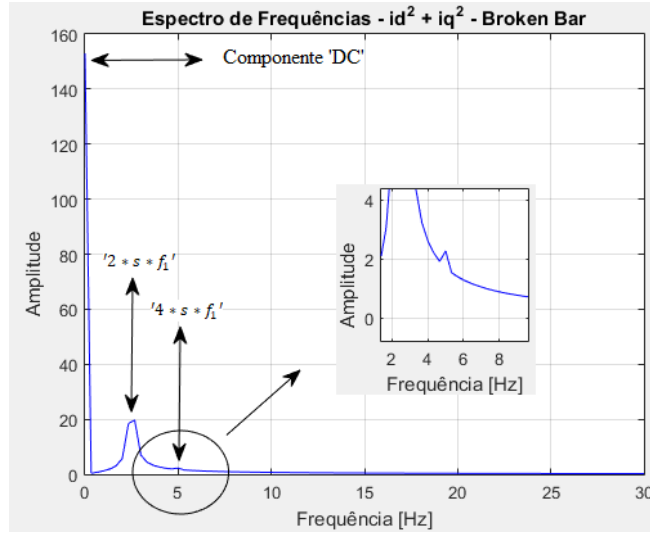


Figura 3. 26 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma do quadrado das correntes 'i_d' e 'i_q' na presença de barras fraturadas – Técnica SSPTCA

De uma forma análoga às técnicas anteriores, para cálculo do índice de severidade, deverá ter-se em conta o posicionamento da componente fundamental do sinal resultante após a aplicação da técnica 'SSPTCA', sendo esta inserida em 0 Hz, e a banda lateral que apresenta a maior influência a nível de amplitude, sendo esta em $2 * s * f_1$. Com isso, a partir da expressão (3.76), poderá ser calculado o índice de severidade.

$$SF_{SSPTCA_{BrokenBar}} = \frac{|i_{SSPTCA_{BrokenBar}}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{SSPTCA_{BrokenBar}}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.76)$$

3.5.2.2 – Excentricidade

Para realizar o estudo da técnica ‘SSPTCA’, no caso da avaria referente a excentricidade, será necessário elevar ao quadrado as correntes elétricas do estator, no sistema de coordenadas ‘dq’, inseridas nas expressões (3.64) e (3.65) e depois efetuar a soma das mesmas. O objetivo principal será obter o sinal resultante da soma do quadrado das correntes ‘ $i_{SSPTCA_{Excentricity}}$ ’, expressão (3.77).

$$\begin{aligned}
 i_{SSPTCA_{Excentricity}}(t) = & \left[\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-n * \omega_r * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.77) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(2 * n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Tal como foi observado no caso anterior, na situação em que o ‘MI’ está a operar na presença de excentricidade, como pode ser visualizado pela expressão (3.77), o sinal resultante da soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema de coordenadas ‘dq’, é similar aos sinais resultantes da expressão (3.22), técnica ‘MSSCSA’ e da expressão (3.48), técnica ‘SEPVA’. A análise do sinal resultante e a respetiva localização das componentes adicionais de frequências poderá ser efetuada de uma forma análoga à realizada no subcapítulo 3.3.2.

Através da visualização do espectro de frequências do sinal ‘ $i_{SSPTCA_{Excentricity}}$ ’, é possível verificar que este apresenta similaridades ao do espectro apresentado nas figuras 3.5 e 3.14, se for considerado o mesmo valor de escorregamento. Para o sinal em questão, foi considerado um escorregamento de 2,5 %, sendo que o respetivo espectro de frequências pode ser observado na figura 3.27.

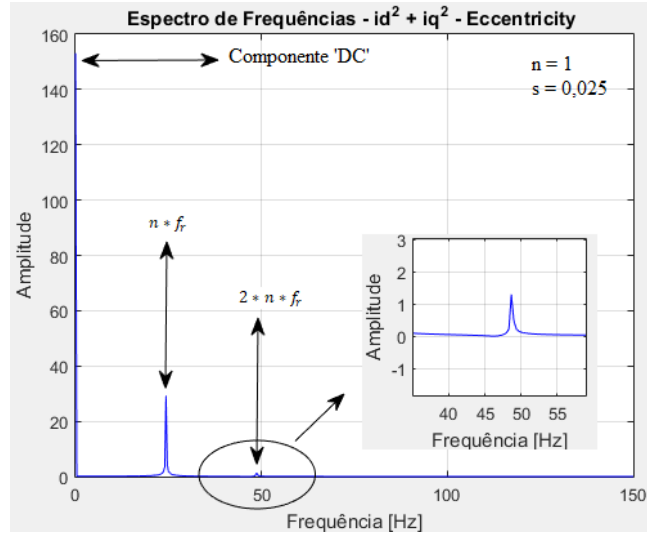


Figura 3. 27 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma do quadrado das correntes i_d e i_q na presença de Excentricidade – Técnica SSPTCA

Por fim, no caso da avaria referente a excentricidade, resta realizar o cálculo do índice de severidade, tendo em conta a relação associada à frequência $n * f_r$ e a componente contínua, sendo esta estabelecida em (3.73).

$$SF_{SSPTCA_{Eccentricity}} = \frac{\left| i_{SSPTCA_{Eccentricity}} \{f(n * f_r)\} \right|}{\left| i_{SSPTCA_{Eccentricity}} \{f(DC \text{ Component})\} \right|} \quad (3.73)$$

3.5.2.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

Na situação em que o 'MI' está a operar na presença de curto-circuito entre espiras, o sinal resultante da soma do quadrado das correntes, tendo em conta o sistema de coordenadas 'dq', poderá ser expresso por (3.79). Através da análise desta expressão é possível verificar que este sinal apresenta similaridades ao sinal resultante da expressão (3.25), técnica 'MSSCSA' e é igual ao sinal resultante da expressão (3.50), técnica 'SEPVA'. A análise do sinal resultante e a respetiva localização das componentes adicionais de frequências poderão ser efetuadas de uma forma análoga à realizada no subcapítulo 3.3.3.

Como esperado, a representação gráfica do espectro de frequências do sinal ' $i_{SSPTCA_{Interturns}}$ ' apresenta similaridade à do espectro apresentado nas figuras 3.6 e 3.15, se for considerado o mesmo valor de escorregamento. Para melhor compreensão, no gráfico da figura 3.28 poderá ser visualizado o espectro de frequências do sinal ' $i_{SSPTCA_{Interturns}}$ ', considerando um escorregamento 's' de 2,5 %, ' $n = 1$ ', ' $k = 1$ ' e ' $p = 2$ '.

$$\begin{aligned}
 i_{SSPTCAInterturns}(t) = & \left(\frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + \frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + \frac{1}{3} \right. \\
 & \left. * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 \right. \\
 & \left. + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 + & \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} \right) * \sin \left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 - \frac{\pi}{2} \right) \\
 + & \left[\left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right. \right. \\
 & \left. \left. * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \\
 + & \left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right. \\
 & \left. * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left\{ \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} - \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left\{ \left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} - \frac{\pi}{2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{3.79}$$

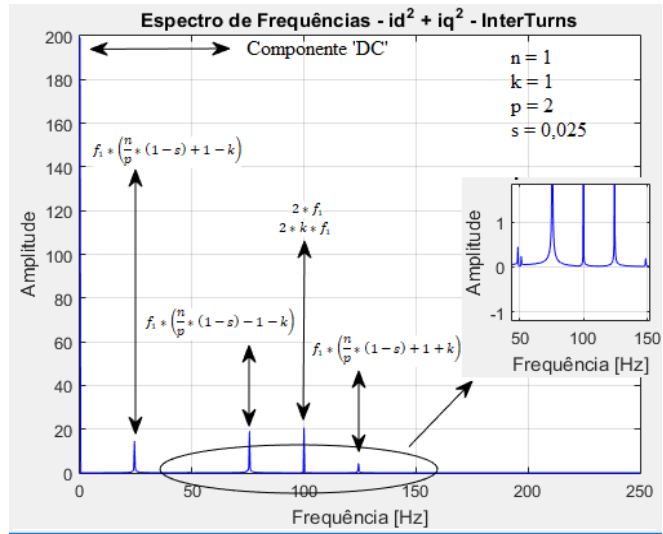


Figura 3. 28 - Espectro de frequências do sinal resultante da soma do quadrado das correntes ' i_d ' e ' i_q ' na presença de curto circuito entre espiras – Técnica 'SSPTCA'

Por fim, no caso da avaria referente ao curto circuito entre espiras, resta realizar o cálculo do índice de severidade, tendo em conta a relação associada à frequência ' $2 * f_1$ ' e a componente contínua, sendo estabelecido em (3.80).

$$SF_{SSPTCAInterturns} = \frac{|i_{SSPTCAInterturns}\{f(2 * f_1)\}|}{|i_{SSPTCAInterturns}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.80)$$

3.6 – Técnica de Análise Espectral das Correntes Elétricas Estatóricas no Sistema dq0 – Sistema Alternativo

No subcapítulo anterior foi efetuado um estudo acerca de duas técnicas inseridas no âmbito da análise espectral, sendo que ambas fizeram uso das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas $'dq0'$. De uma forma análoga às outras técnicas estudadas, foi efetuado o estudo da análise espectral de sinais resultantes de operações matemáticas com as correntes segundo o eixo direto e em quadratura na situação de três avarias distintas, barras fraturadas, excentricidade e curto-circuito entre espiras.

Neste subcapítulo será apresentada uma nova proposta acerca de duas técnicas de diagnóstico de avarias, sendo que neste caso será utilizada uma derivante da transformação de Park, apresentada no subcapítulo 3.5, i.e., será apresentado um meio alternativo de se aplicar a transformação de Park. A ideia será por um lado a de evitar a utilização de um circuito de sincronismo (*PLL – Phase Locked Loop*), e por outro o de obter sinais com maior conteúdo de informação.

Na transformação de um sistema de coordenadas de $\alpha\beta$ para dq , é necessário utilizar a matriz de Park (3.53) na qual existe uma função seno e uma função cosseno. Contudo, no sistema de coordenadas $\alpha\beta$, os sinais que se obtêm a partir de um sistema trifásico sinusoidal estão desfazados de 90° . Assim, neste sistema estes sinais apresentam-se associados a uma função seno e a uma função cosseno. Sendo assim, com o objectivo de evitar a utilização de um circuito de sincronismo e ao mesmo tempo obter maior sensibilidade na análise espectral dos sinais resultantes, na matriz P descrita pela expressão (3.53) serão efetuadas as seguintes substituições:

- As posições onde se encontra a função cosseno, será substituída por $' - i_\beta'$ (note-se que para além de um fator de escala $' - i_\beta'$ é igual a $\cos(\omega_1 * t)$);
- As posições onde se encontra a função seno, será substituída por $'i_\alpha'$ (à imagem do que se verifica no ponto anterior, para além de um fator de escala $'i_\alpha'$ é igual a $\sin(\omega_1 * t)$);

Com isso, tendo em conta as considerações supracitadas, a matriz P poderá ser reescrita e se transformar em uma matriz P' , expressão (3.81). Na expressão (3.82), poderá ser

visualizada a expressão estendida para as correntes do estator no sistema de coordenadas ($dq0'$).

$$P' = \begin{bmatrix} -i_\beta & i_\alpha & 0 \\ -i_\alpha & -i_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \\ i'_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_\beta & i_\alpha & 0 \\ -i_\alpha & -i_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

Sendo conhecidas as expressões para as correntes elétricas estatísticas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta0'$ ', aplicando-se a nova transformada de Park e após as devidas simplificações, obtém-se a seguinte expressão da corrente para a situação de motor sem avaria:

$$i'_{dNoFault}(t) = 0 \quad (3.83)$$

$$i'_{qNoFault}(t) = -\frac{3}{2} * I_{máx}^2 \quad (3.84)$$

Como pode ser visualizado nas expressões (3.83) e (3.84), as expressões resultantes das correntes segundo o eixo direto e em quadratura, após aplicação da variante da transformação de Park, a corrente ' i'_d ', manterá sempre o seu valor nulo pois independentemente do ' MI ' se encontrar a operar em presença de avaria ou não, a conjugação da expressão irá sempre apresentar um valor nulo, pelo que para as técnicas para deteção de avarias que irão ser apresentadas ao longo deste subcapítulo, irão apenas ser consideradas para a análise espectral, a componente q da corrente ' i'_q '.

Como já foi dito anteriormente, as correntes elétricas estatísticas segundo o eixo alfa e beta obedecem a um comportamento de uma função seno e cosseno, respetivamente, pelo que em termos gráficos, as correntes ' $i'_{dNoFault}$ ' e ' $i'_{qNoFault}$ ' devem apresentar o mesmo comportamento do que as correntes ' $i_{dNoFault}$ ' e ' $i_{qNoFault}$ ' ao longo do tempo, tendo por diferença um fator de escala. Para fins de comparações, nos gráficos das imagens (3.29) e (3.30), os sinais acima referidos poderão ser observados no domínio do tempo.

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatórica

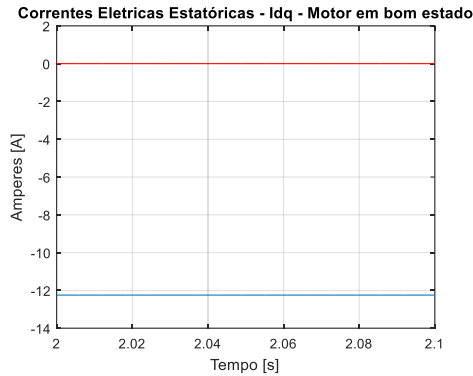


Figura 3. 29 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas dq0

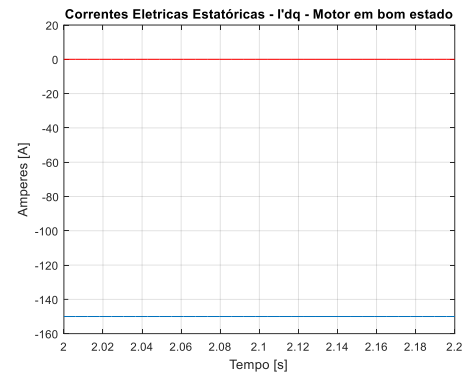


Figura 3. 30 - Representação gráfica das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas dq0'

As afirmações que foram apresentadas acima, só têm veracidade na situação em que o 'MI' opera em boas condições de funcionamento pois na presença de algum tipo de avaria, as típicas bandas laterais associadas a cada avaria em estudo fará com que a corrente segundo o eixo alfa, deixe de ter um comportamento que obedece a uma pura função seno e a corrente segundo o eixo beta deixa de ter um comportamento que obedece a uma pura função – cosseno. Porém, a componente fundamental do sinal das correntes elétricas estatóricas segundo os eixos alfa e beta, na presença de algum tipo de avaria, continuará a obedecer a uma função seno e coseno, respetivamente, pelo que neste caso, faz sentido aplicar a transformação alternativa de Park no estudo de avarias, na medida em que o objetivo principal é estudar as bandas laterais que surgirão no sinal resultante, de modo a avaliar a sua importância na deteção e no diagnóstico da avaria.

Como visto anteriormente, tendo a corrente i'_d um valor sempre nulo seja qual for o regime de funcionamento ou o estado de conservação do 'MI', os estudos que irão ser apresentados no decorrer deste subcapítulo terão por base a corrente i'_q . Para realizar a análise espectral do sinal da corrente i'_q a técnica em questão será denominada por *DPTCA* (*Derived Park Transformer Coordinate Approach*).

No caso de um motor sem avaria, e tal como visto anteriormente, o sinal da corrente será expresso pela expressão (3.84), o qual indica que nesta situação de funcionamento apenas se obtém uma componente contínua.

3.6.1 - Análise Espectral do Sinal (i'_q)

3.6.1.1 – Avaria na Gaiola Rotórica

Anteriormente, no estudo da técnica ‘PVP A’ aplicada à avaria referente a barras fraturadas, que foi descrito no subcapítulo 3.4.1.1, foram apresentadas as expressões das correntes estatóricas resultantes da aplicação da transformação de Clarke (Expressões 3.33 e 3.34). Fazendo uso destas correntes, o objetivo será aplicar a transformação alternativa de Park no caso de avaria na gaiola rotórica.

$$\begin{aligned}
 i_{DPTCABrokenBar}(t) = & \left[-\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(2 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{3\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-2 * s * \omega_1 * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{3\pi}{2} \right) \quad (3.85) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(4 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{3\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Tal como pode ser observado na expressão (3.85), o sinal resultante ‘ $i_{DPTCABrokenBar}'$ apresenta similaridades aos sinais resultantes das técnicas ‘MSSCSA’, expressão (3.19), ‘SEPVA’, expressão (3.46), e ‘SSPTCA’, expressão (3.75). Analisando analiticamente o desenvolvimento da expressão (3.85), pode-se notar que a sua origem advém da soma do quadrado das correntes estatóricas no sistema de coordenadas ‘ $\alpha\beta$ ’ porém o sinal resultante encontra-se em oposição de fase.

Posto isto, a partir da análise do sinal resultante, a localização das componentes adicionais de frequências poderá ser efetuada de uma forma análoga à realizada no subcapítulo 3.3.1. Como esperado, a representação gráfica do espectro de frequências do sinal ‘ $i_{DPTCABrokenBar}'$ apresenta uma similaridade ao dos espectros apresentados nas figuras (3.4), (3.13) e (3.26), se for considerado o mesmo valor de escorregamento. Para o sinal em questão, será considerado um escorregamento de 4,00% e o respetivo espectro de frequências

pode ser observado na figura 3.31.

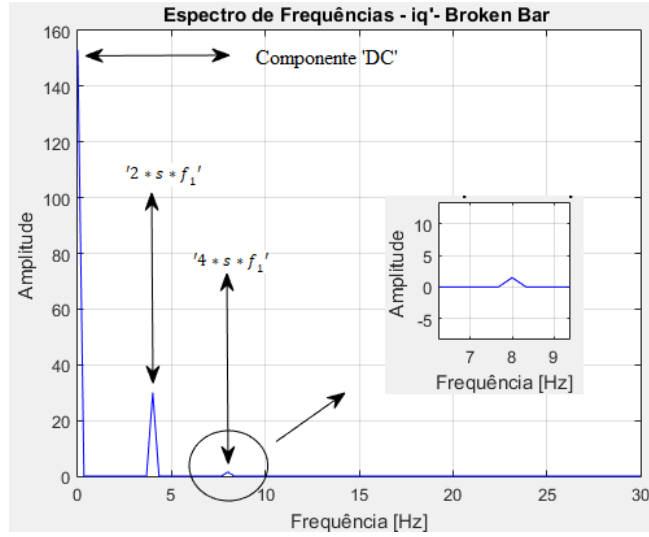


Figura 3. 31 - Espectro de frequências do sinal resultante da corrente i'_q na presença de Barras Fraturadas – Técnica 'DPTCA'

De acordo com as frequências que surgem no caso da avaria de excentricidade, para o cálculo do índice de severidade será considerada a relação entre a componente associada à frequência $'2 * s * f_1'$ e a componente contínua, conforme é possível verificar por (3.86).

$$SF_{DPTCA_{BrokenBar}} = \frac{|i_{DPTCA_{BrokenBar}}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{DPTCA_{BrokenBar}}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.86)$$

3.6.1.2– Excentricidade

Tal como no caso anterior, no estudo da técnica ‘PVPA’ aplicada a avaria por excentricidade, foram apresentadas as expressões necessárias, (Expressões 3.37 e 3.38), para se poder desenvolver a transformação de park alternativa. Deste modo já existem condições de obter a expressão resultante da corrente estatórica, segundo o eixo em quadratura, sendo esta:

$$\begin{aligned}
 i_{DPTCA_{Excentricity}}(t) = & \left[-\frac{3}{2} * \left(I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \right] \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * \sin \left(n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{3\pi}{2} \right) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * \sin \left(-n * \omega_r * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{3\pi}{2} \right) \quad (3.87) \\
 & + 3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}} \sin \left(2 * n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{3\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

No caso da avaria por excentricidade, como pode ser observado na expressão (3.87), volta a existir o fenómeno que ocorreu no caso das barras fraturadas, na medida em que o sinal resultante ‘ $i_{DPTCA_{Excentricity}}$ ’ apresenta similaridade com os sinais resultantes da expressão (3.22), técnica ‘MSSCSA’, da expressão (3.48), técnica ‘SEPVA’ e da expressão (3.77), técnica ‘SSPTC’. De igual modo, a representação gráfica do respetivo espectro de frequências irá apresentar similaridade à dos espectros apresentados nas figuras 3.5, 3.14 e 3.27, caso seja considerado o mesmo valor de escorregamento.

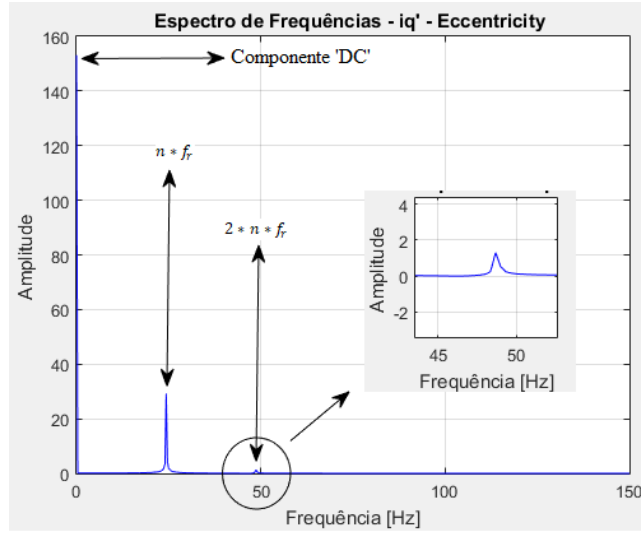


Figura 3. 32 - Espectro de frequências do sinal resultante da corrente i'_q na presença de Excentricidade– Técnica 'DPTCA'

Para concluir a caracterização da técnica 'DPTCA', aplicada à avaria por excentricidade, resta estabelecer a expressão do índice de severidade, tendo em conta a relação existente com a componente mais influente ' $n * f_r$ ' e a componente contínua.

$$SF_{DPTCA_{Eccentricity}} = \frac{|i_{DPTC_{Eccentricity}}\{f(n * f_r)\}|}{|i_{DPTC_{Eccentricity}}\{f(DC \text{ Component})\}|} \quad (3.88)$$

3.6.1.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

Finalmente, o último tipo de avaria a ser estudado, tendo em conta a aplicação da técnica 'DPTCA', é o curto circuito entre espiras, pelo que para se obter a expressão resultante pretendida será necessário fazer uso das expressões das correntes estatóricas no sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', expressões (3.41) e (3.42), apresentadas no subcapítulo 3.4.1.3.

