

Pedro Miguel Gonçalves Duarte

Análise experimental do desempenho do motor de indução trifásico com entreferro excêntrico

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Energia

Dezembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Análise experimental do desempenho do motor de indução
trifásico com entreferro excêntrico**

Pedro Miguel Gonçalves Duarte

Membros do Júri:

Presidente: Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo Cruz

Orientador: Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes

Vogal: Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Dezembro de 2017

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles com quem me cruzei ao longo destes anos e me ajudaram durante este percurso.

A todos os professores com quem aprendi durante o curso, em especial ao meu orientador Prof. Dr. André Manuel dos Santos Mendes pelos conselhos e incentivos que me deu durante a realização desta dissertação.

Agradeço ao Emanuel que me resolveu alguns problemas que tive durante a dissertação.

Em seguida, agradeço à minha namorada Marta Amaral pelo apoio que me deu nos momentos mais difíceis de toda esta jornada.

A todos os meus amigos e colegas que me ajudaram de alguma maneira, especialmente aos meus grandes amigos Nuno Almeida, Sílvia Pedro e Eduardo Rosendo e aos colegas de laboratório Bruno, André e Sandra, pela ajuda prestada nos casos de necessidade.

Por fim, a toda a minha família, em especial aos meus pais pela força e incentivo que me deram durante este trajeto.

Resumo

Esta dissertação centra-se na análise da influência da excentricidade no desempenho de um motor elétrico, neste caso um motor de indução trifásico. Para isso utiliza-se um mecanismo que permite regular o valor da excentricidade, quer da excentricidade estática quer da excentricidade dinâmica.

Este trabalho analisa a influência que a excentricidade tem na temperatura em certos pontos do motor e também o que provoca em certas grandezas como as potências, o rendimento, o deslizamento, o fator de potência, etc. Realizaram-se trinta ensaios com diferentes níveis de carga e de excentricidade e comparam-se os resultados obtidos para cada ensaio.

Em seguida faz-se uma análise do vetor de Park das correntes de alimentação do motor, comparando novamente a influência do aumento da excentricidade na representação do vetor de Park.

Por último, utiliza-se um método designado por Análise Estendida do Vetor de Park (AEVP), que se baseia na representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park das correntes de alimentação do motor. Através deste espectro é possível calcular um fator de severidade que permite mensurar a gravidade de algumas avarias existentes no motor, entre as quais a excentricidade. Este é um método de diagnóstico online, por isso não necessita de parar o motor para analisar a existência ou não, e a gravidade das avarias.

Palavras-chave

Excentricidade, Análise Estendida do Vetor de Park, Motor de Indução Trifásico.

Abstract

This dissertation focuses on the analysis of the influence of eccentricity on the performance of an electric motor, in this case a three-phase induction motor. For this, a mechanism is used to regulate the value of eccentricity, either static eccentricity or dynamic eccentricity.

This work analyzes the influence that eccentricity has on the temperature in certain points of the motor and also what causes in certain magnitudes as the powers, the efficiency, the slip, the power factor, etc. Thirty tests were carried out with different load levels and eccentricity, and the results obtained for each test were compared.

Next, the Park vector obtained through the motor supply currents is analyzed, again comparing the influence of the increase of the eccentricity on the representation of the Park vector.

Finally, a method called Extended Park Vector Analysis (EPVA) is used, which is based on the representation of the frequency spectrum of the module of the Park vector of the currents, obtaining through this spectrum a severity factor that allows to measure the severity of some faults in the motor, this being an online method, so it does not need to stop the motor to analyze the existence or not, and the severity of the faults.

Keywords

Eccentricity, Extended Park Vector Analysis, three-phase Induction Motor.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivo da dissertação.....	3
1.2. Organização da dissertação.....	3
1.3. Revisão da literatura.....	3
2. Motor de Indução Trifásico.....	5
2.1. Geometria do MIT.....	5
2.2. Princípio de funcionamento	7
2.3. Motor de indução com rotor bobinado	8
2.4. Fontes de Calor	8
2.5. Influência da temperatura	9
2.6. Avarias mais comuns dos MIT	10
2.6.1. Desequilíbrio do rotor.....	11
2.6.2. Barras rotóricas partidas	12
2.6.3. Avarias nos enrolamentos do estator.....	13
2.6.4. Desequilíbrio de fases.....	14
2.6.5. Falta de uma fase.....	14
2.6.6. Avarias nos rolamentos	14
2.6.7. Refrigeração insuficiente	15
2.6.8. Excentricidade rotórica.....	15
3. Excentricidade	16
3.1. Excentricidade estática	16
3.2. Excentricidade dinâmica.....	17
3.3. Excentricidade mista	17
3.4. Influência da excentricidade	18
4. Métodos de quantificação de severidade de avarias	19
4.1. Motor Current Signature Analysis	19
4.2. Análise do Vetor de Park.....	19
4.3. Análise Estendida do Vetor de Park.....	21
5. Preparação da bancada de trabalho experimental.....	23
5.1. Montagem.....	23
5.2. Descrição do material utilizado na realização dos ensaios experimentais	28
6. Resultados e discussão	30
6.1. Ensaios experimentais	30
7. Conclusão	47
Bibliografia	49

Anexo A – Equipamento utilizado	51
Anexo B – Resultados obtidos nos ensaios experimentais	54
Anexo C – Resultados obtidos pelo vetor de Park	57
Anexo D – Resultados obtidos através da AEVP	63
Anexo E – Resultados obtidos através da FFT da corrente de alimentação	73

Lista de Figuras

Figura 1.1: Diagrama representativo dos vários tipos de motores	2
Figura 1.2: Quantidade de motores elétricos na indústria a nível mundial [2]	2
Figura 2.1: Corte transversal de um motor de indução.....	5
Figura 2.2: Circuito magnético estatórico.....	6
Figura 2.3: Circuito magnético rotórico	6
Figura 2.4: Tempo de vida do isolamento em função da temperatura [18]	10
Figura 2.5: Causas das avarias nos motores de indução trifásicos.....	11
Figura 2.6: Barras rotóricas partidas	12
Figura 2.7: A imagem do lado esquerdo representa um curto-circuito de espiras que poderá levar à imagem do lado direito que representa um curto-circuito de uma bobina.....	13
Figura 2.8: Rolamento esférico [19].....	14
Figura 3.1: Causas de excentricidade [7].....	16
Figura 3.2: Excentricidade estática [20]	17
Figura 3.3: Excentricidade dinâmica [20].....	17
Figura 3.4: Excentricidade mista [7]	18
Figura 4.1: Representação do Vetor de Park para o funcionamento normal	20
Figura 4.2: Representação do vetor de Park para o motor a funcionar em vazio e sem excentricidade imposta pelo mecanismo	20
Figura 4.3: Representação do módulo do vetor de Park sem excentricidade e com o motor a funcionar em vazio	21
Figura 5.1: Montagem das barras de ferro	23
Figura 5.2: Rotor	24
Figura 5.3: Carcaça do motor.....	24
Figura 5.4: Tampa do lado do ataque, do lado esquerdo a parte interior e do lado direito a parte exterior.....	24
Figura 5.5: Tampa do lado do ventilador, do lado esquerdo a parte interior e do lado direito a parte exterior	25
Figura 5.6: Mecanismo que regula a excentricidade.....	25
Figura 5.7: Mecanismo que impõe excentricidade estática	25
Figura 5.8: Mecanismo que impõe excentricidade dinâmica e rolamento	26
Figura 5.9: Anéis de fixação	26
Figura 5.10: Posição dos sensores de temperatura do lado do ataque.....	27
Figura 5.11: Sensor do lado da ventoinha e sensor colocado no núcleo	27
Figura 5.12: Acoplamento	28
Figura 5.13: Esquema geral da bancada de trabalho	29
Figura 6.1: Software utilizado para registo dos dados obtidos nos ensaios térmicos	31
Figura 6.2: Exemplo das grandezas apresentadas no analisador de potência	31
Figura 6.3: Evolução temporal das temperaturas nos vários sensores para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0, com o motor a funcionar em vazio	32
Figura 6.4: Representação da diferença entre o ponto mais quente no fim de cada ensaio e a temperatura ambiente em função do nível de carga e da excentricidade	32
Figura 6.5: Gráficos que representam a evolução temporal da diferença entre a temperatura média dos sensores colocados nos enrolamentos estatóricos e a temperatura ambiente por nível de carga: (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75%, (e) 100%, (f) legendas dos gráficos anteriores. ...	34
Figura 6.6: Representação da média da potência ativa em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade.....	35
Figura 6.7: Representação da média da potência reativa em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade.....	36

Figura 6.8: Representação da média da potência aparente em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade	36
Figura 6.9: Representação da média do deslizamento em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade	37
Figura 6.10: Representação da média do rendimento em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade	37
Figura 6.11: Representação da média do fator de potência em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade	38
Figura 6.12: Representação do centro térmico para os diversos ensaios.....	41
Figura 6.13: Software de aquisição dos dados referentes às tensões e correntes.....	42
Figura 6.14: Software utilizado para a representação do vetor de Park, do espectro do módulo do vetor de Park e do espectro da corrente.	42
Figura 6.15: Representação do vetor de Park para o nível de carga 0%: (a) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0; (b) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4; (c) excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0; (d) excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2.....	44
Figura 6.16: Representação do vetor de Park para o nível de carga 100%: (a) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0; (b) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4; (c) excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0; (d) excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2.....	45
Figura 6.17: FFT da corrente de alimentação do motor para excentricidade estática 0,4, excentricidade dinâmica 0 e nível de carga 100%	45
Figura 6.18: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park com excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 a funcionar em vazio	46
Figura 6.19: Resultados obtidos para o fator de severidade	46
Figura A.1: Analisador de potência YOKOGAWA WT3000	51
Figura A.2: Controlador do dinamómetro MAGTROL DSP6001	51
Figura A.3: Dinamómetro de histerese MAGTROL HD-815-8NA	52
Figura A.4: Chapa de características do dinamómetro.....	52
Figura A.5: Ventilador do dinamómetro	53
Figura A.6: Autotransformador.....	53
Figura C.1: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	57
Figura C.2: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	58
Figura C.3: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	59
Figura C.4: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	60
Figura C.5: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	61
Figura C.6: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	62
Figura D.1: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	64
Figura D.2: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	66
Figura D.3: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	67

Figura D.4: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	69
Figura D.5: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	71
Figura D.6: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	72
Figura E.1: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	74
Figura E.2: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	76
Figura E.3: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	77
Figura E.4: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	79
Figura E.5: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	81
Figura E.6: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%	82

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Classes de isolamento dos MIT	10
Tabela 5.1: Características principais do motor utilizado	29
Tabela 5.2: Resistência dos enrolamentos estatóricos.....	29
Tabela 6.1: Diferença para a média dos sensores do lado do ataque no final de cada ensaio	40
Tabela B.1: Resultados da diferença entre a temperatura do ponto mais quente e a temperatura ambiente dependendo da excentricidade e do nível de carga	54
Tabela B.2: Resultados dos diferentes níveis de carga e de excentricidade para a potência de ativa entrada (média), a potência reativa (média) e a potência aparente (média)	55
Tabela B.3: Resultados dos diferentes níveis de carga e de excentricidade para o rendimento (média) e o fator de potência (média).....	56

1. Introdução

Nos dias de hoje o aumento do consumo de energia elétrica é cada vez maior e, por isso, é necessário que sejam tomadas medidas de maneira a regular este impacto. Para isso deve evitar-se que os motores elétricos funcionem com algum tipo de avaria, pois essa situação poderá provocar um aumento no consumo de energia ou mesmo danificar o equipamento. É estimado que o consumo de energia elétrica pelos motores elétricos é de cerca de 43% a 46% a nível mundial [1].

Os motores elétricos são também potenciais fontes de ruído acústico, que tende a piorar no caso da existência de uma avaria, podendo ser bastante incómodo. Pode, no entanto, reduzir-se o ruído enclausurando o motor com materiais absorventes do som, mas vai interferir na temperatura e no desempenho do motor. Dependendo da classe de isolamento, os motores elétricos não podem ultrapassar uma determinada temperatura no ponto mais quente, pois no caso desta ser ultrapassada o material isolante vai deteriorar-se, diminuindo assim a sua vida útil.

Existem vários tipos de motores elétricos como mostra a Figura 1.1, sendo que atualmente os mais utilizados na indústria são os motores de indução trifásicos. Os motores de corrente contínua foram no passado preponderantes na indústria, devido à facilidade existente em controlar a velocidade de rotação e também a grande variedade de características binário/velocidade destes motores em comparação com outros, pois na altura não existiam muitas alternativas aos motores assíncronos, tal como não existiam grandes alternativas no que diz respeito aos conversores de potência.

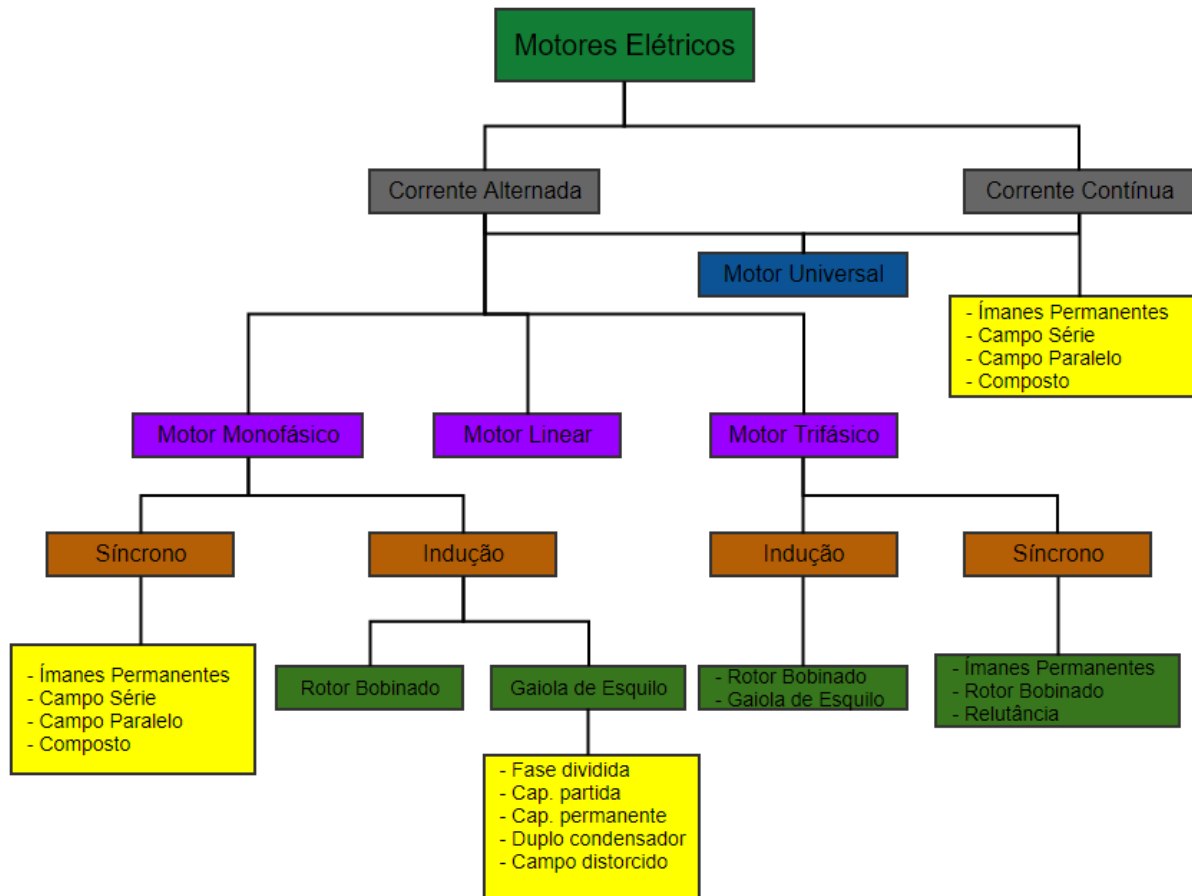


Figura 1.1: Diagrama representativo dos vários tipos de motores

Com o avanço das várias tecnologias, como os semicondutores, e com a constante necessidade de aumento de potência na indústria, os motores de corrente contínua foram caindo em desuso, passando os motores assíncronos a serem os mais usados, mais concretamente os motores de indução trifásicos. Hoje em dia começa também a apostar-se bastante nos motores síncronos, especialmente para aplicações de grande potência.

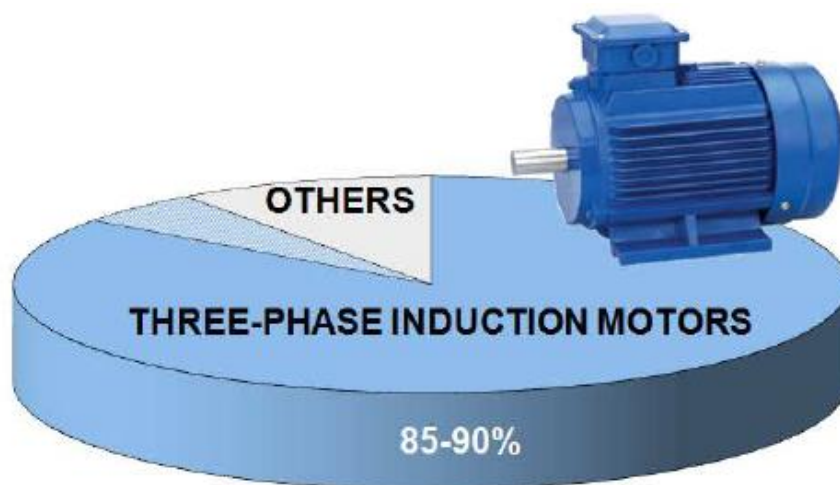


Figura 1.2: Quantidade de motores elétricos na indústria a nível mundial [2]

1.1. Objetivo da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo a análise do desempenho de um motor de indução trifásico de 2 kW, utilizando um mecanismo que permite regular a excentricidade no entreferro. São realizados determinados ensaios que visam analisar a evolução da temperatura em determinados pontos do motor e também de diversas grandezas do motor em conjunto com a utilização do método de Análise Estendida do Vetor de Park de maneira a quantificar o nível de severidade da avaria, verificando a influência do nível de excentricidade.

1.2. Organização da dissertação

A dissertação está estruturada de maneira a que no capítulo 1 seja feita uma breve referência aos vários tipos de motores elétricos e a utilização dos mesmos, bem como o objetivo desta dissertação e uma breve revisão da literatura.

Durante o capítulo 2 é feita uma descrição histórica do motor de indução trifásico e, em seguida, explica-se a sua geometria, princípio de funcionamento e as principais avarias deste tipo de motores.

No capítulo 3 apresentam-se os diferentes tipos de excentricidade e a sua influência no funcionamento do motor, enquanto no capítulo 4 são referidos os métodos utilizados na quantificação da severidade de avarias.

O capítulo 5 descreve a preparação/montagem da bancada de trabalho e o material utilizado na realização dos ensaios ao motor, enquanto que no capítulo 6 são apresentados os resultados desses ensaios (térmicos e aquisição das correntes) em função do nível de carga e do nível de excentricidade.

Por fim, no capítulo 7 são expostas as conclusões retiradas da dissertação, e ainda o possível trabalho futuro.

1.3. Revisão da literatura

Durante a pesquisa sobre trabalhos semelhantes a esta dissertação, foram encontrados vários acerca do aumento do ruído magnético e da vibração provocados pelo aumento da excentricidade no motor de indução trifásico [3, 4]. Há também outros estudos acerca da análise das correntes de

alimentação, nomeadamente a análise das bandas laterais do espectro de frequência da corrente, aquando da presença de excentricidade [5, 6], bem como um artigo acerca da variação da densidade do fluxo no entreferro influenciada pela excentricidade [7].

No que diz respeito à temperatura, pode dizer-se que existe um aumento de temperatura não uniforme provocado pela excentricidade como mostra em [8], gerando-se um maior aumento de temperatura na direção da excentricidade. Existem outros artigos que abordam a tema da temperatura, no entanto não provocada pela excentricidade, mas comparando a alimentação de um MIT através de um inversor PWM e um inversor *six-step*, tendo o inversor PWM apresentado uma potência de perdas mais baixa e, conseqüentemente, temperaturas mais baixas [9]. Outro estudo apresentado em [10] faz uma análise da temperatura de um MIT alimentado por um inversor PWM, sendo que as temperaturas tendem a ser mais elevadas para frequências fundamentais mais baixas.

No artigo [11] é comparado o desempenho de MIT normal com alimentação trifásica e de um MIT assimétrico com alimentação monofásica. Também no artigo [12] é feita uma análise do desempenho de um MIT alimentado por um conversor de frequência, pois estes têm sido cada vez mais usados em aplicações que necessitem de controlo de binário e velocidade, no entanto, estes conversores geram harmónicos prejudiciais para o desempenho do motor.

2. Motor de Indução Trifásico

O motor de indução é uma máquina elétrica rotativa de corrente alternada, assíncrona, que foi inventado em 1887 por Galileo Ferraris e Nikola Tesla, sendo este um motor bifásico. Mais tarde, em 1889, Mikhail Dolivo-Dobrovolsky inventou o motor de indução trifásico (MIT), pois afirmava que as pulsações do motor bifásico não eram práticas, uma vez que não permitia exercer um binário constante. Em 1891 a General Electric Company começou a desenvolver MIT's, sendo que em 1896, em conjunto com George Westinghouse (desenvolvedor de um sistema de alimentação alternada) assinaram um acordo de licenciamento do motor com rotor em gaiola de esquilo. A partir dessa data foram feitas várias melhorias no MIT, de maneira a melhorar o seu desempenho.

2.1. Geometria do MIT

Um motor de indução trifásico é constituído pelo estator, o rotor e a estrutura mecânica.

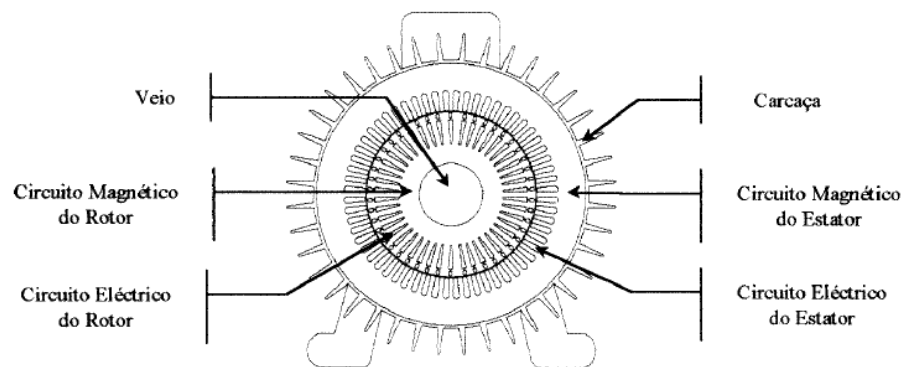


Figura 2.1: Corte transversal de um motor de indução

O circuito magnético do estator é constituído por chapas de material ferromagnético, com baixa densidade de perdas magnéticas. As chapas têm a forma de uma coroa ranhurada circular como mostra a Figura 2.2. Estas chapas são revestidas de um verniz isolante e são depois empilhadas de maneira a formar o circuito estatórico. As ranhuras são para albergar os condutores do circuito elétrico do estator. O circuito elétrico estatórico é formado por três enrolamentos desfasados no espaço de 120° elétricos, que serão alimentados por cada uma das fases do sistema de alimentação. Os condutores elétricos são também isolados [13].

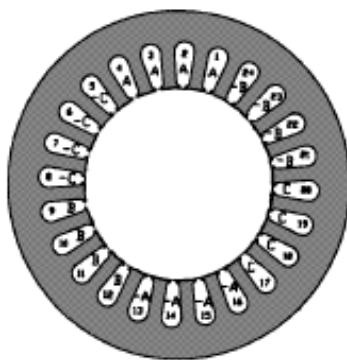


Figura 2.2: Circuito magnético estatórico

O circuito magnético do rotor também é folheado e construído pelo mesmo tipo de chapas ferromagnéticas utilizadas no estator. O circuito rotórico tem a forma de uma coroa circular que possui ranhuras fechadas perto da periferia exterior como se pode ver na Figura 2.3. O rotor pode ser de dois tipos: rotor em gaiola de esquilo ou rotor bobinado. O rotor em gaiola de esquilo é formado por barras de alumínio que se encontram em curto-circuito permanente através de anéis nas duas extremidades. No caso do rotor bobinado, o rotor contacta com a parte fixa da máquina através de um sistema de coletor de anéis-escovas [13].

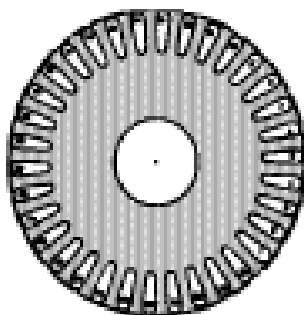


Figura 2.3: Circuito magnético rotórico

No que diz respeito à estrutura mecânica, é necessário que as partes fixas permaneçam na respetiva posição, que as partes móveis rodem à velocidade pretendida e que todo o conjunto esteja protegido das agressões ambientais e também que não ponha em perigo a zona circundante da máquina. Desta estrutura faz parte o veio que é fabricado em aço, sendo de seguida montado o núcleo rotórico sobre este veio. O veio apoia-se nos mancais de rolamento que são colocados nas tampas da carcaça. Esta carcaça é o que protege a máquina do exterior, geralmente em alumínio ou em ferro fundido.

2.2. Princípio de funcionamento

Quando o motor de indução trifásico é alimentado por um sistema trifásico e simétrico de tensões, os enrolamentos estatóricos são percorridos por três correntes simétricas, criando um campo magnético girante na máquina que roda a uma velocidade

$$n_s = \frac{60 * f}{p} [rpm] \quad (2.1)$$

onde n_s representa a velocidade de sincronismo, f a frequência de alimentação e p o número de pares de pólos da máquina.

Este campo induz nos enrolamentos rotóricos uma força eletromotriz que vai originar a circulação de uma corrente no rotor. Assim, o rotor tenderá a rodar no mesmo sentido e à mesma velocidade que o campo girante do estator, por forma a anular essas correntes. No entanto, devido a perdas existentes na máquina, a velocidade de rotação será inferior à velocidade de sincronismo, ou seja, existe um deslizamento do rotor em relação ao campo girante estatórico dado por (2.2) onde s representa o deslizamento, n_s a velocidade de sincronismo e n_r a velocidade de rotação da máquina.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} * 100 [\%] \quad (2.2)$$

Quando o rotor roda a uma velocidade diferente da velocidade de sincronismo, as correntes rotóricas criam um campo girante rotórico. As correntes do rotor têm uma frequência dada por (2.3) onde f_r representa a frequência das correntes rotóricas, s o deslizamento e f a frequência de alimentação.

$$f_r = s * f [Hz] \quad (2.3)$$

O campo girante rotórico roda em sincronismo com o campo girante estatórico, mas atrasado de um ângulo (ângulo do binário). O binário produzido pela máquina depende das forças magnetomotrizes do estator e do rotor e do ângulo que formam entre si.

A junção dos dois campos origina um campo magnético resultante que também é um campo girante e roda à velocidade de sincronismo. Este campo resultante é o responsável pela força eletromotriz estatórica e rotórica.

2.3. Motor de indução com rotor bobinado

O motor utilizado nesta dissertação foi um motor de indução com rotor bobinado. Este motor tem um estator igual ao do motor de indução com rotor em gaiola de esquilo, mas o rotor tem enrolamentos, anéis e escovas. Estes enrolamentos são trazidos até aos anéis que fazem contacto com as escovas, podendo aceder aos enrolamentos rotóricos através da caixa de terminais com o propósito de lhes colocar uma resistência em série durante o arranque. A resistência é curto-circuitada após o arranque, ficando o rotor parecido com o rotor em gaiola de esquilo. Esta resistência que é colocado em série destina-se à diminuição da corrente de arranque, aumentando também o binário de arranque. A resistência diminui o binário nominal, por isso, é que é curto-circuitada. As escovas são uma desvantagem devido à necessidade de manutenção. No entanto, tem a vantagem de poder exercer o binário máximo durante o arranque, enquanto os motores com rotor em gaiola de esquilo só o conseguem a cerca de 80% da velocidade de sincronismo.

Este tipo de motor tem várias aplicações na indústria como:

- Cargas que requeiram elevado binário de arranque e uma baixa corrente de arranque;
- Cargas com elevada inércia;
- Cargas que necessitem de controlo de velocidade;
- Cargas que necessitam de aumento gradual do binário;
- Tapetes rolantes, guindastes, bombas, elevadores, compressores, etc.