Mais uma vez, o sinal resultante ' $i_{DPTCAInterturns}$ ' advém da soma do quadrado das correntes estatóricas fazendo uso das expressões acima referidas. Sendo assim, como é de esperar, este sinal, que está representado na expressão (3.89), apresenta similaridades com os sinais resultantes da expressão (3.26), técnica 'MSSCSA', da expressão (3.50), técnica 'SEPVA' e da expressão (3.79.), técnica 'SSPTCA'. Com isso, a análise da localização das componentes adicionais de frequências poderá ser efetuada de uma forma análoga ao realizado no subcapítulo 3.3.3.

$$\begin{aligned}
 i_{DPTCA_{Interturns}}(t) = & -\left(\frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + \frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{5}{6} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 \right. \\
 & \left. + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}\right) \\
 & + \left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}}\right) * \sin\left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2}\right) \\
 & + \left[\left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{3\pi}{2}\right)\right] \\
 & + \left\{\left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s)\right)(\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 & + \left\{\left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k\right)(\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 & + \left\{\left(\frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 - \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k\right)(\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 & + \left\{\left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 - k\right)(\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 & + \left\{\left(\frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} - \frac{4}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 1 + k\right)(\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 & + \left\{\left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 - k\right)(\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 & + \left\{\left(\frac{5}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}\right) \right. \\
 & \left. * \sin\left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 1 + k\right)(\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2}\right]\right\}
 \end{aligned} \tag{3.89}$$

Tal como referido anteriormente, o sinal ' $i_{DPTCA_{Interturns}}$ ' apresenta similaridades em relação a outros sinais resultantes da aplicação de outras técnicas, sendo estas as anteriormente mencionadas. De igual modo, no que diz respeito ao respetivo espectro de frequência irá também ocorrer uma similaridade deste com os espectros apresentados nas figuras 3.6, 3.15 e 3.28.

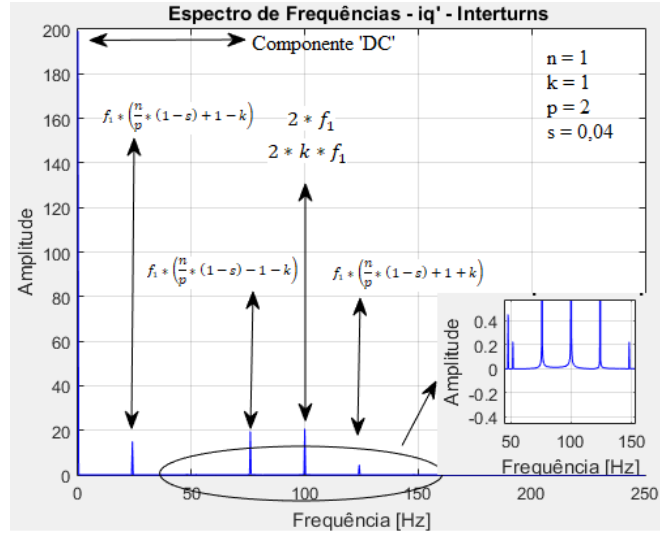


Figura 3. 33 - Espectro de frequências do sinal resultante da corrente i'_q na presença de curto circuito entre espiras– Técnica 'DPTCA'

Por fim, no caso da avaria referente ao curto circuito entre espiras, resta realizar o cálculo do índice de severidade, tendo em conta a relação associada à frequência ' $2 \cdot f_1$ ' e à componente contínua, sendo esta estabelecida em (3.90).

$$SF_{DPTCAInterturns} = \frac{|i_{DPTCAInterturns}\{f(2 \cdot f_1)\}|}{|i_{DPTCAInterturns}\{f(DC\ Component)\}|} \quad (3.90)$$

3.6.2 - Análise Espectral do Sinal ($i'q^2$)

No estudo apresentado no subcapítulo anterior verificou-se que ao realizar a transformação alternativa de Park, a componente segundo o eixo direto, ou seja, a corrente ($i'd$) apresenta um valor nulo, independentemente do estado do motor de indução trifásico. À imagem do que foi feito anteriormente, propõe-se um novo método que é baseado no quadrado do sinal de corrente obtido a partir da transformação alternativa de Park. Esta técnica de diagnóstico de avarias será denominada de *SDPTCA* ('*Square of Derived Park Transformer Coordinate Approach*').

Para a situação do motor em modo de funcionamento saudável, tendo em conta um sistema de tensões equilibrado, o sinal resultante ' $i_{SDPTCANoFault}$ ' poderá ser expresso por (3.91). Para tal, basta elevar ao quadrado o sinal inserido na expressão (3.84).

$$i_{SDPTCANoFault}(t) = \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x}^4 \quad (3.91)$$

Como pode ser visualizado na expressão (3.91), o sinal resultante é uma constante pelo que se pode concluir que para a técnica '*SDPTCA*' a componente fundamental do sinal estará inserida em 0 Hz.

3.6.2.1 – Avaria na Gaiola Rotórica

Fazendo uso da técnica ‘*SDPTCA*’ no caso da avaria referente a barras fraturadas, o objetivo principal é elevar a expressão (3.85), já anteriormente apresentada, ao quadrado, de modo a que possam ser conhecidas as respectivas componentes de frequência que surgirão no sinal resultante ‘ $i_{SDPTCA_{BrokenBar}}$ ’, sendo este apresentado em (3.92). Como poderá ser visualizado mais a frente, existirá novas componentes que surgirão em relação as outras técnicas estudadas anteriormente, que possibilitará uma análise espectral mais rica em termos de componentes adicionais de frequência.

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 i_{SDPTCA_{BrokenBar}} = & \left\{ \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x}^4 + \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^4 + \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^4 + 9 * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + 9 * I_{m\acute{a}x}^2 \right. \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + 9 * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \\
 & * \left. \sin \left[\beta_{lower} + \beta_{upper} - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^3 + 9 * I_{m\acute{a}x}^3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} + 18 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \\
 & * \sin \left[2 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^3 + 9 * I_{m\acute{a}x}^3 * I_{m\acute{a}x_{upper}} + 18 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) \\
 & * \sin \left[-2 * s * \omega_1 * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(\frac{9}{2} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) * \sin \left[4 * s * \omega_1 * t + 2 * \beta_{lower} - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(\frac{9}{2} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) * \sin \left[-4 * s * \omega_1 * t + 2 * \beta_{upper} - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^3 + 9 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^3 * I_{m\acute{a}x_{upper}} + 18 * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \\
 & * \sin \left[4 * s * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) * \sin \left[6 * s * \omega_1 * t + 2 * \beta_{lower} - \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left[-6 * s * \omega_1 * t + 2 * \beta_{upper} - \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(\frac{9}{2} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) * \sin \left[8 * s * \omega_1 * t + 2 * \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.92}$$

Como pode ser verificado na expressão (3.92), o sinal resultante ' $i_{SDPTCA_{BrokenBar}}$ ', apresenta nove parcelas distintas, pois tal como referido anteriormente, no caso da aplicação da técnica 'SDPTCA', irão surgir novas componentes de frequências, na situação de barras fraturadas, que até agora não foram verificadas em outras técnicas de diagnóstico. Sendo assim, poderá ser observado de seguida uma análise qualitativa às componentes adicionais de frequências do sinal em questão;

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

- A primeira parcela do sinal apresenta-se como a componente fundamental do sinal ' $i_{SDPTC_{BrokenBar}}$ ' inserida em 0 Hz, ou seja, apresenta-se como a componente contínua do sinal;
- A segunda, terceira, quarta, quinta e sexta parcelas do sinal ' $i_{SDPTCA_{BrokenBar}}$ ', representam as típicas componentes de frequências que surgem quando o 'MI' se encontra a operar na presença de barras fraturadas. Estas componentes encontram-se inseridas em ' $2 * s * f_1$ ' e ' $4 * s * f_1$ ' e representam componentes específicas/características deste tipo de avarias.
- A sétima e oitava parcelas, apresentam-se como uma novidade em relação às componentes adicionais de frequências que surgem na presença de barras fraturadas, na medida em que esta se encontra inserida em ' $6 * s * f_1$ '. Como poderá ser visto no gráfico da figura 3.34, esta componente apresenta uma amplitude substancialmente inferior às outras duas anteriormente mencionadas, porém, para a análise espectral desta avaria em particular acaba por enriquecer o diagnóstico;
- Finalmente, a oitava parcela do sinal apresenta-se também como uma novidade em relação às componentes adicionais de frequências que surgem na presença de barras fraturadas, na medida em que esta se encontra inserida em ' $8 * s * f_1$ ', porém a sua amplitude é totalmente insignificante em relação às restantes componentes, sendo difícil de ser identificada a olho nu. Por outro lado, esta componente facilmente poderá ser confundida com ruído, pelo que para o diagnóstico em questão, não apresenta grandes vantagens.

Conforme se verificou, a técnica ' $SDPTCA$ ' apresenta muita informação no que diz respeito ao espectro de frequências, pelo que, para melhor compreensão, na figura 3.34 será apresentado o espectro de frequências do sinal ' $i_{SDPTCA_{BrokenBar}}$ ', considerando um escorregamento ' $s = 4 \%$ '.

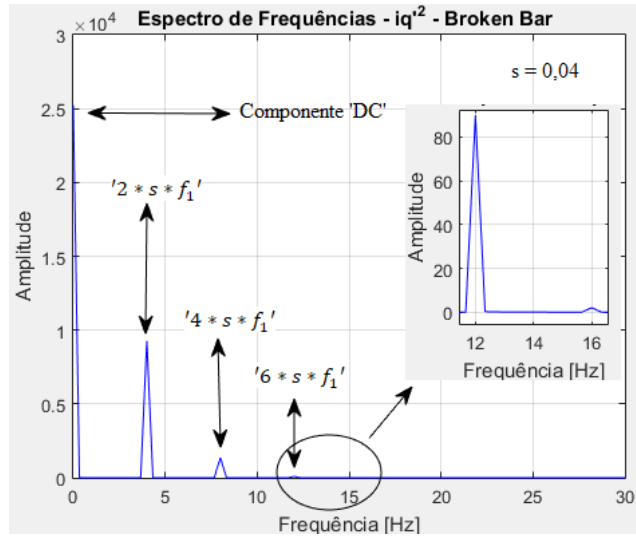


Figura 3. 34 - Espectro de frequências do sinal resultante da corrente i_{q^2} na presença de barras fraturadas – Técnica 'SDPTCA'

Seguindo a mesma metodologia utilizada nas outras técnicas de diagnóstico, para se calcular o índice de severidade, deverá ser estabelecida a relação entre a componente adicional de frequência mais influente, sendo esta inserida em ' $2 * s * f_1$ ' neste caso, e a componente fundamental do sinal, sendo esta inserida em 0 Hz.

$$SF_{SDPTCA_{BrokenBar}} = \frac{|i_{SDPTCA_{BrokenBar}}\{f(2 * s * f_1)\}|}{|i_{SDPTCA_{BrokenBar}}\{f(DC Component)\}|} \quad (3.93)$$

3.6.2.2 – Excentricidade

De uma forma análoga ao caso anterior, para o caso da avaria referente a excentricidade, deverá ser considerada a expressão da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura, quando é aplicado a transformação alternativa de Park, sendo esta inserida em (3.87). Também neste caso, irão surgir novas componentes de frequências que até então não surgiram em mais nenhuma técnica, relativamente ao tipo de avaria em questão, pelo que estas componentes permitirão obter uma análise espectral com maior conteúdo informativo.

$$\begin{aligned}
 i_{SDPTCA_{Eccentricity}} = & \left\{ \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x}^4 + \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^4 + \frac{9}{4} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^4 + 9 * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + 9 * I_{m\acute{a}x}^2 \right. \\
 & * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + 9 * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} \\
 & \left. * \sin \left[\beta_{lower} + \beta_{upper} - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^3 + 9 * I_{m\acute{a}x}^3 * I_{m\acute{a}x_{lower}} + 18 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) \\
 & * \sin \left[n * \omega_r * t * t + \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^3 + 9 * I_{m\acute{a}x}^3 * I_{m\acute{a}x_{upper}} + 18 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) \\
 & * \sin \left[-n * \omega_r * t * t + \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(\frac{9}{2} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) * \sin \left[2 * n * \omega_r * t * t + 2 * \beta_{lower} - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(\frac{9}{2} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \right) * \sin \left[-2 * n * \omega_r * t * t + 2 * \beta_{upper} - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^3 + 9 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^3 * I_{m\acute{a}x_{upper}} + 18 * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) \\
 & * \sin \left[2 * n * \omega_r * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) * \sin \left[3 * n * \omega_r * t + 2 * \beta_{lower} - \beta_{upper} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(9 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}} \right) * \sin \left[-3 * n * \omega_r * t + 2 * \beta_{upper} - \beta_{lower} - \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(\frac{9}{2} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 \right) * \sin \left[4 * n * \omega_r * t + 2 * \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.94}$$

O tipo de análise a ser efetuado a partir da expressão (3.94), no caso da avaria referente à excentricidade, será analoga à análise realizada no caso das barras fraturadas, pelo que abaixo poderá ser verificado os principais detalhes a serem frisados:

- A primeira parcela do sinal apresenta-se como a componente fundamental do sinal ' $i_{SDPTCA_{Excentricidade}}$ ' inserida em 0 Hz;
- A segunda, terceira, quarta, quinta e sexta parcela do sinal ' $i_{SDPTCA_{Excentricidade}}$ ', representam as típicas componentes de frequências que surgem quando o 'MI' se encontra a operar na presença de excentricidade. Estas componentes encontram-se inseridas em ' $n * f_r$ ' e ' $2 * n * f_r$ ' e representam componentes específicas/características deste tipo de avarias.
- Tal como sucedeu no caso anterior, a sétima e oitava parcelas do sinal, apresentam-se como uma novidade em relação às componentes adicionais de frequências que surgem na presença de excentricidade, na medida que esta se encontra inserida em ' $3 * n * f_r$ '.
- Da mesma forma, a nona parcela do sinal apresenta-se também como uma novidade em relação às componentes adicionais de frequências que surgem na presença de excentricidade na medida que esta se encontra inserida em ' $4 * n * f_1$ '. Esta componente não tem grande significado na análise espectral devido à sua pequena amplitude em relação as restantes parcelas, o que também poderá facilmente ser confundido com ruído.

Para melhor compreensão da análise efetuada acima, na figura 3.35 será apresentado o espectro de frequências do sinal ' $i_{SDPTCA_{Excentricidade}}$ ', considerando um escorregamento ' $s = 2,5 \%$ ' e ' $n = 1$ '.

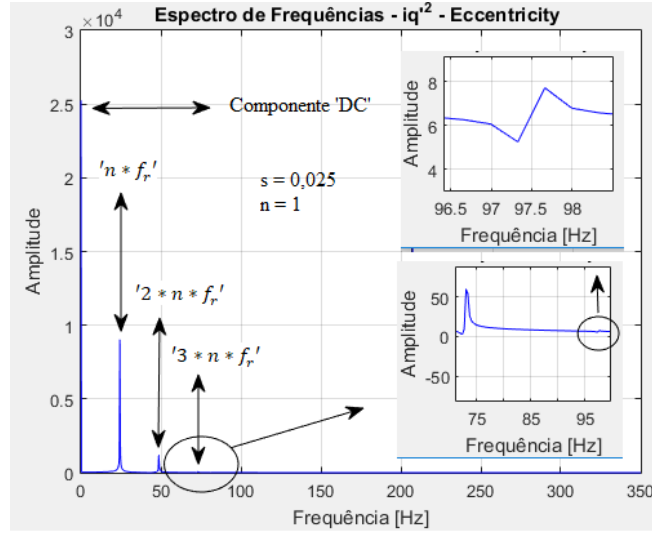


Figura 3. 35 - Espectro de frequências do sinal resultante da corrente $i'q^2$ na presença de Excentricidade – Técnica 'SDPTCA'

Para concluir a caracterização da técnica 'SDPTCA', aplicada à avaria por excentricidade, resta estabelecer a expressão do índice de severidade, tendo em conta a relação existente com a componente mais influente $n * f_r'$ e com a componente contínua.

$$SF_{SDPTCA_{Eccentricity}} = \frac{\left| i_{SDPTCA_{Eccentricity}} \{f(n * f_r)\} \right|}{\left| i_{SDPTCA_{Eccentricity}} \{f(DC \text{ Component})\} \right|} \quad (3.95)$$

3.6.2.3 - Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

Em relação a técnica ‘SDPTCA’, a aplicação da mesma na situação em que o ‘MI’ se encontra com avaria nos enrolamentos do estator, nomeadamente, o curto circuito entre espiras, representa o derradeiro caso analisado no decorrer de todo o capítulo 3 e será o mais complexo e trabalhoso de apresentar. Sabe-se que anteriormente, na expressão (3.89), foi apresentada a expressão que corresponde à corrente elétrica segundo a componente em quadratura, tendo em conta a transformação alternativa de Park. A partir desta, o sinal resultante pretendido será derivado da elevação ao quadrado da expressão (3.89).

Tal como poderá ser constatado na expressão (3.89), o sinal ‘ $i_{DPTCAInterturns}$ ’ é formado pela soma de dez parcelas distintas, pelo que ao elevar a mesma expressão ao quadrado, o sinal resultante apresenta-se como uma expressão complexa e extensa pelo que para facilitar a análise das componentes adicionais de frequência, o sinal resultante será apresentado por partes. Poderá ainda ser verificado que em relação ao estudo de outras técnicas de diagnóstico aplicadas a situação de curto circuito entre espiras, o sinal resultante ‘ $i_{SDPTCAInterturns}$ ’ em estudo apresentará componentes adicionais de frequências que já foram estudadas e fundamentadas anteriormente, pelo que o objetivo do discente será frisar apenas as novas componentes de frequência.

Para tal, numa primeira instância, será considerado que a primeira parcela da expressão (3.89), corresponde à letra ‘a’, a segunda parcela à letra ‘b’, a terceira parcela à letra ‘c’, e assim sucessivamente. Com isso a expressão (3.89) poderá ser reescrita a partir das considerações tomadas anteriormente, expressão (3.96), e a expressão resultante quando esta é elevada ao quadrado poderá ser visualizada em (3.97). Note-se que a expressão (3.97) surge na sequência da aplicação de uma técnica matemática da soma do quadrado de dez parcelas.

$$i_{DPTCAInterturns}(t) = a + b + c + d + e + f + g + h + i + j \quad (3.96)$$

$$\begin{aligned}
 i_{DPTCA_{Interturns}}^2(t) &= (a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2 + g^2 + h^2 + i^2 + j^2) \\
 &+ (ab + ac + ad + ae + af + ag + ah + ai + aj) \\
 &+ (bc + bd + be + bf + bg + bh + bi + bj) \\
 &+ (cd + ce + cf + cg + ch + ci + cj) \\
 &+ (de + df + dg + dh + di + dj) \\
 &+ (ef + eg + eh + ei + ej) \\
 &+ (fg + fh + fi + fj) \\
 &+ (gh + gi + gj) \\
 &+ (hi + hj) \\
 &+ (ij)
 \end{aligned} \tag{3.97}$$

Sendo assim, tendo em conta o objetivo inicial, a expressão (3.97) poderá ser reescrita novamente, expressão (3.98), considerando que a soma dos produtos inseridos dentro de cada parentesis corresponde a uma parcela que irá ser analisada e fundamentada. A primeira expressão, e a mais extensa que irá ser apresentada, será a parcela inserida na expressão (3.99), 'square'. Esta parcela irá apresentar novas componentes de frequência que até agora não foram estudadas em nenhuma técnica, no que diz respeito à avaria referente ao curto circuito entre espiras e irá apresentar de igual modo outras já conhecidas de outras técnicas.

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 i_{DPTCA_{Interturns}}^2 &= i_{SDPTCA_{Interturns}} \\
 &= square + sum1 + sum2 + sum3 + sum4 + sum5 \\
 &\quad + sum6 + sum7 + sum8 + sum9
 \end{aligned} \tag{3.98}$$

$$\begin{aligned}
 square(t) &= \left(\frac{1}{3} I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^3 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x}^3 * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{1}{3} I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^3 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^3 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right. \\
 &+ \frac{1}{3} I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^3 + \frac{1}{3} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^3 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \\
 &+ \frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 \\
 &\quad \left. * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right. \\
 &+ \frac{11}{12} * I_{m\acute{a}x}^4 + \frac{1}{6} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^4 + \frac{11}{12} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^4 + \frac{1}{6} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^4 + \frac{11}{12} * I_{m\acute{a}x_{upper}}^4 + \frac{1}{18} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^4 \\
 &+ \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 + \frac{1}{2} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + \frac{11}{3} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{11}{3} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \\
 &+ \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \\
 &+ \frac{2}{3} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{4}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 + \frac{11}{3} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 \\
 &\left. + \frac{1}{2} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 \right)
 \end{aligned}$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{2}{3} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 + \frac{1}{18} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{4}{19} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 \right. \\
 & + \frac{2}{9} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}} * I_{\text{máx_upper_cc}} + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} * I_{\text{máx_upper_cc}} + \frac{2}{3} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}} * I_{\text{máx_upper}}^2 \\
 & + \frac{2}{3} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 + \frac{4}{9} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}} * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{2}{3} * I_{\text{máx}}^2 * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} \\
 & + \frac{2}{3} * I_{\text{máx}}^2 * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_upper_cc}} + \frac{2}{3} * I_{\text{máx_cc}}^2 * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} + \frac{2}{3} * I_{\text{máx_cc}}^2 * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_upper_cc}} \\
 & + \frac{2}{3} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_lower_cc}} + \frac{2}{3} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}} \\
 & + \frac{4}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 * I_{\text{máx_lower_cc}} + \frac{2}{3} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}} \\
 & + \frac{2}{3} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_upper_cc}} + \frac{2}{3} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} \\
 & \left. + \frac{2}{3} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_upper_cc}} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} \right) \\
 & + \left(\frac{2}{9} * I_{\text{máx}}^4 + \frac{1}{18} * I_{\text{máx_cc}}^4 + \frac{1}{9} * I_{\text{máx}} * I_{\text{máx_cc}}^3 - \frac{2}{9} * I_{\text{máx}}^3 * I_{\text{máx_cc}} - \frac{1}{6} * I_{\text{máx}}^2 * I_{\text{máx_cc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left(4 * \omega_1 * t - 4 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(\frac{25}{18} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper}}^2 + \frac{1}{18} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{1}{18} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 \right. \\
 & + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{5}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_lower_cc}} + \frac{5}{9} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}} \\
 & \left. + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_upper_cc}} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left(4 * k * \omega_1 * t + 2 * \beta_{\text{lower}} - 2 * \beta_{\text{upper}} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(\frac{8}{9} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper}}^2 + \frac{1}{18} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{1}{18} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 \right. \\
 & + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 - \frac{4}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_upper}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}} - \frac{4}{9} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_lower}}^2 * I_{\text{máx_upper_cc}} \\
 & + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_lower_cc}} * I_{\text{máx_upper_cc}}^2 + \frac{2}{9} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_upper_cc}} * I_{\text{máx_lower_cc}}^2 \\
 & \left. - \frac{7}{9} * I_{\text{máx_lower}} * I_{\text{máx_upper}} * I_{\text{máx_lower_cc}} * I_{\text{máx_upper_cc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{\text{lower}} - 2 * \beta_{\text{upper}} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.99}$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{2}{9} * I_{máx_{lower}}^4 + \frac{1}{18} * I_{máx_{lowercc}}^4 + \frac{1}{9} * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{lowercc}}^3 - \frac{2}{9} * I_{máx_{lower}}^3 * I_{máx_{lowercc}} \right. \\
 & \left. - \frac{1}{6} * I_{máx_{lower}}^2 * I_{máx_{lowercc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) - 4 * k \right) (\omega_1 * t) - 4 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{2}{9} * I_{máx_{upper}}^4 + \frac{1}{18} * I_{máx_{uppercc}}^4 + \frac{1}{9} * I_{máx_{upper}} * I_{máx_{uppercc}}^3 - \frac{2}{9} * I_{máx_{upper}}^3 * I_{máx_{uppercc}} \right. \\
 & \left. - \frac{1}{6} * I_{máx_{upper}}^2 * I_{máx_{uppercc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) + 4 * k \right) (\omega_1 * t) - 4 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{25}{18} * I_{máx}^2 * I_{máx_{upper}}^2 + \frac{1}{18} * I_{máx}^2 * I_{máx_{uppercc}}^2 + \frac{1}{18} * I_{máx_{upper}}^2 * I_{máx_{cc}}^2 + \frac{2}{9} * I_{máx_{cc}}^2 * I_{máx_{uppercc}}^2 \right. \\
 & + \frac{5}{9} * I_{máx} * I_{máx_{upper}}^2 * I_{máx_{cc}} + \frac{5}{9} * I_{máx_{upper}} * I_{máx}^2 * I_{máx_{uppercc}} + \frac{2}{9} * I_{máx} * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}}^2 \\
 & \left. + \frac{2}{9} * I_{máx_{upper}} * I_{máx_{uppercc}} * I_{máx_{cc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k - 2 \right) (\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{8}{9} * I_{máx}^2 * I_{máx_{upper}}^2 + \frac{1}{18} * I_{máx}^2 * I_{máx_{uppercc}}^2 + \frac{1}{18} * I_{máx_{upper}}^2 * I_{máx_{cc}}^2 + \frac{2}{9} * I_{máx_{cc}}^2 * I_{máx_{uppercc}}^2 \right. \\
 & - \frac{4}{9} * I_{máx} * I_{máx_{upper}}^2 * I_{máx_{cc}} - \frac{4}{9} * I_{máx_{upper}} * I_{máx}^2 * I_{máx_{uppercc}} + \frac{2}{9} * I_{máx} * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}}^2 \\
 & \left. + \frac{2}{9} * I_{máx_{upper}} * I_{máx_{uppercc}} * I_{máx_{cc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k + 2 \right) (\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(\frac{25}{18} * I_{máx}^2 * I_{máx_{lower}}^2 + \frac{1}{18} * I_{máx}^2 * I_{máx_{lowercc}}^2 + \frac{1}{18} * I_{máx_{lower}}^2 * I_{máx_{cc}}^2 + \frac{2}{9} * I_{máx_{cc}}^2 * I_{máx_{lowercc}}^2 \right. \\
 & + \frac{5}{9} * I_{máx} * I_{máx_{lower}}^2 * I_{máx_{cc}} + \frac{5}{9} * I_{máx_{lower}} * I_{máx}^2 * I_{máx_{lowercc}} + \frac{2}{9} * I_{máx} * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}}^2 \\
 & \left. + \frac{2}{9} * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{lowercc}} * I_{máx_{cc}}^2 \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k - 2 \right) (\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned}$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{8}{9} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{1}{18} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{1}{18} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 \right. \\
 & - \frac{4}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} - \frac{4}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x}^2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 \\
 & \left. + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k + 2 \right) (\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned}$$

Tal como acontece no caso das avarias referentes a barras fraturadas e a excentricidade, na situação de curto circuito entre espiras o quadrado da componente segundo o eixo em quadratura, tendo em conta a transformada alternativa de Park, apresenta como componente fundamental a componente contínua. Por outras palavras, a primeira e segunda parcelas da expressão (3.99) correspondem à componente contínua do sinal e, por sua vez, à componente fundamental do mesmo. Como pode ser facilmente constatado na expressão (3.99) e como poderá ser constatado pela figura 3.35, a componente contínua do sinal ' $i_{SDPTCInterturns}'$ representa uma parcela do sinal que tem uma amplitude significativa em relação às restantes parcelas do sinal.

Sendo assim, como foi dito anteriormente, à medida que forem apresentadas as diversas partes integrantes da expressão (3.98), serão apresentadas logo em seguida as componentes adicionais de frequências que surgem em cada uma das partes e também no intervalo de frequências ao qual poderá se associar estas componentes, tendo em conta os seguintes pressupostos:

$$\text{➤ } 's' < 5\%, 'n = 1', 'k = 1' \text{ e } 'p = 2'$$

Deve-se ainda salientar que as componentes de frequências que já foram estudadas não irão ser analisadas. Deste modo a análise respeitante às componentes adicionais de frequência inseridas em '*square*', poderá ser visualizada abaixo:

- A terceira parcela do sinal irá contribuir com uma componente de frequência que irá surgir em ' $4 * kf_1'$ ', pelo que nas condições anteriormente delineadas, a mesma estará inserida nos 200 Hz, sendo que poderá surgir em outras frequências para diferentes valores de ' k' '. Esta componente de frequência, para a situação de curto circuito entre espiras ainda não tinha surgido em nenhuma técnica referente à análise espectral, pelo

que esta poderá com efeito qualificar e permitir a identificação deste tipo de avaria em específico.

- A quarta parcela do sinal irá contribuir com uma componente que estará inserida em $f_1 * \left(\frac{4*n}{p} * (1 - s)\right)$, pelo que esta componente de frequência irá surgir entre 95 e 100 Hz, exclusive. Tal como a componente de frequência anterior, esta componente também se apresenta como novidade referente ao tipo de avaria em estudo, pelo que poderá com efeito qualificar e permitir a identificação desta.
- A quinta e sexta parcelas do sinal irão contribuir com componentes de frequência que estarão inseridas em $f_1 * \left(\frac{4*n}{p} * (1 - s) \mp 4 * k\right)$. No caso da quinta parcela, esta terá lugar entre 100 e 105 Hz, inclusive e a sexta parcela terá lugar entre 295 e 300 Hz, exclusive.
- A sétima, oitava, nona e décima parcelas do sinal, tal como foi dito anteriormente, não serão analisadas, na medida em que estas já surgiram anteriormente em outras técnicas de diagnóstico, quando aplicadas na situação de curto circuito entre espiras.

Como foi possível verificar na análise efetuada acima, a parcela 'square' já apresentou muitas novas componentes de frequência adicionais quando comparada com as outras técnicas, pelo que estando esta devidamente analisada e fundamentada, na expressão (3.100) será apresentado a parcela 'sum1'.

$$\begin{aligned}
 sum1 = & - \left\{ \frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x}^2 + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 + \frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right. \\
 & \left. + \frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}}^2 + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right\} * \\
 & * \left[\left(I_{m\acute{a}x_{cc}}^2 - 2 * I_{m\acute{a}x}^2 + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{cc}} \right) \right. \\
 & \quad \left. * \sin \left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \right. \\
 & \quad \left. + \left(5 * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \right. \\
 & \quad \left. * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

Como poderá ser visualizado na expressão (3.100) as componentes de frequências que surgem pela contribuição da parcela 'sum1' já se apresentam como conhecidas nas técnicas de diagnóstico estudadas anteriormente, referentes a avaria de curto-circuito entre espiras, pelo que a análise da localização destas componentes poderá ser efetuada de uma forma análoga à realizada no subcapítulo 3.3.4.

Nesta fase, o sinal correspondente ao terceiro parentesis inserido na expressão (3.97) poderá ser visualizado na expressão (3.101), nomeadamente a parcela 'sum2'.

$$\begin{aligned}
 sum2 = & \left\{ \frac{1}{9} * I_{máx_{cc}}^2 - \frac{2}{9} * I_{máx}^2 + \frac{1}{9} * I_{máx} * I_{máx_{cc}} \right\} \\
 * [& - (5 * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{lower_{cc}}} + 2 * I_{máx_{lower_{cc}}} \\
 & * I_{máx_{upper_{cc}}}) \\
 & * \sin \left[(-2 * k - 2)(\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 - \beta_{lower} + \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & - (5 * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{lower_{cc}}} + 2 * I_{máx_{lower_{cc}}} \\
 & * I_{máx_{upper_{cc}}}) \\
 & * \sin \left[(-2 * k + 2)(\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 - \beta_{lower} + \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & (-4 * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{lower_{cc}}} + 2 * I_{máx_{lower_{cc}}} * I_{máx_{upper_{cc}}}) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 \right) (\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & (-4 * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{lower_{cc}}} + 2 * I_{máx_{lower_{cc}}} * I_{máx_{upper_{cc}}}) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 \right) (\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & (-4 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper_{cc}}}) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & (5 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper_{cc}}}) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.101}$$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k - 3 \right) (\omega_1 * t) + 3 * \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k + 3 \right) (\omega_1 * t) - 3 * \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) * \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k - 3 \right) (\omega_1 * t) + 3 * \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k + 3 \right) (\omega_1 * t) - 3 * \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 - 2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k - 2 \right) (\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}}^2 - 2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k + 2 \right) (\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(I_{\text{máx}_{\text{lower}_{cc}}}^2 - 2 * I_{\text{máx}_{\text{lower}}}^2 + I_{\text{máx}_{\text{lower}}} * I_{\text{máx}_{\text{lower}_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k - 2 \right) (\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{\text{lower}} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{\text{máx}_{\text{lower}_{cc}}}^2 - 2 * I_{\text{máx}_{\text{lower}}}^2 + I_{\text{máx}_{\text{lower}}} * I_{\text{máx}_{\text{lower}_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k + 2 \right) (\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 - 2 * \beta_{\text{lower}} + \frac{\pi}{2} \right] \quad]
 \end{aligned}$$

Como poderá ser constatado na expressão (3.108), a parcela '*sum2*', apresenta na sua composição componentes de frequências que já foram estudadas anteriormente, em outras técnicas de diagnóstico. Por outras palavras, no que diz respeito ao estudo do conteúdo de '*sum2*', não serão analisadas a terceira, quarta, quinta, sexta, sétima, oitava, décima terceira e décima sétima parcelas, pelo que a análise da mesma irá cingir-se às parcelas não apresentadas até ao momento, nomeadamente:

- O primeiro termo, apresenta uma componente de frequência que irá surgir em ' $f_1(-2 * k - 2)$ '. Esta componente, de uma maneira analoga a uma componente anteriormente apresentada (' $2 * k f_1$ ') irá estar inserida a 200 Hz;
- O segundo termo, apresenta uma componente de frequência que irá surgir em ' $f_1(-2 * k + 2)$ '. Para o valor de ' $k = 1$ ', tal como foi especificado no início do subcapítulo, esta componente de frequência irá contribuir com a componente contínua do sinal inserida na parcela '*square*';
- O nono, décimo, décimo primeiro e décimo segundo termo apresenta-se como uma novidade relativamente às outras técnicas até agora apresentadas, para o estudo do curto circuito entre espiras, na medida em que as componentes adicionais de frequências se encontram inseridas em ' $f_1 * \left(\frac{2}{p} * (1 - s) - k - 3 \right)$ '. Em relação à localização das componentes de frequências estas encontram-se entre 175 e 176,25 Hz, relativo ao nono termo, 123,75 e 125 Hz, relativo ao décimo termo, 75 e 76,25 Hz, relativo ao décimo primeiro termo e 223,75 e 225 Hz, relativo ao décimo segundo termo.
- O décimo quarto e décimo quinto termo apresentam-se como parcelas que irão contribuir com componentes de frequência que estarão inseridas em

' $f_1 * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) + 2 * k + 2\right)$ ' e ' $f_1 * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) - 2 * k - 2\right)$ ', respectivamente.

Em relação à localização das componentes de frequências estas encontram-se entre 147,50 Hz e 150 Hz, exclusive, e entre 100 e 102,5 Hz, inclusive.

Estando a parcela ' $sum2$ ', no que diz respeito às novas componentes adicionais de frequência, totalmente analisada e fundamentada, o próximo passo será apresentar a expressão (3.102), correspondente à parcela ' $sum3$ ', sendo este sinal correspondente ao quarto parentesis inserido na expressão (3.97).

$$\begin{aligned}
 sum3 = & \left\{ \frac{5}{9} * I_{máxlower} * I_{máxupper} + \frac{1}{9} * I_{máxlower} * I_{máxuppercc} + \frac{1}{9} * I_{máxupper} * I_{máxlowercc} \right. \\
 & \left. + \frac{2}{9} * I_{máxlowercc} * I_{máxuppercc} \right\} \\
 * [& \left(-2 * I_{máxlower}^2 - 2 * I_{máxupper}^2 + I_{máxuppercc}^2 + I_{máxlowercc}^2 + I_{máxlower} * I_{máxlowercc} \right. \\
 & \left. + I_{máxupper} * I_{máxuppercc} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(-4 * I_{máxlower} * I_{máxupper} + I_{máxlower} * I_{máxuppercc} + I_{máxupper} * I_{máxlowercc} + 2 * I_{máxlowercc} \right. \\
 & \left. * I_{máxuppercc} \right) * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 + & \left(-4 * I_{máxlower} * I_{máxupper} + I_{máxlower} * I_{máxuppercc} + I_{máxupper} * I_{máxlowercc} + 2 * I_{máxlowercc} \right. \\
 & \left. * I_{máxuppercc} \right) * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(I_{máx_{lowercc}}^2 - 2 * I_{máx_{lower}}^2 + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 4 * k \right) (\omega_1 * t) - 3 * \beta_{lower} + \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(I_{máx_{uppercc}}^2 - 2 * I_{máx_{upper}}^2 + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 4 * k \right) (\omega_1 * t) - 3 * \beta_{upper} + \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lowercc}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lowercc}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 3 * k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 + \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + 3 * k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 + \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.102}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 3 * k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 + \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 3 * k + 1 \right) (\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 + \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \quad]
 \end{aligned}$$

Tal como acontece no caso da análise da parcela anterior 'sum2', e como poderá ser constatado na expressão (3.109), a parcela 'sum3' apresenta na sua composição componentes de frequências que já foram estudadas anteriormente, em outras técnicas de diagnóstico. Com isso, a primeira, segunda, terceira, sexta, sétima, oitava e nona parcelas de 'sum3' não serão novamente analisadas. Em relação às restantes componentes de frequências que são originadas devido à contribuição das restantes parcelas de 'sum3', estas são analisadas de seguida:

- A quarta e quinta parcelas do sinal irão contribuir com componentes de frequência que estarão inseridas em $f_1 * \left(\frac{2*n}{p} * (1 - s) \mp 4 * k \right)$. No caso da quarta parcela esta terá lugar entre 150 e 152,5 Hz, inclusive e a quinta parcela terá lugar entre 247,5 e 250 Hz, exclusive.
- As componentes de frequências resultantes da décima, décima primeira, décima segunda e décima terceira parcelas, estas encontram-se inseridas em ' $f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \mp 3k \mp 1 \right)$ '. Apesar destas parcelas não terem sido apresentadas anteriormente, a análise da localização das componentes de frequências poderá ser efetuada de uma forma análoga ao caso das componentes ' $f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \mp k \mp 3 \right)$ ' inseridas na parcela 'sum2' (expressão 3.101).

O seguimento do estudo do sinal resultante ' $i_{SDPTC_{Interturns}}$ ', será apresentar a expressão (3.103), correspondente à parcela 'sum4', sendo esta inserida no quinto parentesis da expressão (3.97).

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 sum4(t) = & \left\{ -\frac{4}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right. \\
 & \left. * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right\} \\
 & * \left[\left(-2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 - 2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + I_{m\acute{a}x_{uppercc}}^2 + I_{m\acute{a}x_{lowercc}}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \right. \\
 & \left. * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \right. \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x_{lowercc}}^2 - 2 * I_{m\acute{a}x_{lower}}^2 + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{upper} - 3 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \right. \\
 & + \left(I_{m\acute{a}x_{uppercc}}^2 - 2 * I_{m\acute{a}x_{upper}}^2 + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - 3 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \right. \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \right. \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) + k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \right. \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \right. \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & \left. * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \right.
 \end{aligned} \tag{3.103}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) + k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) + k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) - k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) - k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \quad]
 \end{aligned}$$

Como poderá ser visualizado em (3.103), em relação às componentes de frequências que se apresentam como novidade, em relação às outras técnicas de diagnóstico estudadas anteriormente, estas são analisadas de seguida:

- A segunda e terceira parcelas do sinal irão contribuir com componentes de frequência que estarão inseridas em $f_1 * \left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) \mp 2 * k \right)$. No caso da segunda parcela, esta terá lugar entre 100 e 105 Hz, inclusive, e a terceira parcela terá lugar entre 195 e 200 Hz, exclusive.
- Em relação às componentes de frequências resultantes da nona e décima primeira parcela, estas encontram-se inseridas em $f_1 * \left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) \right)$. Estas componentes de frequência, tendo em conta os pressupostos anteriormente citados, encontram-se inseridas entre 71,25 e 75 Hz, exclusive;
- Finalmente, as componentes resultantes das oitava e décima parcelas encontram-se inseridas em $f_1 * \left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) + k + 1 \right)$ e $f_1 * \left(\frac{3 * n}{p} * (1 - s) - k - 1 \right)$. Em relação à primeira componente citada, esta está inserida entre 171,25 e 175 Hz, exclusive, e a segunda componente está inserida entre 25 e 28,75 Hz, inclusive.

Na continuação do estudo das diversas parcelas do sinal $i'_{SDPTC_{Interturns}}$, nesta fase

poderá ser visualizado na expressão (3.104), o sinal correspondente ao sexto parentesis inserido na expressão (3.97), nomeadamente, a parcela 'sum5'.

$$\begin{aligned}
 & \text{sum5}(t) \\
 &= \left(\frac{1}{9} * I_{máx_{lower_{cc}}}^2 - \frac{2}{9} * I_{máx_{lower}}^2 + \frac{1}{9} * I_{máx_{lower}} * I_{máx_{lower_{cc}}} \right) \\
 & * \left[\left(I_{máx_{upper_{cc}}}^2 - 2 * I_{máx_{upper}}^2 + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \right. \\
 & \quad * \sin \left(4 * k * \omega_1 * t + 2 * \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & \quad \left(I_{máx_{upper_{cc}}}^2 - 2 * I_{máx_{upper}}^2 + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{4 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & \quad + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lower_{cc}}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k - 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & \quad + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lower_{cc}}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & \quad + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 3 * k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 + \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & \quad + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{upper_{cc}}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1 - s) - 3 * k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 + \beta_{upper} - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{3.104}$$

$$\begin{aligned}
 sum6(t) = & \left(\frac{1}{9} * I_{máx_{uppercc}}^2 - \frac{2}{9} * I_{máx_{upper}}^2 + \frac{1}{9} * I_{máx_{upper}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & * \left[\begin{aligned}
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) + k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lowercc}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 3 * k - 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - \beta_{lower} + 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lowercc}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{n}{p} * (1-s) - 3 * k + 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} + 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lowercc}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1-s) + k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{lower}} + I_{máx} * I_{máx_{lowercc}} + I_{máx_{lower}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{lowercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1-s) + k + 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - \beta_{lower} - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1-s) + 3 * k - 1 \right) (\omega_1 * t) + \alpha_0 - 3 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(-4 * I_{máx} * I_{máx_{upper}} + I_{máx} * I_{máx_{uppercc}} + I_{máx_{upper}} * I_{máx_{cc}} + 2 * I_{máx_{cc}} * I_{máx_{uppercc}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{3 * n}{p} * (1-s) + 3 * k + 1 \right) (\omega_1 * t) - \alpha_0 - 3 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right]
 \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \tag{3.105}$$

De uma forma análoga às parcelas anteriores, o objetivo será dar a conhecer e analisar as componentes de frequências, inseridas em 'sum6', que se apresentam como novidades, sendo estas:

- As componentes resultantes da nona e décima parcela, que se encontram inseridas em $f_1 * \left(\frac{3*n}{p} * (1 - s) + 3 * k - 1\right)$ e $f_1 * \left(\frac{3*n}{p} * (1 - s) + 3 * k + 1\right)$. Em relação à primeira componente citada, esta estará inserida entre 171,25 e 175 Hz, exclusive, e a segunda componente estará inserida entre 271,25 e 275 Hz, exclusive.

Na continuação do estudo das parcelas do sinal $i_{SDPTC_{Interturns}}$, nesta fase poderá ser visualizado na expressão (3.106), o sinal correspondente ao oitavo parentesis inserido na expressão (3.97), nomeadamente, a parcela $'sum7'$.

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

$$\begin{aligned}
 sum7(t) = & \left(-\frac{4}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \\
 & * \left[\left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \right. \\
 & \quad * \sin \left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(-4 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[(2 * k - 2)(\omega_1 * t) + 2 * \alpha_0 + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{upper_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lower_{cc}}} \right) \\
 & \quad * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \quad \left. \right]
 \end{aligned} \tag{3.106}$$

Como poderá ser constatado na expressão (3.106), as componentes adicionais de frequências que constituem o sinal da parcela 'sum7' já foram apresentados anteriormente no estudo de pelo menos uma técnica de diagnóstico de avaria, no caso da avaria referente ao curto circuito entre espiras. Este facto irá ocorrer também no conteúdo das parcelas 'sum8' e 'sum9', pelo que nesta fase não existe nenhuma parcela adicional de frequência que se apresente como novidade e por isso resta apresentar o gráfico referente ao espectro de frequências, que irá ajudar na análise da localização das bandas laterais que constituem o sinal resultante ' $i_{SDPTCAInterturns}$ '.

$$\begin{aligned}
 sum8 = & \left(-\frac{4}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}} \right. \\
 & \left. * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 * [& \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & * \sin \left(2 * \omega_1 * t - 2 * \alpha_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & * \sin \left[(2 * k + 2)(\omega_1 * t) - 2 * \alpha_0 + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right) (\omega_1 * t) - \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) + 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & \left. \right] \tag{3.107}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 sum9 = & \left(\frac{5}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{upper}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} + \frac{1}{9} * I_{m\acute{a}x_{upper}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + \frac{2}{9} * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{uppercc}} \right) \\
 * [& \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & * \sin \left(2 * k * \omega_1 * t + \beta_{lower} - \beta_{upper} + \frac{\pi}{2} \right) \\
 & + \left(5 * I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lower}} + I_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} + I_{m\acute{a}x_{lower}} * I_{m\acute{a}x_{cc}} + 2 * I_{m\acute{a}x_{cc}} * I_{m\acute{a}x_{lowercc}} \right) \\
 & * \sin \left[\left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) - 2 * k \right) (\omega_1 * t) - 2 * \beta_{lower} + \frac{\pi}{2} \right] \\
 & \left. \right] \tag{3.108}
 \end{aligned}$$

Após toda a análise efetuada nas componentes adicionais de frequências inseridas nas diversas expressões que constituem o sinal em estudo, ' $i_{SDPTCAInterturns}$ ', pode-se constatar que comparativamente com outras técnicas estudadas anteriormente, nesta abordagem

obtem-se um sinal com muita informação no que nota à presença de bandas laterais específicas para o tipo de avaria em questão, que é o curto-circuito entre espiras. Para melhor visualização daquilo que já foi fundamentado, na Figura (3.35), apresenta-se o espectro de frequências do sinal em estudo para a situação de curto-circuito entre espiras. Na figura 3.36 apresenta-se um pormenor da figura 3.35, de modo a dar ênfase às componentes adicionais de frequência que apresentam menores amplitudes.

Poderá se constatar que apesar do sinal apresentar diversas componentes adicionais de frequência e este ser rico no que diz respeito ao seu espectro de frequências, nem todas as componentes poderão contribuir para um diagnóstico fiável e objetivo pois algumas delas apresentam amplitudes relativamente pequenas.