2.4. Fontes de Calor

Sendo um motor uma máquina rotativa capaz de converter energia elétrica em energia mecânica, e tal como todas as máquinas, o motor não é ideal, uma vez que existe uma parte da energia elétrica absorvida que não é convertida em energia mecânica, sendo perdida de diferentes formas. Dos vários fenómenos elétricos e magnéticos que advêm do funcionamento do motor, surgem vários tipos de perdas, entre elas:

- Perdas por efeito Joule nos enrolamentos do estator e do rotor;
- Perdas por correntes de Foucault nas chapas magnéticas;
- Perdas magnéticas por histerese;
- Perdas mecânicas por atrito e ventilação.

Todas estas perdas, com a exceção das perdas por ventilação, são responsáveis pela produção de calor, provocando o aquecimento da máquina. As perdas por ventilação devem-se à quantidade de energia mecânica que é necessário para mover o ventilador, por isso não contribui para o aquecimento do motor. O ventilador tem o objetivo de refrigerar a máquina para que não haja deterioração das propriedades dos materiais usados na sua construção, pois, caso contrário, poderia levar à destruição da mesma.

O material mais sensível ao aumento da temperatura é o fio de cobre isolado utilizado no enrolamento do estator [14]. Por este motivo, é que o ponto mais quente está geralmente nas testas das bobinas dos enrolamentos estáticos. Em algumas situações, as condições ambientais do meio envolvente podem impor limites de temperatura inferiores aos impostos nas condições normais, como por exemplo, temperatura ambiente elevada (geralmente os MIT funcionam normalmente até uma temperatura ambiente máxima de 40°C), funcionamento a elevadas altitudes, zonas muito húmidas e/ou com muita poeira, etc.

2.5. Influência da temperatura

A temperatura determina diretamente a vida útil nas máquinas elétricas, pois afeta o isolamento dos enrolamentos e o lubrificante dos rolamentos. Por isso, as temperaturas elevadas são uma das principais causas da falha no isolamento dos enrolamentos. Em motores pequenos este é um dos principais problemas. Segundo um estudo do EPRI (Electric Power Research Institute), as falhas nos enrolamentos representam cerca de 36% do total [15, 16].

Acima de uma determinada temperatura, o isolamento envelhece a uma taxa cada vez maior, sendo que a vida útil do isolamento diminui para metade por cada 10 °C de aumento de temperatura. Por exemplo, se o isolamento durasse 20000 horas a 155 °C, com um aumento de 10 °C passaria a 165 °C e duraria cerca de 10000 horas. A partir do momento em que ocorre a deterioração do isolamento, torna-se irreversível [17]. Isto demonstra a importância do projeto da máquina e também do estudo do seu comportamento térmico.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as temperaturas máximas a que os motores podem ser sujeitos dependendo da sua classe de isolamento. As classes de isolamento dependem dos materiais utilizados. Na Figura 2.4 é apresentado o tempo de vida útil do isolamento em função da temperatura, demonstrando assim a influência do aumento da temperatura na diminuição do tempo de vida útil dos isolamentos e, conseqüentemente dos enrolamentos.

Tabela 2.1: Classes de isolamento dos MIT

Classes de isolamento	Temperatura (°C)
A	105
B	130
F	155
H	180

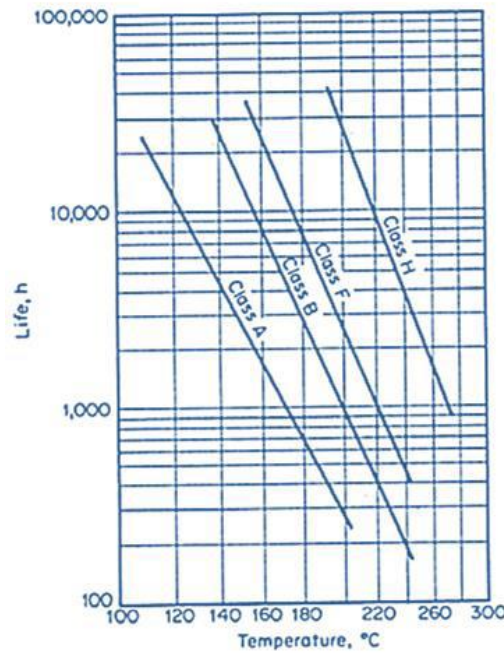


Figura 2.4: Tempo de vida do isolamento em função da temperatura [18]

2.6. Avarias mais comuns dos MIT

Os MIT são bastantes robustos, no entanto estão sujeitos a vários tipos de avarias, estando estas associadas a falhas que podem ter origem interna (mecânicas ou elétricas) ou externa [19]. Existem várias razões para haver falhas, tais como, imprecisões no processo de fabrico e/ou montagem, má instalação, ambiente de trabalho desadequado, tipo de cargas a que é sujeito e a manutenção que se executa. As falhas podem ser divididas em 4 grupos: mecânicas, elétricas, térmicas e ambientais [5].

As avarias mecânicas provocam muitas vezes danos de isolamento, devido ao movimento das espiras e aos toques do rotor no estator (dano nos rolamentos ou empenos no veio). As avarias elétricas devem-se ao dielétrico de alguns componentes elétricos, quando os materiais passam de não condutores a condutores. Por sua vez, as falhas térmicas afetam grandemente o tempo de vida

da máquina. Por exemplo, uma subida de temperatura de 10°C diminui a vida do isolamento em 50% [5]. Outro problema é o sobreaquecimento que ocorre devido aos desequilíbrios de fases (como um aumento da tensão de uma das fases em relação às outras), falha no sistema de refrigeração ou temperatura ambiente elevada. As falhas ambientais devem-se à limpeza do meio onde a máquina está inserida, humidade, poeira, etc.

Na Figura 2.5 estão representadas as causas das falhas dos motores de indução trifásicos. As falhas mais comuns são os curto-circuitos entre fases ou entre espiras (consequência de falhas de isolamento elétrico), ligações erradas entre enrolamentos, resistência elevada no contacto entre condutores de bobinas da mesma fase, circulação de correntes nos rolamentos e no veio (motores alimentadas por conversores de potência), problemas na ligação à terra, falhas nos rolamentos, barras rotóricas partidas, danificação do circuito magnético (deterioração das propriedades magnéticas devido a temperaturas elevadas, ambientes agressivos, etc.), anéis partidos nas extremidades da gaiola rotórica, entreferro não uniforme, veios torcidos, deslocamento do veio (axial, radial, desalinhamentos).

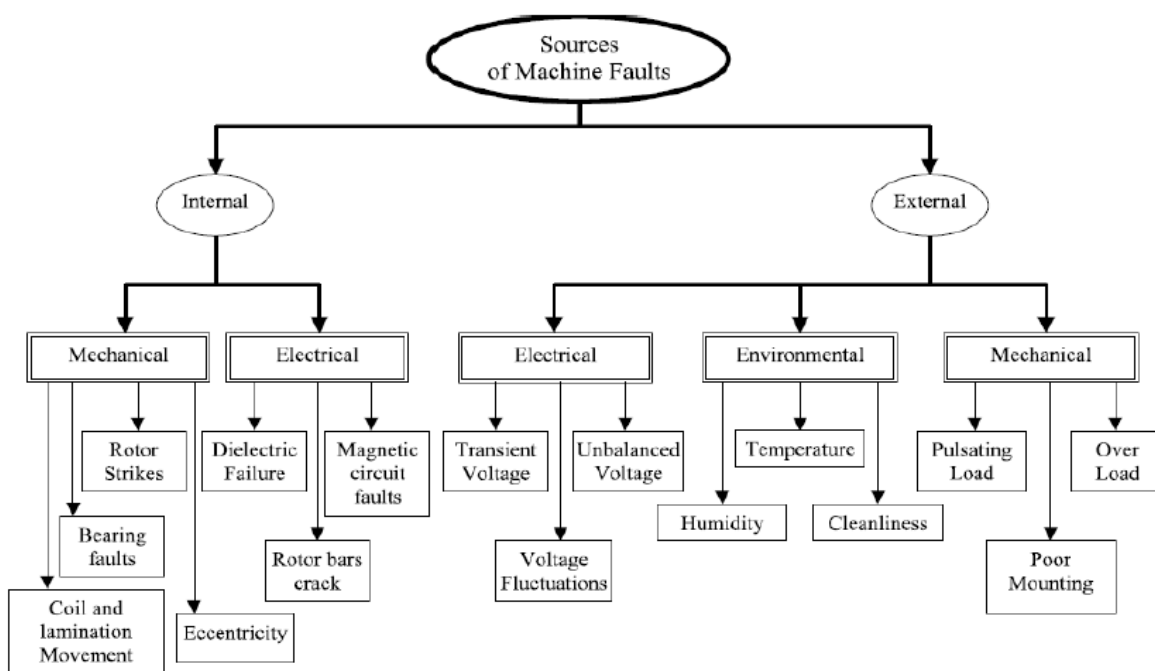


Figura 2.5: Causas das avarias nos motores de indução trifásicos

2.6.1. Desequilíbrio do rotor

O desequilíbrio de massas no rotor acontece após um longo período de operação, a distribuição irregular de massas com o aumento da velocidade causa uma vibração excessiva, que

resulta numa variação constante do entreferro, caso este problema persista pode provocar o empeno do veio. No entanto, o desequilíbrio do rotor ocorre principalmente durante a sua produção [5].

As causas principais do desequilíbrio do rotor são:

- Defeito de fabrico;
- Desalinhamento interno ou veio empenado.

2.6.2. Barras rotóricas partidas

Este problema só acontece nos motores com rotor em gaiola de esquilo, pois esta avaria acontece nas barras da gaiola (quer estejam partidas, fraturadas ou dessoldadas). Esta avaria pode dever-se a um defeito de fabrico ou a arranques e variações de carga constantes. A avaria é válida para qualquer defeito na estrutura, tanto nas barras como nos anéis.

No caso de uma das barras partir, as barras adjacentes passam a suportar correntes mais elevadas, levando a um aumento da temperatura. Se o motor continuar a funcionar nestas condições as barras saudáveis também poderão partir. As barras partidas causam assimetrias na resistência e na indutância de cada uma das fases do rotor, o que provoca assimetrias no campo eletromagnético entre o estator e o rotor.



Figura 2.6: Barras rotóricas partidas

Há várias causas para as barras partirem, entra elas estão:

- Defeitos de fabrico;
- Stresses térmicos;
- Stresses mecânicos causados por falha nos rolamentos;

- Arranques frequentes do motor à tensão nominal;
- Fadiga do metal das barras rotóricas.

2.6.3. Avarias nos enrolamentos do estator

As avarias no estator estão relacionadas com uma falha no isolamento dos enrolamentos. Há diferentes tipos de falhas nos enrolamentos do estator, tais como o curto-circuito entre espiras da mesma fase, curto-circuito entre bobinas da mesma fase, curto-circuito entre espiras de fases diferentes, curto-circuito entre os enrolamentos e o núcleo do estator ou circuito aberto quando se interrompe um enrolamento.

Quando há um curto-circuito, a corrente vai atingir valores mais elevados que no funcionamento normal. O aumento da corrente vai, por sua vez, provocar um aumento na temperatura que diminui o isolamento, até que as bobinas entram em contacto. Estas falhas resultam de uma assimetria na impedância da máquina causando correntes desequilibradas, provocadas pelas correntes de sequência negativa. No entanto, as correntes de sequência negativa também podem ser causadas por desequilíbrio de tensão, saturação da máquina, etc. [5] Geralmente o curto-circuito começa com poucas espiras da mesma fase, mas acaba por provocar um desequilíbrio de fases, que evolui e pode danificar irremediavelmente o motor.

As causas dever-se-ão essencialmente a:

- Stresses mecânicos;
- Stresses elétricos (transitórios de tensão);
- Stresses térmicos (sobreaquecimento);
- Stresses ambientais.



Figura 2.7: A imagem do lado esquerdo representa um curto-circuito de espiras que poderá levar à imagem do lado direito que representa um curto-circuito de uma bobina

2.6.4. Desequilíbrio de fases

Pode dizer-se que existe um desequilíbrio de fases quando uma das fases tem uma tensão diferente das outras duas fases, podendo ser maior ou menor. Com a variação da tensão há também uma variação da corrente, o que pode provocar danos, pois vai variar a temperatura. Caso a temperatura aumente poderá ocorrer danos no isolamento, podendo originar um curto-circuito.

2.6.5. Falta de uma fase

A falta de uma fase pode ser consequência de um curto-circuito ou de um circuito aberto. Os motores sem uma fase podem conseguir arrancar, no entanto com um grande ruído, mas não chega a atingir a velocidade nominal. No caso de o motor já estar a funcionar, a velocidade diminui. No entanto, em ambos os casos o motor vai acabar por parar. As fases ativas vão ficar com uma corrente muito superior ao funcionamento normal para compensar a falta de uma fase, o que faz com a temperatura aumente bastante, danificando o isolamento que poderá levar ao aparecimento de um curto-circuito.

2.6.6. Avarias nos rolamentos

Os rolamentos são usados para suportar o veio, sendo usados dois conjuntos, um em cada uma das extremidades do MIT. Os rolamentos servem para manter o rotor no lugar, ajudando-o a rodar livremente, diminuindo a fricção. Um rolamento consiste num anel interior e num anel exterior, tendo pelo meio um conjunto de esferas como se pode ver na Figura 2.8.

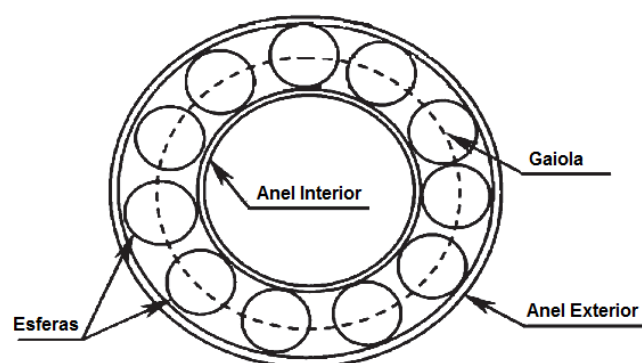


Figura 2.8: Rolamento esférico [19]

O anel interior está preso no veio do motor, por isso a carga é transmitida através das esferas, reduzindo a fricção. Os rolamentos são os componentes mais substituídos nos motores de indução, pois são os mais frágeis. Por este motivo é importante detetar a existência de avarias.

As principais causas dos danos nos rolamentos são:

- Carga excessiva;
- Corrosão;
- Falta de lubrificação;
- Mau alinhamento dos rolamentos;
- Falha devido à muita utilização.

Como consequência das avarias nos rolamentos surgem as vibrações mecânicas, o ruído e o aumento da fricção que provoca o aumento da temperatura.

2.6.7. Refrigeração insuficiente

As causas da refrigeração insuficiente podem ser a passagem obstruída, turbinas ou bomba de água corroída, funcionamento do motor no sentido contrário ao de rotação (válido só para motores com sentido de rotação único). Os motores podem ser refrigerados a ar ou a líquido.

2.6.8. Excentricidade rotórica

A excentricidade é uma desigualdade no entreferro (espaço que existe entre o estator e o rotor) e origina forças radiais desequilibradas que podem causar contacto entre o estator e o rotor, provocando danos nos dois. A excentricidade pode ser estática, dinâmica ou mista (junção entre a excentricidade estática e a dinâmica). A excentricidade vai ser aprofundada mais à frente, pois é o tema principal desta dissertação.

3. Excentricidade

Existe excentricidade no motor quando o entreferro deixa de ser uniforme. A excentricidade pode ser estática, dinâmica ou mista (combinação entre a excentricidade estática e dinâmica).

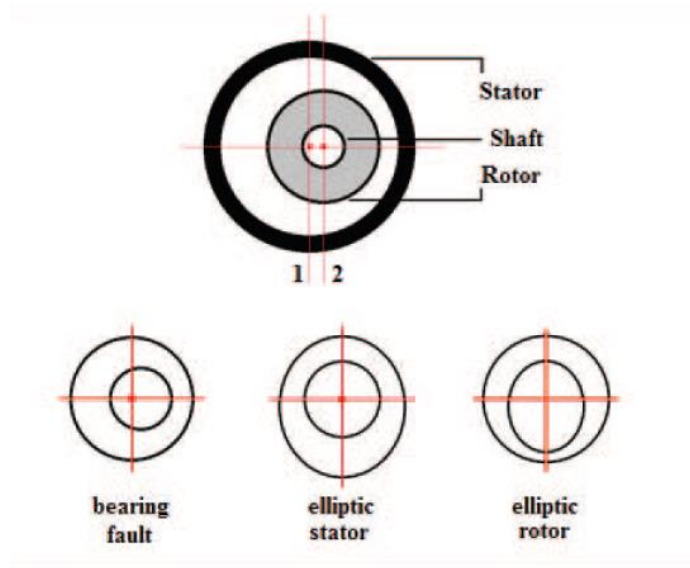


Figura 3.1: Causas de excentricidade [7]

A desigualdade no entreferro está ligada ao processo de fabrico, às características de desenho do motor e/ou às condições de funcionamento. As causas da excentricidade são uma falha nos rolamentos (o centro do rotor não está alinhado com o centro do estator), o estator e/ou o rotor não são perfeitamente cilíndricos (são elípticos) ou o veio curvo [7].

Este tipo de avaria pode originar vários problemas, como por exemplo tensão no entreferro e corrente de linha instáveis, fluxo no entreferro desequilibrado, aumento do binário pulsante, diminuição do binário médio, diminuição do rendimento (consequente aumento das perdas), sobreaquecimento e aumento do ruído.

3.1. Excentricidade estática

A excentricidade estática acontece quando o centro geométrico do rotor se encontra deslocado em relação ao centro geométrico do estator, sendo que o rotor continua a rodar sobre o seu próprio eixo, ou seja, o entreferro não é igual para todos os pontos do rotor. As causas típicas da excentricidade estática são o posicionamento incorreto do rotor ou o estator elíptico, devido à sua má colocação ou conceção.

Em consequência da excentricidade estática é originada uma atração magnética desequilibrada entre o rotor e o estator que poderá provocar uma excentricidade dinâmica.

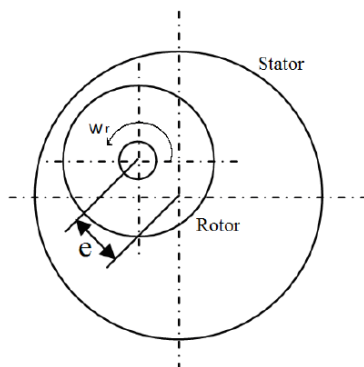


Figura 3.2: Excentricidade estática [20]

3.2. Excentricidade dinâmica

A excentricidade dinâmica é definida como a alteração longitudinal do entreferro, ou seja, quando o centro do rotor não é o centro de rotação. Isto significa que este tipo de excentricidade é uma função do tempo e do espaço. As principais causas da excentricidade dinâmica são o veio empenado, o desgaste dos rolamentos e a expansão assimétrica do rotor com o aumento de temperatura. Como no caso da excentricidade estática, também a excentricidade dinâmica provoca uma atração magnética desequilibrada entre o rotor e o estator que poderá provocar fricção entre o rotor e o estator, causando danos nos enrolamentos ou no núcleo.

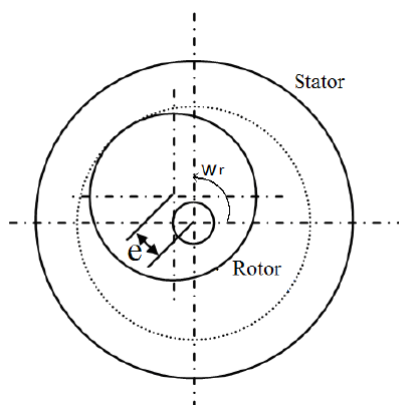


Figura 3.3: Excentricidade dinâmica [20]

3.3. Excentricidade mista

A excentricidade mista ocorre quando no motor estão presentes os outros dois tipos de excentricidade (a excentricidade estática e a dinâmica), não coincidindo o centro do rotor com o

centro de rotação, ao mesmo tempo que se encontra deslocado do centro do estator, como está ilustrado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Excentricidade mista [7]

3.4. Influência da excentricidade

A excentricidade leva ao aparecimento de forças distribuídas ao longo do perímetro interno do estator, sendo a resultante diferente de zero, pelo que surge uma força magnética desequilibrada. A força resultante está sempre direcionada para a posição de entreferro mínimo. No caso da excentricidade estática, esta força é constante no espaço e no tempo, havendo, por isso, a possibilidade de causar deflexão do rotor. No caso da excentricidade dinâmica, a força resultante roda com o rotor, causando vibração que se transmite à base do motor [4]. Esta vibração vai traduzir-se num aumento do ruído produzido pelo motor e também num aumento da temperatura. Para o aumento da temperatura também tem influência a fricção entre o estator e o rotor.

4. Métodos de quantificação de severidade de avarias

Os métodos de quantificação de severidade de avarias são métodos que também são usados para o diagnóstico de avarias com a máquina online. No caso desta dissertação estes métodos de diagnóstico foram utilizados com o objetivo de quantificar a severidade da avaria (a excentricidade). Os métodos utilizados foram:

- A MCSA (Motor Current Signature Analysis);
- A AEVP (Análise Estendida do Vetor de Park).

4.1. Motor Current Signature Analysis

Este método monitoriza a corrente de alimentação do motor (independente dos parâmetros do motor e da temperatura), analisa as formas de onda utilizando algoritmos de processamento de sinal, como a FFT (Fast Fourier Transform), a STFT (Short-Time Fourier Transform), a DWT (Discrete Wavelet Transform), a CWT (Continuous discrete Wavelet Transform) [21]. Pode ser utilizado para detetar avarias nos rolamentos, no rotor e nos enrolamentos estáticos.

Utilizou-se a FFT como método de despiste para outras avarias com por exemplo problemas no rotor. Caso existissem esses problemas, então apareceria uma componente dada pela equação (4.1), onde f_{av} representa a frequência da avaria, s o deslizamento e f_s a frequência da corrente de alimentação.

$$f_{av} = (1 \pm 2s) * f_s \quad (4.1)$$

4.2. Análise do Vetor de Park

Este método servirá apenas para verificar se o mecanismo de excentricidade utilizado funciona corretamente e consiste na conversão das correntes em eixo abc para eixo dq , dada por:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Em funcionamento normal, o vetor de Park tem as seguintes componentes:

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} i_+ \sin(\omega t) \quad (4.3)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} i_+ \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4.4)$$

onde i_+ representa o valor máximo da sequência positiva da corrente (A), ω a frequência angular de alimentação (rad/s) e t a variável tempo (s) [22]. A representação do vetor de Park será uma circunferência centrada na origem dos eixos, tal como mostra a .

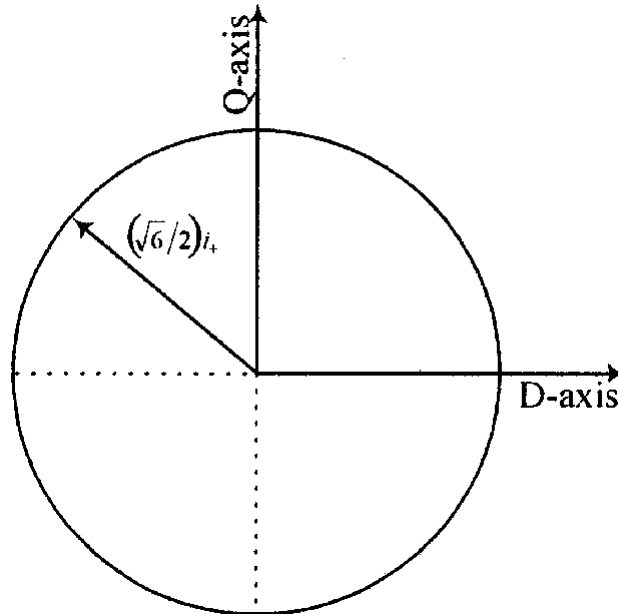


Figura 4.1: Representação do Vetor de Park para o funcionamento normal

Se existir uma avaria, então as equações (4.3) e (4.4) deixam de ser válidas, pois as correntes irão ter outras componentes para além da componente de sequência positiva, deixando também a representação do vetor de Park de ser uma circunferência.

Um exemplo do resultado obtido para o vetor de Park para o motor a funcionar em vazio e sem excentricidade encontra-se na Figura 4.2.

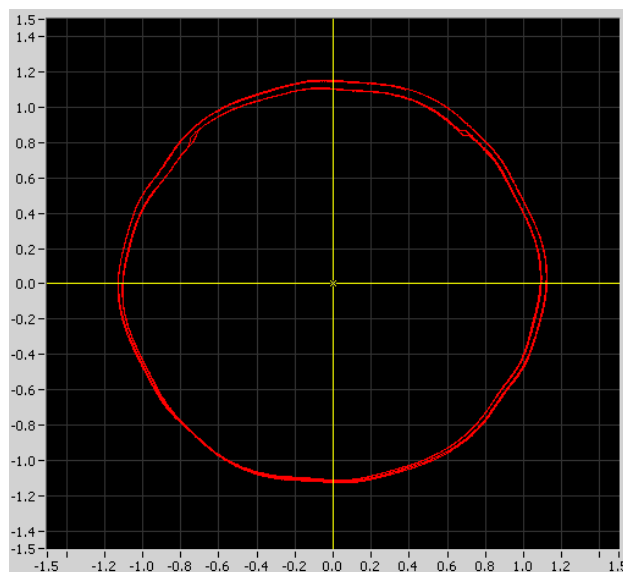


Figura 4.2: Representação do vetor de Park para o motor a funcionar em vazio e sem excentricidade imposta pelo mecanismo

O resultado obtido na Figura 4.2 é semelhante ao da Figura 4.1 que é a situação ideal. No entanto há um ligeiro desfasamento entre as duas circunferências, o que pode indicar uma outra avaria ou uma ligeira excentricidade que não é controlada pelo mecanismo.

4.3. Análise Estendida do Vetor de Park

O método AEVP consiste na análise espectral do sinal do vetor de Park da corrente. A análise da localização das bandas laterais é geralmente usada para detetar barras rotóricas partidas, curto-circuitos e excentricidade. As bandas laterais que geralmente são procuradas situam-se perto dos 2-4 Hz, 25 Hz e 100 Hz para uma frequência de alimentação de 50 Hz, dependendo das avarias existentes no motor.

Alguns métodos não são eficazes no caso de constantes variações de binário e de carga (funcionamento em condições não estacionárias). Foi então necessário encontrar alternativas como a AEVP.

Este método consiste na análise do módulo do vetor de Park. Na Figura 4.3 está representado o módulo do vetor de Park para a situação em que não há excentricidade nem carga aplicada ao motor.

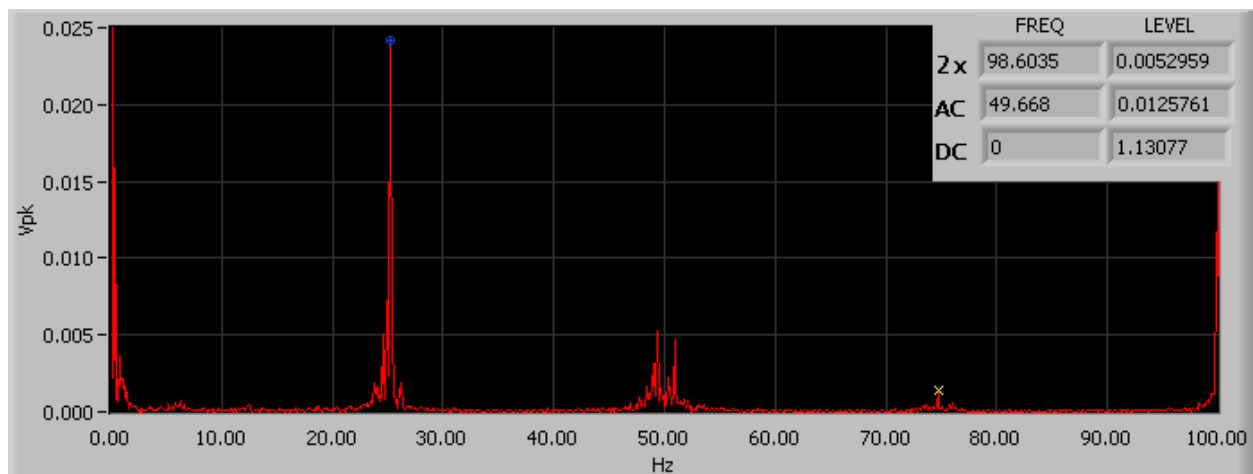


Figura 4.3: Representação do módulo do vetor de Park sem excentricidade e com o motor a funcionar em vazio

Este resultado idealmente não deveria ter a componente dos 25 Hz uma vez que não está aplicada nenhuma excentricidade pelo mecanismo, no entanto tal como no caso do vetor de Park, é possível que exista alguma excentricidade provocada pelo uso do motor ou até pelo processo de fabrico do mesmo.