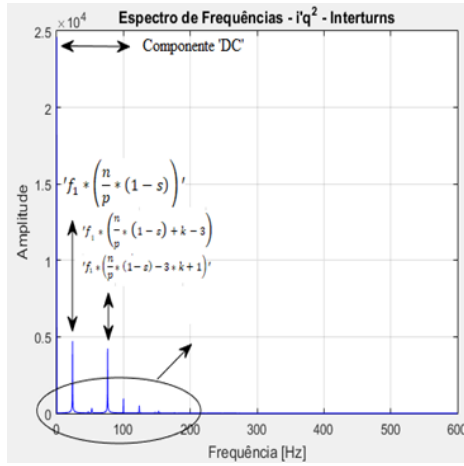


Figura 3.36 - Espectro de frequências do sinal resultante do quadrado da corrente i_q na presença de curto circuito entre espiras – Técnica 'SDPTCA'

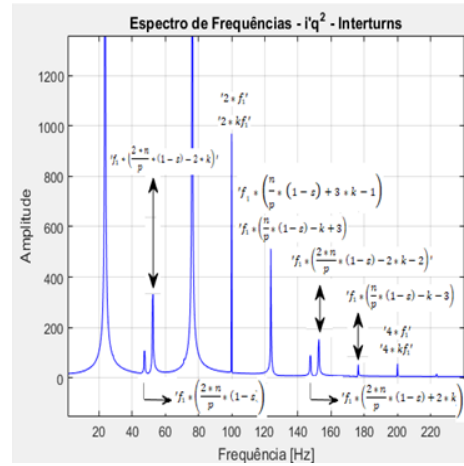


Figura 3.37 - Espectro de frequências do sinal resultante do quadrado da corrente i_q na presença de curto circuito entre espiras – Técnica 'SDPTCA'

Por fim, no caso da avaria referente ao curto circuito entre espiras, resta realizar o cálculo do índice de severidade, tendo em conta a relação associada à frequência $f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s)\right)'$ e a componente contínua, sendo esta estabelecida em (3.109).

$$SF_{SDPTCAInterturns} = \frac{\left| i_{SDPTCAInterturns} \left\{ f \left(f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \right) \right) \right\} \right|}{\left| i_{SDPTCAInterturns} \{ f(DC Component) \} \right|} \quad (3.109)$$

3.7 – Resumo das Técnicas Apresentadas

Ao longo de todo o capítulo 3 foram apresentadas diversas técnicas de diagnóstico de avarias nos 'MI', sendo que estas se encontram inseridas no âmbito da análise espectral do quadrado da corrente elétrica estatórica. O estudo que foi desenvolvido baseou-se em três sistemas de coordenadas, nomeadamente '*abc*', ' *$\alpha\beta 0$* ' e *dq0*.

O grande objetivo das análises realizadas foi obter, para as técnicas apresentadas, as respetivas componentes adicionais de frequência que surgem na presença das três avarias em estudo, assim como, definir um índice de severidade de modo a permitir que estas técnicas sejam inseridas num programa de manutenção preventiva. Através do índice de severidade também será possível efectuar uma comparação entre métodos quando à sua sensibilidade e imunidade à variação da carga.

Sendo assim, para concluir este capítulo resta apresentar em forma de tabela um resumo acerca das componentes adicionais de frequência, para as técnicas de diagnóstico apresentadas no decorrer do capítulo, tendo em conta os três tipos de avarias em questão. Na Tabela 3.1 é apresentado este resumo, onde se discrimina a componente fundamental das outras componentes que irão estar associadas à avaria. Através desta tabela é possível verificar que as técnicas associadas ao quadrado dos sinais das correntes estatóricas apresentam sempre um maior conteúdo informativo, ou seja, um maior número de frequências adicionais associadas à avaria em questão.

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatística

Tabela 3. 1 - Resumo das componentes adicionais de frequências, tendo em conta as diversas técnicas apresentadas, para os três tipos de avarias estudados

Técnica	Componente Fundamental	Barras Fraturadas	Excentricidade	Curto-Circuito entre espiras
'MCSA'	$'f_1'$	$'f_1 * (1 \pm s)'$	$'f_1 * \left(1 \pm n * \frac{f_r}{f_1}\right)'$	$'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k\right)'$
'MSCSA'	$'2 * f_1'$	$'2 * s * f_1'$ $'4 * s * f_1'$ $'f_1 * (2 \pm 2 * s)'$ $'f_1 * (2 \pm 4 * s)'$	$'n * f_r'$ $'2 * n * f_r'$ $'f_1 * \left(2 \pm n * \frac{f_r}{f_1}\right)'$ $'f_1 * \left(2 \pm 2 * n * \frac{f_r}{f_1}\right)'$	$'2 * k * f_1'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s)\right)'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k\right)'$ $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1\right)'$
'MSSCSA'	$'0 * f_1 / DC'$	$'2 * s * f_1'$ $'4 * s * f_1'$	$'n * f_r'$ $'2 * n * f_r'$	$'2 * k * f_1'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s)\right)'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k\right)'$ $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1\right)'$
'PVPA'	$'2 * f_1'$	$'f_1 * (2 \pm 2 * s)'$ $'f_1 * (2 \pm 4 * s)'$	$'f_1 * \left(2 \pm n * \frac{f_r}{f_1}\right)'$ $'f_1 * \left(2 \pm 2 * n * \frac{f_r}{f_1}\right)'$	$'2 * k * f_1'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s)\right)'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k\right)'$ $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1\right)'$

Capítulo 3 – Análise Espectral Baseada no Quadrado da Corrente Elétrica Estatórica

'SEPVA'	$'0 * f_1 / DC'$	$'2 * s * f_1'$ $'4 * s * f_1'$	$'n * f_r'$ $'2 * n * f_r'$	$'2 * k * f_1'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right)'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k \right)'$ $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1 \right)'$
'SPTCA'	$'0 * f_1 / DC'$	$'2 * s * f_1'$	$'n * f_r'$	$'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1 \right)'$
'SSPTCA'	$'0 * f_1 / DC'$	$'2 * s * f_1'$ $'4 * s * f_1'$	$'n * f_r'$ $'2 * n * f_r'$	$'2 * k * f_1'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right)'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k \right)'$ $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1 \right)'$
'DPTCA'	$'0 * f_1 / DC'$	$'2 * s * f_1'$ $'4 * s * f_1'$	$'n * f_r'$ $'2 * n * f_r'$	$'2 * k * f_1'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \right)'$ $'f_1 * \left(\frac{2 * n}{p} * (1 - s) \pm 2 * k \right)'$ $'f_1 * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \pm 1 \right)'$

<p>'SDPTCA'</p>	<p>'0 * f₁ / DC'</p>	<p>'2 * s * f₁' '4 * s * f₁' '6 * s * f₁' '8 * s * f₁'</p>	<p>'n * f_r' '2 * n * f_r' '3 * n * f_r' '4 * n * f_r'</p>	<p>'2 * k * f₁' '4 * k * f₁' 'f₁ * (± k ± 2)' 'f₁ * ($\frac{2 * n}{p} * (1 - s)$)' 'f₁ * ($\frac{4 * n}{p} * (1 - s)$)' 'f₁ * ($\frac{2 * n}{p} * (1 - s) ± 2$)' 'f₁ * ($\frac{2 * n}{p} * (1 - s) ± 2 * k$)' 'f₁ * ($\frac{2 * n}{p} * (1 - s) ± 4 * k$)' 'f₁ * ($\frac{4 * n}{p} * (1 - s) ± 2 * k$)' 'f₁ * ($\frac{4 * n}{p} * (1 - s) ± 4 * k$)' 'f₁ * ($\frac{n}{p} * (1 - s) ± k ± 1$)' 'f₁ * ($\frac{n}{p} * (1 - s) ± 3 * k ± 1$)' 'f₁ * ($\frac{n}{p} * (1 - s) ± k ± 3$)' 'f₁ * ($\frac{2 * n}{p} * (1 - s) ± 2 * k ± 2$)' 'f₁ * ($\frac{3 * n}{p} * (1 - s) ± k ± 1$)' 'f₁ * ($\frac{3 * n}{p} * (1 - s) ± 3 * k ± 1$)'</p>

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Com o objetivo de validar os métodos propostos e desenvolvidos teoricamente, neste capítulo serão apresentados resultados experimentais dos vários métodos apresentados no capítulo anterior. Para a obtenção destes resultados, utilizaram-se dois motores idênticos, mas que foram alterados de modo a permitir testar os motores nos vários modos de avaria. Estas alterações serão também descritas no presente capítulo. Para além disso, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados. Através da apresentação dos diversos resultados experimentais será possível verificar a sua conformidade com os resultados teóricos.

4.2 – Protótipo Desenvolvido

O desenvolvimento da parte experimental iniciou-se pela escolha da máquina de indução a ser utilizada nos diversos ensaios como motor. Devido a limitações a nível das fontes de alimentação, a escolha recaiu na utilização de um motor de indução trifásico cujas características elétricas poderão ser visualizadas na figura 4.1.



Figura 4. 1 - Chapa de Características do motor de indução trifásico utilizado nos ensaios experimentais

No que diz respeito à ligação dos enrolamentos estáticos, optou-se por conectar os mesmos em estrela, de modo a que a fonte de alimentação tivesse capacidade para alimentar o motor em regime nominal.

Deste modo foram efetuados ensaios experimentais em quatro regimes de funcionamento, sendo estes:

- Vazio
- 65% da Carga (Corrente de linha cerca de 5,0 Amperes por cada enrolamento);
- 75% da Carga (Corrente de linha cerca de 6,0 Amperes por cada enrolamento);
- Regime nominal (Corrente de linha até ao máximo de 8,1 Amperes);

Para efetuar os ensaios em carga foi necessário acoplar ao motor em uso, um gerador de corrente contínua de excitação independente, com uma resistência de carga à saída do mesmo, ou seja, com essa carga ligada em paralelo com a armadura. No que diz respeito às características elétricas do gerador, estas poderão ser visualizadas na figura 4.2.

Likströmgenerator	2,2	kW	1500	r/min
Likströmsmotor	2	kW	1400	r/min
Seriemotor		kW		r/min
	220	V	12	A
Magn.	220	V	0,8	A
30 Min Kont.				
IEC 34-1		IP23		No 5585
TERCO		SWEDEN		

Figura 4.2 - Chapa de Caraterísticas do Gerador de corrente contínua utilizado nos ensaios experimentais

Em suma, foram utilizados dois motores trifásicos de indução, com as caraterísticas descritas na figura 4.1, sendo que, como será fundamentado no decorrer do subcapítulo 4.2, um deles foi adaptado para simular barras fraturadas e o outro para simular curto circuitos entre espiras. No que toca à excentricidade, foi elaborado um dispositivo auxiliar que irá possibilitar deslocar o centro de massa do conjunto rotor + acoplamento.

4.2.1 – Simulações de Avarias na prática

Para se efetuar os ensaios necessários/pretidos para os diversos tipos de avarias em estudo, foi necessário efetuar, a nível dos motores de indução trifásicos, modificações físicas para permitir obter correntes elétricas estatóricas em situação o mais próxima possível do tipo de avaria em causa, e assim apresentar um estudo que pudesse aproximar-se o mais possível do real.

No que diz respeito à avaria designada por barras fraturadas, como já foi referido anteriormente, para se simular este tipo de avaria foi necessário perfurar algumas barras de alumínio da gaiola rotórica. Mais especificamente, foram efetuados furos em duas barras rotóricas, conforme se pode verificar pela figura 4.3.



Figura 4. 3 - Modificação física efetuado nas barras rotóricas de modo a simular a avaria designada por barras fraturadas

Relativamente à avaria designada por curto-circuito entre espiras, a modificação física que foi realizada apresentou uma maior complexidade. Para esta alteração foi necessário fazer uma rebobinagem do estator do motor de indução em uso, de modo a que houvesse a possibilidade de se fazer um *shunt*, ou curto-circuito, de diferentes quantidades de espiras de uma mesma bobine. Através da tabela (4.1) poderá ser visualizado os elementos de bobinagem do motor elétrico em uso.

Tabela 4. 1 - Elementos de Bobinagem do Motor em uso

Nº de Cavas	36
Nº de Grupos por Fase	2
Bobines por Grupo	3
Espiras por Bobines	58
Nº de Fios por Bobines	2 – (0,71 + 0,75)
Passo Polar	1x (8-10-12)
Tipo de Bobines	Concêntricas
Tipo de ligação	Paralelo

Para melhor visualização, apresenta-se na figura 4.4 o esquema de bobinagem em círculo, do motor de indução em uso. Nesta figura poderá ser visualizado o esquema de bobinagem das três fases do motor.

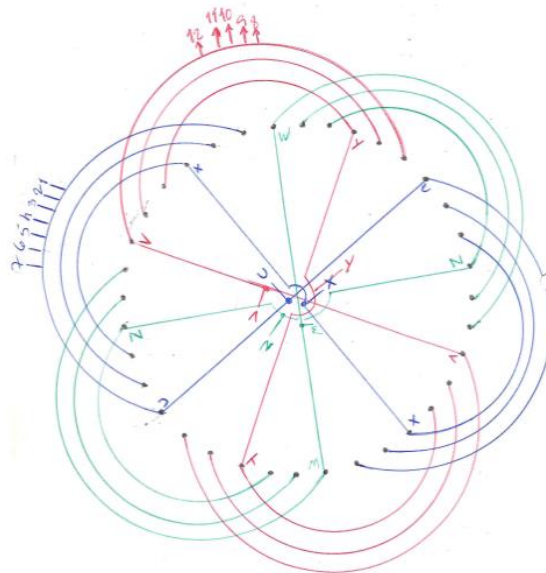


Figura 4. 4 - Esquema de Bobinagem do Motor de Indução Trifásico em uso

Para simular curto-circuitos entre espiras, a escolha recaiu sobre estabelecer modificações nas bobines que contêm o maior passo polar, ou seja, passo polar 1 a 12, sendo estas realizadas num dos grupos de bobines respeitantes às fases U e V. Para melhor visualização da forma como foram efetuadas as modificações citadas, nas figuras 4.5 e 4.6 pode-se verificar o esquema representativo da bobine a ser modificada e inserida na fase U e V, respetivamente.

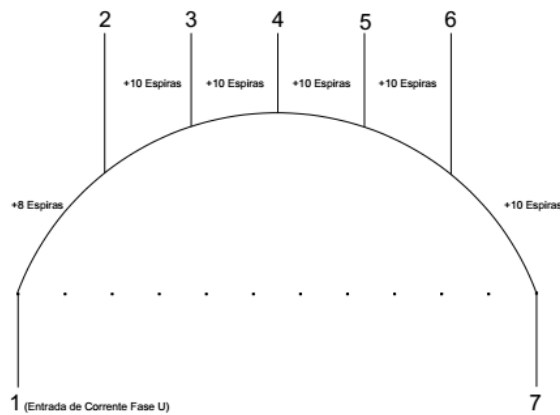


Figura 4. 5 - Esquema representativo da bobine modificada do passo polar 1 a 12, inserida na Fase U

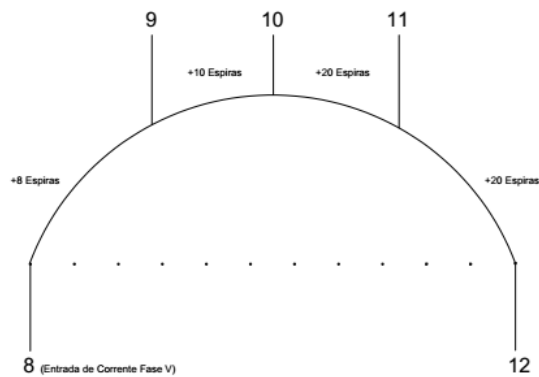


Figura 4. 6 - Esquema representativo da bobine modificada do passo polar 1 a 12, inserida na Fase V

Nas figuras 4.5 e 4.6 podem ser visualizadas as numerações adotadas para os terminais que permitem efetuar o curto-circuito. Estas representam pontos de acesso a um certo número de espiras, permitindo, quando estas são curto-circuitadas, estabelecer ou simular curto-circuitos entre espiras. De modo a limitar a corrente que percorre o curto circuito, foram

utilizadas resistências entre os terminais, No motor que foi rebobinado para o efeito, foi criada uma placa de ligações interativa que permite ao utilizador realizar curto circuitos entre espiras de forma rápida e fácil (figura 4.7).

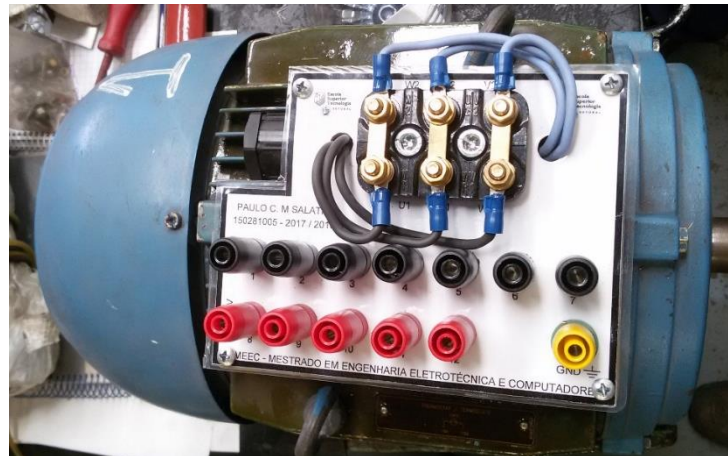


Figura 4. 7 - Placa de Ligações interativa do Motor de Indução modificado para simular curto circuito entre espiras

Finalmente, para a avaria de excentricidade, não foram efetuadas modificações a nível do motor de indução. No entanto, foi necessário criar uma roda metálica com vários furos disponíveis para se colocar ou tirar pesos. Previamente foi necessário estabelecer a equilibragem dinâmica do conjunto veio e roda metálica, de modo a garantir que dinamicamente o mesmo se encontrava equilibrado. Para simular a avaria referente à excentricidade, foram colocados pesos na periferia da roda metálica, de modo a deslocar o centro de massa da roda, sendo esta excentricidade designada por excentricidade estática, na medida que existe deslocação do centro de rotação do rotor. Através das figuras 4.8 e 4.9 pode ser visualizada a roda metálica utilizada para simular a avaria referente a excentricidade.



Figura 4. 8 - Roda Metálica utilizada na simulação da avaria de excentricidade na prática – Roda equilibrada com parafusos e porcas M10 distribuído igualmente na sua periferia

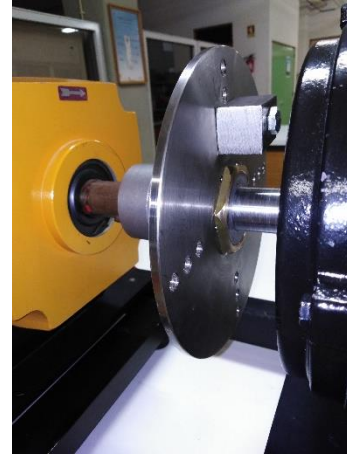


Figura 4. 9 - Roda Metálica utilizada na simulação da avaria de excentricidade na prática – Roda desequilibrada com um peso significativo inserido em um dos lados

Os ensaios experimentais efetuados tiveram por base a Roda metálica desequilibrada inserida na imagem 4.9.

4.2.2 – Sistema de Aquisições

O Sistema de aquisição a ser utilizado deverá apresentar condições para se efetuar a aquisição do sinal da corrente elétrica estatórica das três fases e por isso a escolha recaiu na utilização de um programa que foi desenvolvido em labview, em conjunto com a placa de aquisição da National Instruments NI6009. Através da placa NI6009 é possível recolher amostras de sinais analógicos e posteriormente gravar os dados adquiridos num formato à escolha do utilizador, excel ou bloco de notas, de modo a que os mesmos possam ser tratados por outro software. Neste trabalho foi utilizado o programa matlab, como software de tratamento de dados.

O sistema de aquisição criado apresenta diversos componentes na estrutura, nomeadamente:

- Placa Interface (figura 4.10), formado por sensores de corrente por efeito de Hall LEM LTA 100P/SP1;
- Placa de Proteção, formado por circuitos inversores de tensão em conjunto com díodos de zener para limitar a tensão a saída (Figura 4.11);
- Placa de aquisição NI 6009;
- Computador Portátil (Software em Labview).



Figura 4. 10 - Placa Interface e respetiva legenda (Vista Frontal)

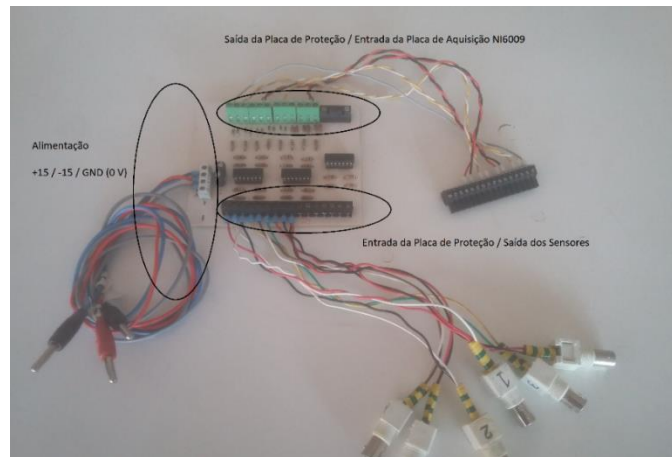


Figura 4. 11 - Placa de proteção utilizada e respetiva legenda (Vista Frontal)

4.3 – Resultados Experimentais

No decorrer deste subcapítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos através dos diversos ensaios realizados. O objetivo principal será, por um lado, apresentar os espectros de frequências associados às diversas técnicas apresentadas no capítulo anterior (para os três tipos de avaria) e, por outro lado, apresentar graficamente o comportamento do índice de severidade com a variação da corrente elétrica do estator, ou seja, com a variação da carga mecânica solicitada ao motor. O gráfico respeitante ao índice de severidade será apresentado para cada tipo de avaria.

4.3.1 – Barras Fraturadas

Como foi referido anteriormente, para a simulação do funcionamento de um ‘MI’ sob a presença de barras fraturadas foram efetuados furos na gaiola rotórica. Sendo assim, serão apresentados os resultados dos espectros de frequências, referentes às diversas técnicas de diagnóstico apresentadas no capítulo 3, quando o ‘MI’ se encontra a operar a 75% da carga, ou seja, quando o equipamento se encontra a consumir uma corrente de linha de cerca de 6 A eficazes. Em relação às barras fraturadas, a interrupção de apenas duas barras rotóricas teve como objetivo demonstrar a capacidade de deteção das diversas técnicas quando o equipamento se encontra numa situação de avaria. Com isso, numa primeira fase, é importante dar a conhecer as formas de onda das correntes elétricas do estator no sistema de coordenadas ‘abc’, quando o motor opera numa situação de barras fraturadas, figura 4.12. Na figura 4.13, pode-se observar um Zoom da última imagem referida.

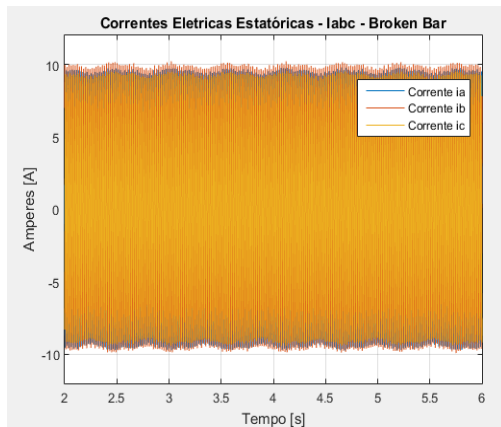


Figura 4. 12 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas na situação de barras fraturadas - Experimental

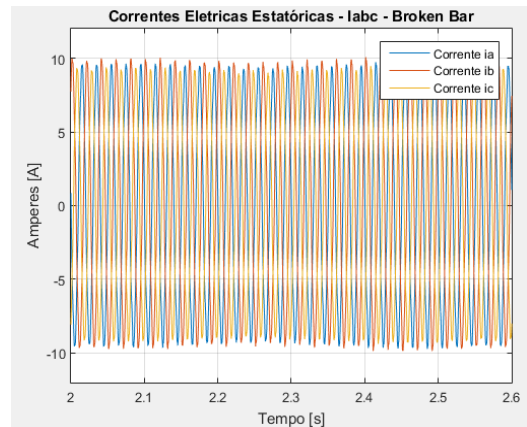


Figura 4. 13 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas na situação de barras fraturadas – Zoom a imagem anterior

Como se pode observar nas imagens acima, na presença de barras fraturadas as correntes elétricas do estator sofrem oscilações devido à presença das bandas laterais específicas que estão próximas da componente fundamental do sinal, ou seja, a componente de 50 Hz. As diferenças de amplitudes das correntes deve-se a desequilíbrios de amplitudes da tensão de alimentação e assimetrias do motor. Sendo assim, nas Figuras 4.14 a 4.22 poderá ser observado o espectro de frequências, na presença de barras fraturadas, dos sinais resultantes das técnicas estudadas no capítulo anterior, sendo que as duas primeiras a serem observadas, figuras 4.14 e 4.15, mostram o espectro de frequências resultante da aplicação da técnica ‘MCSA’ e técnica ‘MSCSA’, sendo que ambas as técnicas serviram, praticamente na sua totalidade, de base para toda a fundamentação teórica do capítulo ‘3’.

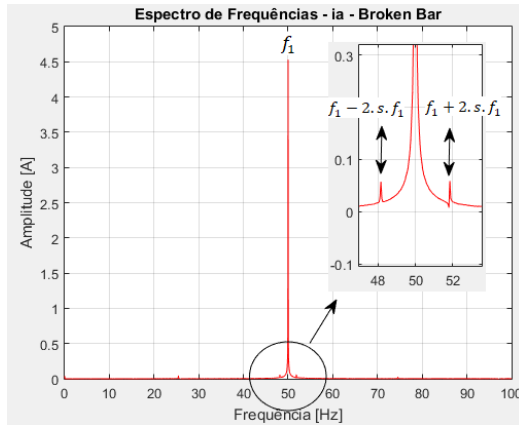


Figura 4. 14 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estática – Barras Fraturadas – Técnica MCSA

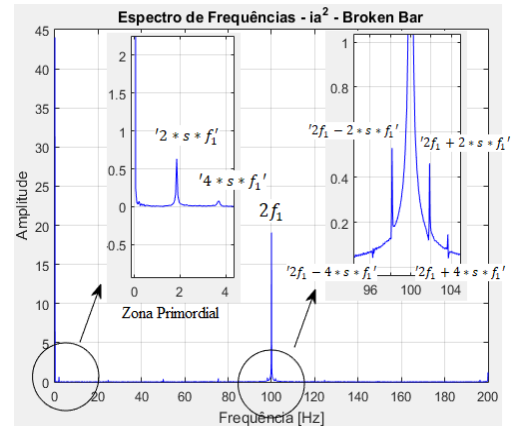


Figura 4. 15 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estática – Barras Fraturadas – Técnica MSCSA

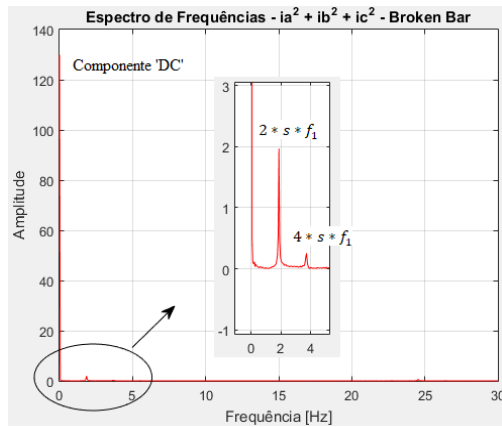


Figura 4. 16 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estática – Barras Fraturadas – Técnica MSSCSA

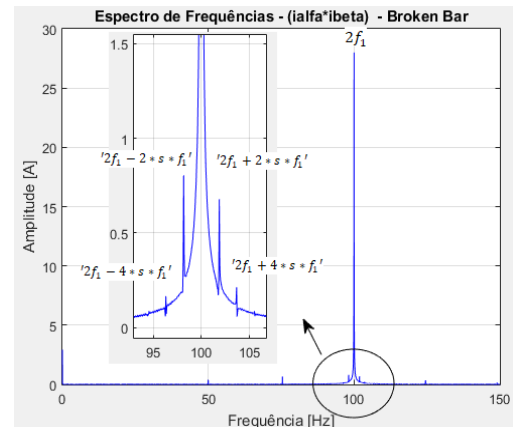


Figura 4. 17 - Espectro de Frequências do produto entre as corrente elétricas estáticas – Sistema de coordenadas oβ – Barras Fraturadas – Técnica PVPA

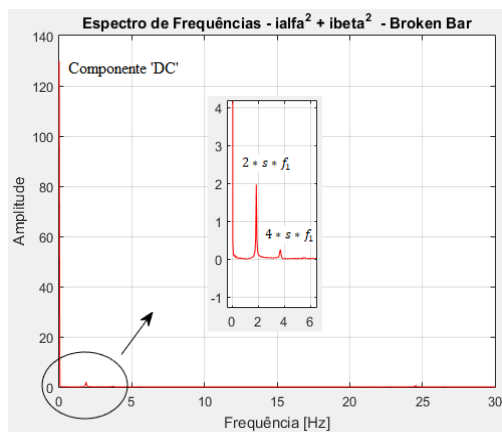


Figura 4. 18 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estáticas – Sistema de coordenadas - αβ Barras Fraturadas – Técnica SEPVA

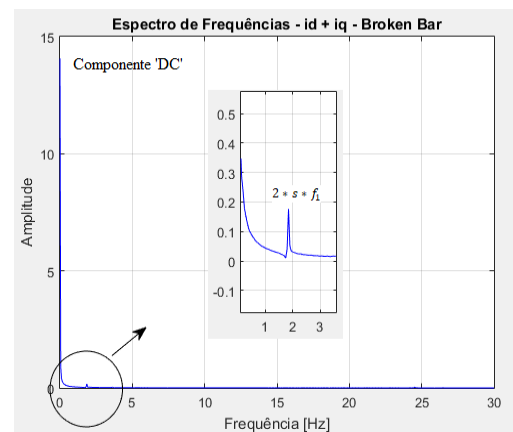


Figura 4. 19 - Espectro de Frequências do sinal da soma das correntes elétricas estáticas – Sistema de coordenadas dq - Barras Fraturadas – Técnica SPTCA

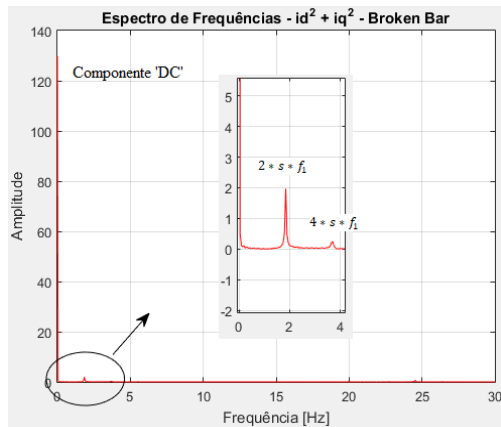


Figura 4. 20 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas – Sistema de coordenadas dq - Barras Fraturadas – Técnica SSPTCA

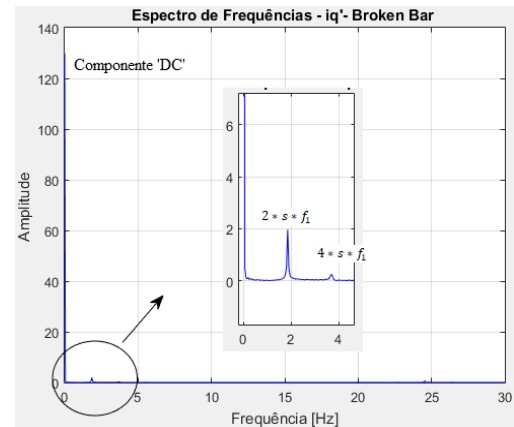


Figura 4. 21 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternative - Barras Fraturadas – Técnica DPTCA

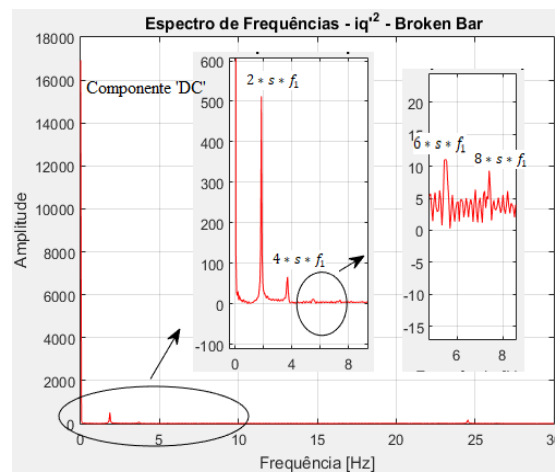


Figura 4. 22 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternative - Barras Fraturadas – Técnica SDPTCA

Através da análise dos espectros de frequências resultantes inseridos nas imagens acima, é possível verificar, por um lado, qual a técnica de diagnóstico que apresenta mais informações a nível espectral, ou seja, qual técnica que apresenta mais componentes adicionais de frequências específicas da avaria referente a barras fraturadas e, por outro lado, verificar a relação existente entre a amplitude da banda lateral com mais influência e a respetiva componente fundamental do sinal respetivo, ou seja, estabelecer o índice de severidade.

A nível quantitativo, pode-se concluir que o espectro de frequências inserido na Figura 4.15, que correspondente ao espectro resultante da técnica ‘MSCSA’, apresenta o maior número de bandas laterais, o que mostra que esta técnica é efetivamente rica a nível de

informação espectral. Para se efetuar o estudo qualitativo, é apresentado na figura 4.23 o gráfico correspondente à variação do índice de severidade em função da carga. Esta figura apresenta este índice para todas as técnicas estudadas.

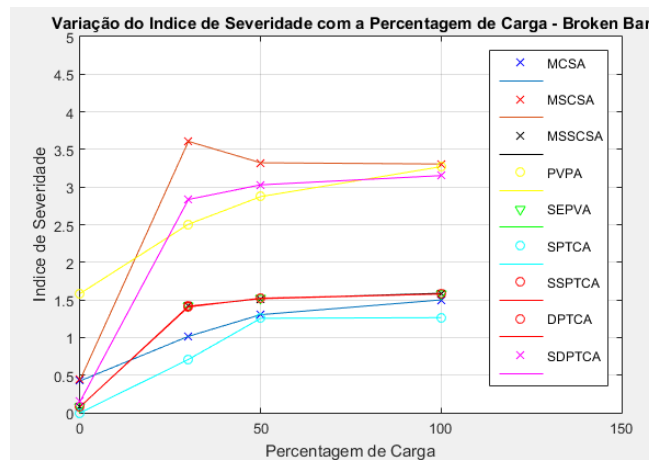


Figura 4. 23 - Variação do Índice de Severidade com a Percentagem de Carga – Barras Fraturadas

A partir da imagem da figura 4.23 pode-se constatar algumas afirmações que já foram referidas anteriormente, nomeadamente, que efetivamente o índice de severidade, em todas as técnicas apresentadas, tem tendência a aumentar com o aumento da corrente consumida pelo 'MI'. Pode-se constatar também que, como já era de esperar, o índice de severidade relativamente às técnicas 'MSSCA', 'SEPVA', 'SSPTCA' e 'DPTCA', apresenta o mesmo comportamento em relação à variação de carga, na medida em que a expressão resultante da aplicação destas técnicas apresenta uma igualdade. Sendo assim, pode-se concluir que a técnica 'MSCSA' apresenta uma maior relação entre a amplitude da componente de maior influência e a respetiva amplitude da componente fundamental do sinal em questão. Não muito distante, pode-se também destacar as técnicas 'PVPA' e 'SDPTCA' que também apresentam altos índices de severidade em relação às restantes técnicas, para as mesmas condições de corrente consumida pelo 'MI'.

4.3.2 – Excentricidade

No caso da avaria referente à excentricidade, a análise aos resultados experimentais vai ser realizada de uma forma análoga ao do subcapítulo anterior. Como já foi referido, para se simular a avaria referente à excentricidade, foi utilizado uma roda metálica acoplada ao veio do motor com alguns furos equidistantes de modo a que fosse possível inserir massas metálicas para que houvesse a possibilidade de deslocar o centro de massa das partes girantes, ou, por outras palavras, deslocar o centro de rotação do rotor. Para o caso da excentricidade, será considerado que o ‘MI’ opera na presença da excentricidade estática e dinâmica em simultâneo, na medida em que se deverá ter em conta as próprias imperfeições e assimetrias da máquina em uso.

Numa primeira análise, é importante dar a conhecer a forma de onda das correntes elétricas do estator (Figura 4.24), quando o ‘MI’ opera na presença de excentricidade, pois tal como o caso anterior, esta apresentará ondulações nas respetivas amplitudes máximas. Na figura (4.25), pode-se observar um Zoom da última imagem referida.

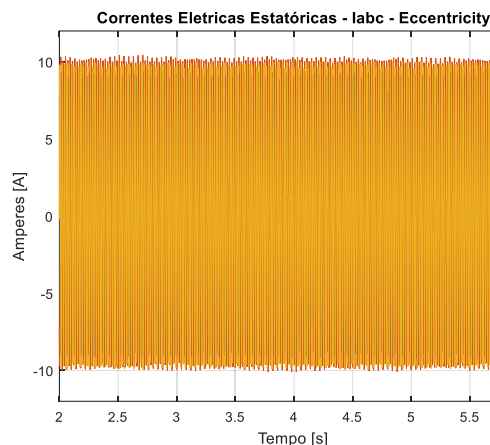


Figura 4. 24 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas na situação de Excentricidade- Experimental

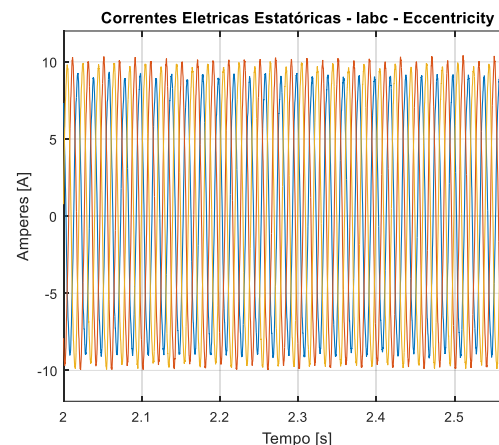


Figura 4. 25 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas na situação de Excentricidade – Zoom da imagem anterior

Apesar de ser mais difícil a perceção, tal como pode ser observado na figura 4.25, a ondulação da amplitude também acontece no caso da excentricidade, porém numa primeira análise é difícil de concluir, através da análise da forma de onda das correntes do estator, que efetivamente se trata de uma avaria referente a excentricidade, pois pode-se facilmente confundir com a avaria de barras fraturadas. Em algumas situações existe a influência do accionamento, ou seja, da carga na análise e deteção de avarias, pois em alguns casos a

própria carga pode desequilibrar dinamicamente o rotor e pode facilmente se confundir com uma avaria referente a excentricidade. Estes casos poderão ser encontrados nos motovibradores e nas fábricas de cimento, nomeadamente, nos tambores de mistura. Outro detalhe a ser mencionado é que no caso dos motores com dois ou mais pares de pólos facilmente se consegue, através do espectro de frequências do sinal da corrente elétrica estatórica, técnica 'MCSA', distinguir se o 'MI' se encontra a operar na presença de excentricidade ou barras fraturadas. No caso dos motores com um par de pólos torna-se difícil qualificar qual o tipo de avaria em que o 'MI' se encontra a operar, nomeadamente através da aplicação da técnica 'MCSA', daí a importância de se aplicar novos métodos que permitam facilmente obter componentes adicionais de frequências específicas que possibilitem, com alta fiabilidade, reconhecer qual tipo de avaria dos dois tipos de avarias mencionados, em que o equipamento se encontra a operar.

Tendo em consideração o que foi referido, o objetivo principal nesta fase é dar a conhecer o espectro de frequências resultantes da aplicação das diversas técnicas de diagnóstico apresentadas no capítulo '3'. Diferentemente do caso das barras fraturadas, as bandas laterais que surgem no espectro de frequências dos respetivos sinais em estudo estão dependentes de um valor de 'n', ou seja, estão dependentes de uma constante. Para as simulações inseridas no capítulo '3', foi considerado ' $n = 1$ ', por isso deverá existir um maior cuidado na análise das componentes adicionais de frequências que serão apresentadas nos espectros de frequência das figuras 4.26 a 4.34. Tal como no caso das barras fraturadas, os resultados experimentais apresentados, são para o caso do 'MI' a operar a 75% da sua carga nominal.

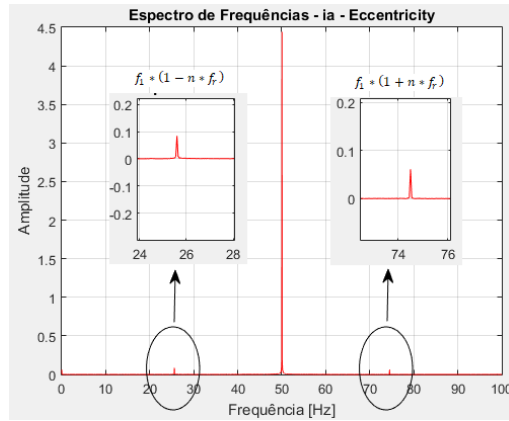


Figura 4. 26 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estática – Excetricidade – Técnica MCSA

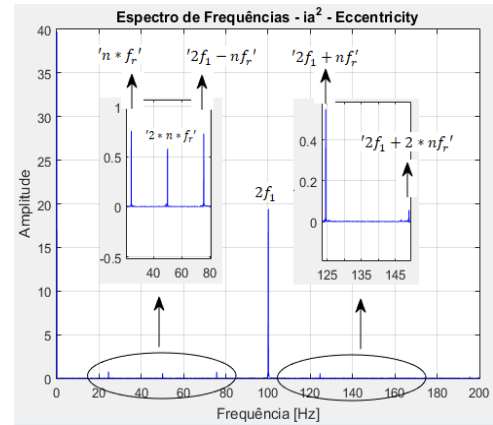


Figura 4. 27 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estática – Excetricidade – Técnica MSCSA

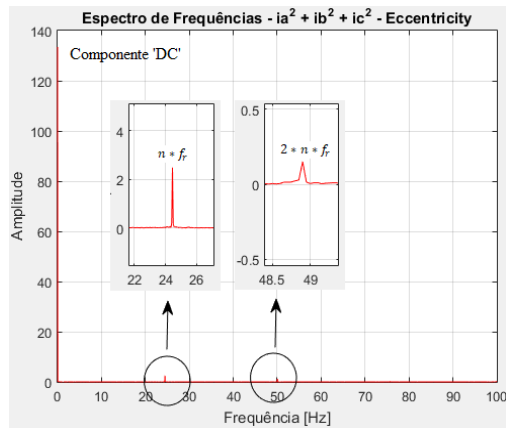


Figura 4. 28 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estáticas – Excetricidade – Técnica MSSCSA

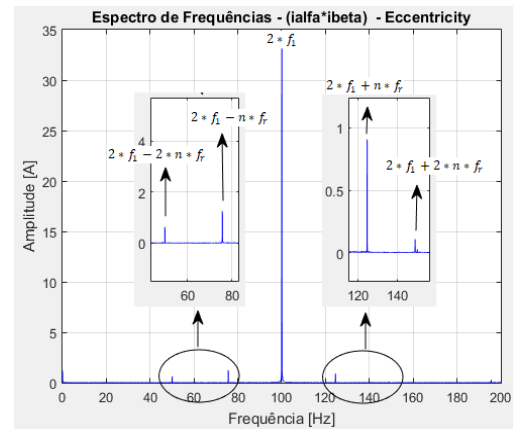


Figura 4. 29 - Espectro de Frequências do produto entre as correntes elétricas estáticas – Sistema de coordenadas aβ – Excetricidade – Técnica PVPA

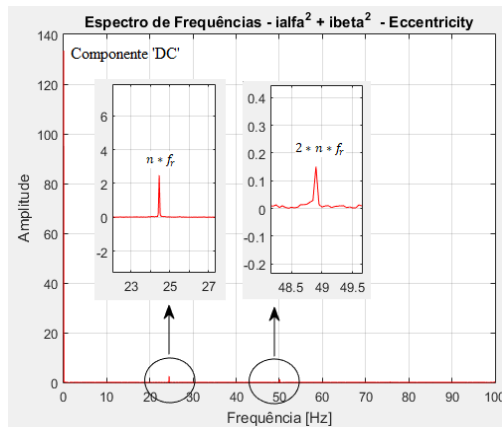


Figura 4. 30 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estáticas – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ - Excetricidade – Técnica SEPVA

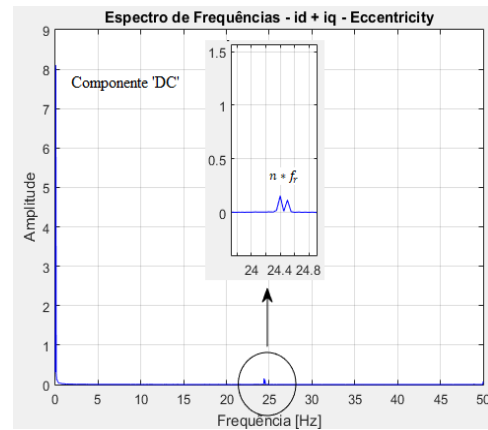


Figura 4. 31 - Espectro de Frequências do sinal da soma das correntes elétricas estáticas – Sistema de coordenadas dq - Excetricidade – Técnica SPTCA

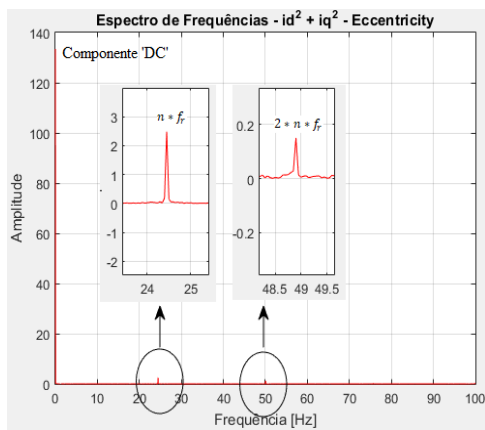


Figura 4. 32 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estáticas – Sistema de coordenadas dq - Excetricidade – Técnica SSPTCA

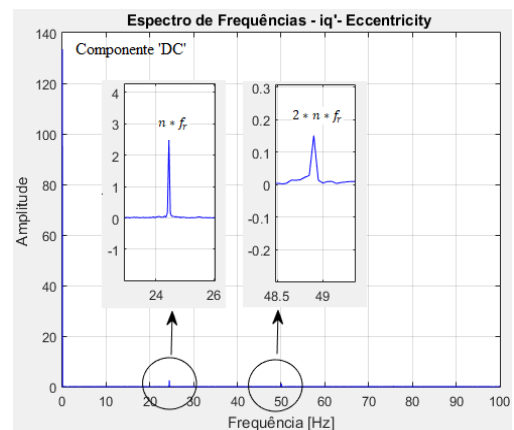


Figura 4. 33 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estática segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Excetricidade – Técnica DPTCA

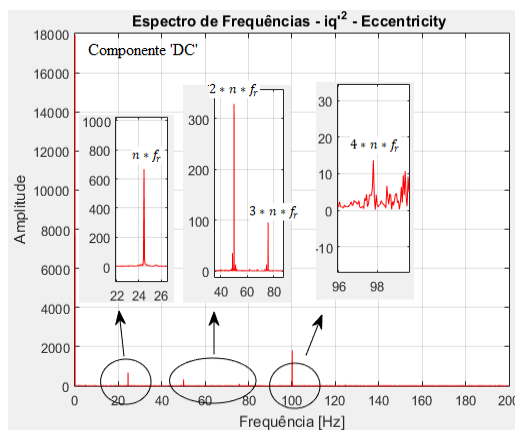


Figura 4. 34 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estática segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Excetricidade – Técnica SDPTCA

Tal como acontece no caso das barras fraturadas, em relação à avaria referente à excentricidade, pode-se concluir que a nível de informação espectral, a técnica ‘MSCSA’ apresenta um maior número de componentes adicionais de frequências específicas, apesar de algumas delas apresentarem uma amplitude com valores relativamente baixos, o que facilmente poderá ser confundido com ruído e/ou assimetrias do motor elétrico. Em termos de impacto visual da relação entre a componente adicional de frequência com maior amplitude e a respetiva componente fundamental do sinal resultante, pode-se destacar as técnicas ‘PVPA’ e ‘SDPTCA’, nas quais facilmente se consegue reconhecer o posicionamento das componentes adicionais de frequência específicas à avaria referente a excentricidade. Com isso, resta estabelecer o gráfico que relaciona a carga do ‘MI’ com o respetivo índice de severidade, figura 4.35. Na figura 4.36 está apresentado um Zoom da imagem anterior. Tal como no caso das barras fraturadas, foram retirados quatro pontos de corrente, sendo que a operação em vazio representa a situação de 0% de carga e a operação com corrente nominal representa a situação de 100% de carga.