O método permite calcular um fator de severidade para quantificar a gravidade da avaria. Este fator calcula-se através do rácio entre a componente que se pretende analisar (neste caso a componente próxima dos 25 Hz) e o valor *dc*.

5. Preparação da bancada de trabalho experimental

Antes de iniciar a realização de ensaios foi necessário proceder à montagem do motor e à sua colocação na base do dinamómetro de histerese. Este trabalho inicial consistiu na adaptação dos eixos das máquinas, já que havia uma diferença de alturas entre o veio do motor e o veio do dinamómetro.

5.1. Montagem

Na montagem foi preciso criar uma base para elevar o motor, pelo que foram utilizadas barras de ferro de 10 mm de espessura, como se pode ver Figura 5.1. Como o motor era mais comprido que a base do dinamómetro, foi necessário colocar dois calços de madeira para que as barras não dobrassem, e também para absorver alguma da vibração.

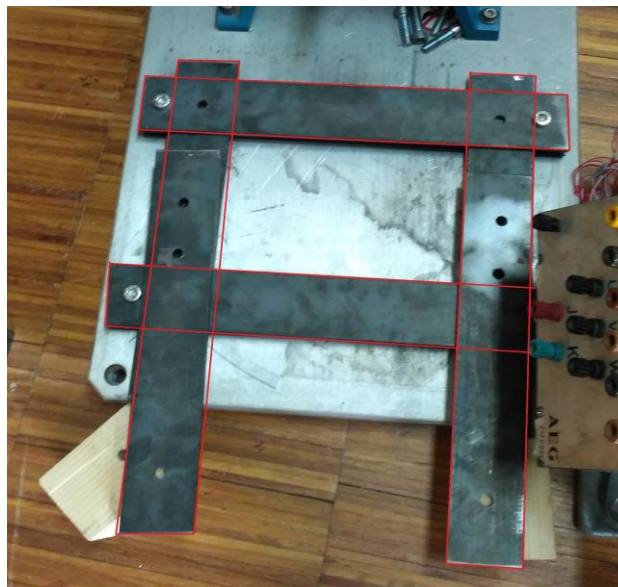


Figura 5.1: Montagem das barras de ferro

Em seguida apresentam-se os vários constituintes do motor de indução trifásico utilizado para a realização dos ensaios. Na Figura 5.2 mostra-se o rotor utilizado nos ensaios experimentais. A carcaça do motor está representada na Figura 5.3, enquanto que as suas tampas são representadas na Figura 5.4 e na Figura 5.5. O mecanismo que regula a excentricidade, mostrado na Figura 5.6, permite regular a excentricidade estática, dinâmica e mista, através de quatro anéis concêntricos, dois para regular a excentricidade estática (anéis exteriores) e dois para regular a excentricidade dinâmica (anéis interiores). A regulação da excentricidade é feita através do deslocamento dos anéis correspondentes à excentricidade pretendida. A Figura 5.7 apresenta o mecanismo que regula a excentricidade estática, o qual fica posicionado na abertura das tampas. No interior do mecanismo que regula a excentricidade estática fica posicionado o mecanismo de excentricidade

dinâmica que está representado na Figura 5.8, em conjunto com os rolamentos. O mecanismo de excentricidade dinâmica e os rolamentos encontram-se no mesmo componente. Para fixar o mecanismo que regula a excentricidade estática às tampas, foram utilizados os anéis de fixação da Figura 5.9.



Figura 5.2: Rotor



Figura 5.3: Carcaça do motor



Figura 5.4: Tampa do lado do ataque, do lado esquerdo a parte interior e do lado direito a parte exterior



Figura 5.5: Tampa do lado do ventilador, do lado esquerdo a parte interior e do lado direito a parte exterior

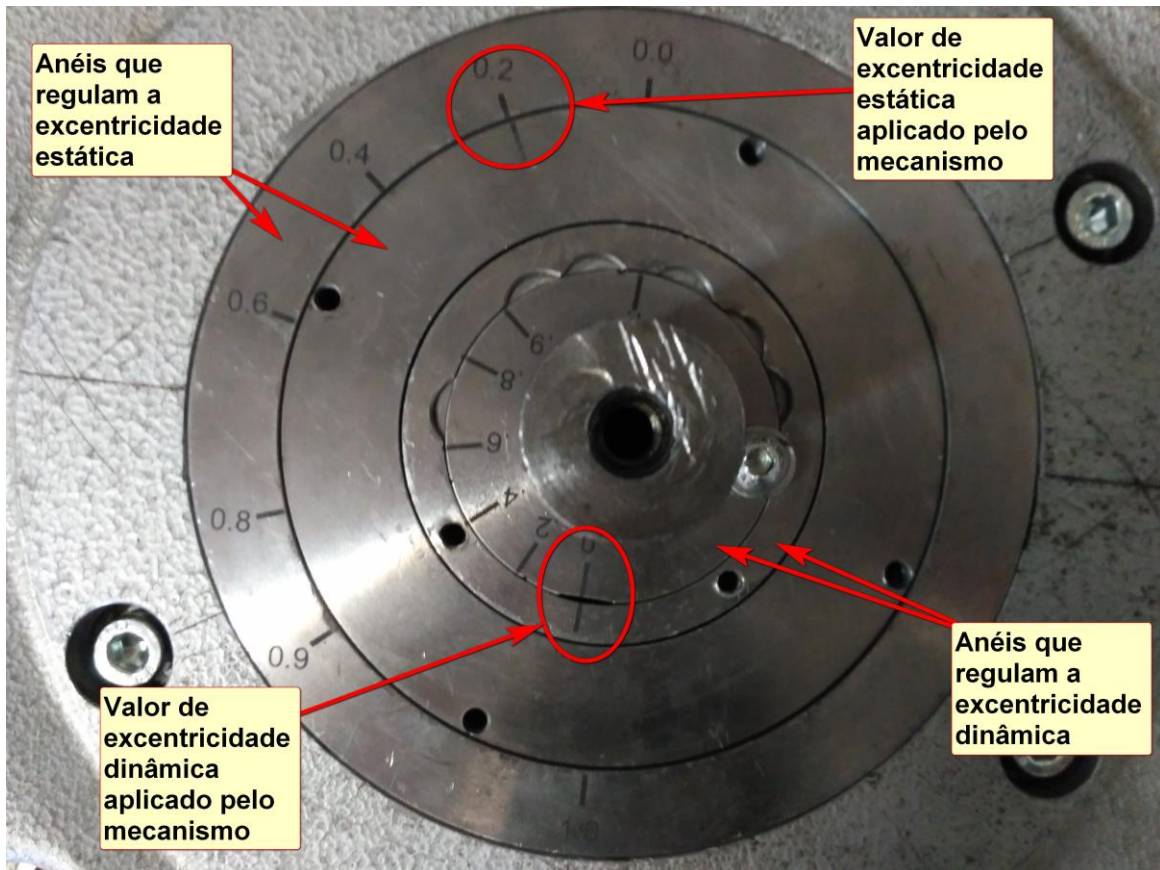


Figura 5.6: Mecanismo que regula a excentricidade



Figura 5.7: Mecanismo que impõe excentricidade estática



Figura 5.8: Mecanismo que impõe excentricidade dinâmica e rolamento



Figura 5.9: Anéis de fixação

Durante a montagem do motor foram colocados oito sensores de temperatura (termorresistências do tipo Pt-100). Um dos sensores destina-se à medida da temperatura ambiente e foi colocado a cerca de 2,5 m do conjunto motor-dinamómetro para não ser muito influenciado pelo calor produzido nesse conjunto. Os restantes sensores foram colocados no motor, estando um na carcaça do motor, quatro foram colocados nos enrolamentos estáticos, perto das testas das bobinas do lado do ataque (sensores 1 a 4), com um desfasamento de cerca de 90° entre eles, dispostos como se ilustra na Figura 5.10. Há ainda um sensor colocado no núcleo estático (sensor nº6) e outro também nos enrolamentos estáticos, perto das testas das bobinas do lado do ventilador (sensor nº5), tal como se vê na Figura 5.11.

Os sensores de temperatura estavam ligados a dois módulos NI WSN-3226 que transmitiam os valores por *wireless* para um módulo NI 9795, instalado na plataforma cRIO-9074 que, por sua vez enviava os valores das temperaturas para um PC, via Ethernet.

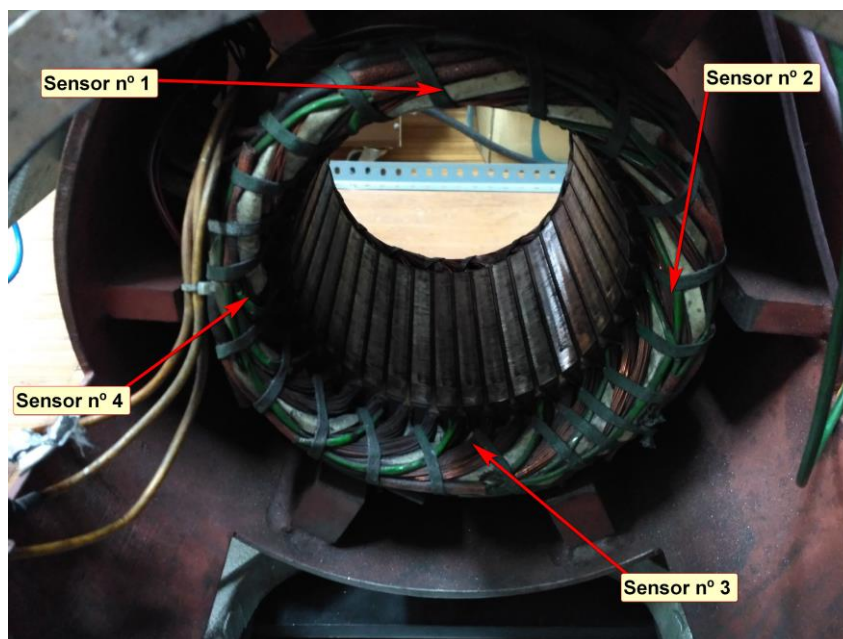


Figura 5.10: Posição dos sensores de temperatura do lado do ataque

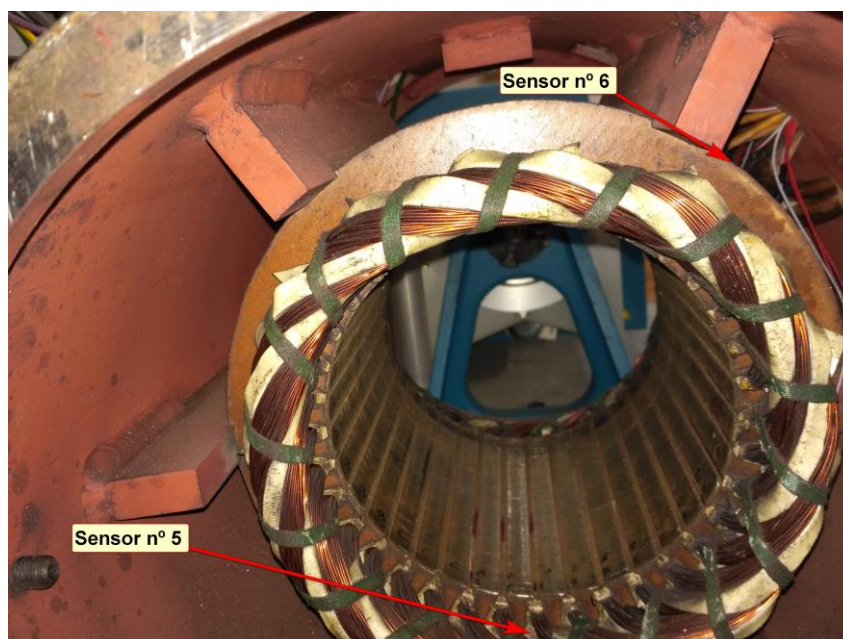


Figura 5.11: Sensor do lado da ventoinha e sensor colocado no núcleo

Após a montagem do motor na base, efetuou-se o seu acoplamento com o dinamómetro através de um acoplamento rígido. O dinamómetro destina-se exclusivamente a aplicar um binário resistivo controlado no veio do motor.



Figura 5.12: Acoplamento

5.2. Descrição do material utilizado na realização dos ensaios experimentais

O esquema da disposição da bancada de ensaios está representado na Figura 5.13. O analisador de potência utilizado foi o YOKOGAWA WT300. Este analisador de potência foi utilizado para ler os sinais de tensão e de corrente de alimentação, bem como o binário e a velocidade através dos sinais recebidos do dinamômetro, permitindo assim calcular as potências, o fator de potência, rendimento, etc.. Os sensores de tensão do analisador de potência têm como valores limite os 1100 V (eficazes) ou 1600 V (pico), sendo considerado o menor, da mesma forma os sensores de corrente têm limite de 33 A (eficazes) ou 90 A (pico). Os sinais de binário e velocidade variam entre os ± 5 VDC. Para a aquisição das correntes de alimentação do motor usaram-se dois sensores de corrente LEM RR3030 e para a aquisição das tensões de alimentação utilizaram-se dois sensores de tensão Tektronix P5200. Os sensores foram ligados a um módulo NI 9215 instalado na plataforma cRIO-9074 que enviava os sinais via Ethernet para um PC.

O dinamômetro de histerese foi o MAGTROL HD-815-8NA e destinava-se a aplicar um binário resistivo de referência no veio do motor. Este dinamômetro funciona até uma velocidade máxima de 12000 rpm, com uma potência máxima contínua de 6000 W e uma potência máxima de 7000 W durante 5 minutos. O binário aplicado pelo dinamômetro era controlado através do equipamento MAGTROL DSP6001. O dinamômetro necessitava de refrigeração aquando da aplicação de binário no motor e por isso foi necessário acoplar um ventilador.

Por sua vez o motor utilizado tinha uma potência nominal de 2 kW da AEG (características principais na Tabela 5.1), com os enrolamentos estáticos ligados em triângulo. O rotor do motor utilizado era um rotor bobinado, que se colocou em curto-circuito para a realização dos ensaios. O entreferro do motor tem 1,2 mm no caso do normal funcionamento do motor.

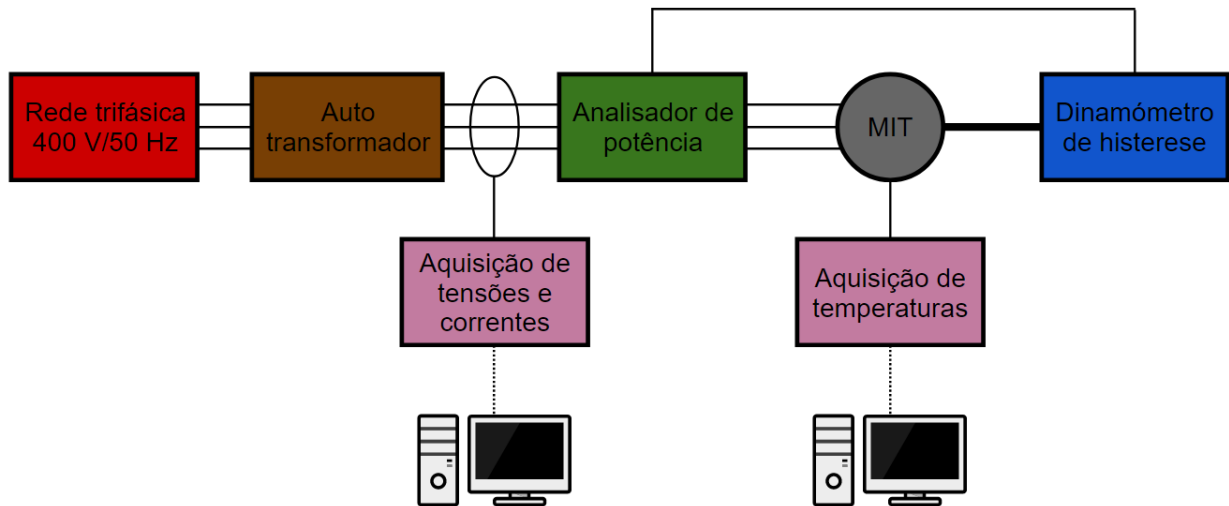


Figura 5.13: Esquema geral da bancada de trabalho

Tabela 5.1: Características principais do motor utilizado

Potência (kW)	2
Corrente (A)	7,8/4.45 (Δ/Y)
Tensão (V)	380/660 (Δ/Y)
Frequência (Hz)	50
Numero de pólos	4
Velocidade (rpm)	1467
Rendimento (%)	75
Fator de potência	0.52

Tabela 5.2: Resistência dos enrolamentos estáticos

$R_{UX} = 2,8 \Omega$
$R_{VY} = 2,6 \Omega$
$R_{WZ} = 2,6 \Omega$

6. Resultados e discussão

Foram realizados dois tipos de ensaios, os ensaios em que se adquiriram duas correntes de alimentação do motor para realizar o estudo baseado no método AEVP e os ensaios que seguiram a norma IEEE 112-2004 que diz que o término do ensaio deve ser quando a temperatura subir 1 °C ou menos em relação à temperatura ambiente num espaço de 30 minutos.

Os ensaios foram realizados para diferentes conjuntos de excentricidade. Os diferentes conjuntos de excentricidade foram os seguintes:

- Excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0;
- Excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0;
- Excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0;
- Excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2;
- Excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2;
- Excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4.

Para cada um destes conjuntos de excentricidade foram feitos ensaios com níveis de carga do motor 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, em relação à carga nominal. No total foram realizados 30 ensaios (6 conjuntos de excentricidade e 5 níveis de carga). Apenas foram realizados ensaios até um máximo de excentricidade de 0,4, pois ao colocar um valor de 0,6 de excentricidade o rotor não rodava, o que poderá dever-se a alguma excentricidade já existente e que não é controlada pelo mecanismo regulador utilizado.

6.1. Ensaio experimentais

Os ensaios tinham o objetivo de mostrar a influência da excentricidade no aumento da temperatura e nas diversas grandezas do motor. As temperaturas foram adquiridas a cada minuto através de 8 sensores que estavam ligados a dois módulos *wireless* referidos no capítulo 5.1. Estes módulos enviavam os sinais para um PC que continha um executável do software Labview como mostra a Figura 6.1 e que permitia analisar o desenvolvimento das temperaturas, as formas de onda da tensão e da corrente e os dados elétricos e mecânicos do motor. O analisador de potência calculou as potências (ativa, reativa e aparente) de entrada e o ângulo de fase φ . O analisador de potência apresenta os vários dados dispostos por várias páginas como é o exemplo da Figura 6.2. O binário aplicado pelo dinamómetro, a potência mecânica e a velocidade foram adquiridas através de controlador do dinamómetro.

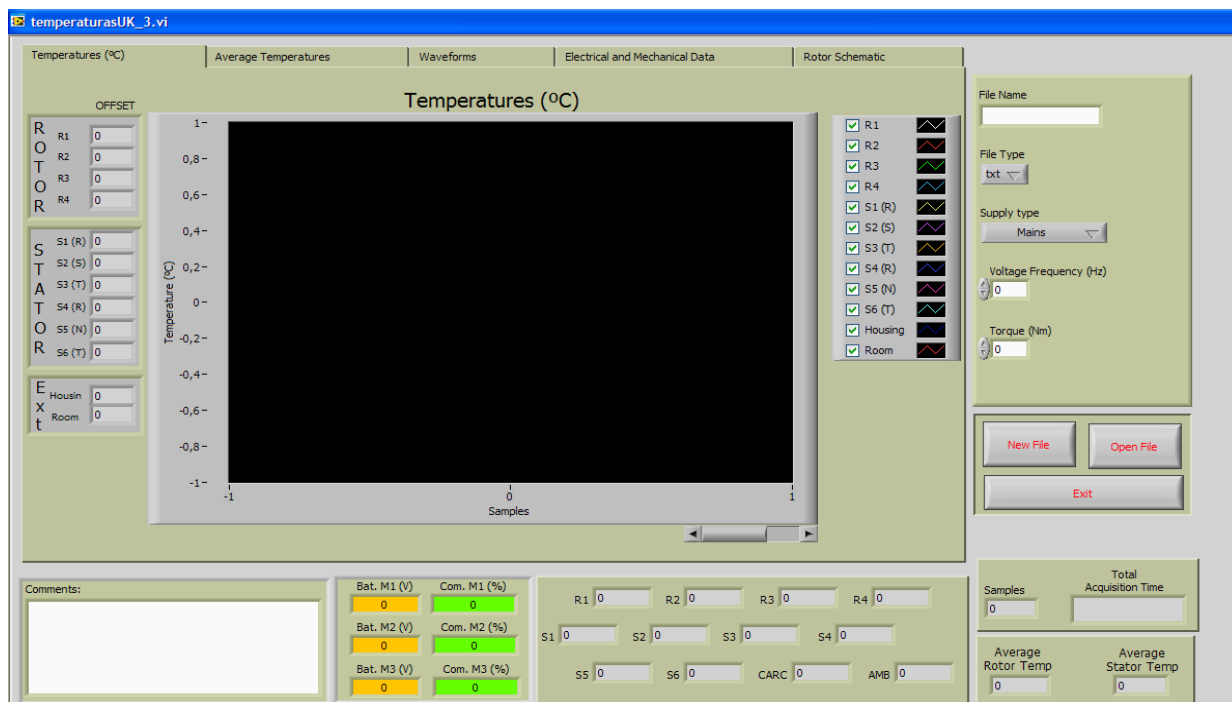


Figura 6.1: Software utilizado para registo dos dados obtidos nos ensaios térmicos



Figura 6.2: Exemplo das grandezas apresentadas no analisador de potência

A evolução das temperaturas representada na Figura 6.3 demonstra que os sensores mais próximos do centro do motor (sensores 1 a 5) apresentam maior temperatura. Os sensores 1 a 5 encontram-se nas testas das bobinas do estator e, por isso, registam temperaturas aproximadas.

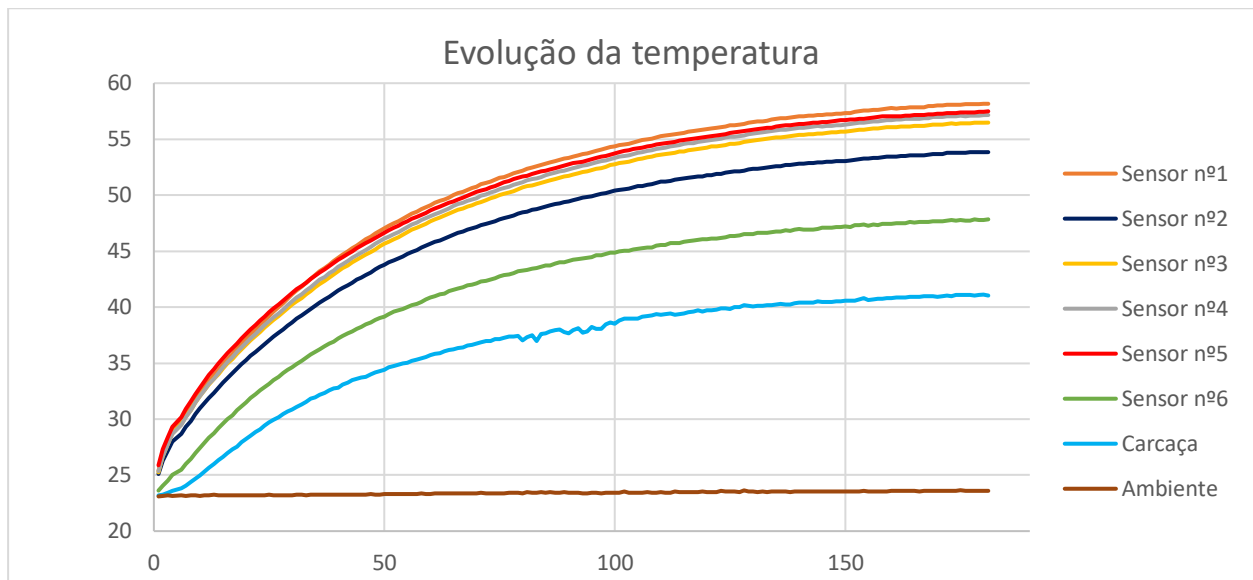


Figura 6.3: Evolução temporal das temperaturas nos vários sensores para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0, com o motor a funcionar em vazio

Na Figura 6.4 são apresentados os resultados obtidos correspondentes à diferença entre o ponto mais quente no fim dos ensaios e a temperatura ambiente. O ponto mais quente (PMQ) foi, em 28 dos 30 ensaios, o local onde se encontrava o sensor de temperatura nº 1. Nos outros dois ensaios (excentricidade estática 0, excentricidade dinâmica 0,2, nível de carga 25% e excentricidade estática 0,2, excentricidade dinâmica 0,2, nível de carga 75%), o sensor com a temperatura mais elevada foi o nº 5.

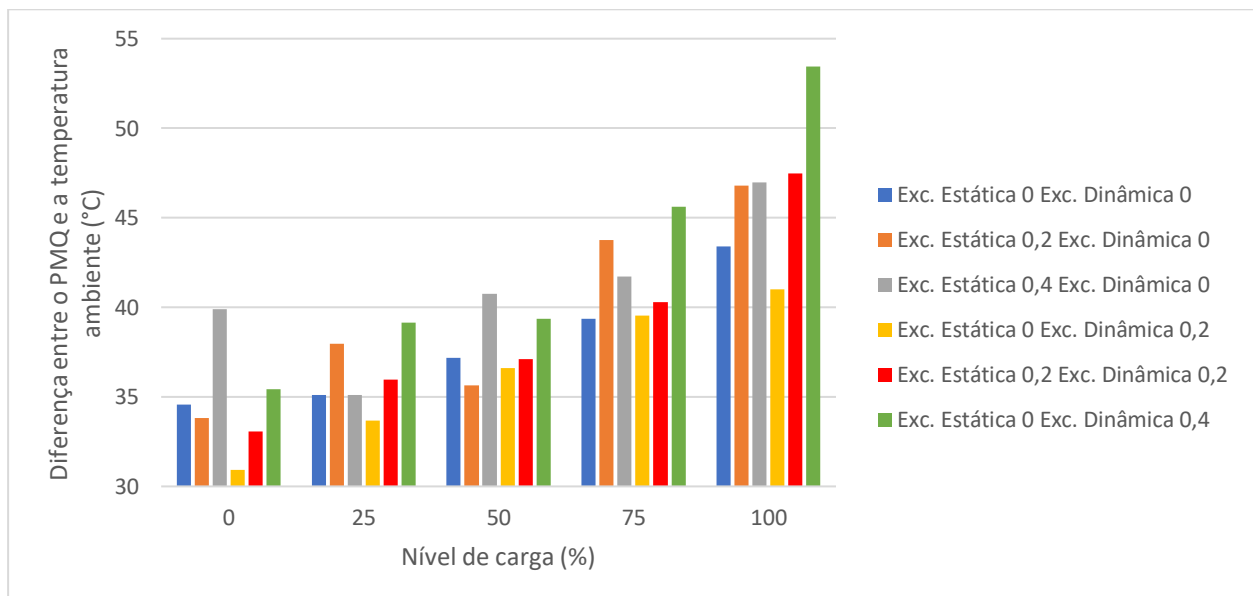


Figura 6.4: Representação da diferença entre o ponto mais quente no fim de cada ensaio e a temperatura ambiente em função do nível de carga e da excentricidade

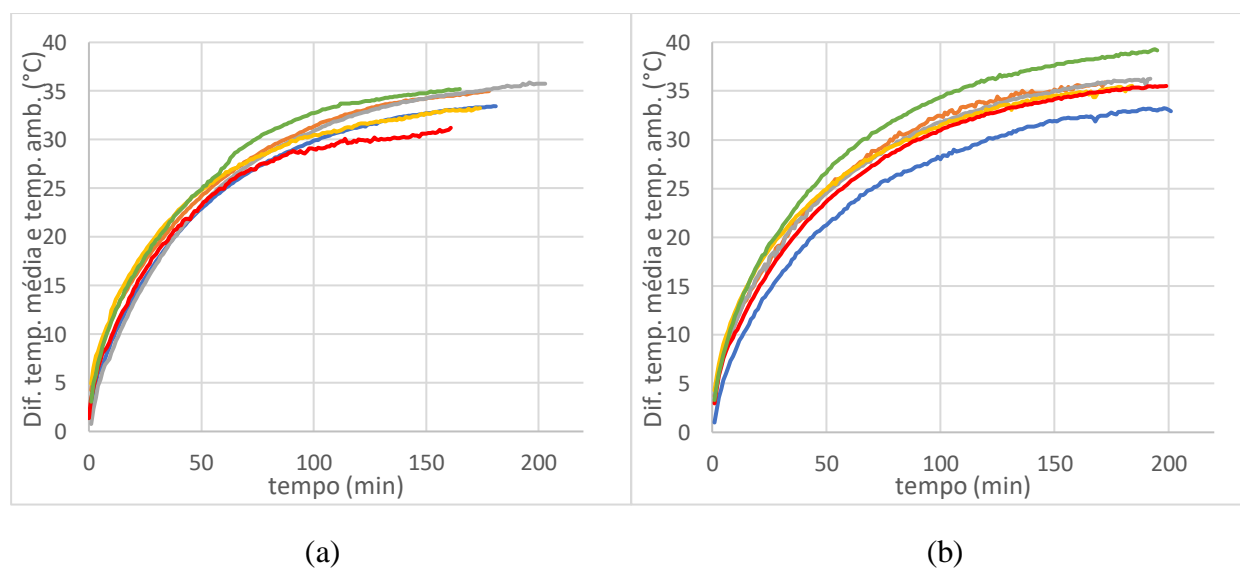
Ao analisar a Figura 6.4 pode dizer-se que, como era esperado, a temperatura aumenta à medida que aumenta o nível de carga, para a mesma excentricidade. Existem apenas duas situações

onde isso não acontece. Essas situações são os casos de excentricidade estática 0,2 para um nível de carga 25% e excentricidade estática 0,4 para um nível de carga 25%. O aumento da temperatura devido ao aumento da excentricidade nota-se para os níveis de carga mais elevados, sendo que para os 0% e 25% de carga não é possível tirar essa conclusão.

Com o aumento da excentricidade vai aumentar o desequilíbrio de forças, que por sua vez vai aumentar a vibração, podendo também existir fricção entre o estator e o rotor, no limite podem até tocar um no outro, aumentando assim a temperatura.

Através da análise do PMQ no estator pode verificar-se que a excentricidade dinâmica atinge temperaturas superiores às obtidas com excentricidade, podendo verificar-se o mesmo na Figura 6.5 que representa a evolução temporal entre a diferença da média das temperaturas dos sensores colocados no estator (sensores 1 a 5) e a temperatura ambiente. Os valores foram registados a cada minuto. Através dos gráficos consegue-se perceber que, como é normal e seria de esperar, as diferenças entre cada conjunto de excentricidade aumentam com o decorrer do tempo. As curvas não terminam todas no mesmo instante, uma vez que os ensaios tiveram diferentes durações.

Através da Figura 6.5 pode perceber-se que para um mesmo valor de excentricidade total (conjunto dos dois tipos de excentricidade), como são os casos da curva verde e da curva cinzenta, que para a curva verde a temperatura é mais elevada que na curva cinzenta, o que pode indicar que a excentricidade dinâmica provoca um maior aumento de temperatura no motor.



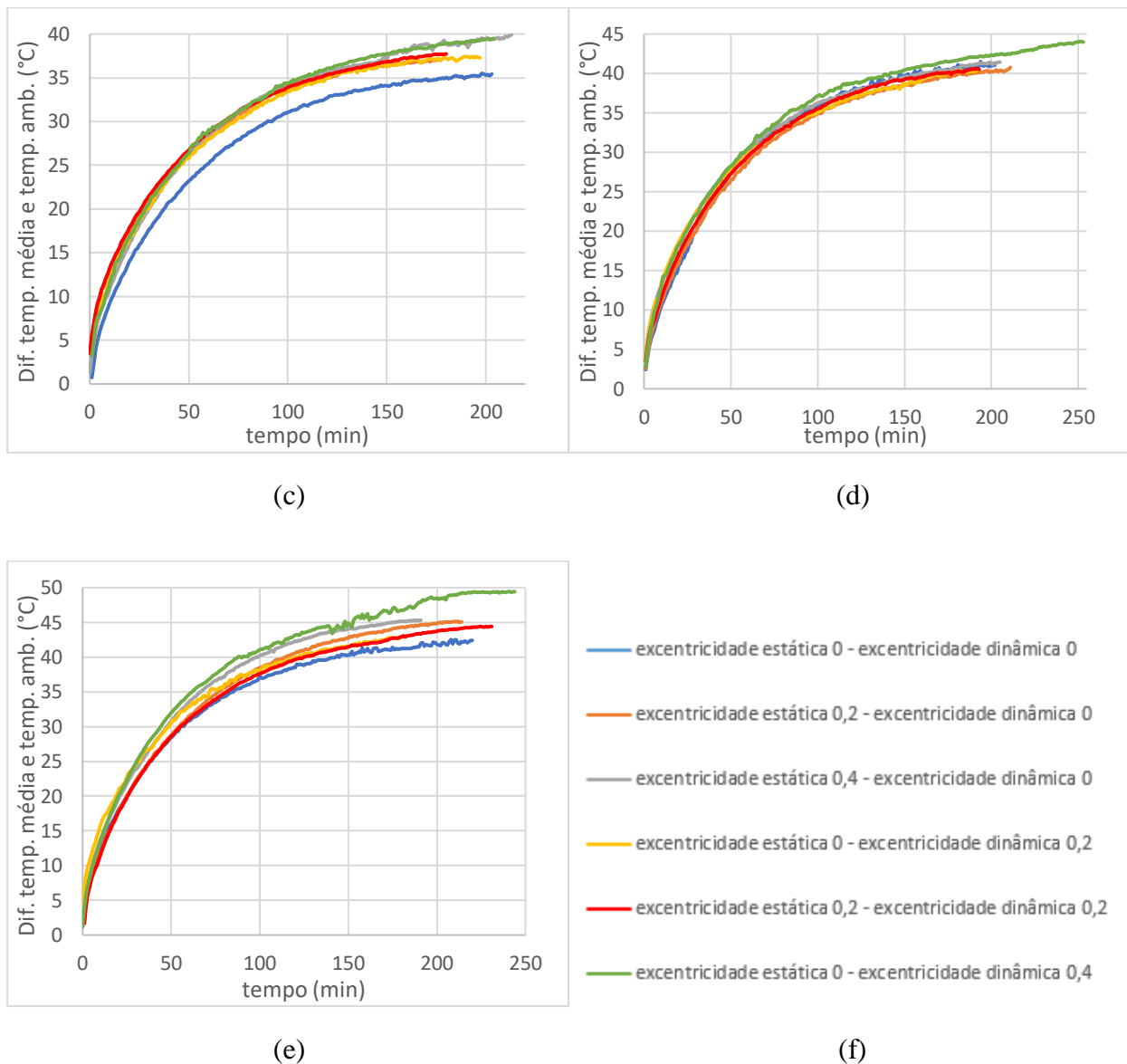


Figura 6.5: Gráficos que representam a evolução temporal da diferença entre a temperatura média dos sensores colocados nos enrolamentos estáticos e a temperatura ambiente por nível de carga: (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75%, (e) 100%, (f) legendas dos gráficos anteriores.

Na Figura 6.6 apresenta-se a média da potência ativa de entrada obtida para cada ensaio em função do nível de carga e do nível de excentricidade. Com base nestes resultados pode afirmar-se que existe um pequeno aumento da potência ativa com o aumento da excentricidade e, como era esperado, também com o aumento do nível de carga. Comparando os três tipos de excentricidade, para os casos em que o conjunto apresenta uma excentricidade de 0,4, pode afirmar-se que há um maior consumo de potência ativa no caso de excentricidade dinâmica 0,4 em relação à excentricidade estática 0,4 e excentricidade mista 0,4 (excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2), sendo que para os casos de excentricidade mista 0,4 os valores das potências são geralmente menores. Isto está de acordo com os gráficos das temperaturas, onde é possível verificar que as temperaturas para a excentricidade dinâmica são superiores às da

excentricidade estática que, por sua vez, são superiores às da excentricidade mista. Este aumento de potência ativa está ligado ao aumento das perdas provocadas pelo aumento da temperatura.

A média da potência reativa de cada ensaio está representada na Figura 6.7 e não segue qualquer padrão específico quer para o nível de carga, quer para o nível de excentricidade, variando entre os 4173 VAR e os 4313 VAR. A Figura 6.8 mostra a média da potência aparente, onde se pode verificar que há um aumento da potência aparente com o aumento da carga, no entanto nada se pode concluir quanto à variação do nível de excentricidade, devido à influência da potência reativa.

Para o cálculo da média das potências são tidos em conta os valores obtidos da potência instantânea a cada minuto da realização dos ensaios. Os valores de potência instantâneos são calculados através da média das três tensões e correntes e do ângulo φ , como mostram as equações (6.1), (6.2) e (6.3).

$$S = \sqrt{3} * \frac{U_{RS} + U_{ST} + U_{TR}}{3} * \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (6.1)$$

$$P = \sqrt{3} * \frac{U_{RS} + U_{ST} + U_{TR}}{3} * \frac{I_R + I_S + I_T}{3} * \cos \varphi \quad (6.2)$$

$$Q = \sqrt{3} * \frac{U_{RS} + U_{ST} + U_{TR}}{3} * \frac{I_R + I_S + I_T}{3} * \sin \varphi \quad (6.3)$$

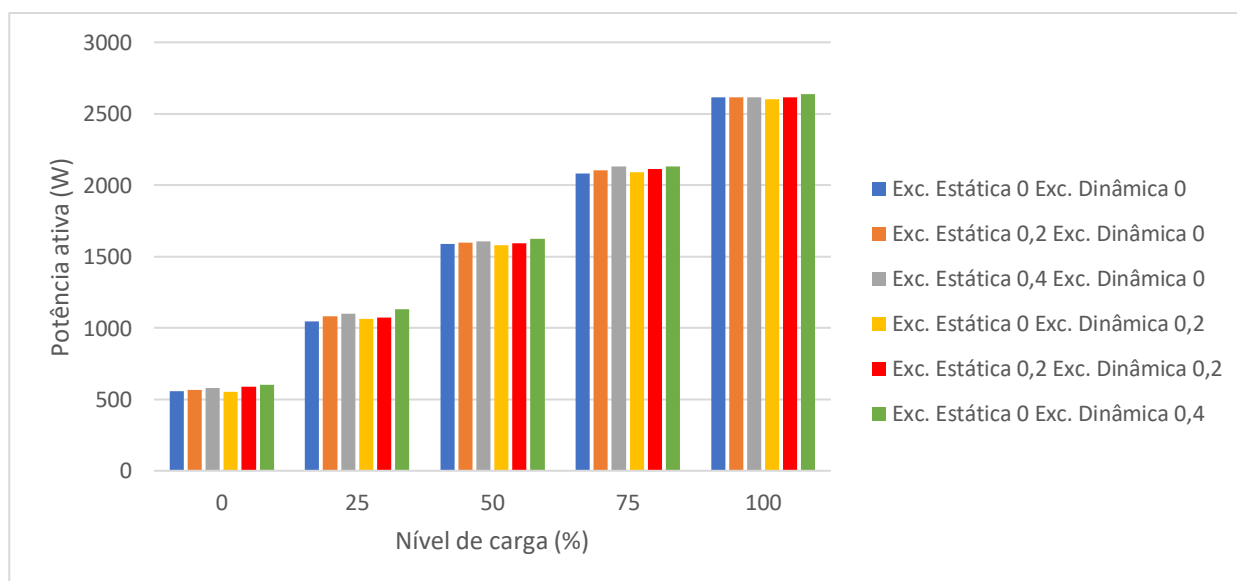


Figura 6.6: Representação da média da potência ativa em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade

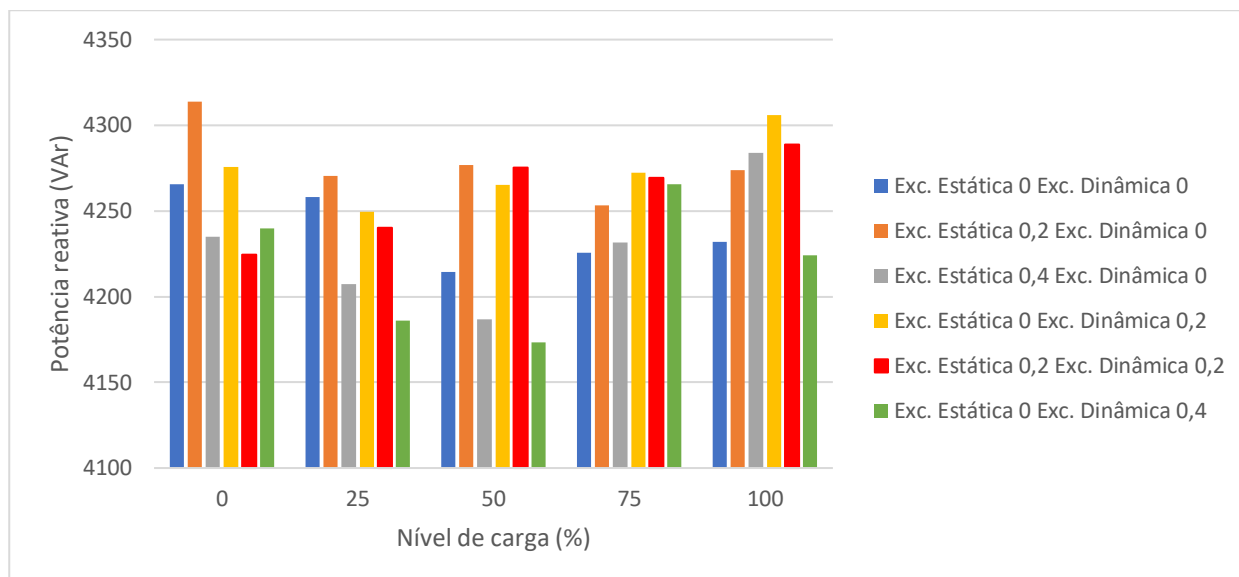


Figura 6.7: Representação da média da potência reativa em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade

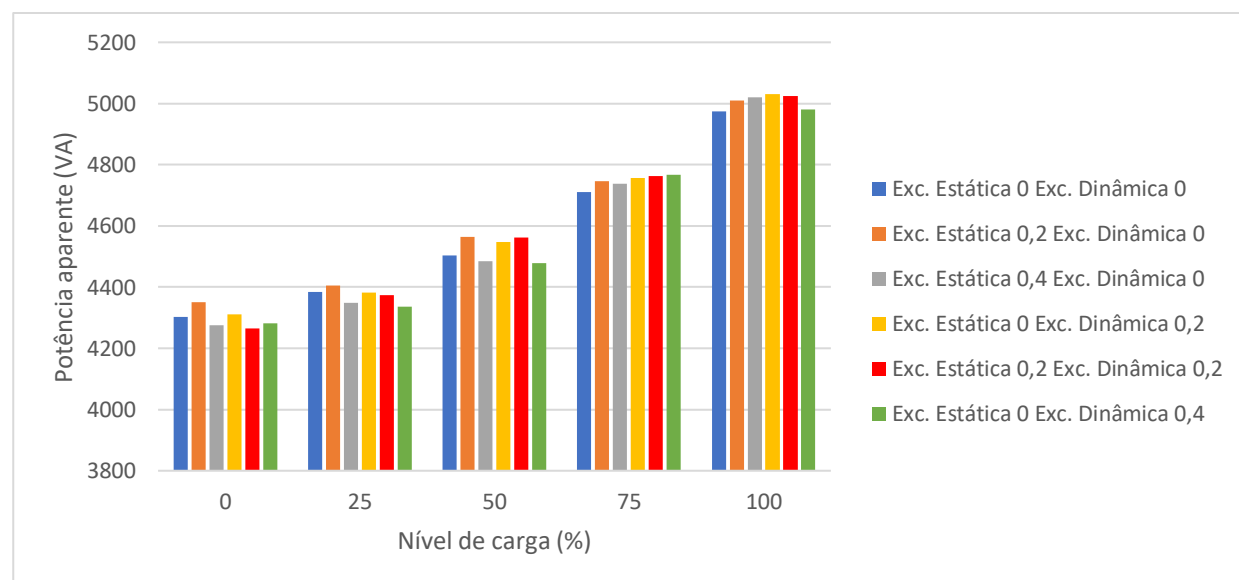


Figura 6.8: Representação da média da potência aparente em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade

A Figura 6.9 representa o deslizamento que aumenta com o aumento da carga, pois a velocidade diminui. Ao aumentar a excentricidade vai também aumentar o deslizamento, isto é evidente quando o motor funciona à carga nominal, pois já não pode absorver mais potência ativa, uma vez que a corrente já atingiu o valor nominal e, por isso, a velocidade vai diminuir.

O rendimento do motor apresenta-se na Figura 6.10 e com o motor a funcionar em vazio pode considerar-se nulo, pois a potência absorvida é utilizada pelo motor unicamente para satisfazer as perdas. Com o aumento do nível de carga vai também aumentar o rendimento do motor. Ao aumentar a excentricidade há uma ligeira diminuição do rendimento, mas não muito significativa, por exemplo com 75% da carga nominal e nos ensaios de excentricidade estática 0,

excentricidade dinâmica 0 e excentricidade estática 0,4, excentricidade dinâmica 0, o rendimento diminui de 71,93 para 70,35. Comparando a excentricidade estática com a excentricidade dinâmica, apresentam rendimentos semelhantes para níveis de carga elevados e ligeiramente mais baixos, cerca de 0,5 a 1,5%, para os casos de menor carga.

Na Figura 6.11 está representado o fator de potência e pode apenas dizer-se que aumenta com o aumento do nível de carga. O fator de potência para o motor a funcionar em vazio (0%) é cerca de 0,13-0,14, à meia carga (50%) já apresenta valores de 0,34-0,36, enquanto que à plena carga (100%) é de 0,51-0,52.

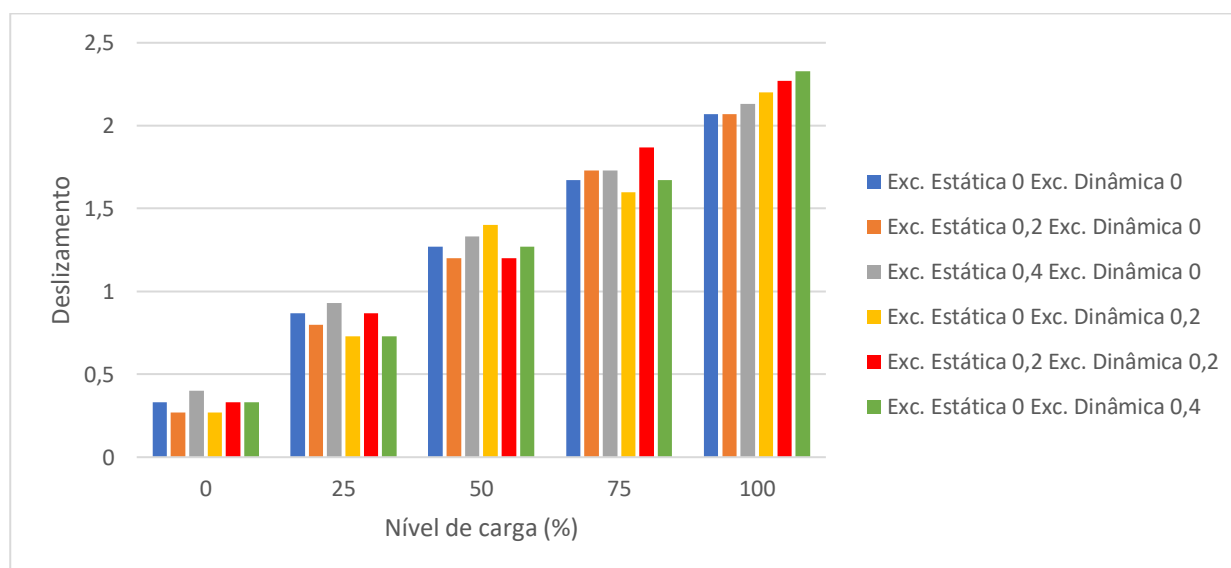


Figura 6.9: Representação da média do deslizamento em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade

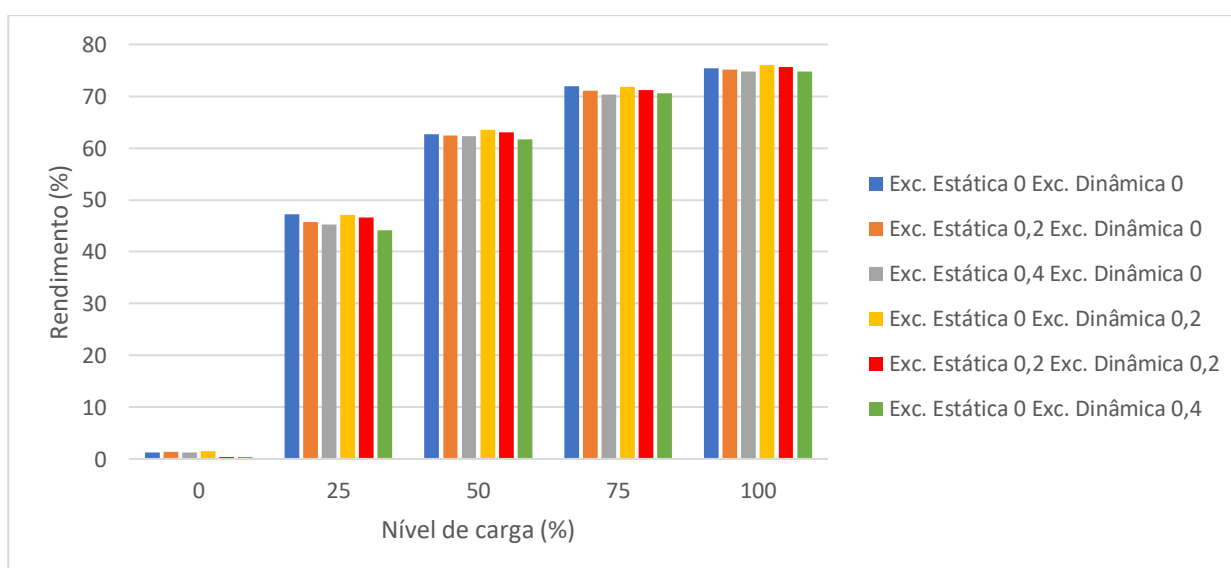


Figura 6.10: Representação da média do rendimento em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade

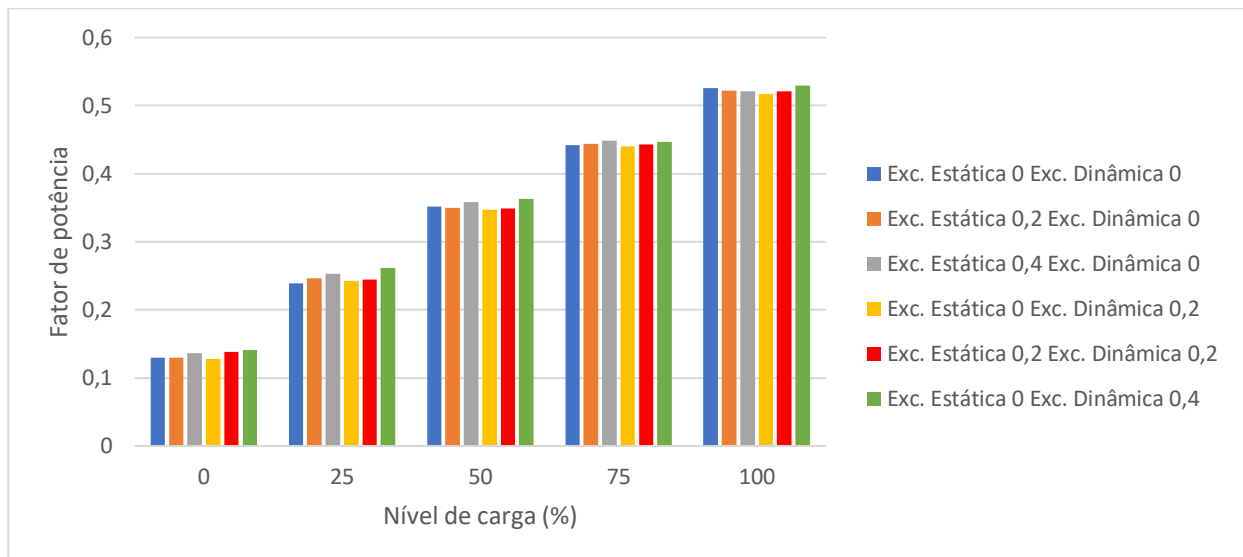


Figura 6.11: Representação da média do fator de potência em cada ensaio em função do nível de carga e da excentricidade

O aumento de excentricidade implica um maior aumento da potência ativa absorvida pelo motor, consequência do aumento da corrente absorvida, mas isto só acontece para níveis de carga inferiores ao nominal. Quando o motor está a operar à carga nominal, o aumento da corrente absorvida é prejudicial para o motor, uma vez que aumentando a corrente para além da corrente nominal causaria danos nos enrolamentos estáticos, por isso com o aumento da excentricidade vai existir um aumento do deslizamento, provocando um aumento das tensões rotóricas e, conseqüentemente das correntes rotóricas, aumentando assim as perdas, portanto a potência mecânica vai diminuir. Isto significa que é aconselhado retirar o motor de serviço aquando do aparecimento de excentricidade, mas caso não seja possível, o motor pode continuar a funcionar, no entanto conseguirá produzir menor potência mecânica.

Com o aumento da excentricidade vai aumentar a temperatura e, conseqüentemente, o rendimento vai diminuir, pois o aumento da temperatura advém do aumento das perdas por efeito Joule.

Quando existe unicamente excentricidade estática é natural que exista um ponto mais quente que os outros, porque o centro de rotação do rotor está deslocado do centro do estator, por isso, mais próximo de uma zona do estator. Era de esperar que com a introdução da excentricidade dinâmica a temperatura nos sensores colocados no estator fosse mais homogênea, pois o centro de rotação, mesmo não estando centrado com o centro do estator, vai variar com o tempo, mas continua a existir um ponto claramente mais quente que os outros (sensor nº1) como se pode ver na Tabela 6.1.

Para que se perceba melhor a Tabela 6.1 foi calculado o centro térmico do motor através dos 4 sensores colocados do lado do ataque, utilizando para isso a equação (6.4), onde \vec{r}_{CT} é o vetor posição do centro térmico, X_{CT} e Y_{CT} são as componentes resultantes da decomposição do vetor \vec{r}_{CT} , segundo os eixos x e y , respetivamente, i é o índice do sensor, \vec{r}_i é o vetor posição do sensor i , m_i é a temperatura do sensor i , M é a soma das temperaturas dos sensores, x_i e y_i é a posição do sensor i , segundo os eixos x e y , respetivamente [23].

$$\vec{r}_{CT} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n (m_i \cdot \vec{r}_i) \Rightarrow \begin{cases} X_{CT} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i \\ Y_{CT} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \cdot y_i \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} X_{CTn} = \frac{T_{direita} - T_{esquerda}}{T_{superior} + T_{inferior} + T_{direita} + T_{esquerda}} \\ Y_{CTn} = \frac{T_{superior} - T_{inferior}}{T_{superior} + T_{inferior} + T_{direita} + T_{esquerda}} \end{cases}$$

Tabela 6.1: Diferença para a média dos sensores do lado do ataque no final de cada ensaio

EXCENTRICIDADE	NÍVEL DE CARGA (%)	MÉDIA TEMPERATURA (°C)	SENSOR Nº1	SENSOR Nº2	SENSOR Nº3	SENSOR Nº4
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0	0	56,40	1,76	-2,57	0,08	0,74
	25	57,74	1,46	-2,43	0,16	0,81
	50	59,74	1,52	-2,51	0,18	0,80
	75	60,83	1,52	-2,63	0,31	0,81
	100	66,05	1,65	-2,93	0,35	0,94
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0	0	56,19	1,70	-2,04	0,05	0,30
	25	56,31	4,35	-2,84	-0,83	-0,68
	50	58,19	1,88	-2,29	0,05	0,36
	75	63,56	3,22	-2,63	-0,45	-0,15
	100	67,97	2,49	-2,57	-0,21	0,28
ESTÁTICA 0,4 DINÂMICA 0	0	59,98	3,63	-2,18	-0,51	-0,95
	25	55,30	1,26	-1,23	0,27	-0,30
	50	60,46	1,64	-1,51	0,15	-0,29
	75	63,27	2,80	-1,98	-0,26	-0,57
	100	66,02	2,80	-2,27	0,00	-0,53
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,2	0	52,75	1,46	-2,34	0,07	0,82
	25	53,60	1,15	-2,31	0,27	0,89
	50	57,15	1,62	-2,52	0,18	0,72
	75	58,34	1,46	-2,72	0,44	0,83
	100	62,20	1,57	-2,94	0,45	0,93
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0,2	0	52,28	2,75	-2,25	-0,28	-0,21
	25	56,78	1,81	-1,81	-0,09	0,09
	50	57,40	2,35	-2,16	-0,26	0,06
	75	61,52	0,83	-1,73	0,43	0,48
	100	67,64	3,24	-2,69	-0,30	-0,25
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,4	0	57,90	1,99	-2,99	0,33	0,68
	25	60,45	1,33	-2,41	0,38	0,72
	50	64,10	1,49	-3,78	1,11	1,19
	75	68,29	3,28	-6,08	1,39	1,42
	100	75,93	4,19	-3,95	-0,26	0,04

Na situação ideal, sem excentricidade, o centro térmico estaria na posição (0,0). Esta análise é adequada para a excentricidade estática, sendo que a excentricidade dinâmica não será adequada uma vez que o centro de rotação varia ao longo do tempo. Na Figura 6.12 estão representados os centros térmicos obtidos para os ensaios realizados. O centro térmico para todos os ensaios está colocado para a esquerda e para cima, que é o local onde as escovas entram em contacto com o rotor, o que pode ter alguma influência.