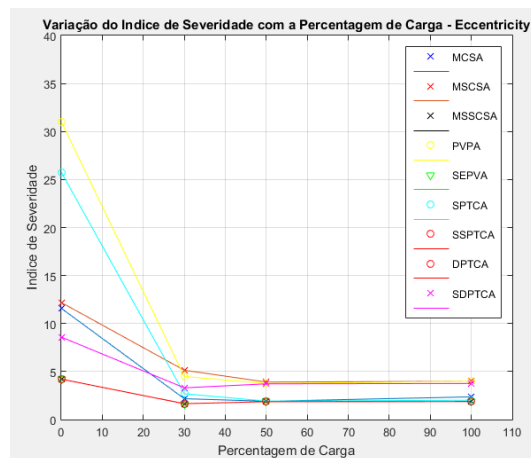


Figura 4. 35 - Variação do Índice de Severidade com a Percentagem de Carga – Excentricidade

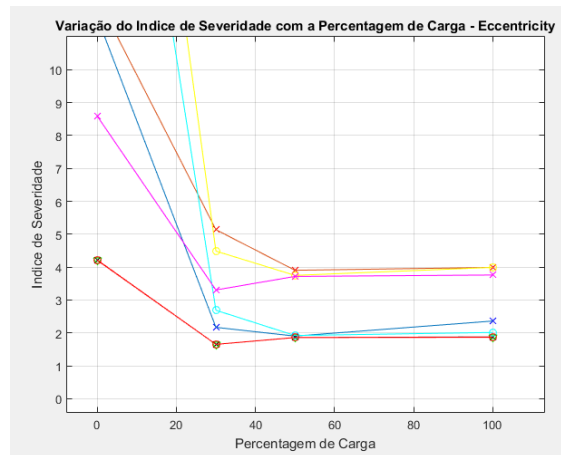


Figura 4. 36 - Variação do Índice de Severidade com a Percentagem de Carga – Excentricidade – Zoom a imagem anterior

Diferentemente do que acontece no caso das barras fraturadas, neste caso, a componente adicional de frequência específica referente a excentricidade, apresenta uma maior ênfase quando o equipamento se encontra a operar em vazio, pois a própria carga mecânica acoplada ao veio do motor possibilita que a vibração mecânica seja atenuada. Por este motivo na maioria das situações apresentadas (figura 4.35) existe um decaimento do valor do índice de severidade com o aumento da carga mecânica. Por outras palavras, a deteção da avaria referente à excentricidade é de mais fácil deteção quando o ‘MI’ se encontra a operar em regimes de baixa carga, pois em regimes de carga próximas ao nominal, o índice de severidade é substancialmente menor. Para uma análise mais cuidada ao conteúdo dos gráficos das figuras 4.35 e 4.36, pode-se repartir esta em duas partes, segundo a primeira análise efetuada quando o ‘MI’ se encontra a operar em vazio e na segunda análise quando o ‘MI’ se encontra a operar nos restantes regimes de funcionamento:

- Na situação de vazio, as técnicas ‘PVPA’ e ‘SPTCA’ apresentam os maiores índices de severidade. Por outras palavras, estas técnicas, neste regime de funcionamento, apresentam-se como melhores soluções no que toca à deteção da avaria referente a excentricidade. Esta afirmação poderá também ser aplicada para regimes de baixa carga. Por outro lado, à medida que a percentagem de carga aumenta, o decaimento do valor do índice de severidade é mais acentuado relativamente às restantes técnicas;
- Nos restantes regimes de funcionamento, a técnica ‘MSCSA’ apresenta os maiores valores para o índice de severidade, porém estes encontram-se muito próximos dos

respetivos índices de severidade resultantes da aplicação das técnicas ‘*PVPA*’ e ‘*SDPTCA*’.

Em suma, após a análise efetuada à avaria referente a excentricidade pode-se apresentar algumas observações:

- A técnica ‘*MSCSA*’ apresenta-se como uma solução plausível para deteção e diagnóstico deste tipo de avaria, na medida em que, por um lado, apresenta um maior número de informação espectral, e, por outro lado, apresenta bons índices de severidade quando o ‘*MI*’ se encontra a operar com alguma carga mecânica. Na situação de vazio, existem outras duas técnicas que permitem obter um maior índice de severidade;
- A técnica ‘*PVPA*’ também se apresenta como uma solução aplicável para este tipo de avaria, pois apresenta um espectro de frequências com quatro bandas laterais em torno da componente fundamental do sinal resultante e apresenta o maior índice de severidade quando o ‘*MI*’ se encontra a operar na situação de vazio. Na situação de carga mecânica solicitada ao equipamento, não apresenta os maiores índice de severidade, porém encontra-se próximo da técnica ‘*MSCSA*’;
- Tal como no caso anterior, a técnica ‘*SDPTCA*’ também apresenta quatro bandas laterais no respetivo espectro de frequências e apresenta o segundo maior índice de severidade quando o ‘*MI*’ se encontra em vazio. Nos restantes regimes de funcionamento o valor dos respetivos índices de severidade são relativamente próximos quando comparados com as outras duas técnicas referidas acima.

4.3.3 – Curto-Circuito entre Espiras – Avaria no Estator

O último tipo de avaria a ser analisado é o curto-circuito entre espiras. O desenvolvimento da análise que irá ser apresentado será análogo ao caso das barras fraturadas e excentricidade.

Diferentemente dos outros dois tipos de avarias já analisados, o curto circuito entre espiras é o mais complexo de ser analisado, na medida em que as componentes adicionais de frequências estão dependentes de duas variáveis, nomeadamente, o valor de ' n ' e o valor de ' k '. Tanto no capítulo 3, quanto no desenvolvimento deste subcapítulo, foi considerado que estas variáveis assumiam o valor unitário. Porém, a análise das respetivas componentes de frequência que surgem na presença de curto circuito entre espiras poderá ser realizada tendo em conta outros valores. Outro detalhe a ser apontado nesta fase é que ao analisar aquisições experimentais, o sistema de tensões apresentará desequilíbrios na amplitude, pelo que facilmente poderá dar a ideia da existência de avaria referente ao curto circuito entre espiras, sem que esta de facto exista. Por isso, para realizar uma análise qualitativa, serão apresentados os resultados experimentais para as seguintes condições:

- ' MI ' com dez espiras em curto circuito;
- ' MI ' com quarenta espiras em curto circuito.

Sendo assim, numa primeira abordagem é importante dar a conhecer a forma de onda das correntes elétricas estatóricas, na situação em que não existe avaria e nas outras duas acima mencionadas, sendo estas apresentadas nas figuras 4.37, 4.38 e 4.39, respetivamente.

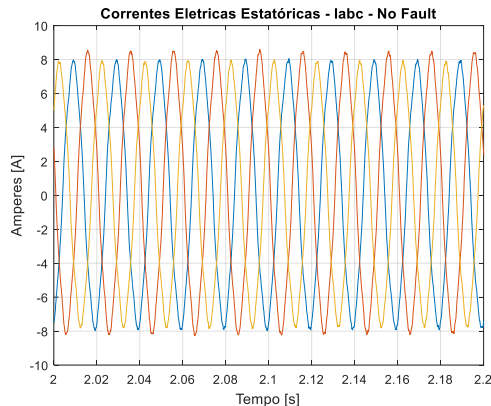


Figura 4. 37 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas sem a presença de avarias - Experimental

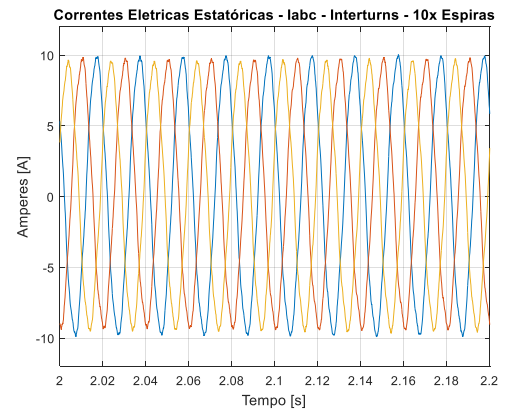


Figura 4. 38 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas na presença de curto circuito entre espiras (10x Espiras) - Experimental

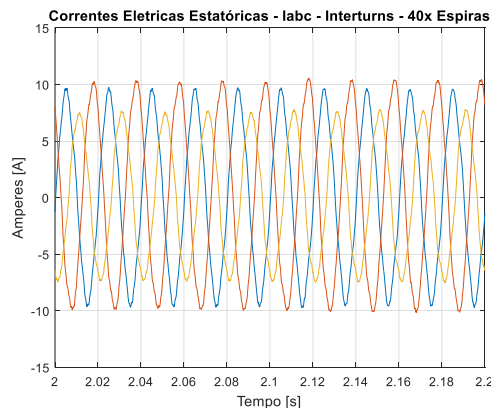


Figura 4. 39 - Sinal das Correntes Elétricas Estatóricas na presença de curto circuito entre espiras (40x Espiras) - Experimental

Relativamente à forma de onda das correntes elétricas estatóricas, nas três situações acima mencionadas, pode-se retirar algumas observações importantes, sendo estas:

- Na situação da figura 4.37 existem diferenças nas amplitudes das correntes devido ao desequilíbrio das tensões de alimentação da rede;
- Na situação da figura 4.38 a avaria referente ao curto circuito entre espiras encontra-se no seu estado inicial, pelo que observa-se algum desequilíbrio na amplitude das correntes porém não justifica ou valida a presença desta avaria;
- Na situação da figura 4.39 a avaria encontra-se em um estado avançado, pelo que facilmente se consegue concluir que o equipamento não se encontra em condições

normais de funcionamento, incitando que este estará com curto circuito entre espiras nos enrolamentos de alguma fase, ou mais do que uma fase.

Para se efetuar uma análise qualitativa relativa à avaria de curto circuito entre espiras, serão apresentados nas figuras 4.40 a 4.75 os respectivos espectros de frequências referente ao sinal resultante da aplicação das diversas técnicas, na situação em que o 'MI' se encontra a operar com dez e quarenta espiras em curto circuito, tendo em conta que o mesmo encontra-se a consumir cerca de 75% da corrente nominal. Deve-se ainda salientar que para se melhor visualizar a localização das componentes adicionais de frequência recorreu-se ao zoom.

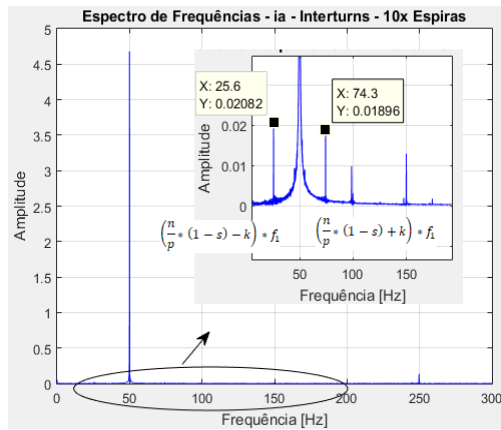


Figura 4. 40 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estática – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica MCSA

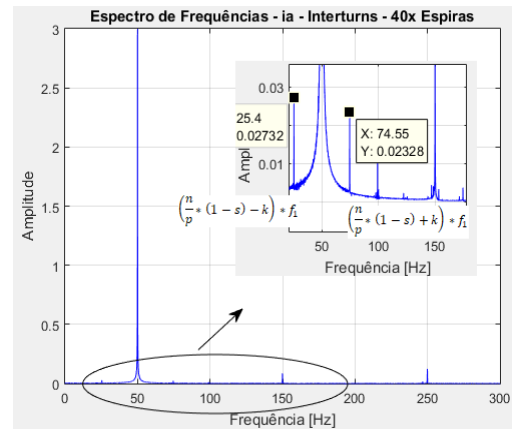


Figura 4. 41 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estática – Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica MCSA

Como pode ser verificado pelas figuras (4.40) e (4.41), na situação em que existem 40 espiras em curto circuito as bandas laterais que se encontram ao redor da componente fundamental do sinal, inserido em ' f_1 ', apresentam amplitudes superior relativamente às mesmas componentes na situação em que existem apenas 10 espiras em curto circuito. Porém existe uma diminuição da amplitude da componente fundamental (esta situação será verificada também em outras técnicas que serão mais abaixo analisadas), mostrando que o curto circuito entre espiras faz com que a componente fundamental do sinal que efetivamente produz trabalho sofre um enfraquecimento na presença deste tipo de avarias. Outro detalhe a ser apontado é que nesta situação as bandas laterais apresentam um posicionamento próximo às bandas laterais que surgem quando o equipamento se encontra a operar na presença de excentricidade, pelo que para qualificar ou diferenciar estas duas avarias, é necessário também efetuar uma análise às formas de onda das correntes do estator.

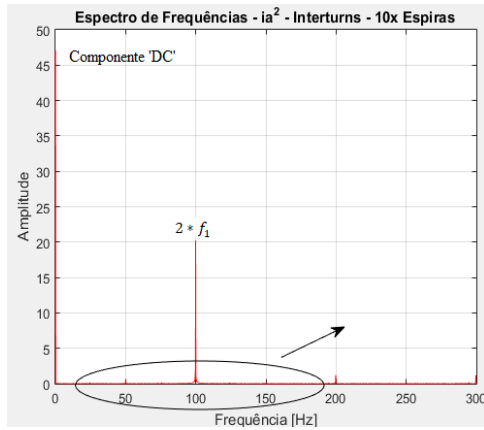


Figura 4.42 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica MSCSA

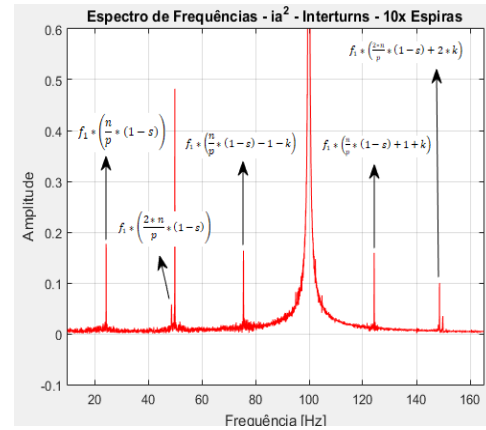


Figura 4.43 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica MSCSA (Zoom a figura 4.42)

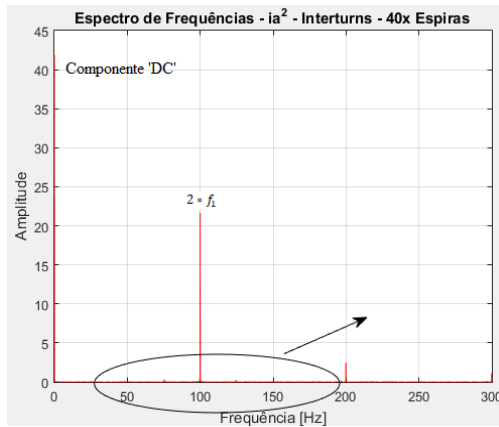


Figura 4.44 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica – Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica MSCSA

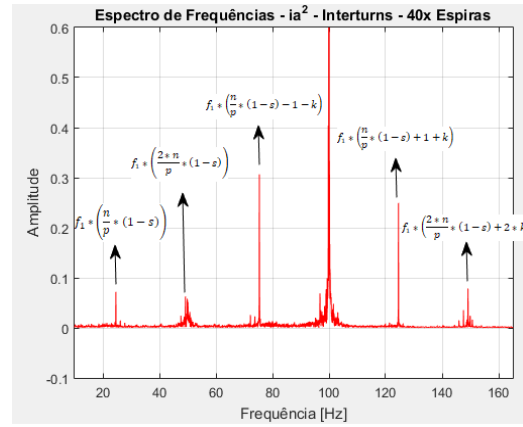


Figura 4.45 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica – Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica MSCSA (Zoom a figura 4.44)

Um detalhe importante a ser apontado na comparação dos espectros de frequências, fazendo uso da técnica ‘MSCSA’, na situação em que o equipamento se encontra com dez e quarenta espiras em curto circuito, é que na segunda situação, as bandas laterais inseridas em torno da componente fundamental deste sinal, ‘ $2 * f_1$ ’, aumentam de amplitude, enquanto que as componentes que estão mais afastadas diminuem de amplitude.

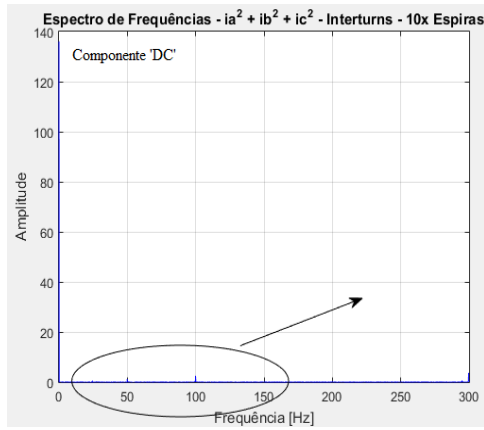


Figura 4. 46 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica MSSCSA

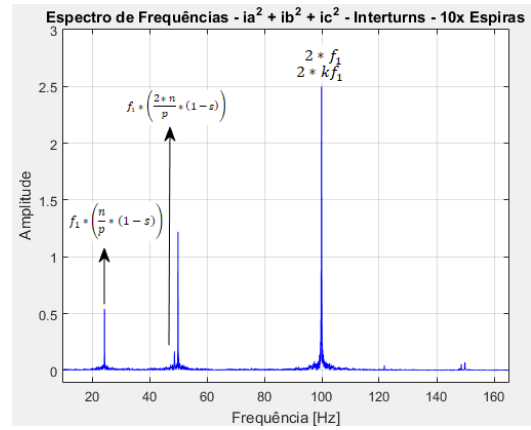


Figura 4. 47 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica MSSCSA (Zoom a figura 4.46)

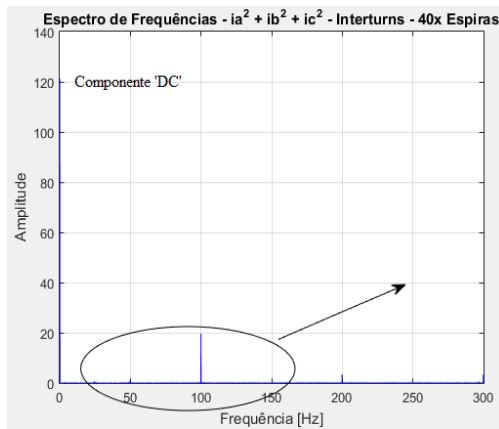


Figura 4. 48 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica MSSCSA

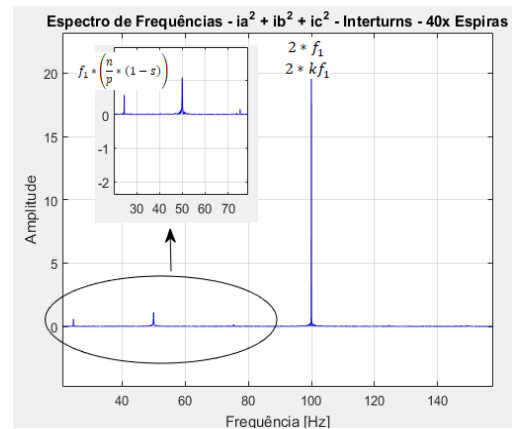


Figura 4. 49 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica MSSCSA (Zoom a figura 4.48)

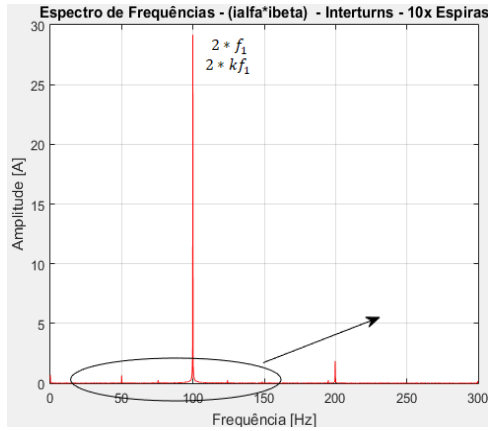


Figura 4. 50 - Espectro de Frequências do produto entre as corrente elétricas estatóricas – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica PVPA

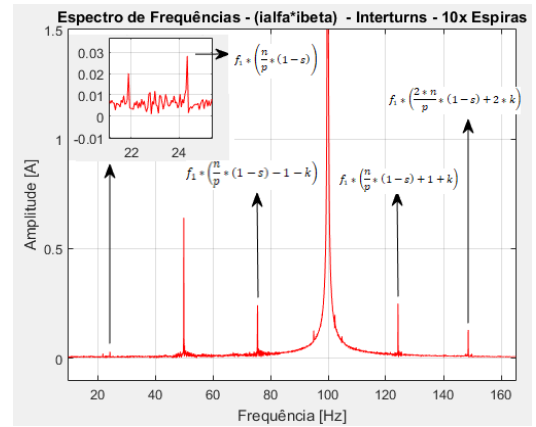


Figura 4. 51 - Espectro de Frequências do produto entre as corrente elétricas estatóricas – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ – Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica PVPA (Zoom a figura 4.50)