Era expectável que devido ao aumento da excentricidade estática, o centro térmico se afastaria do ponto (0,0), uma vez que aumentava o desequilíbrio de forças, no entanto, isso não se

comprova com os resultados pois os pontos que representam o centro térmico para uma excentricidade estática 0,4 se encontram mais próximo desse ponto de referência em relação aos pontos de excentricidade estática 0.

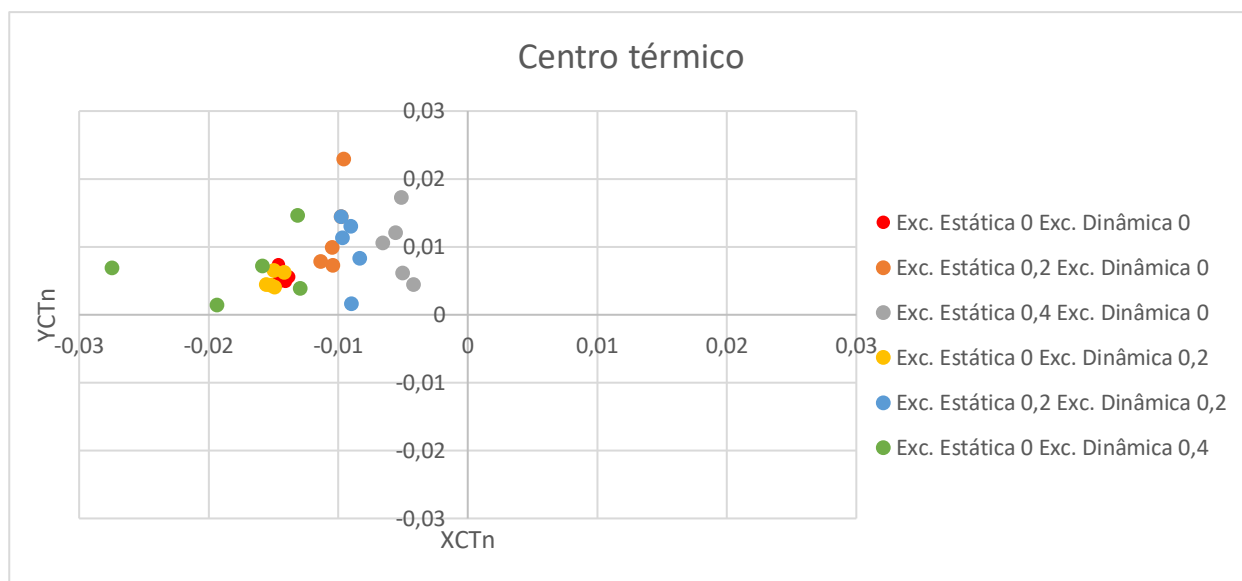


Figura 6.12: Representação do centro térmico para os diversos ensaios

De seguida faz-se uma análise do vetor de Park e do espectro do módulo do vetor Park. Esta análise do espectro do módulo do vetor de Park designa-se Análise Estendida do Vetor de Park (AEVP), destinando-se neste caso à quantificação da severidade da avaria imposta pelo mecanismo.

O software utilizado para as aquisições das correntes e tensões é apresentado na Figura 6.13. As aquisições foram efetuadas a uma frequência de 102400 Hz para a representação do vetor de Park e a uma frequência de 1000 Hz para a representação da FFT do módulo do vetor de Park. A aquisição das correntes a 1000 Hz deve-se à obtenção de uma FFT da corrente com melhor precisão para esta frequência, sendo a aquisição a 102400 Hz referente a uma volta mecânica que corresponde a dois períodos elétricos, pois o motor tem 4 pólos.

A representação do vetor de Park foi obtida através de um software apresentado na Figura 6.14, tal como a representação do módulo do vetor de Park.

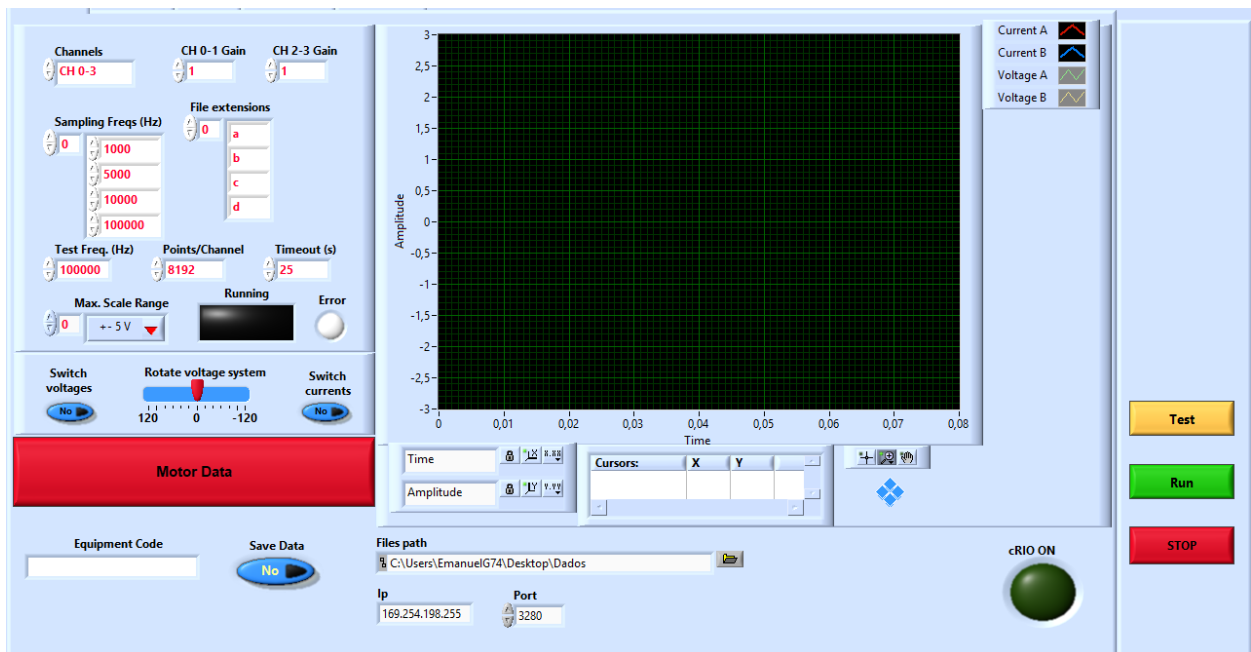


Figura 6.13: Software de aquisição dos dados referentes às tensões e correntes

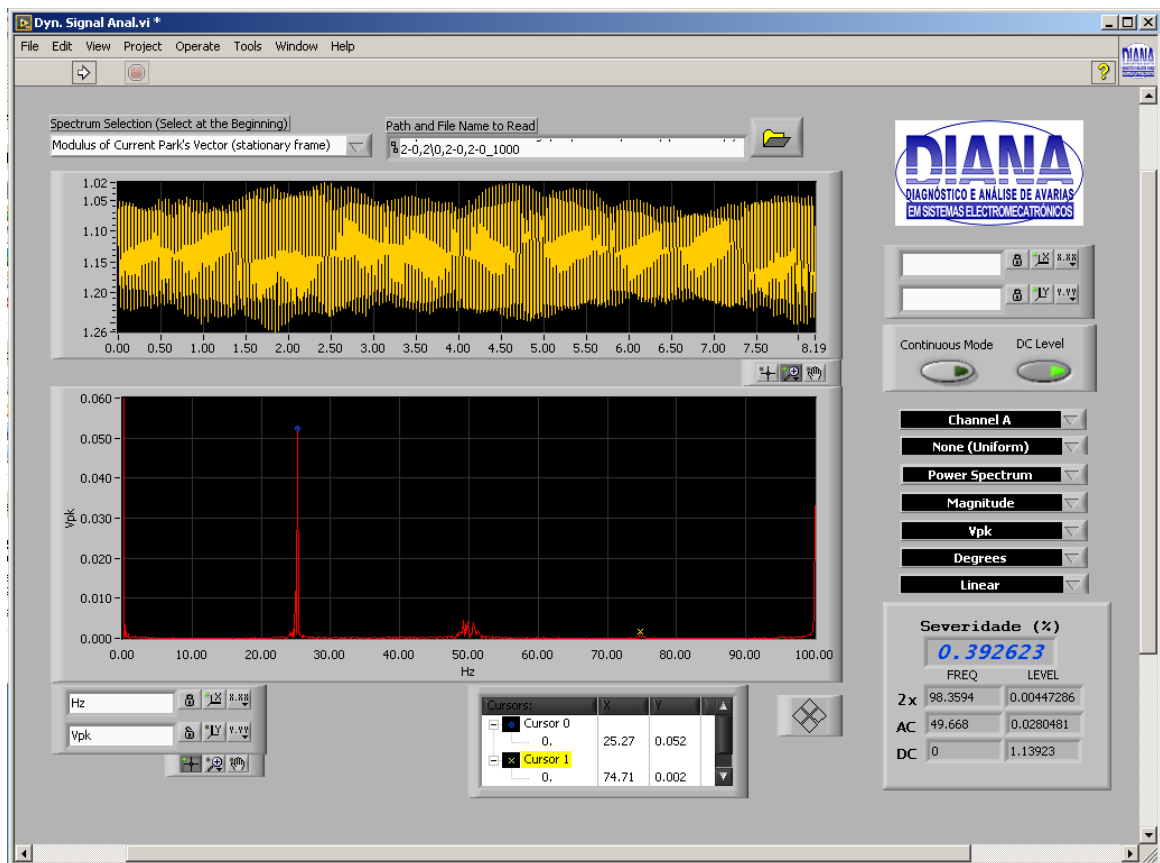


Figura 6.14: Software utilizado para a representação do vetor de Park, do espectro do módulo do vetor de Park e do espectro da corrente.

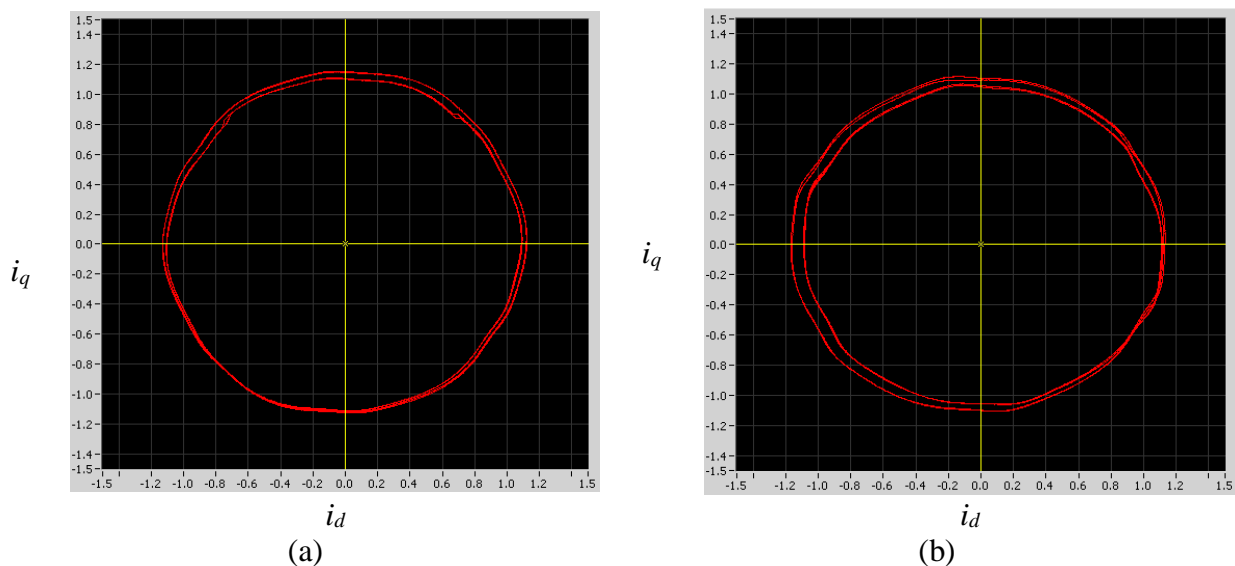
Na Figura 6.15 e na Figura 6.16 são apresentadas as representações dos vetores de Park obtidos em alguns ensaios. Esta análise destina-se exclusivamente à inspeção visual dos vetores de Park. Pode perceber-se a influência da excentricidade, pois o vetor de Park vai deixar de ser muito próximo de uma circunferência e vai aumentando a sua elipticidade. Há outro fator que

permite detetar a existência de falhas que é o facto de existirem duas elipses, não estando as duas sobrepostas.

Pode comparar-se a Figura 6.15 e a Figura 6.16 e com o aumento do nível de carga as duas componentes (i_d e i_q) vão aumentar devido ao aumento das correntes absorvidas pelo motor, provocando um claro aumento do raio do vetor de Park. É ainda evidente que o vetor de Park vai deixar de se parecer tanto com uma circunferência ou uma elipse e vai tornar-se numa figura mais próxima de um hexágono.

Através da Figura 6.15 é possível perceber que a excentricidade dinâmica apresenta uma maior distância entre as duas elipses em relação às excentricidades estática e mista, isto pode querer indicar que terá maior gravidade.

No caso em que o motor está a funcionar sem excentricidade, era esperado que as duas circunferências estivessem totalmente sobrepostas, no entanto é possível que existam outras falhas/avarias no motor, o que pode até dever-se à existência de excentricidade provocada na construção do motor, o que é bastante comum acontecer.



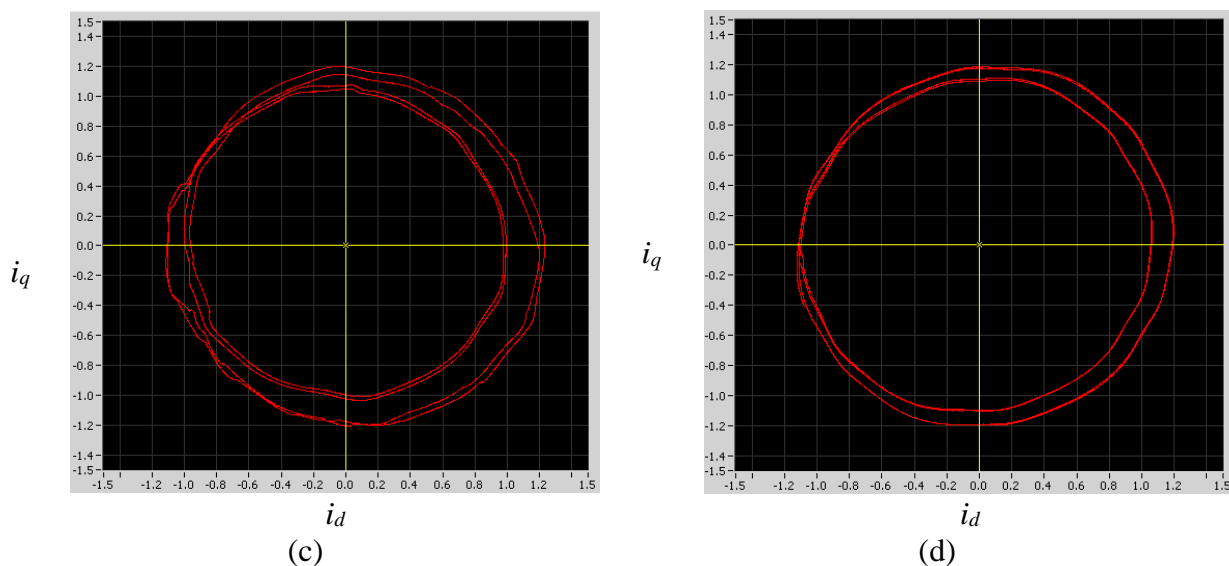
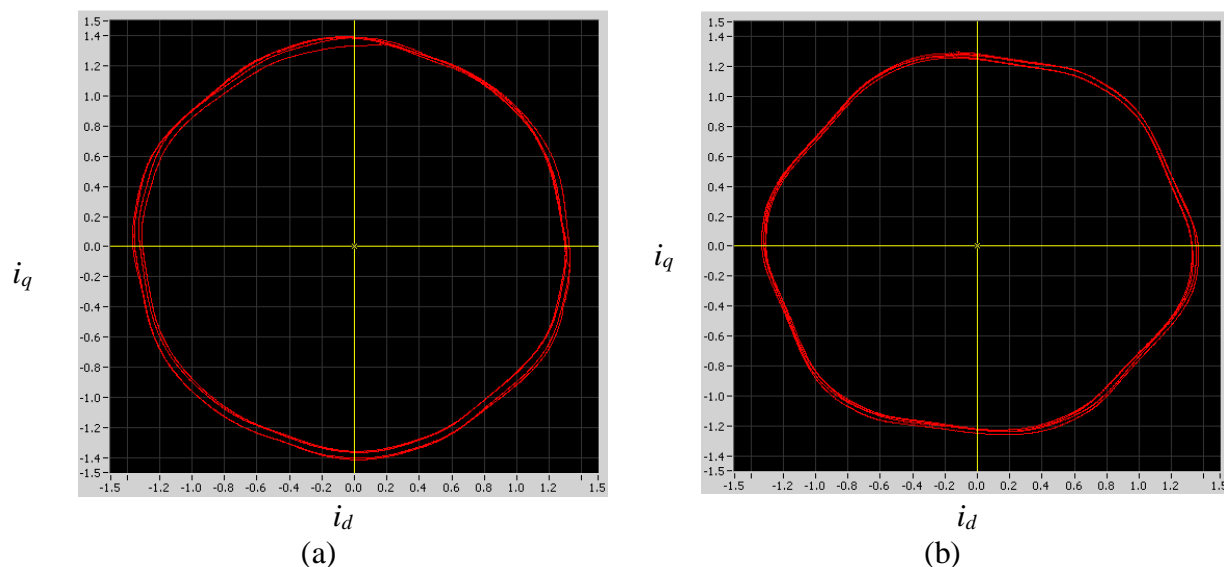


Figura 6.15: Representação do vetor de Park para o nível de carga 0%: (a) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0; (b) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4; (c) excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0; (d) excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2

Na Figura 6.16 (c) aparece um resultado estranho, tal como em outras 3 representações do vetor de Park, como se pode ver no Anexo C – Resultados obtidos pelo vetor de Park. Supondo-se a existência de problemas no rotor fez-se a FFT de uma das correntes de alimentação e no caso da existência desses problemas existiriam componentes harmônicas dadas por (4.1). A FFT representada na Figura 6.17 apresenta duas bandas laterais por volta dos 48 e 52 Hz na ordem dos -38 e -33 dB, respetivamente. Isto pode indicar problemas no rotor, sendo, no entanto, algo estranho apenas acontecer em 4 dos 30 ensaios, o que pode significar problemas nas escovas durante a aquisição das correntes de alimentação. Os problemas nas escovas foram sentidos várias vezes durante a realização dos ensaios, pois o apoio de um deles já não se encontra nas melhores condições.



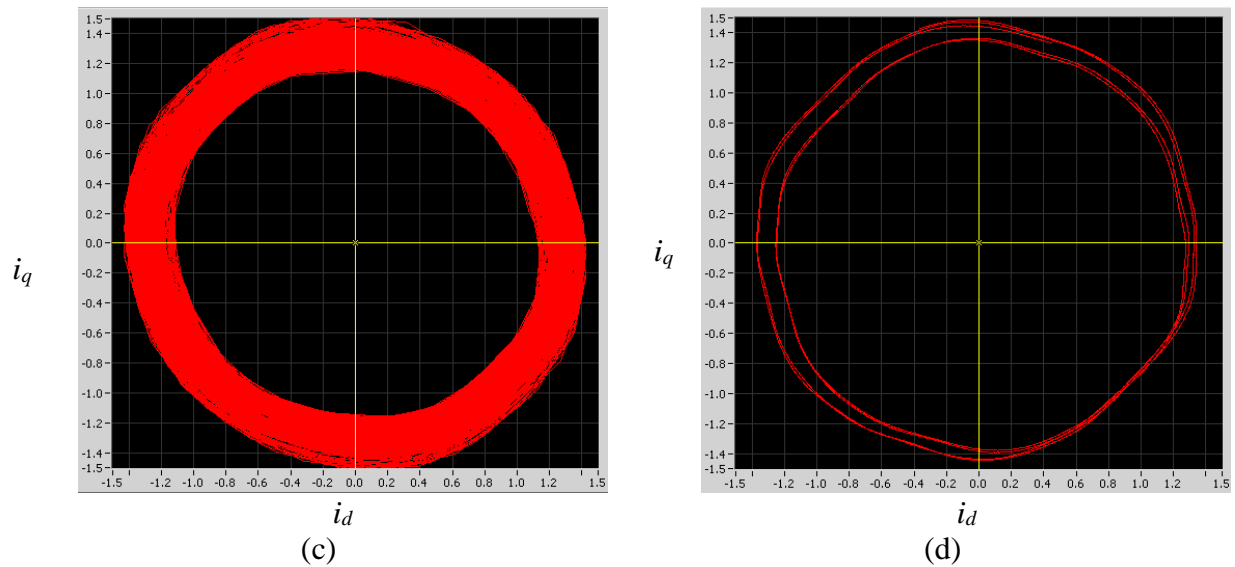


Figura 6.16: Representação do vetor de Park para o nível de carga 100%: (a) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0; (b) excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4; (c) excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0; (d) excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2

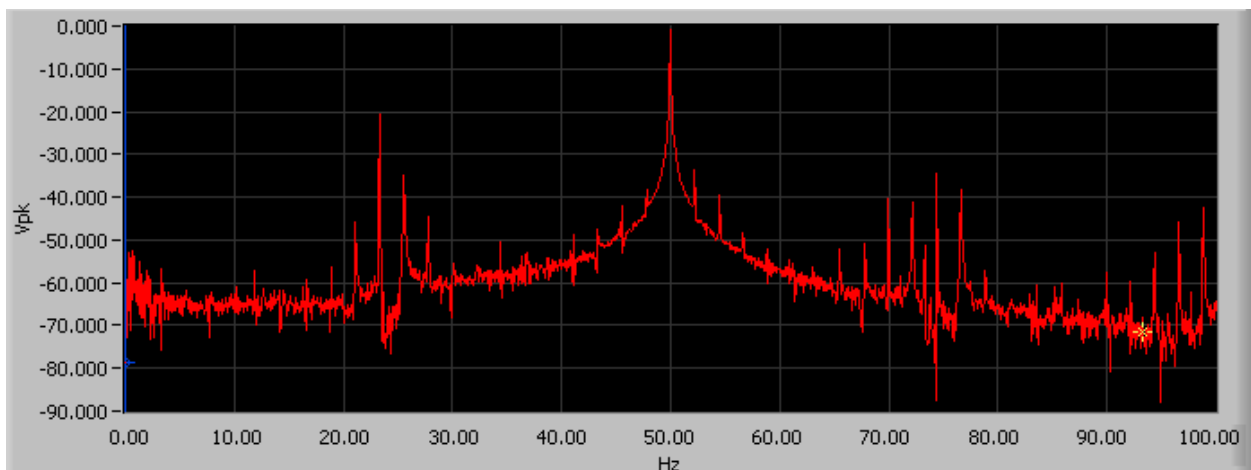


Figura 6.17: FFT da corrente de alimentação do motor para excentricidade estática 0,4, excentricidade dinâmica 0 e nível de carga 100%

Utilizando agora a Análise Estendida do Vetor de Park (AEVP) que tem por base a análise do espectro de frequência do módulo do vetor de Park, vai ser analisado o fator de severidade que é, como já foi mencionado anteriormente no capítulo 4.2, o rácio entre o indicador da falha (componente próxima dos 25 Hz) e o valor dc .

Através da Figura 6.19 pode perceber-se que o fator de severidade não depende do binário que o motor tem de desenvolver, pois este é um fator que pretende avaliar o aumento das falhas, o que não acontece ao aumentar o nível de carga mantendo a excentricidade. Ao aumentar a excentricidade estática vai também aumentar o fator de severidade, no entanto com o aumento da

excentricidade dinâmica não vai haver aumento do fator de severidade, o que pode querer dizer que este método pode não ser útil na identificação de este tipo de falha.

Quando o motor estava com excentricidade 0 era esperado que o fator de severidade também fosse 0, mas varia entre 1,5% e 2,5%, o que pode indicar a existência de uma outra avaria não controlada pelo mecanismo ou até da existência de alguma excentricidade devido ao processo de fabrico como já foi possível observar aquando da análise do vetor de Park.

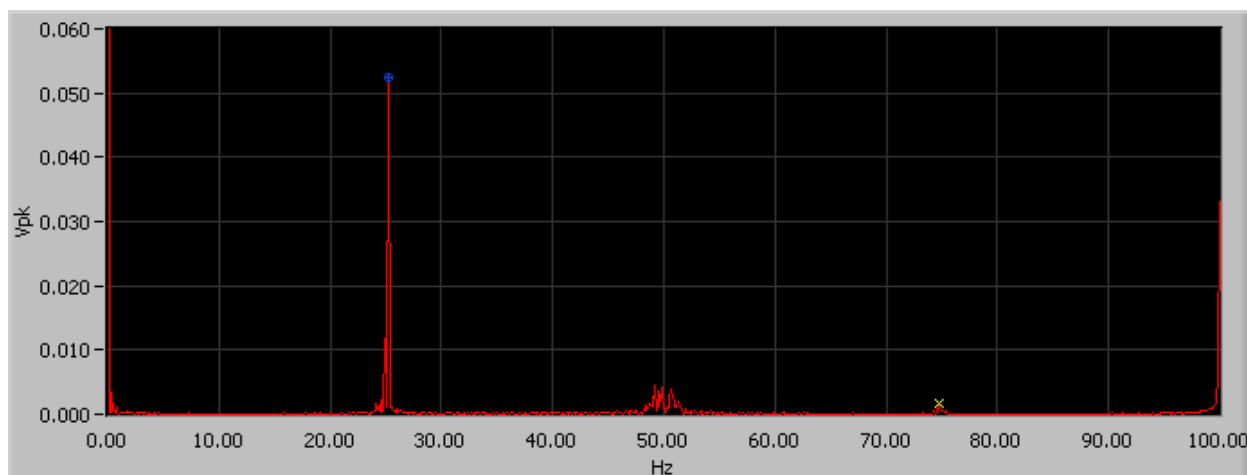


Figura 6.18: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park com excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 a funcionar em vazio

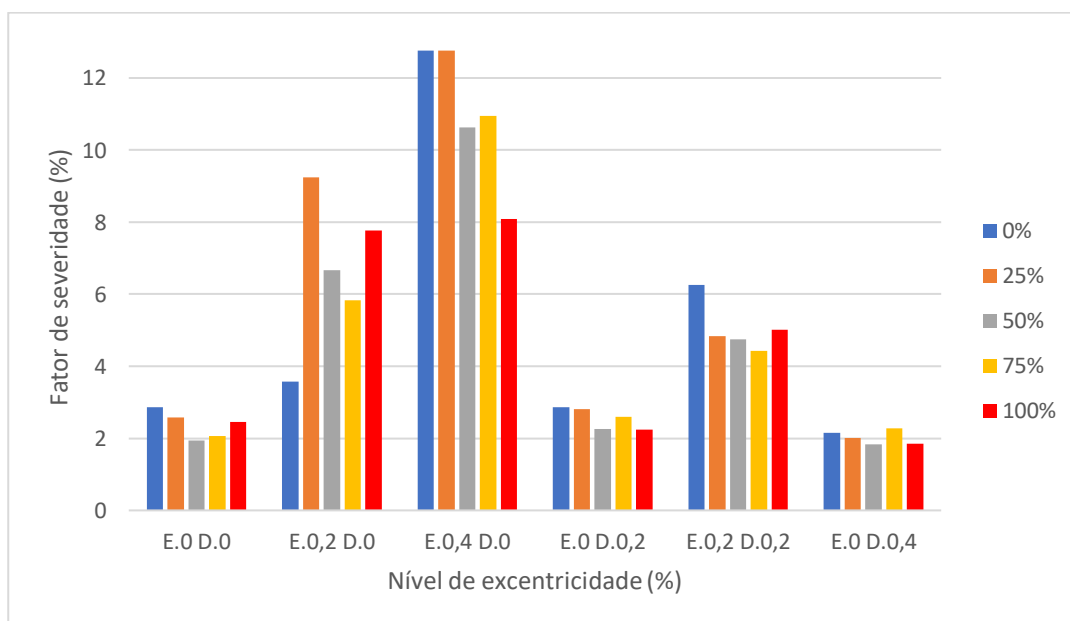


Figura 6.19: Resultados obtidos para o fator de severidade

7. Conclusão

Este trabalho tinha como objetivo estudar a influência no desempenho de um motor de indução trifásico alterando a excentricidade no entreferro. Pôde concluir-se, ao analisar os dados recolhidos da temperatura, que o aumentar da excentricidade vai aumentar a temperatura irradiada pelo motor. Na excentricidade estática existe um ponto mais quente que os outros, pois o rotor encontra-se deslocado do centro, mas sempre a rodar na mesma posição. No entanto, na excentricidade dinâmica era esperado que não existisse um ponto claramente mais quente que os outros (nos enrolamentos estatóricos), porque o rotor está deslocado do centro, mas a posição varia com o tempo, por isso, esperava-se que a temperatura dos enrolamentos estatóricos fosse mais homogênea, mas continua a existir um ponto mais quente que os outros. Isto pode significar que o mecanismo que controla a excentricidade dinâmica não funciona corretamente ou pode dever-se ao posicionamento da escovas.

Na análise às restantes grandezas adquiridas, pode afirmar-se que o aumento do deslizamento devido ao aumento da excentricidade, leva a um aumento das tensões induzidas no rotor e, por isso, um aumento das correntes rotóricas, originando um aumento das perdas (e da temperatura). Pode resolver-se este problema diminuindo a carga, de maneira, a manter a máquina funcional, pois não estaria sujeita a temperaturas tão elevadas que poderiam causar danos graves nos enrolamentos.

Quanto à análise do vetor de Park, conclui-se a existência de um desfasamento entre as duas circunferências aquando da presença de excentricidade, tal como o aumento da elipticidade do vetor de Park com o aumento da excentricidade, o que confirma que o mecanismo introduzia efetivamente a excentricidade pretendida. Confirma-se com esta análise que o mecanismo funciona corretamente, sendo o provável aparecimento de um ponto mais quente com a introdução da excentricidade dinâmica, uma causa da influência do contacto entre as escovas com o rotor, como também é sugerido através do cálculo do centro térmico.

Por último, o espectro do módulo do vetor de Park oferece a informação necessária para o cálculo do fator de severidade, no entanto só é possível obter informação relevante para a excentricidade estática, pois como já foi dito anteriormente o método AEVP pode não ser adequado na análise da existência da excentricidade dinâmica.

7.1. Trabalho futuro

Como trabalho futuro seria interessante estudar o desempenho do motor aplicando outras avarias de forma controlada, analisando as mesmas grandezas e comparando com as obtidas nesta dissertação.

Seria também interessante um estudo acerca do ruído e da vibração provocados pelo motor com o aumento da excentricidade e, ainda a possível alimentação através de um inversor PWM analisando a influência na temperatura e nas restantes grandezas elétricas e mecânicas.

Bibliografia

- [1] D. Maheswaran, V. Rangaraj, K. K. J. Kailas, and W. A. Kumar, "Energy efficiency in electrical systems," in *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2012, pp. 1-6.
- [2] F. J. T. E. Ferreira, "Material Pedagógico da disciplina de Máquinas Elétricas III do MIEEC" Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2016.
- [3] J. Sobra, T. Vaimann and A. Belahcen, "Mechanical vibration analysis of induction machine under dynamic rotor eccentricity," *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Prague, 2016, pp. 1-4.
- [4] S. L. Nau, "Análise da Influência da Excentricidade do Rotor sobre o Ruído Acústico de Origem Magnética Gerado por Motores de Indução Trifásicos," Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [5] B. A. M. Amaral, "Diagnóstico de avarias em motores elétricos," Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- [6] S. Nandi, R. M. Bharadwaj, and H. A. Toliyat, "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, pp. 392-399, 2002.
- [7] A. Polat, Y. D. Ertuğrul, and L. T. Ergene, "Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor," in *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2015, pp. 284-288.
- [8] Y. Akiyama, "Unbalance-heating phenomena of induction motor with eccentric rotor," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1992, pp. 107-114 vol.1.
- [9] B. Suechoey, S. Tadsuan and S. Bunjongjit, "A comparison of power losses and winding temperature of three-phase induction motor with PWM inverter and Six-Step inverter supply," *8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009)*, Hong Kong, China, 2009, pp. 1-5.
- [10] P. Khluabwannarat, C. Thammarat, S. Tadsuan and B. Suechoey, "The result analysis of the electrical power and temperature of 3-phase induction motor supplied by the PWM inverter," *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*, Singapore, 2007, pp. 1197-1202.
- [11] P. Wellington, G. M. Roberlam, M. N. Luciano, "Comparative performance analysis of a standard three-phase induction motor and an asymmetric three-phase induction motor fed from a single-phase network", *In Electric Power Systems Research*, Volume 125, 2015, Pages 211-219
- [12] J. R. Ruthes, S. L. Nau and A. Nied, "Performance analysis of induction motor under non-sinusoidal supply voltages," *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba, 2016, pp. 1-6.
- [13] M. V. Guedes, "Material Pedagógico," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.
- [14] H. N. B. Gonçalves, "Optimização do Projecto de Motores Assíncronos Trifásicos," Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001.
- [15] M. M. Botha, "Electrical machine failures, causes and cures," *1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444)*, Cambridge, 1997, pp. 114-117.
- [16] Ye Zhongming and Wu Bin, "A review on induction motor online fault diagnosis," *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435)*, Beijing, 2000, pp. 1353-1358 vol.3.
- [17] TOSHIBA APPLICATION GUIDELINE #05. Available:

- <http://toshont.com/ag/mtrldesign/AG05%20%28Temperature%20Rise%29.pdf>
- [18] I. Boldea and S. A. Nasar. (2010). The induction machines design handbook. Available: <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781420066685>
- [19] P. F. d. S. P. Dinis, "Análise e Monitorização de Condição em Motores de Indução Trifásicos," Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 2017.
- [20] A. Rezig, M. R. Mekideche, and A. Djerdir, "Effect of Rotor Eccentricity Faults on Noise Generation in Permanent Magnet Synchronous Motors," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 15, 2010.
- [21] B. M. G. d. Santos, "Diagnóstico e Análise de Avarias em Geradores Síncronos de Imanes Permanentes Aplicados em Turbinas Eólicas," Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade da Beira Interior, 2012.
- [22] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 2000, pp. 395-401 vol.1.
- [23] B. R. O. Baptista, "Desempenho do Motor de Indução Trifásico em condições especiais de funcionamento: alimentado por um conversor NPC com tolerância a falhas ou com avarias no rotor," Tese de doutoramento em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na Especialidade de Energia, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, 2016.

Anexo A – Equipamento utilizado



Figura A.1: Analisador de potência YOKOGAWA WT3000



Figura A.2: Controlador do dinamômetro MAGTROL DSP6001

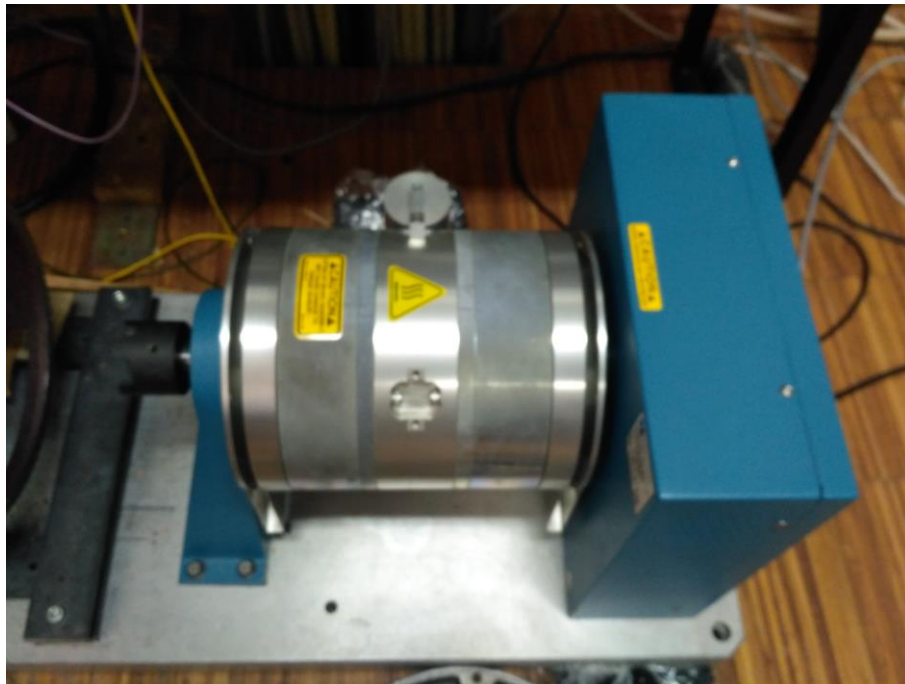


Figura A.3: Dinamómetro de histerese MAGTROL HD-815-8NA



Figura A.4: Chapa de características do dinamómetro



Figura A.5: Ventilador do dinamómetro



Figura A.6: Autotransformador

Anexo B – Resultados obtidos nos ensaios experimentais

Tabela B.1: Resultados da diferença entre a temperatura do ponto mais quente e a temperatura ambiente dependendo da excentricidade e do nível de carga

EXCENTRICIDADE	NÍVEL DE CARGA (%)	TEMP. PMQ	TEMP. AMB.	DIFERENÇA
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0	0	58,16	23,58	34,58
	25	59,19	24,1	35,09
	50	61,26	24,08	37,18
	75	62,34	22,97	39,37
	100	67,7	24,31	43,39
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0	0	57,89	24,08	33,81
	25	60,66	22,71	37,95
	50	60,07	24,43	35,64
	75	66,78	23,01	43,77
	100	70,46	23,68	46,78
ESTÁTICA 0,4 DINÂMICA 0	0	63,61	23,71	39,9
	25	56,56	21,47	35,09
	50	62,1	21,35	40,75
	75	66,07	24,36	41,71
	100	68,81	21,82	46,99
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,2	0	54,21	23,28	30,93
	25	54,89	21,21	33,68
	50	58,77	22,16	36,61
	75	59,8	20,27	39,53
	100	63,77	22,75	41,02
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0,2	0	55,03	21,96	33,07
	25	58,59	22,62	35,97
	50	59,75	22,64	37,11
	75	62,62	22,33	40,29
	100	70,88	23,41	47,47
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,4	0	59,89	24,45	35,44
	25	61,77	22,62	39,15
	50	65,59	26,24	39,35
	75	71,57	25,97	45,6
	100	80,11	26,65	53,46

Tabela B.2: Resultados dos diferentes níveis de carga e de excentricidade para a potência de ativa entrada (média), a potência reativa (média) e a potência aparente (média)

EXCENTRICIDADE	NÍVEL DE CARGA (%)	POTÊNCIA ATIVA (W)	POTÊNCIA REATIVA (VAR)	POTÊNCIA APARENTE (VA)
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0	0	558,77	4265,66	4302,18
	25	1048,02	4258,05	4385,16
	50	1586,99	4214,56	4503,5
	75	2082,48	4225,48	4710,85
	100	2615,28	4231,87	4975,01
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0	0	565,6	4313,79	4350,76
	25	1083,64	4270,44	4405,89
	50	1596,25	4276,89	4565,12
	75	2106,07	4253,28	4746,21
	100	2615,06	4273,71	5010,45
ESTÁTICA 0,4 DINÂMICA 0	0	580,78	4234,84	4274,54
	25	1099,88	4207,28	4348,74
	50	1605,77	4186,58	4484,02
	75	2129,15	4231,61	4737,15
	100	2615,28	4284,07	5019,42
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,2	0	553,62	4275,75	4311,48
	25	1065,86	4249,6	4381,59
	50	1577,98	4265,19	4547,8
	75	2091,6	4272,27	4757,03
	100	2599,47	4305,95	5029,95
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0,2	0	586,86	4224,51	4265,51
	25	1071,18	4240,25	4373,5
	50	1591,55	4275,14	4561,84
	75	2112,33	4269,24	4763,28
	100	2615,92	4288,84	5023,81
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,4	0	603,77	4239,96	4282,78
	25	1133,1	4186,11	4335,75
	50	1626,33	4173,2	4478,9
	75	2128,88	4265,49	4767,32
	100	2639,51	4224,11	4981,1

Tabela B.3: Resultados dos diferentes níveis de carga e de excentricidade para o rendimento (média) e o fator de potência (média)

EXCENTRICIDADE	NÍVEL DE CARGA (%)	DESGLIZAMENTO (%)	RENDIMENTO (%)	FATOR DE POTÊNCIA
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0	0	0,33	1,23	0,13
	25	0,87	47,25	0,239
	50	1,27	62,71	0,352
	75	1,67	71,93	0,442
	100	2,07	75,42	0,526
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0	0	0,27	1,35	0,13
	25	0,8	45,8	0,246
	50	1,2	62,46	0,35
	75	1,73	71,09	0,444
	100	2,07	75,17	0,522
ESTÁTICA 0,4 DINÂMICA 0	0	0,4	1,22	0,136
	25	0,93	45,28	0,253
	50	1,33	62,25	0,358
	75	1,73	70,35	0,449
	100	2,13	74,8	0,521
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,2	0	0,27	1,47	0,128
	25	0,73	47,06	0,243
	50	1,4	63,56	0,347
	75	1,6	71,82	0,44
	100	2,2	76,05	0,517
ESTÁTICA 0,2 DINÂMICA 0,2	0	0,33	0,33	0,138
	25	0,87	46,65	0,245
	50	1,2	62,99	0,349
	75	1,87	71,17	0,443
	100	2,27	75,6	0,521
ESTÁTICA 0 DINÂMICA 0,4	0	0,33	0,38	0,141
	25	0,73	44,1	0,261
	50	1,27	61,71	0,363
	75	1,67	70,53	0,447
	100	2,33	74,81	0,53

Anexo C – Resultados obtidos pelo vetor de Park

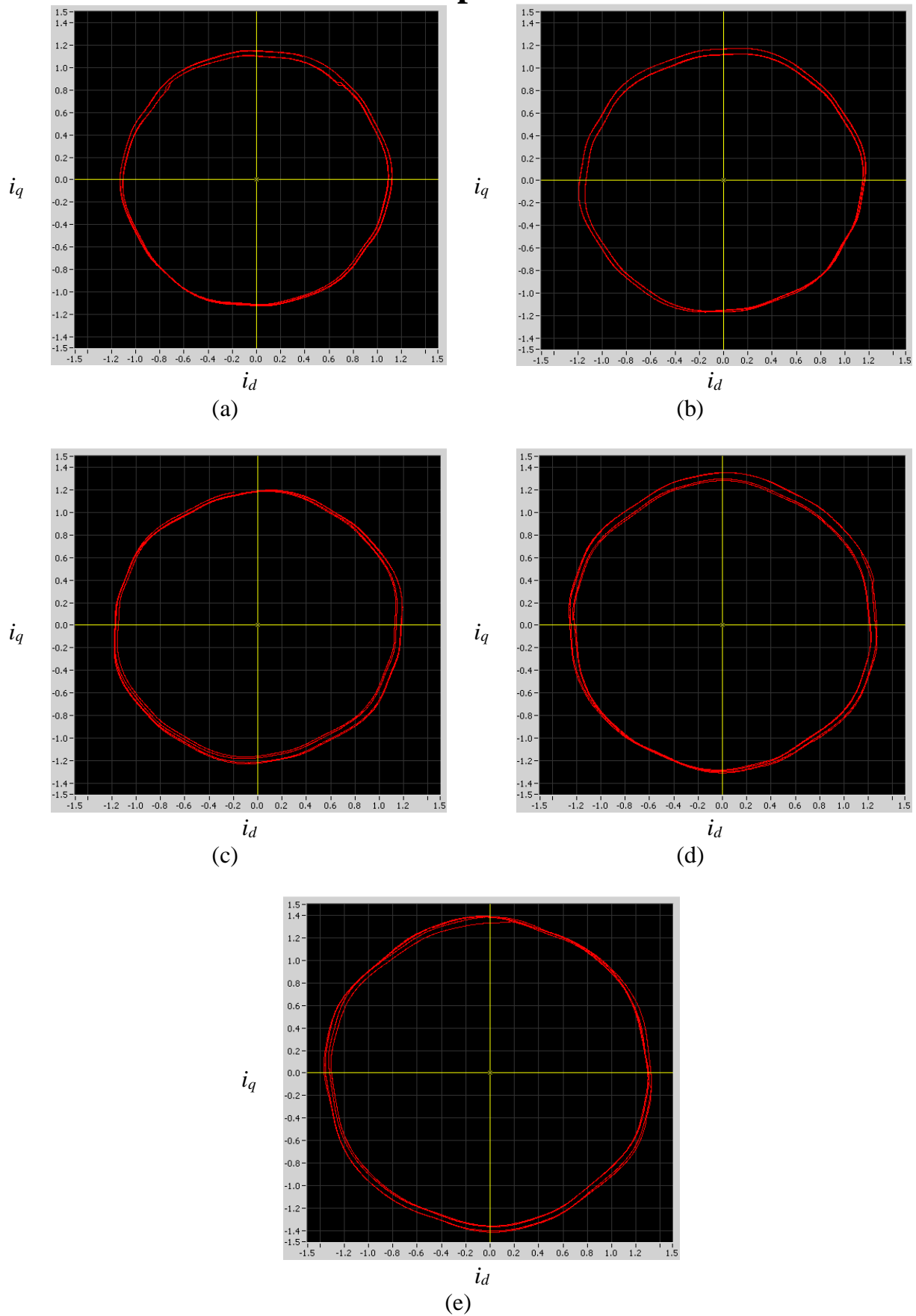


Figura C.1: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%

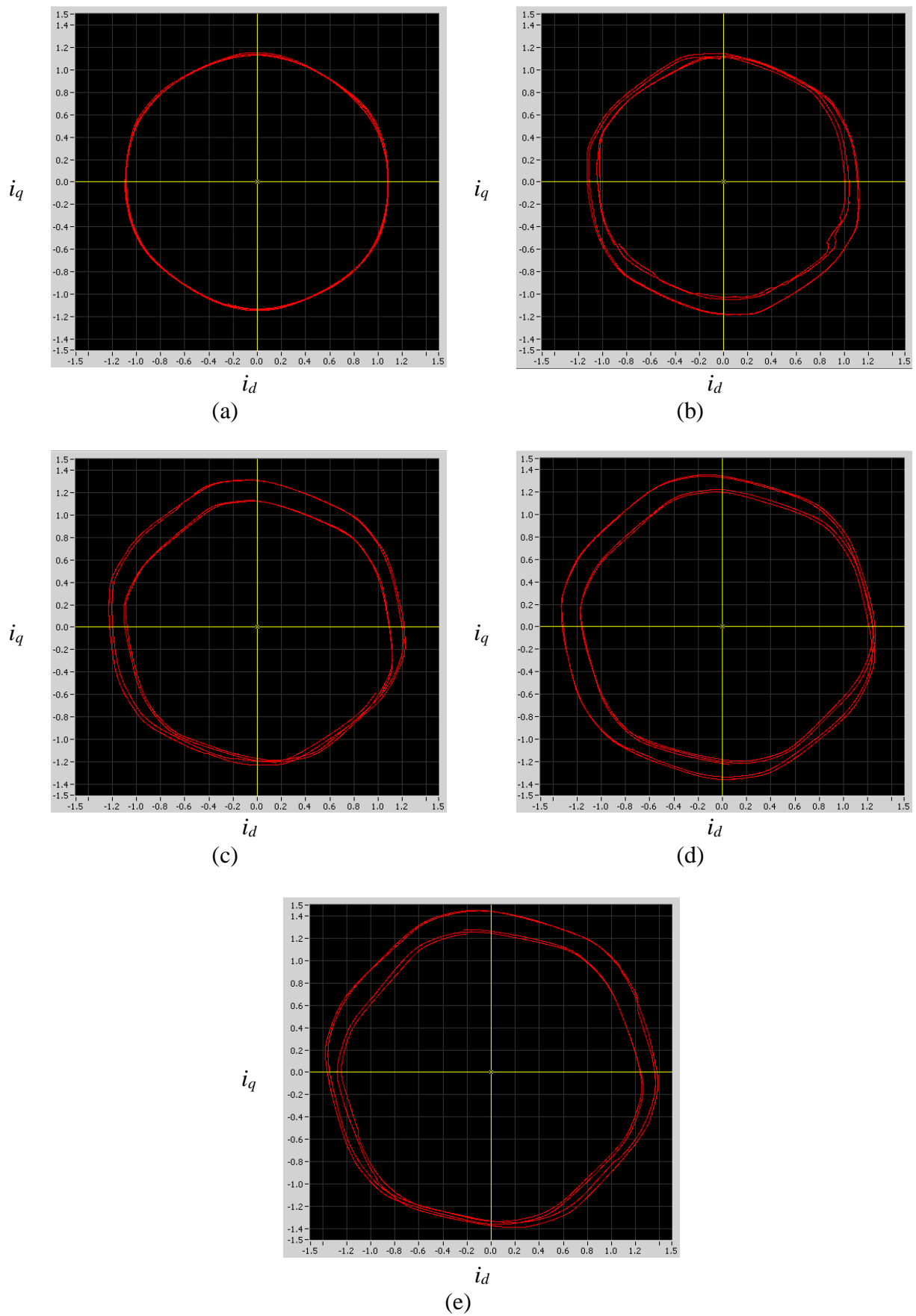


Figura C.2: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%

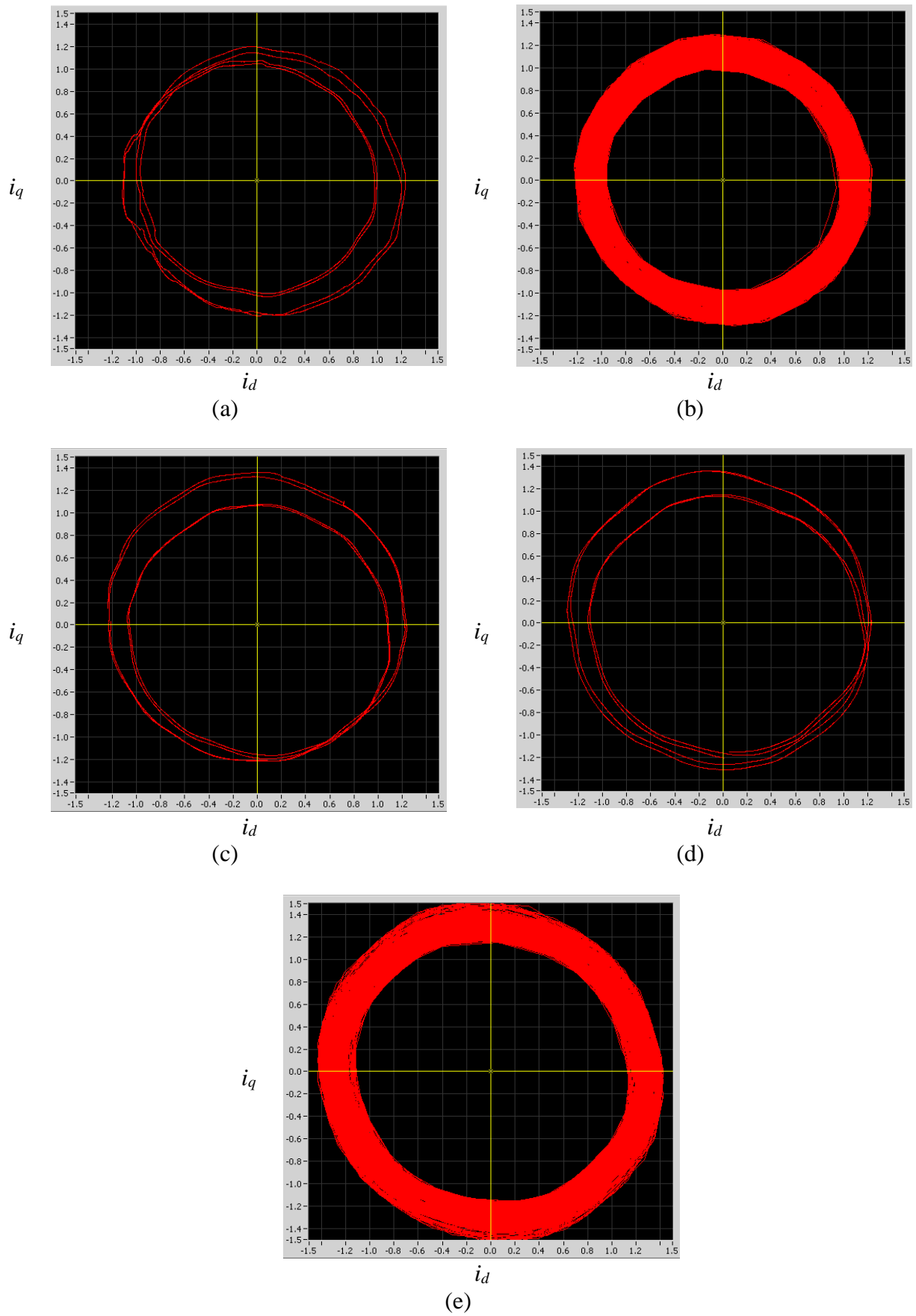
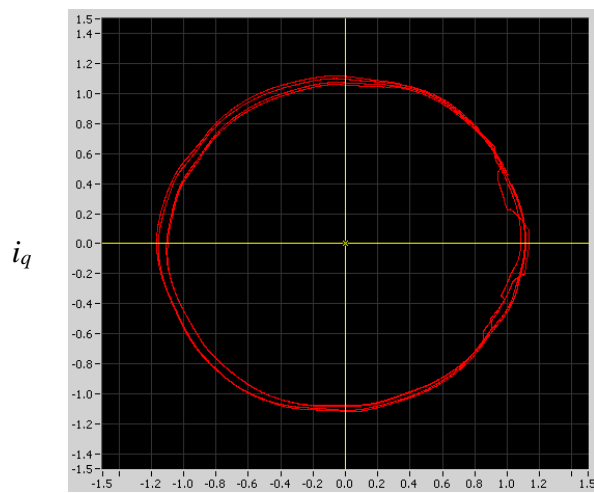
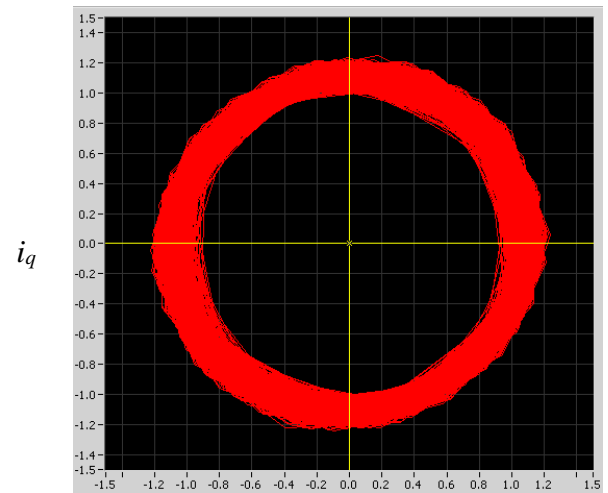