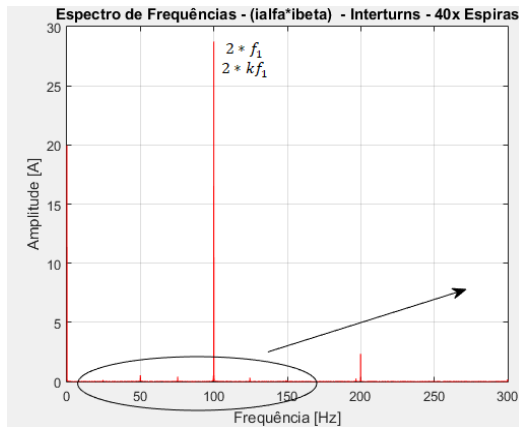


Figura 4. 52 - Espectro de Frequências do produto entre as corrente elétricas estatóricas – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ – Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica PVPA

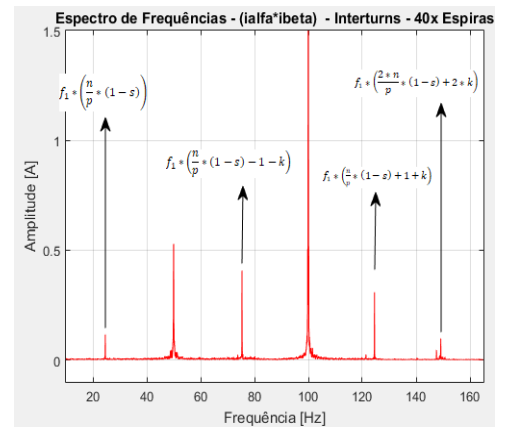


Figura 4. 53 - Espectro de Frequências do produto entre as corrente elétricas estatóricas – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ – Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica PVPA (Zoom a figura 4.52)

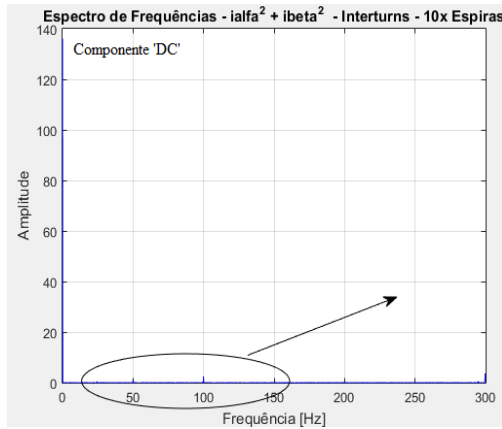


Figura 4. 54 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SEPVA

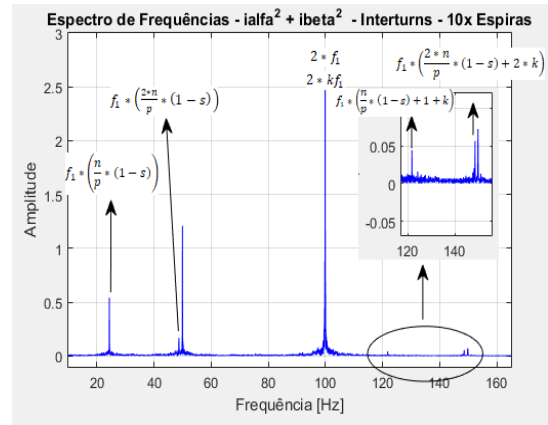


Figura 4. 55 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SEPVA (Zoom a figura 4.54)

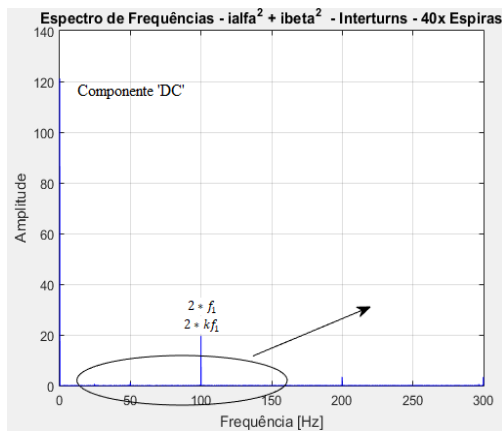


Figura 4. 56 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SEPVA

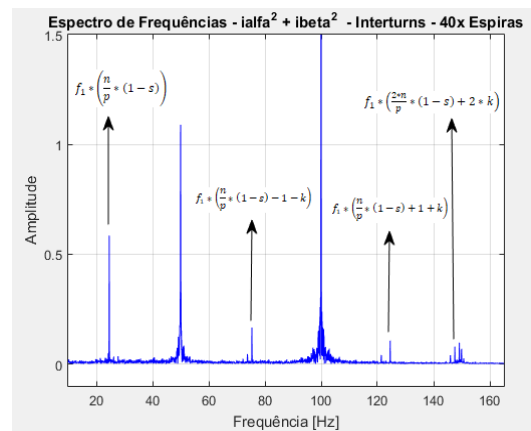


Figura 4. 57 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas $\alpha\beta$ - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SEPVA (Zoom a figura 4.56)

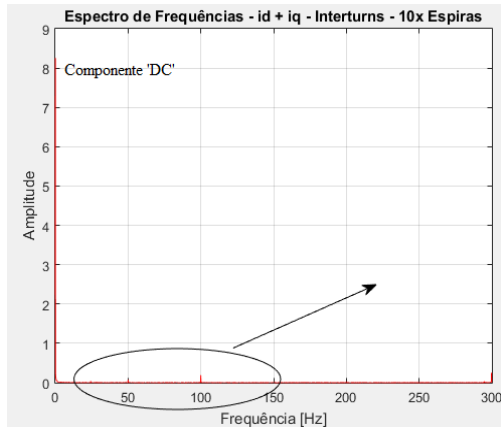


Figura 4. 58 - Espectro de Frequências do sinal da soma das correntes elétricas estática – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SPTCA

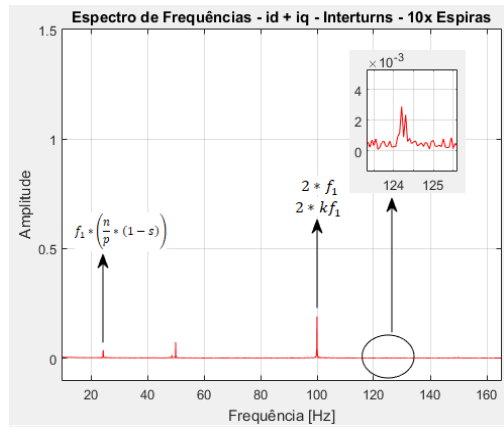


Figura 4. 59 - Espectro de Frequências do sinal da soma das correntes elétricas estática – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SPTCA (Zoom a figura 4.58)

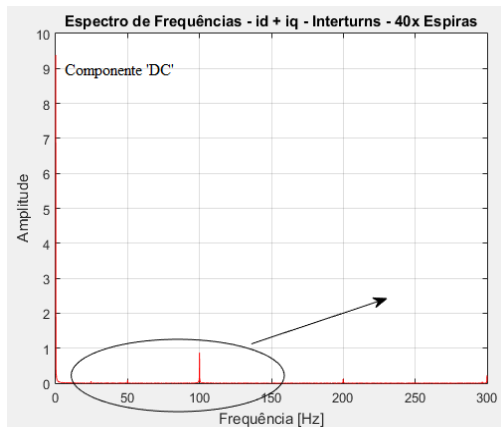


Figura 4. 60 - Espectro de Frequências do sinal da soma das correntes elétricas estática – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SPTCA

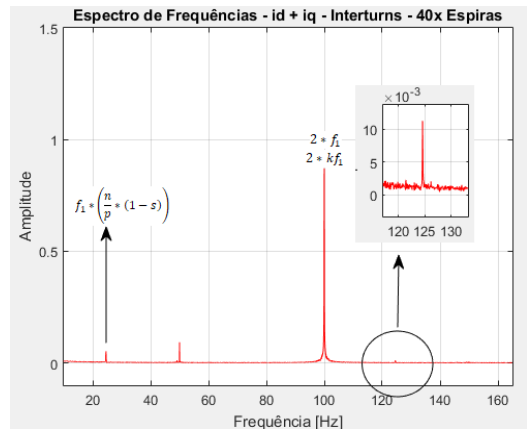


Figura 4. 61 - Espectro de Frequências do sinal da soma das correntes elétricas estática – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SPTCA (Zoom a figura 4.60)

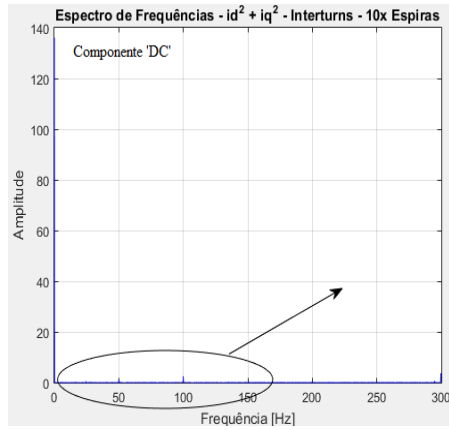


Figura 4. 62 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SSPTCA

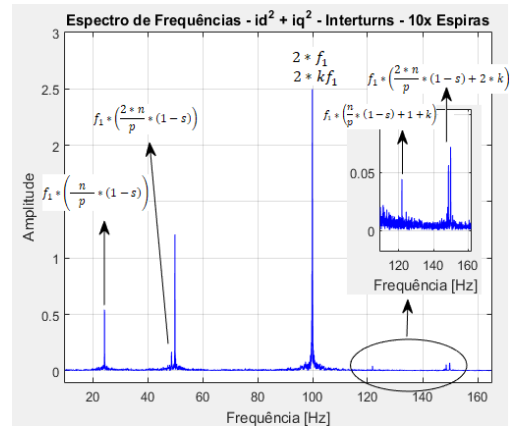


Figura 4. 63 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SSPTCA (Zoom a figura 4.62)

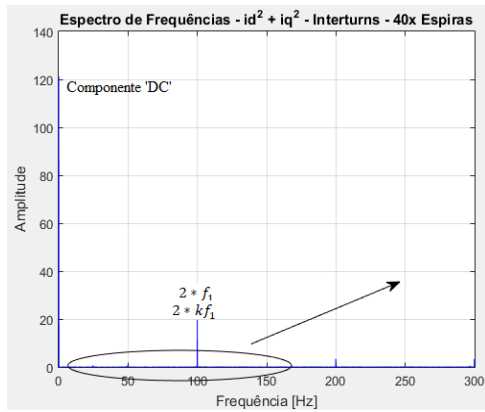


Figura 4. 64 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SSPTCA

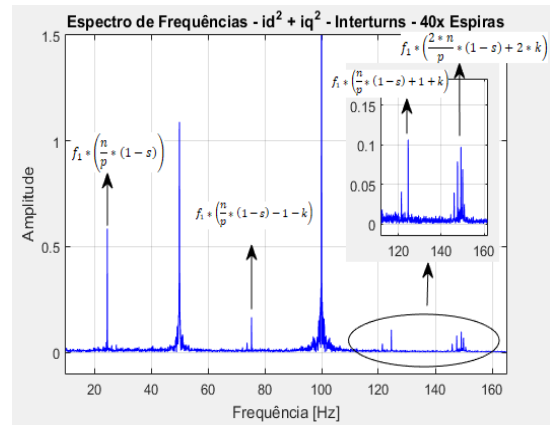


Figura 4. 65 - Espectro de Frequências do sinal da soma do quadrado das correntes elétricas estatórica – Sistema de coordenadas dq - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SSPTCA (Zoom a figura 4.64)

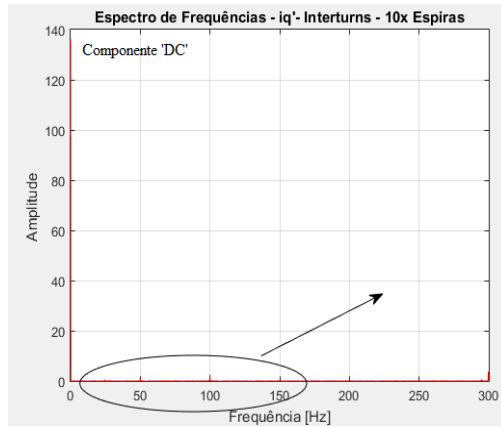


Figura 4. 66 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica DPTCA

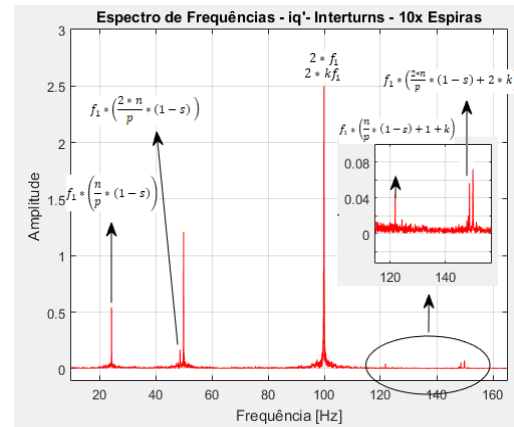


Figura 4. 67 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica DPTCA (Zoom a figura 4.66)

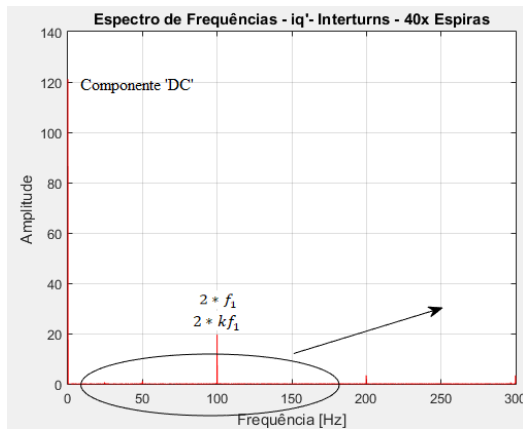


Figura 4. 68 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica DPTCA

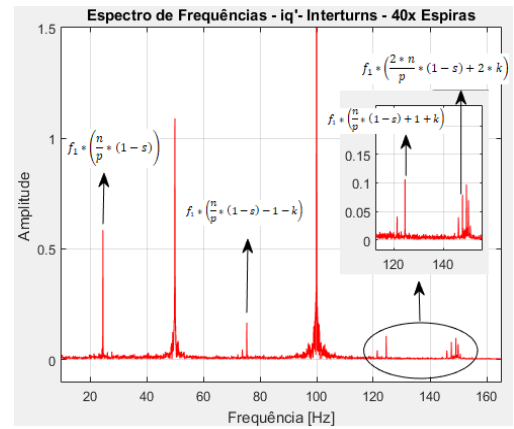


Figura 4. 69 - Espectro de Frequências do sinal da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica DPTCA (Zoom a figura 4.68)

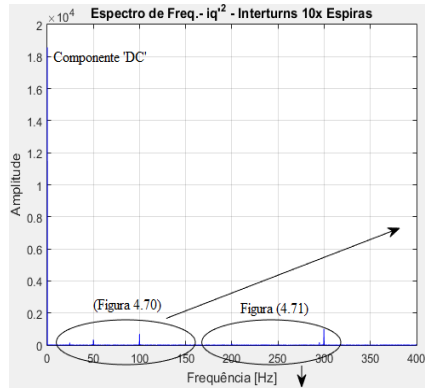


Figura 4. 70 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estática segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SDPTCA

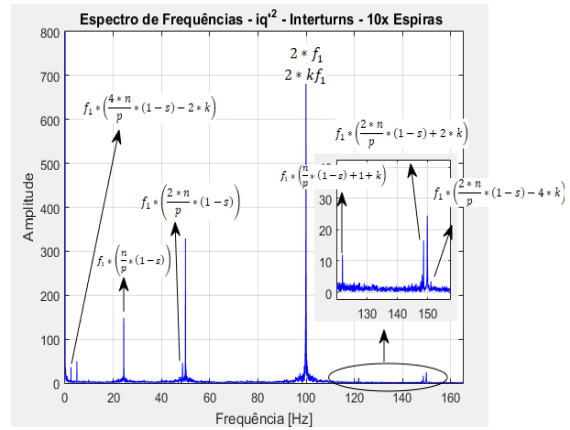


Figura 4. 71 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estática segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SDPTCA (Zoom N° 1 a figura 4.70)

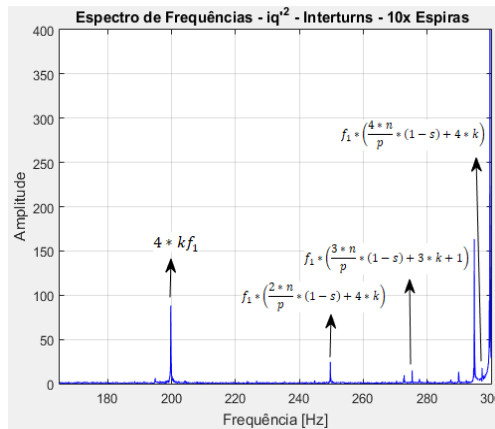


Figura 4. 72 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estática segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (10 espiras) – Técnica SDPTCA (Zoom N°2 a figura 4.70)

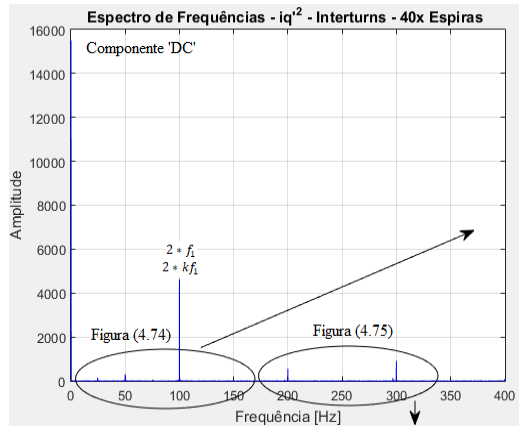


Figura 4. 73 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SDPTCA

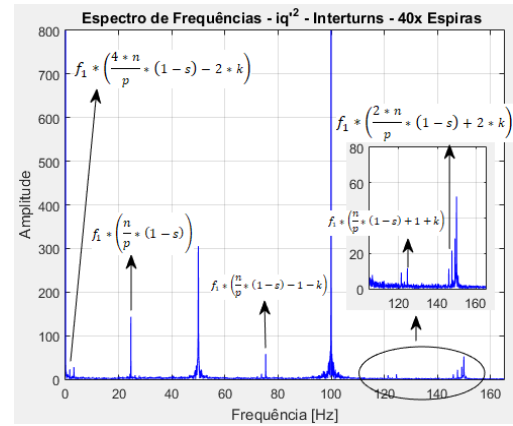


Figura 4. 74 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SDPTCA (Zoom N°1 a figura 4.73)

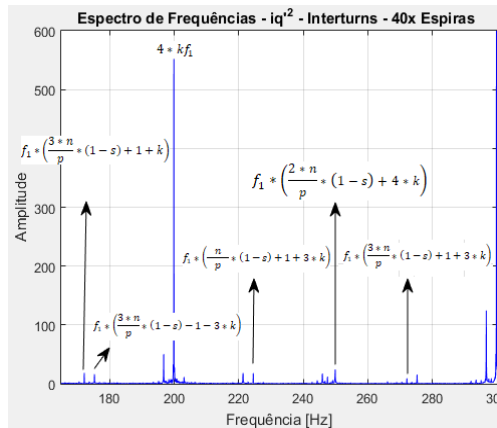


Figura 4. 75 - Espectro de Frequências do sinal do quadrado da corrente elétrica estatórica segundo o eixo em quadratura – Sistema de coordenadas de Park alternativo - Curto circuito entre espiras (40 espiras) – Técnica SDPTCA (Zoom N°2 a figura 4.73)

Em suma, os espectros de frequências dos sinais resultantes da aplicação das diversas técnicas apresentam componentes adicionais de frequências que estão em concordância com a fundamentação efetuada no capítulo 3. No decorrer deste subcapítulo houve uma tentativa de dar ênfase às componentes de frequência que apresentavam alguma amplitude significativa, na medida em que outras componentes com amplitudes relativamente pequenas, podem ser facilmente confundidas com ruído.

Em termos de quantidade de informação espectral, a técnica ‘SDPTCA’ apresenta o maior número de componentes adicionais de frequência, porém é de salientar que a maior parte das componentes adicionais de frequência apresentam um valor de amplitude

relativamente pequeno, pelo que numa situação tal como foi apresentado no caso de dez espiras em curto circuito, o número de bandas laterais específicas com algum significado, relativo ao tipo de avaria em questão, são sensivelmente inferiores ao caso do de quarenta espiras em curto circuito. Dentro das diversas componentes adicionais de frequência inseridas nesta técnica, é de se destacar as componentes inseridas em $2 * kf_1'$ e $4 * kf_1'$, ou seja, 100 e 200 Hz respetivamente, pois estas aumentam substancialmente o valor da amplitude quando o curto circuito apresenta um maior número de espiras. Se for tido em conta apenas a primeira componente citada, esta última informação poderá também ser verificada em outras técnicas, tais como 'MSSCSA', 'SEPVA', 'SPTCA', 'SSPTCA', 'DPTCA'. Esta componente de frequência é muito importante na análise de curto circuito entre espiras, na medida em que esta, na maior parte das técnicas, se destaca relativamente às restantes componentes.

Por último, para se efetuar uma análise relativamente à relação entre a amplitude da componente de frequência, específica do curto-circuito entre espiras, com maior significância e a amplitude da componente fundamental dos respetivos sinais, será estabelecido o gráfico do índice de severidade em função da percentagem de carga acoplada ao equipamento. Assim, serão efetuados dois gráficos relativos ao índice de severidade em função da carga, sendo um para a situação em que existem dez espiras em curto circuito e outro para a situação em que existem quarenta espiras em curto circuito (Figuras 4.76 e 4.77).