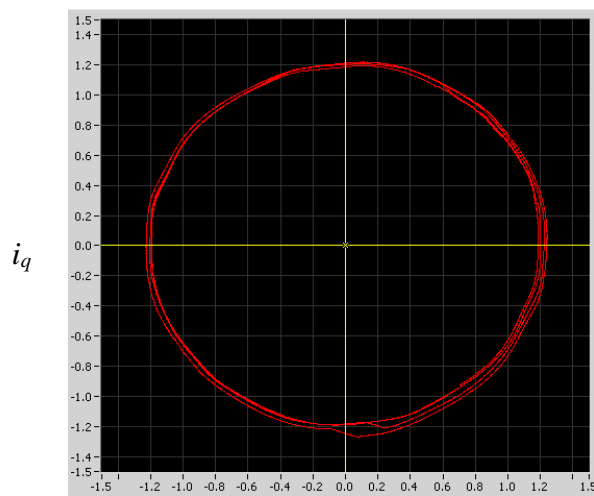
Figura C.3: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



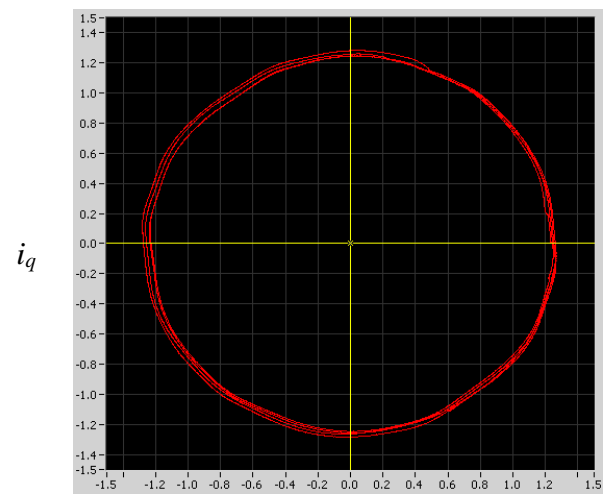
(a)



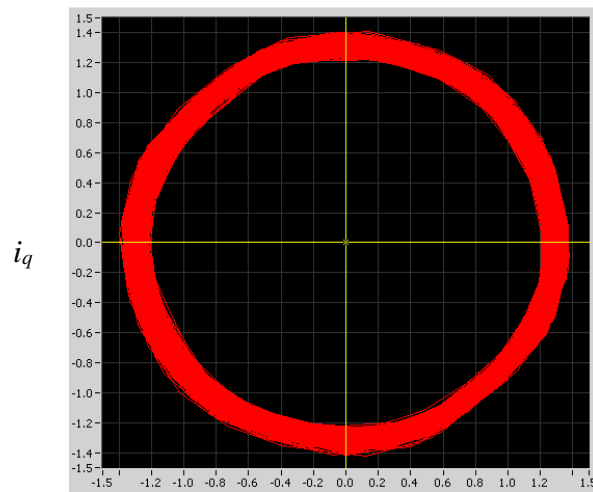
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura C.4: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%

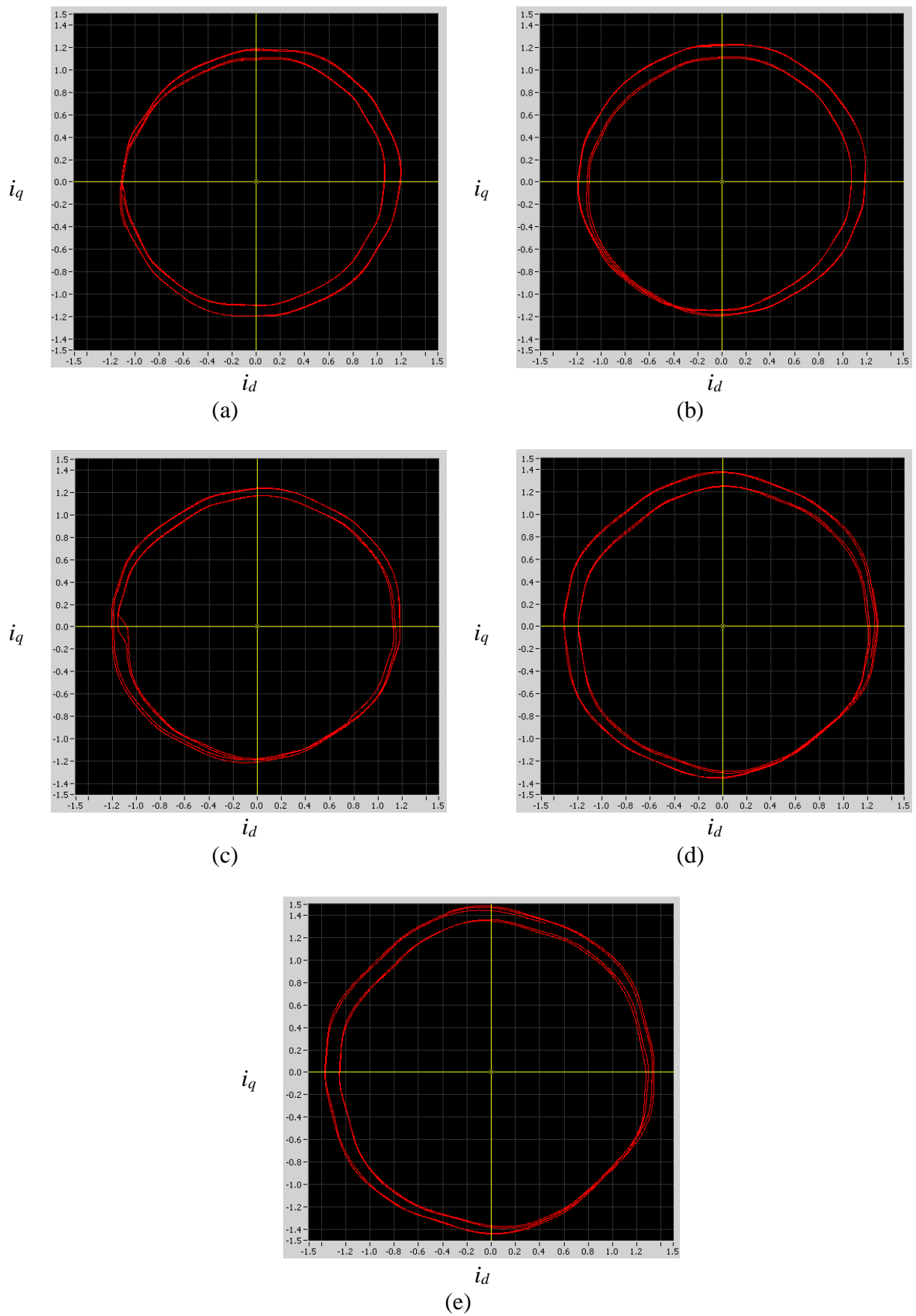


Figura C.5: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%

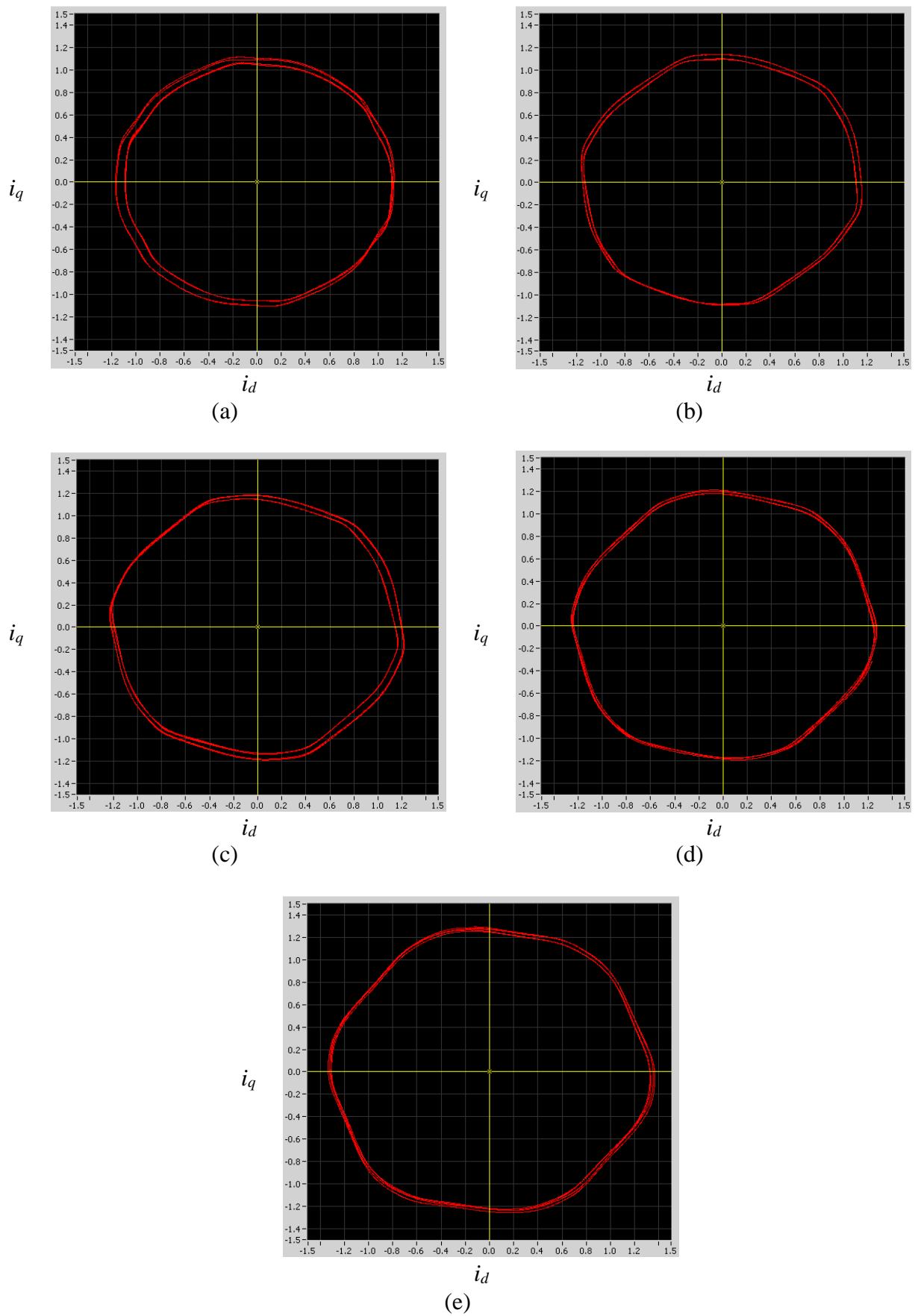
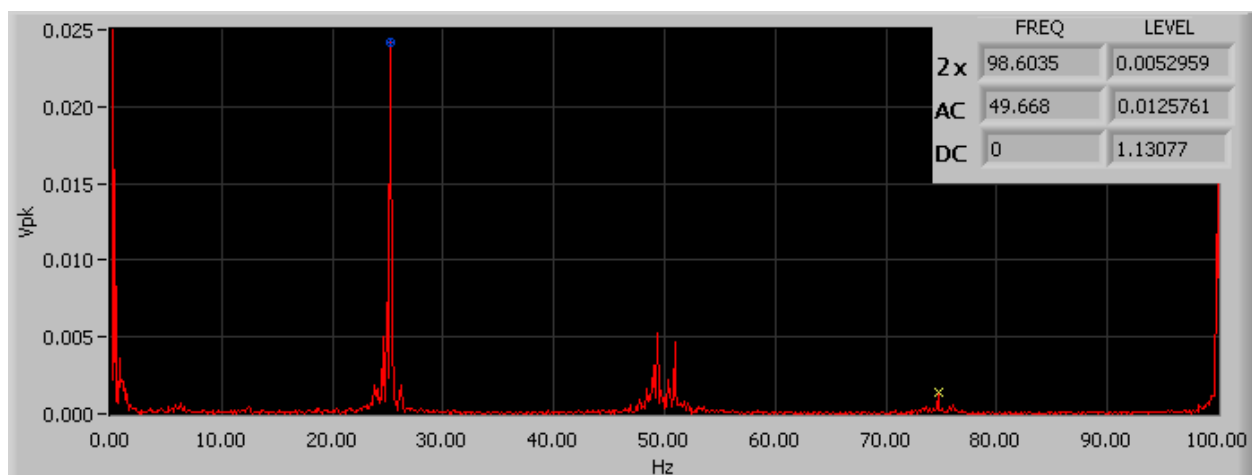
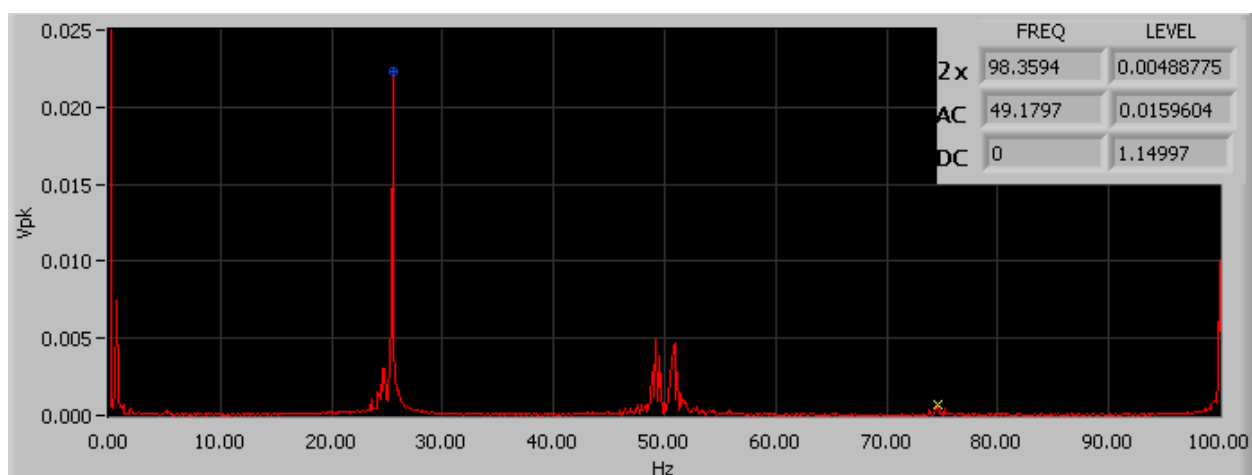


Figura C.6: Representação do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%

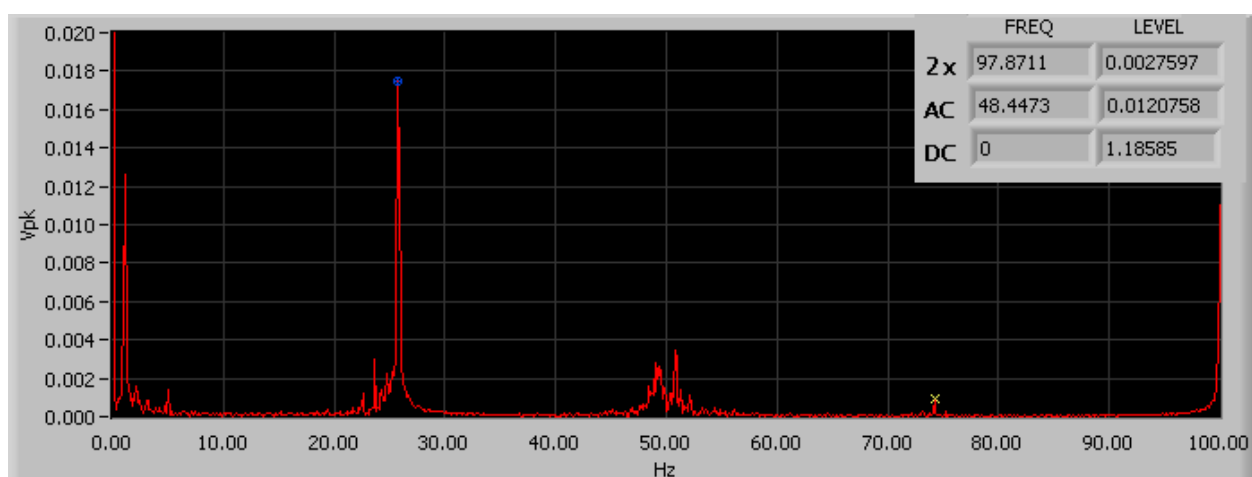
Anexo D – Resultados obtidos através da A EVP



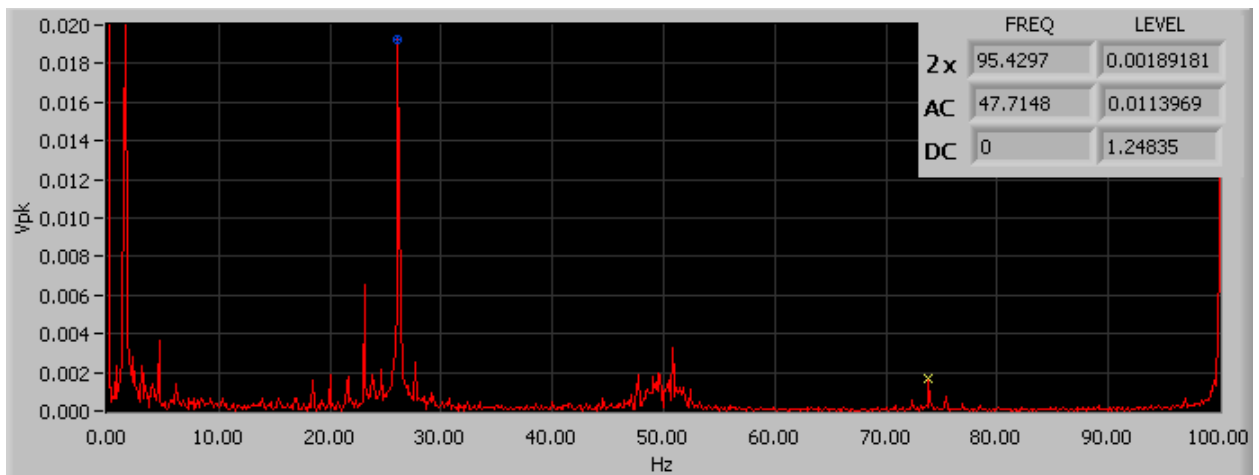
(a)



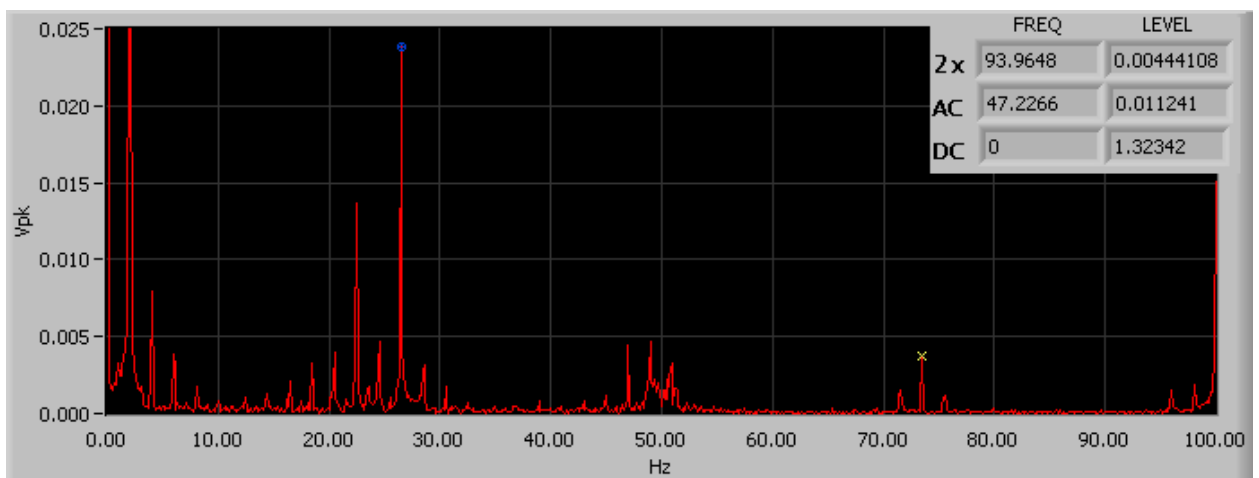
(b)



(c)

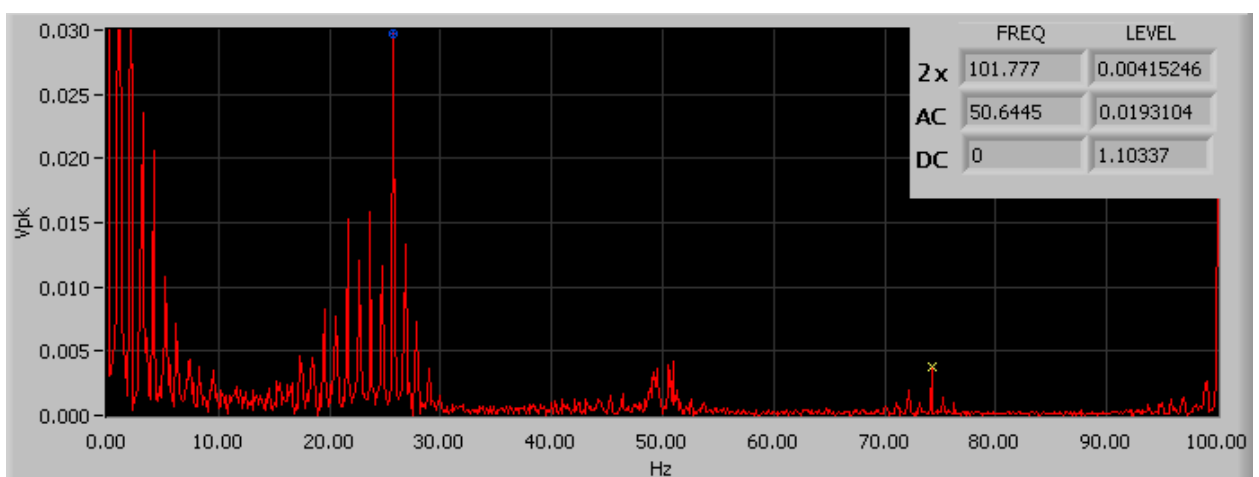


(d)

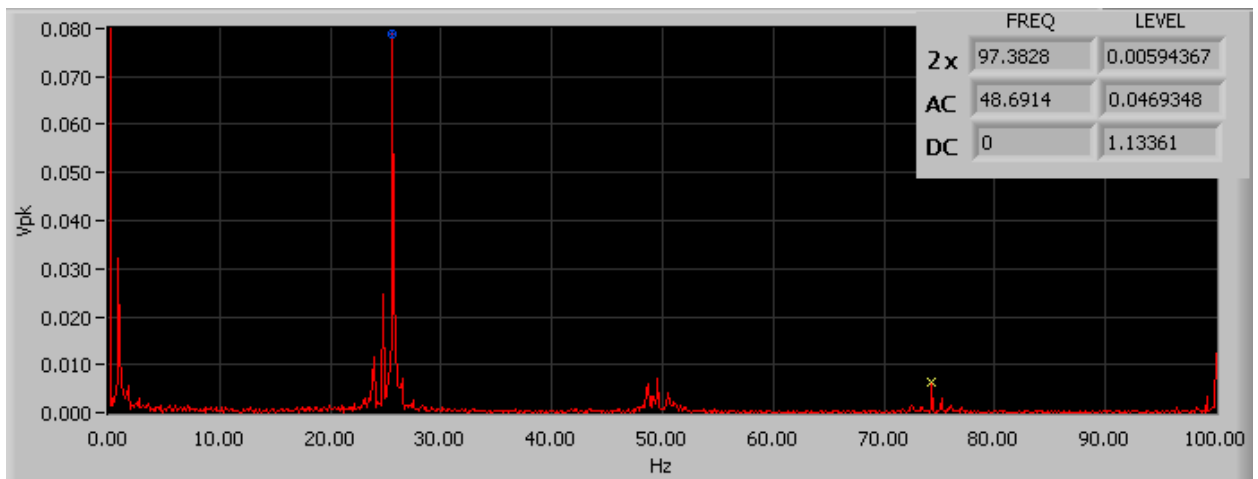


(e)

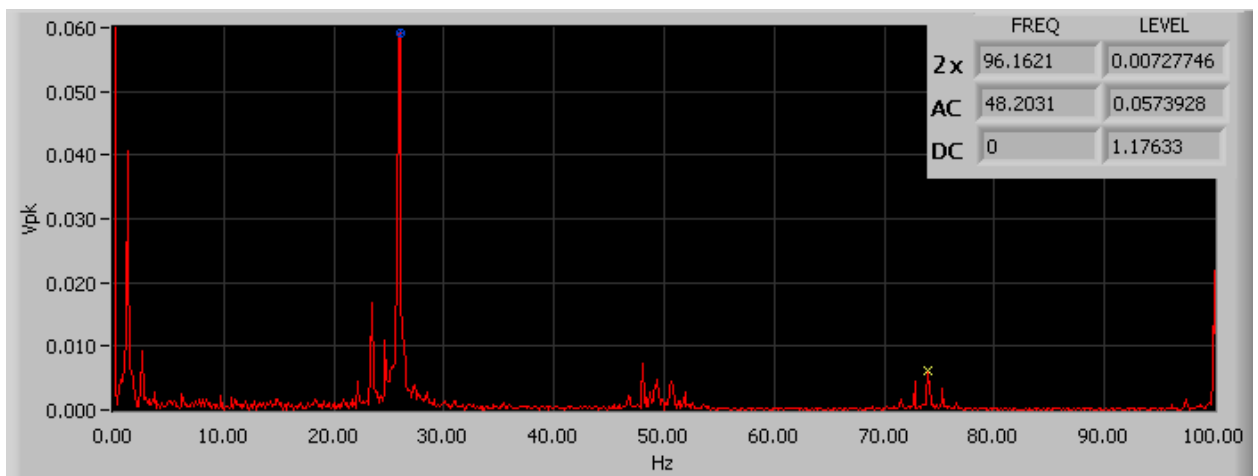
Figura D.1: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



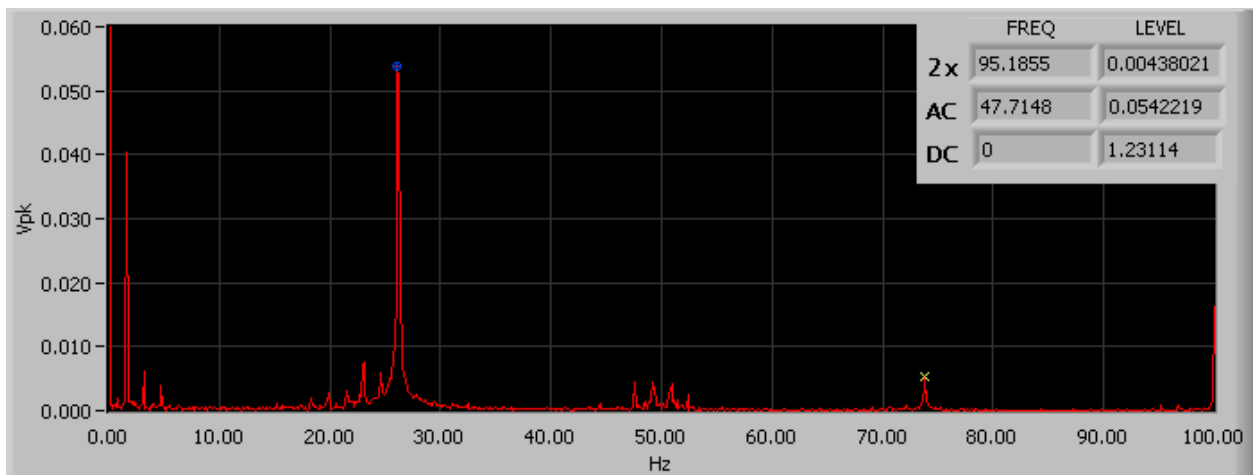
(a)