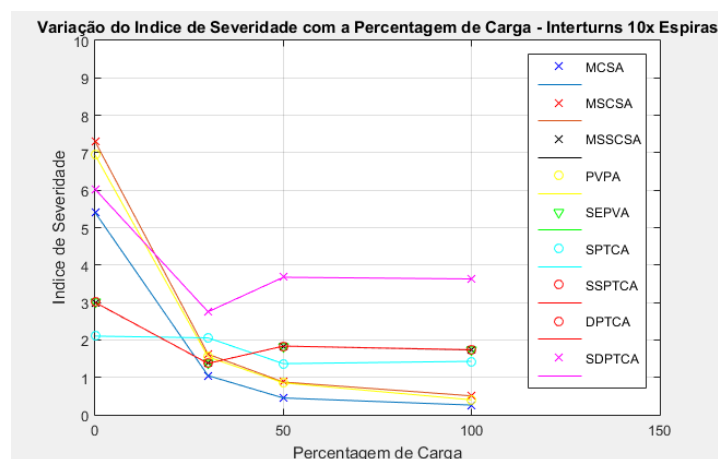


Figura 4. 76 - Variação do Índice de Severidade com a Percentagem de Carga – 10x Espiras em curto circuito

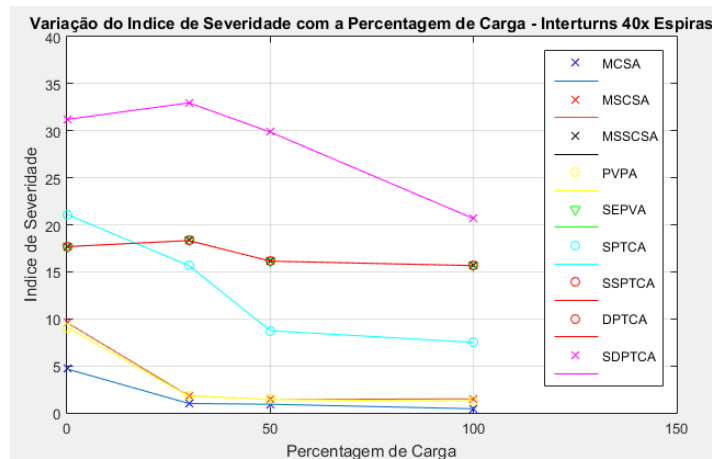


Figura 4. 77 - Variação do Índice de Severidade com a Percentagem de Carga - 40x Espiras em curto circuito

Tal como acontece no caso anterior, avaria por excentricidade, na maior parte das técnicas de diagnóstico de avarias estudadas, existe um decaimento do índice de severidade à medida que o valor percentual da carga aumenta, apresentando o menor valor quando o 'MI' se encontra em regime de carga nominal. Deste modo, o índice de severidade é maior quando o equipamento se encontra a operar em regimes de baixa carga ou até mesmo em vazio.

Ao contrário do que acontece nas outras duas avarias estudadas anteriormente, as técnicas 'MSCSA' e 'PVPA' não se apresentam como melhores soluções neste caso pois apresentam os menores índices de severidade em todos os pontos de funcionamento estudados. Neste caso de estudo, poderão se destacar as técnicas 'MSSCSA', 'SEPVA', 'SSPTCA' e 'DPTCA' pois ao contrário dos casos anteriores apresentam índices de severidades significativos, o que mostra que são boas soluções para a detecção da avaria referente ao curto circuito entre espiras.

Em relação à técnica 'SPTCA', no caso da avaria em questão, esta apresenta-se como uma solução mediana no que toca ao índice de severidade, porém em relação às restantes técnicas, apresenta o menor número de informação espectral.

Por fim, a técnica 'SDPTCA', além de apresentar o espectro de frequências com o maior número de componentes adicionais de frequências, é a técnica que apresenta os maiores índices de severidade com a variação percentual da carga. Por outras palavras, para a detecção de curto circuito entre espiras, esta técnica mostrou-se como a mais vantajosa para o efeito.

4.4 – Conclusões

Através da realização do estudo experimental da aplicação das técnicas de diagnóstico de avarias, estudadas no capítulo 3, no caso da avaria referente a barras fraturadas, excentricidade e curto circuito entre espiras, foi possível obter uma série de informações importantes que poderão efetivamente ajudar a conhecer qual a técnica mais vantajosa a ser aplicada para cada tipo de avaria. De acordo com este estudo, obteve-se as seguintes conclusões:

- As técnicas que tiveram por base todos os métodos propostos e no qual foi feito um estudo teórico e prático apresentado nos capítulos 3 e 4, foram as técnicas ‘MCSA’ e ‘MSCSA’. Deste modo, o objetivo do estudo das restantes técnicas foi descobrir quais as principais vantagens e desvantagens que estas apresentam. A técnica ‘MCSA’, apesar de ser uma técnica totalmente aplicável, apresenta-se como a técnica com um dos menores conteúdos espectral e a técnica que apresenta um dos menores índices de severidade em função da variação percentual da carga, pelo que, com exceção da técnica ‘SPTCA’, qualquer uma das outras técnicas estudadas apresenta maiores vantagens na aplicação das mesmas. A técnica ‘MSCSA’, no que toca à avaria referente às barras fraturadas e excentricidade, apresenta-se como uma das melhores técnicas para a deteção destas avarias, na medida em que apresenta um espectro de frequências com o maior conteúdo espectral e os maiores índices de severidade. Em contrapartida, no caso do curto circuito entre espiras, a sensibilidade resultante, i.e., os índices de severidade que estão em função da carga apresentam os menores valores, pelo que não se apresenta como a melhor solução na deteção desta avaria.
- A técnica ‘PVPA’, apesar de ter em todas as situações menor informação espectral, é uma solução que apresenta vantagens e desvantagens similares à técnica ‘MSCSA’, na medida em que, nos três tipos de avarias estudados, o comportamento do índice de severidade é semelhante. Por isso, as técnicas ‘PVPA’ e ‘MSCSA’ apresentam-se como soluções substancialmente atrativas.

- Tal como já era de esperar, as técnicas ‘MSSCSA’, ‘SEPVA’, ‘SSPTCA’ e ‘DPTCA’ em todos os tipos de avarias estudados apresentam espectros de frequências similares e, conseqüentemente, apresentam um comportamento similar do índice de severidade em função da variação percentual da carga. Estas quatro técnicas apresentadas, apesar de apresentarem algumas diferenças nas amplitudes das componentes de frequência acabam por ser redundantes, na medida em que o estudo espectral da soma do quadrado das correntes acaba por ser muito semelhante. Estas técnicas quatro técnicas mencionadas acima, se apresentaram como pouco vantajosas na detecção das barras fraturadas e excentricidade, na medida em que apresentam pouca informação espectral e um dos menores índices de severidade em função da variação da carga. Em contrapartida, na detecção do curto circuito entre espiras, estas técnicas, além de apresentarem um conteúdo espectral razoável, também apresentaram valores relativamente interessantes no que toca ao índice de severidade.
- Por fim, tal como já foi referido anteriormente, no geral, a técnica ‘SDPTCA’ apresentou-se como a mais vantajosa relativamente às restantes técnicas devido aos seguintes fatores:
 - No caso das barras fraturadas e excentricidade apresentou nos respetivos espectros de frequências quatro componentes adicionais de frequência, igualando a técnica ‘PVPA’ e ficando inferior apenas à técnica ‘MSCSA’ que apresenta seis componentes adicionais de frequências nestas duas avarias. No que toca aos índices de severidade, apresenta valores muito próximos às últimas duas técnicas referidas;
 - No caso do curto circuito entre espiras apresenta um espectro de frequências rico em termos de quantidade de componentes adicionais, apesar de, como já referido anteriormente, uma boa parte das componentes apresentarem amplitudes relativamente baixas e poderem facilmente ser confundidas com o ruído no sinal. O grande destaque desta técnica, no caso da avaria em questão, foi nos valores para o índice de severidade, mostrando que efetivamente esta técnica é a mais sensível no que toca à respetiva detecção e diagnóstico, apresentando valores substancialmente maiores.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 – Considerações finais

A presente dissertação de Mestrado teve por objetivo apresentar e estudar técnicas de diagnóstico de avarias baseadas no quadrado das correntes elétricas estatóricas. Este estudo abordou três tipos de avarias distintas, sendo estas, barras fraturadas, excentricidade e curto circuito entre espiras, dado que representam as avarias mais recorrentes em Motores de Indução Trifásicos. Apesar de já terem sido propostas técnicas de diagnóstico baseadas no quadrado da corrente estatórica, foram desenvolvidas novas técnicas de diagnóstico baseadas neste conceito, e que fazem uso das grandezas em diferentes sistemas de coordenadas.

De forma a introduzir o tema e especificar o âmbito no qual está inserido o trabalho, foi apresentado no capítulo 2 um estado da arte, no qual, numa primeira parte, houve a preocupação de dar a conhecer o princípio de funcionamento e os aspectos construtivos do 'MI', com o objetivo de apresentar os diversos componentes do equipamento sujeito a avaria, assim como a sua construção que é totalmente simples e robusta. Numa segunda parte houve a preocupação de apresentar os diversos tipos de avarias que podem estar associados ao 'MI'.

Relativamente às diversas técnicas de diagnóstico de avarias, estas foram divididas em três grandes grupos, métodos baseados em modelos, métodos baseados em reconhecimento de padrões e métodos baseados na análise espectral em frequência. Ao nível dos diversos métodos, foi dada ênfase à técnica 'MCSA'. Esta técnica veio revolucionar os métodos de diagnóstico, na medida em que é totalmente não invasiva e pode ser realizada através da aplicação de um único sensor de corrente para aquisição do respetivo sinal. Neste capítulo foi dado a conhecer a aplicação desta técnica a quatro tipos de avarias, nomeadamente rolamentos, barras fraturadas, excentricidade, e curto circuito entre espiras. Esta parte da dissertação foi fundamental pois deu a conhecer as componentes adicionais de frequências que surgem na presença de tais avarias. Com base nesta última informação, foram estabelecidas as expressões para o sinal da corrente elétrica estatórica

Com o objetivo de aprofundar outros tipos de avarias, o capítulo 3 inicia-se com a fundamentação teórica da técnica 'MSCSA', nomeadamente ao nível das expressões resultantes da aplicação do quadrado ao sinal da corrente elétrica do estator, na presença das três avarias em estudo. Foram ainda apresentados os respetivos espectros de frequências dos sinais resultantes, assim como a expressão para o cálculo do índice de severidade. A aplicação desta técnica apresenta grandes vantagens, na medida em que, em todos os tipos de avarias estudados, apresentou sempre um conteúdo espectral rico, com elevado número de bandas laterais. Nas avarias referentes às barras fraturadas e excentricidade, apresentou uma boa relação entre o valor percentual da carga e o respetivo índice de severidade, comparativamente com outras técnicas. Por outro lado, no que toca à avaria referente ao curto-circuito entre espiras, apresentou uma má relação entre o valor percentual da carga e o respetivo índice de severidade, o que mostra uma má sensibilidade da técnica, quando é aplicada a este tipo de avarias. Os restantes métodos foram apresentados de forma análoga ao caso da técnica 'MSCSA', na medida em que foram primeiramente apresentadas as expressões resultantes da aplicação de cada técnica, o respetivo espectro de frequências e a expressão para o cálculo do índice de severidade. É de salientar que para a apresentação dos espectros de frequências foram atribuídos valores para cada grandeza das expressões, de modo a que fosse dado a conhecer somente as localizações das componentes adicionais de frequências. Em seguida, houve a preocupação em apresentar uma técnica de diagnóstico de avarias que já se encontra desenvolvida, que estabelece o produto das correntes elétricas estatóricas segundo o sistema de coordenadas ' $\alpha\beta$ ', nomeadamente a técnica 'PVPA'. Esta técnica apresenta algumas similaridades relativamente a técnica 'MSCSA' e foi possível estabelecer, através do estudo teórico prático, a comparação entre ambas as técnicas.

Deve se ainda referir que foram propostas diversas técnicas de diagnóstico que não se encontravam ainda estudadas ou referidas na literatura. Deste modo, existe uma contribuição original na medida em que se deu a conhecer técnicas de diagnóstico que fazem uso dos seguintes sinais:

- Soma do quadrado das correntes elétricas estatóricas em três sistemas de coordenadas distintos:
 - Sistema de coordenadas ' abc ' – Técnica 'MSSCSA';

- Sistema de coordenadas ‘ $\alpha\beta$ ’ – Técnica ‘*SEPVA*’;
 - Sistema de coordenadas ‘dq’ – Técnica ‘*SSPTCA*’.
- Soma das correntes elétricas estatóricas no sistema de coordenadas ‘dq’ – Técnica ‘*SSPTCA*’;
- Corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura, tendo em conta o sistema de coordenadas alternativa de Park –Técnica ‘*DPTCA*’;
- Quadrado da corrente elétrica do estator segundo o eixo em quadratura, tendo em conta o sistema de coordenadas alternativa de Park –Técnica ‘*SDPTCA*’;

Para validação das fundamentações teóricas apresentadas no capítulo 3, foi desenvolvido um protótipo laboratorial constituído por dois motores de indução trifásicos, sendo um deles para simular a avaria de barras fraturadas e o outro para simular a avaria referente a curto-circuito entre espiras, sendo este último rebobinado propositadamente para que a simulação da avaria fosse realizada de forma interativa. O protótipo é ainda constituído por uma placa de interface, placa de proteção, placa de aquisição de sinais NI6009, computador e uma fonte de alimentação. Para simular a avaria referente à excentricidade, foi desenvolvida uma roda metálica com diversos furos, localizados de forma equidistante no espaço, de modo a que esta pudesse também ser realizada de uma forma interativa.

Os resultados experimentais foram de extrema importância para a validação dos pressupostos teóricos apresentadas no capítulo 3, nomeadamente pela confirmação das respetivas localizações das componentes adicionais de frequências inseridas em cada sinal resultante da aplicação de cada técnica. É de salientar que todas as técnicas apresentadas fazem uso apenas de sensores de corrente para a aquisição dos sinais das correntes elétricas estatóricas, sendo que, na sua maioria, é necessário adquirir o sinal das três fases do motor. Por outro lado, a aquisição destes sinais pode ser efetuada de uma forma não invasiva, tal como foi referido anteriormente.

5.2 – Proposta de Trabalhos Futuros

Como proposta de trabalhos futuros existem algumas vertentes que podem ser realizadas de modo a que haja melhoramento do trabalho já apresentado ou outros estudos que podem vir a incrementar ou introduzir outras técnicas de diagnóstico de avarias, nomeadamente:

- Podem ser aplicados sensores de tensão para que se efetue uma análise acerca do desequilíbrio de amplitudes existentes nos sinais, assim como componentes harmónicas existentes nos respetivos sinais. Estes sensores podem possibilitar, de igual modo, a aplicação das técnicas de diagnóstico relacionados com a análise espectral das potências ativas instantaneas, monofásicas e trifásicas, que não foram tratadas neste documento.
- Pode ser efetuado o estudo do sinal da corrente elétrica estatórica ao cubo ou a soma das correntes elétricas estatóricas ao cubo, dado que nestas circunstâncias irão surgir outras componentes adicionais de frequências que até então são desconhecidas. Este estudo iria ao encontro de um dos objetivos desta dissertação que é a análise da quantidade do conteúdo espectral assim como a relação do valor percentual da carga com o índice de severidade, de modo a analisar a sensibilidade das técnicas propostas.
- Pode ser efetuado um estudo em que o 'MI' opere na presença de barras fraturadas e excentricidade simultaneamente, para que, através das componentes adicionais de frequência, haja a possibilidade de diferenciar quais são as componentes respeitantes a cada tipo de avaria. Para tal, seria interessante substituir o motor por uma máquina de um par de pólos, pois tal como já foi referido anteriormente, nestas circunstâncias, as componentes adicionais de frequências referentes a este dois tipos de avarias estarão muito próximas.
- Por fim, pode desenvolver-se um método de diagnóstico baseado na análise espectral, mas com o motor em regime transitório, por exemplo, no arranque.

Bibliografia

[1] – A. Franco, “SDAI-MFEV: Sistema de Diagnóstico de Avarias Inteligente para Manutenção Ferroviária”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Novembro de 2001, Porto

[2] – F. Silveira e N. Marques, “Motor Elétricos de Indução – Uma das dez maiores invenções de todos os tempos”
<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2012v29n1p114>, acessado em 16-12-2016

[3] - <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/InducaoMagnetica/leidefaradyneumann.php>, acessado em 20-12-2016

[4] – A. Francisco, “Motores Elétricos”, Livro, Editora ETEP

[5] – L. Pereira, “Introdução a Máquina de Indução”, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

[6] - <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>, acessado em 21-12-2016

[7] – A. Francisco, “Motores de Indução Trifásicos”,
http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestana/maquinas%20el%C3%A9ctricas%20/aulas%20te%C3%B3ricas/Motores_inducao_tri.pdf, acessado em 21/12/2016

[8] - <http://www.revimaq.com/noticia/o-efeito-dos-servicos-de-reparos-e-de-rebobinamento-no-rendimento-dos-motores-eletricos>, acessado 03/01/2017

[9] – M. Guerreiro, “Máquinas Trifásicas de Indução”, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Ano Letivo 2004/2005

[10] - <http://docplayer.com.br/2013647-Eletromecanicos-de-manutencao-industrial.html>, acessado em 04/01/2016

[11] – J. Silva e A. Cardoso, “Diagnostico de Avarias nos Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos”, Escola superior de Tecnologia do Viseu

[12] – I. Onel e M. Benbouzid, “Induction Motor Bearing Failure Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study”, IEEE, Transactions on Mechatronics, Vol 13, N°2, pp. 257 – 262, April 2008

[13] – W. Oh. “Preventing VFD/AC Drive Induced Electrical Damage to AC Motor Bearings”, Eletro Static Technology, An ITW Company, <http://www.est-aegis.com/TechPaper.pdf>, acessado a 11/01/2017

[14] – J. Junior, “Enrolamentos de Motores de Indução Trifásicos utilizando a teoria da modulação de Pólos”, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Novembro de 2007

[15] - <http://estudeemcasa.blogspot.pt/2013/05/esquema-motor-trifasico-24-ranhuras-2.html>, acessado em 19/02/2017

[16] – A. Martinez. “Estudo de Métodos de Detecção de Curto-Circuito entre espiras em estatores de motores de indução trifásicos de baixa tensão”, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Julho de 2008

[17] – D. Foito, “Detecção e Diagnóstico de falhas em sistemas de acionamento com Máquinas de Indução Hexafásicas”, Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, Maio de 2015

[18] – S. Ushakumari, “ Rotor fault detection and diagnosis of Induction Motor using Fuzzy Logic”, AMSE JOURNALS –2014-Series: Modelling A; Vol. 87; N° 2; pp 19-40, India, April 2014

[19] – R. Assunção, “Ensino de Detecção de Avarias em Motores de Indução”, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Setembro de 2014

[20] – F. Santos, I. Silva e M. Suetake, “Sobre a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em Máquinas de indução – Uma visão Geral”, Universidade de São Paulo, Revista Controle&Automação – Vol 23 – N° 5, São Carlos – São Paulo, Outubro de 2012

[21] - <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/ressonancia-mecanica.htm>, acedido em 25/04/2017

[22] - F. Villada, “The negative sequence impedance as fault indicator in induction motors”, Group of Efficient Energy Management – GIMEL, Universidad de Antioquia, Medellín, 20 de Febrero de 2009, Colombia

[23] – C. Neto, “Análise de um Motor de Indução Trifásico submetido a Tensões de Alimentação Distorcidas”, Universidade Federal de Viçosa, 2012

[24] – I. Bazine, S. Tnani, T. Poinot, G. Champenois, K. Jelassi “Online detection of stator and Rotor Faults occurring in induction machine, Diagnosis by parameter estimation”, 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, pp. 105-112, September 2011

[25] – M. Wageck, “Detecção de Defeitos em motores de indução pela análise da assinatura da corrente elétrica”, Trabalho de Conclusão de Curso, Curitiba 2015

[26] – A. Conceição, “Manutenção Baseada na Condição na Tabaqueira, E.I.T”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2013

[27] – D. Perez e J. Daviu, “Application of infrared thermography to fault detection in industrial induction motors: case stories”, 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland 4-7 September 2016

[28] – V. Fernão Pires, J. F. Martins, A. J. Pires, “Eigenvector/eigenvalue Analysis of a 3D Current Referential Fault Detection and Diagnosis of an Induction Motor”, Energy Conversion and Management, Elsevier, vol. 51, no. 5, pp. 901-907, May 2010

[29] – J. Marques, “O Método da Análise de Componentes Principais na detecção e identificação de Outliers múltiplos em FOTOTRIANGULAÇÃO”, Tese de Doutorado, Curitiba 1994

[30] – D. Rebouças , “Utilização de Redes Neurais artificiais para detecção e diagnóstico de falhas”, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal 2011

[31] – N. Rama Devi, P. Ramana Rao and S. Abdul Gafoor, “Wavelet – ANN based Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motor”, 2011 Annual IEEE India Conference , Hyderabad, India , January 2012

[32] – A. Reis, “Reconhecimento de Padrões em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Fevereiro de 2010

[33] – J. F. Martins, V. Fernão Pires, A. J. Pires, “Unsupervised Neural-Network-Based Algorithm for an On-Line Diagnosis of Three-Phase Induction Motor Stator Fault”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 259-264, February 2007

[34] – F. Gomide e R. Gudwin, “Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy”, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Artigo Técnico, Setembro de 1994

[35] – H. Pinheiro, “Sistema para Detecção e Diagnóstico de Falhas em

Motores Elétricos de Indução utilizando Lógica Fuzzy”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Dezembro de 2011

[36] – L. Guimarães, “Diagnóstico de Avaria em Bombas e Ventiladores por análise de vibrações e equilibragem em Estaleiro pelo Método dos Coeficientes de Influência”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2011

[37] – C.Vaithilingan, G. Thio e R. Rajkumar, “Health monitoring of induction motor for vibration Analysis, UCSI University Kuala Lumpur Malaysia

[38] – P. Filho e J. Brito, “Predictive Monitoring of induction motor via magnetic flux analysis, 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasilia Distrito Federal, November 2007

[39] – M. Kadivonga, “Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos Através da Análise Espectral do Quadrado da Corrente Estatórica”, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Novembro de 2010

[40] Dulce F. Pires, V. Fernão Pires, J. F. Martins, A. J. Pires, “Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Based on a Current and Virtual Flux Approach”, Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 4, pp. 1026-1032, April 2009

[41] – W. Thomson and R. Gilmore, “Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, Data interpretation, and

industrial cases histories”, Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium, 2003

<https://pdfs.semanticscholar.org/7af1/964ffb69b942ed4efdd2674f2e332d79a77d.pdf>, acedido em 25-08-2017

[42] – D. Reljic, J. Tomic and Z. Kanovic, “Application of the Goertzel’s Algorithm in the Airgap Mixed Eccentricity Fault Detection”, University of Novi Sad, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, N° , February 2015

[43] – M. Prieto, J. Roura e J. Martínez, “Bearing Fault Detection using Inference Tools”, MCIA Group, Technical University of Catalonia Sapin

[44] – A. Ukil, S. Chen and A. Andenna, “Detection of Stator Short Circuit Faults in Three-Phase Induction Motors Using Motor Current Zero Crossing Instants”,

http://www3.ntu.edu.sg/home/aukil/papers/journal/2011_Ukil_IM-StatorShort_preprint.pdf

[45] – V. Pires, J. Martins, A. Pires, L. Rodrigues, “Induction Motor Broken Bar Fault Detection Based on MCSA, MSCSA and PCA: A comparative study, 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), pp. 298-303, 29 June - 1 July 2016.

[46] – V. Fernão Pires, Manuel Kadivonga, J. F. Martins, A. J. Pires, “Motor Square Current Signature Analysis for Induction Motor Rotor Diagnosis”, Measurement, Elsevier, vol. 46, no. 2, pp. 942-948, February 2013.

[47] – V. Fernão Pires, Daniel Foito, J. F. Martins, A. J. Pires, “Detection of Stator Winding Fault in Induction Motors Using a Motor Square Current Signature Analysis (MSCSA)”, 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2015), pp 507-512, May 11-13, 2015

[48] – P. Salatiel, ‘Modelação e Controlo de uma Máquina Síncrona de Magnetos Permanentes’, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Julho de 2015

[49] – A. Allal and B. Chetate, “A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors couplet to variable loads”, *Front. Energy* 2016, 10(2): 176–191

[50] – S. Cruz and A. Cardoso, “Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extend Park’s Vector Approach”, *IEEE Transactions on Industry Applications* (Volume: 37 , Issue: 5 , Sep/Oct 2001)