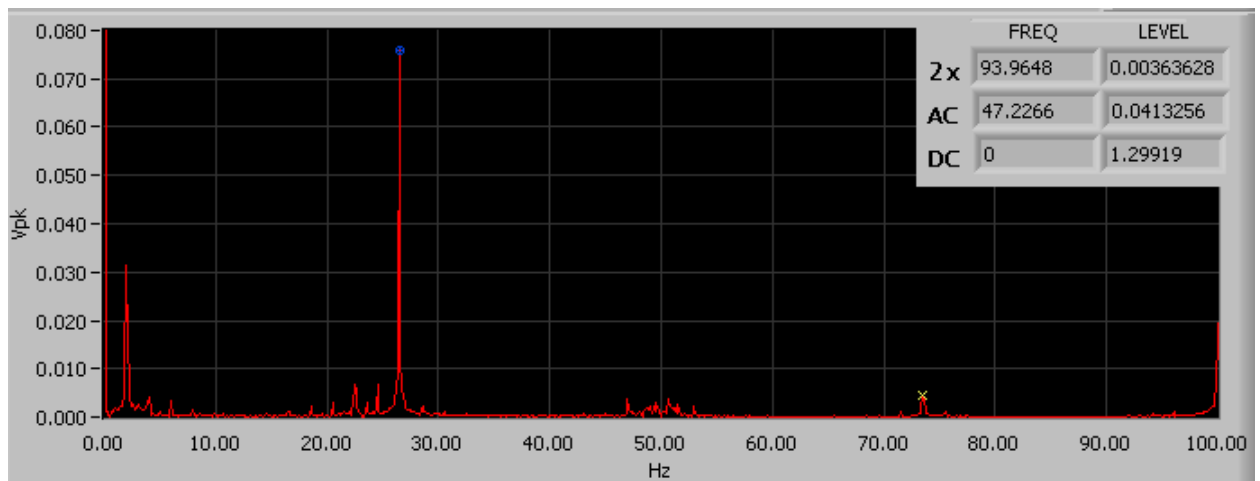
(b)



(c)

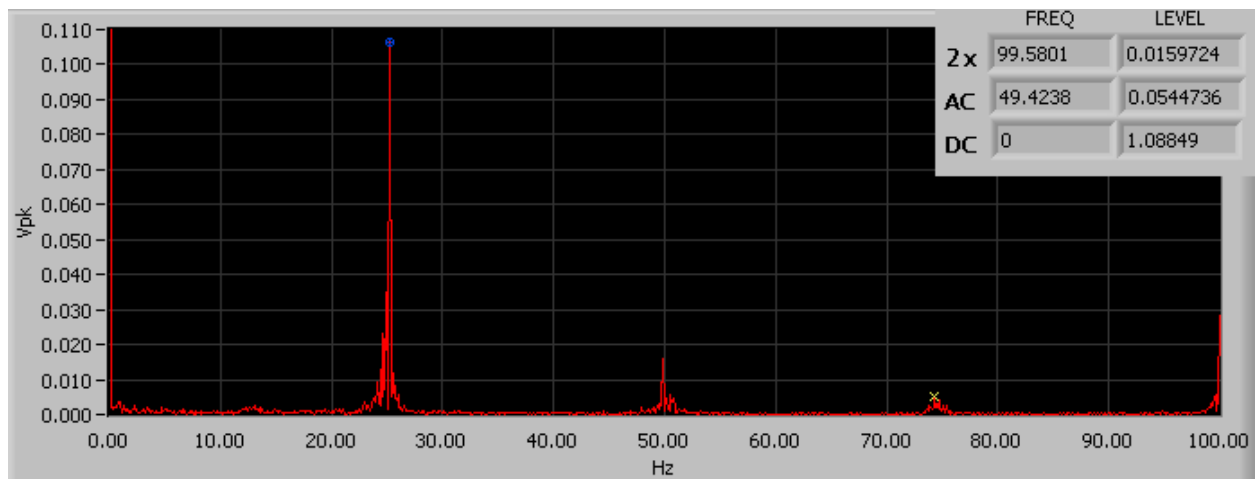


(d)

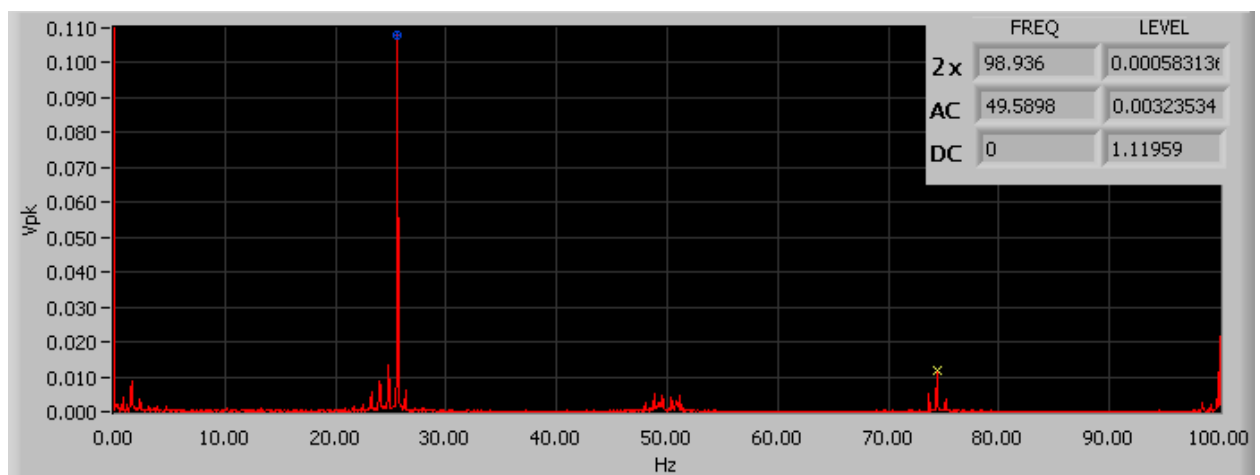


(e)

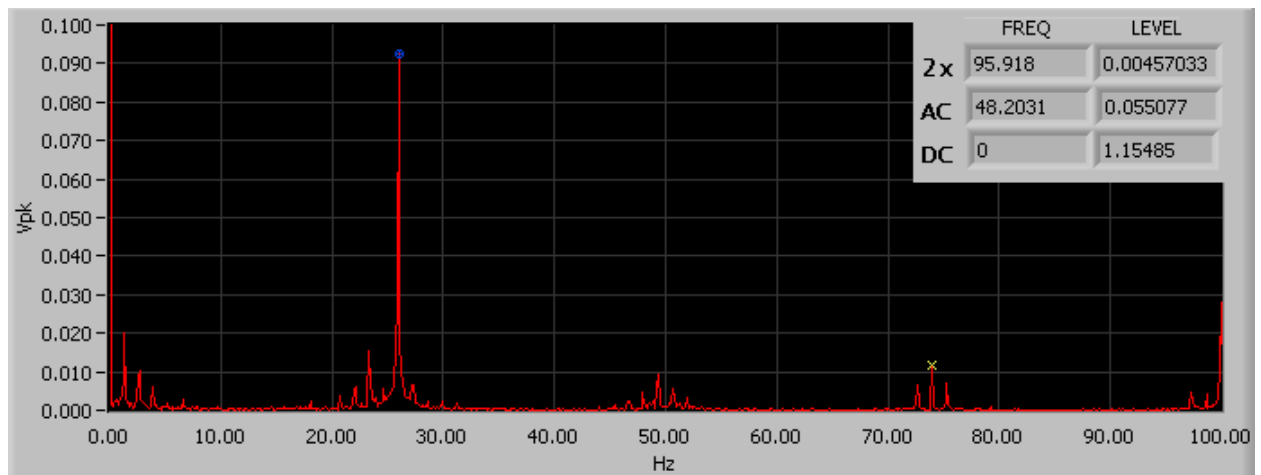
Figura D.2: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



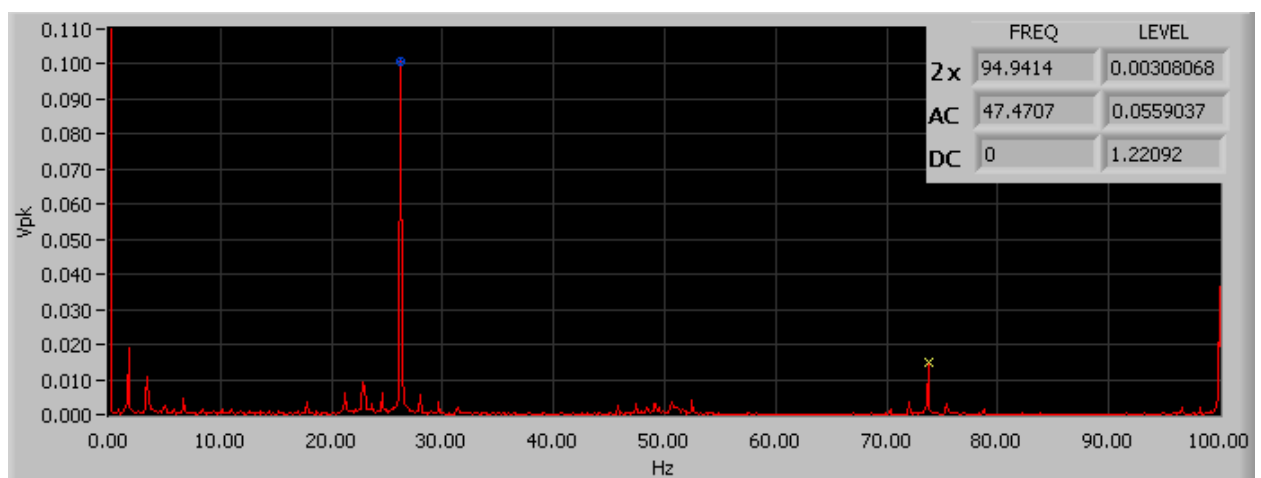
(a)



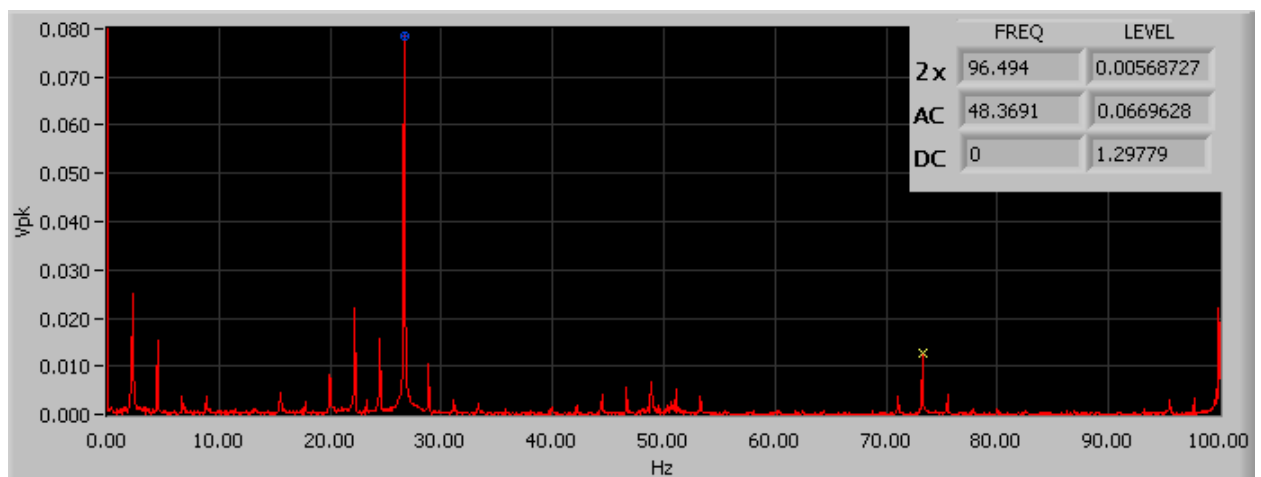
(b)



(c)

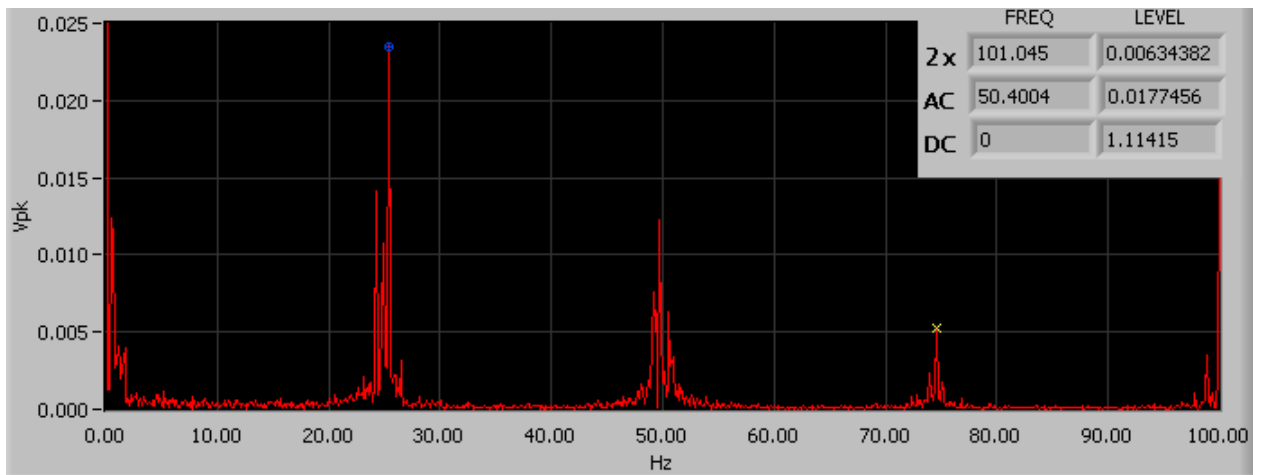


(d)

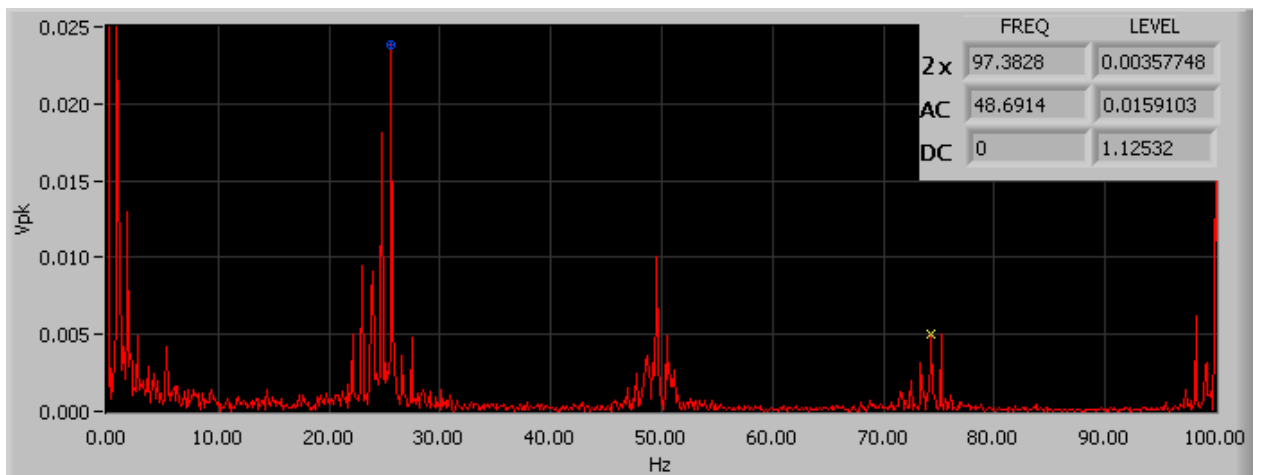


(e)

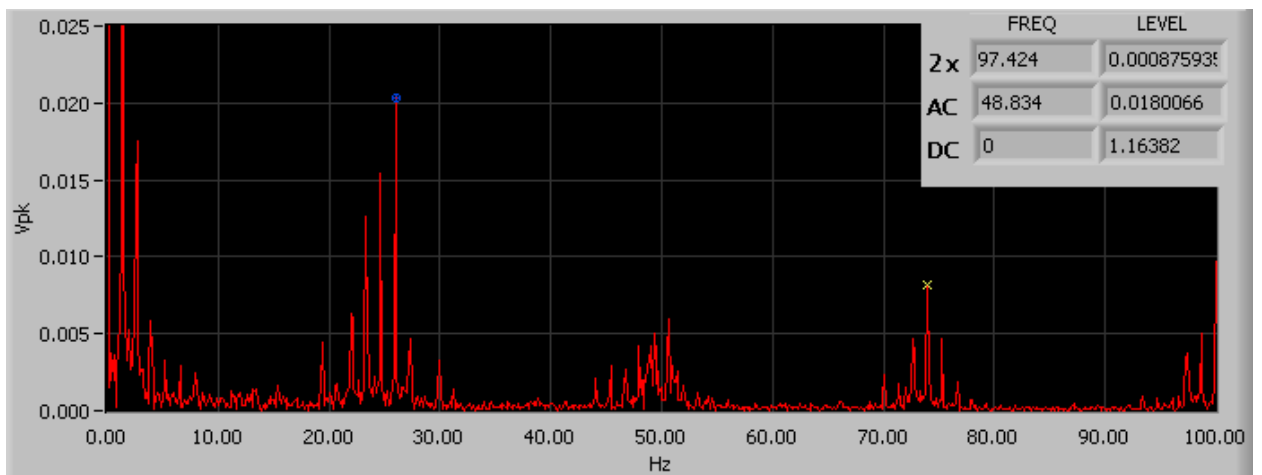
Figura D.3: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



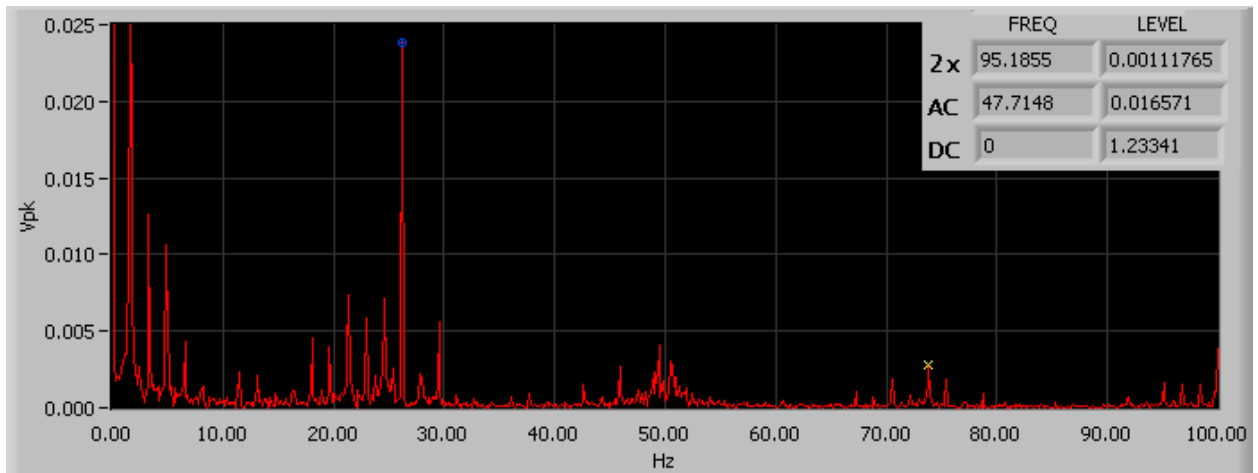
(a)



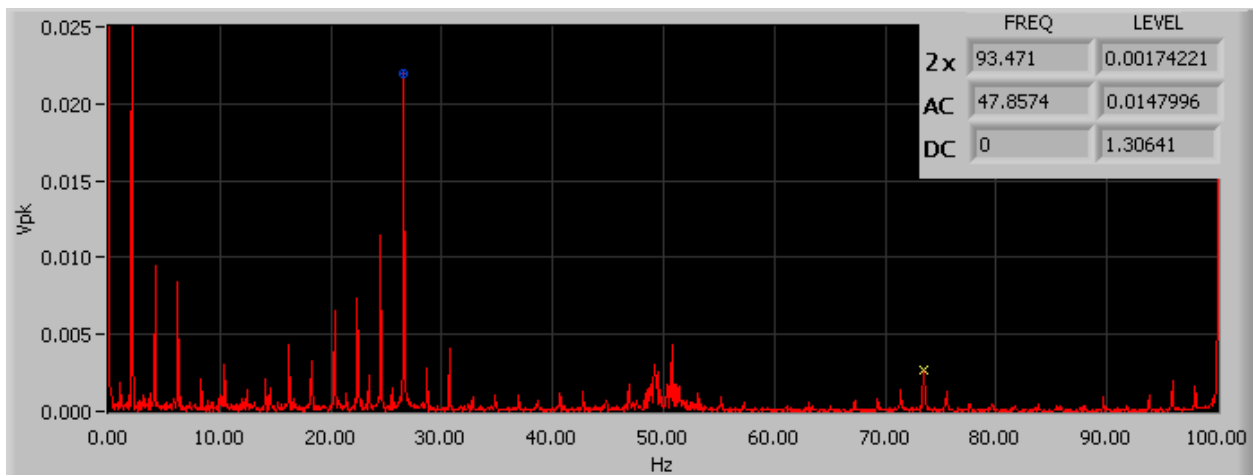
(b)



(c)

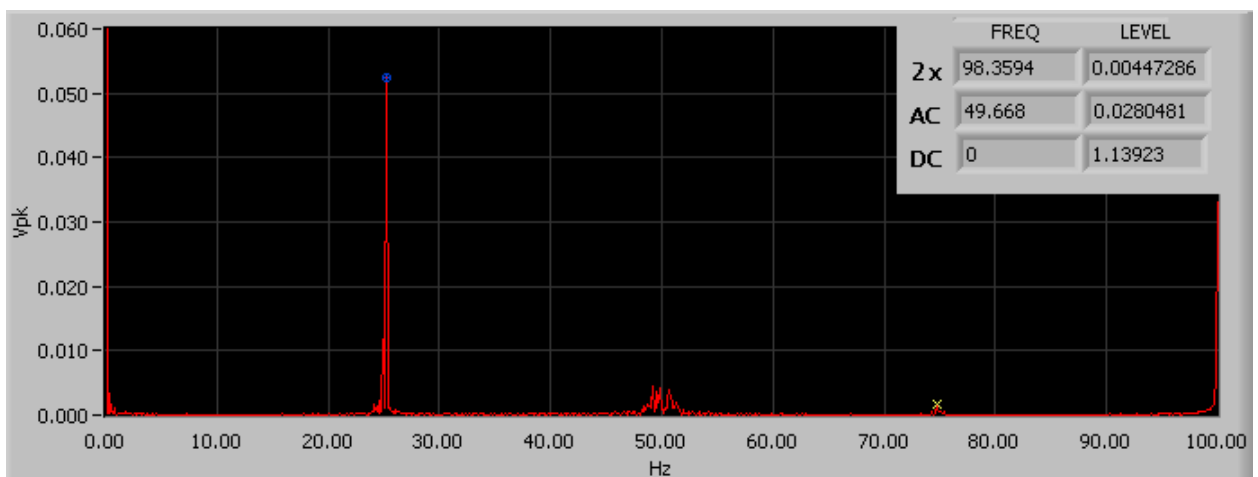


(d)

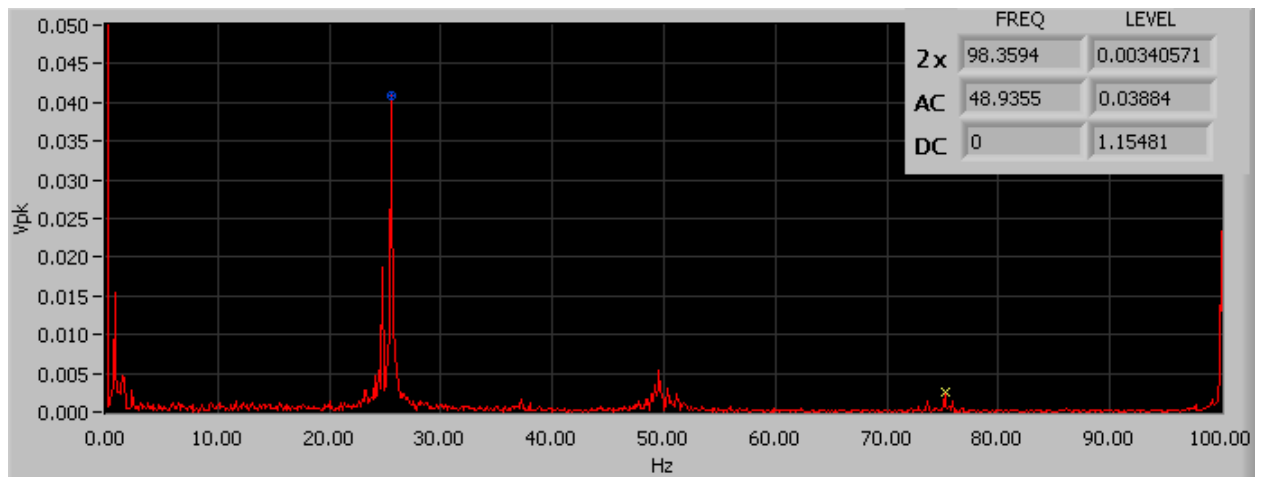


(e)

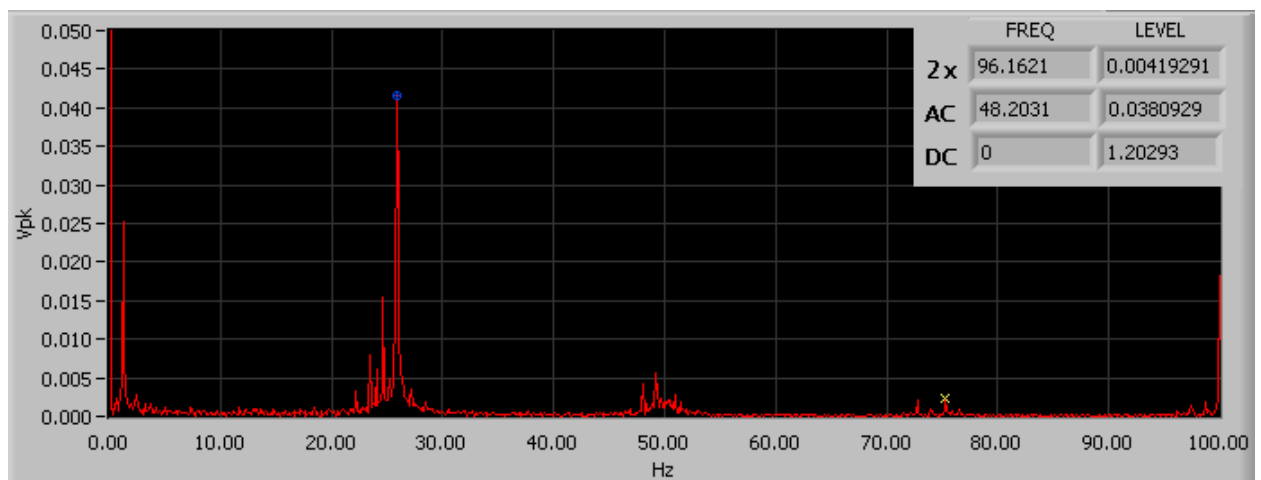
Figura D.4: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



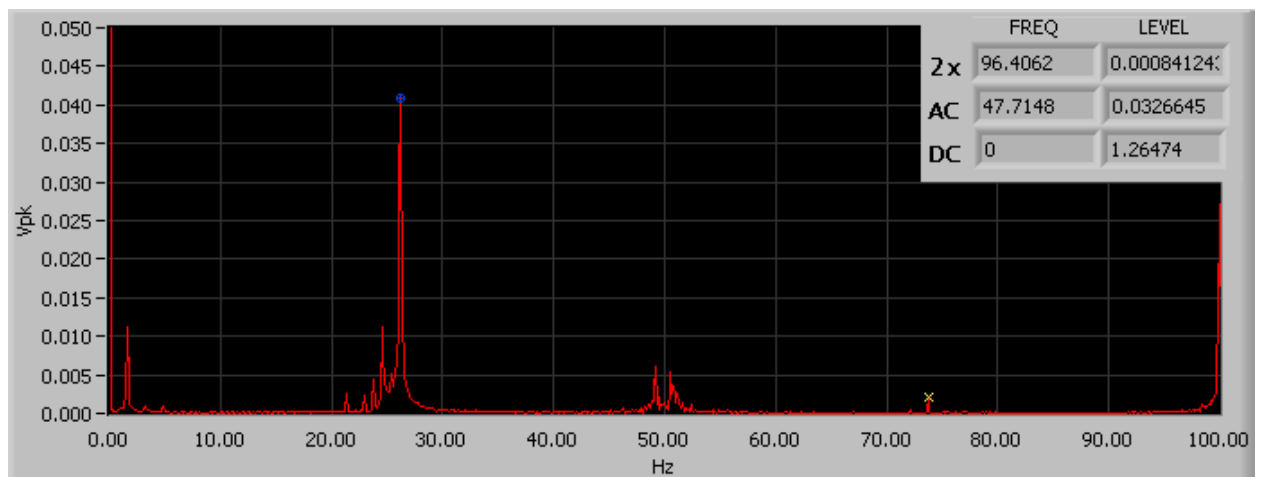
(a)



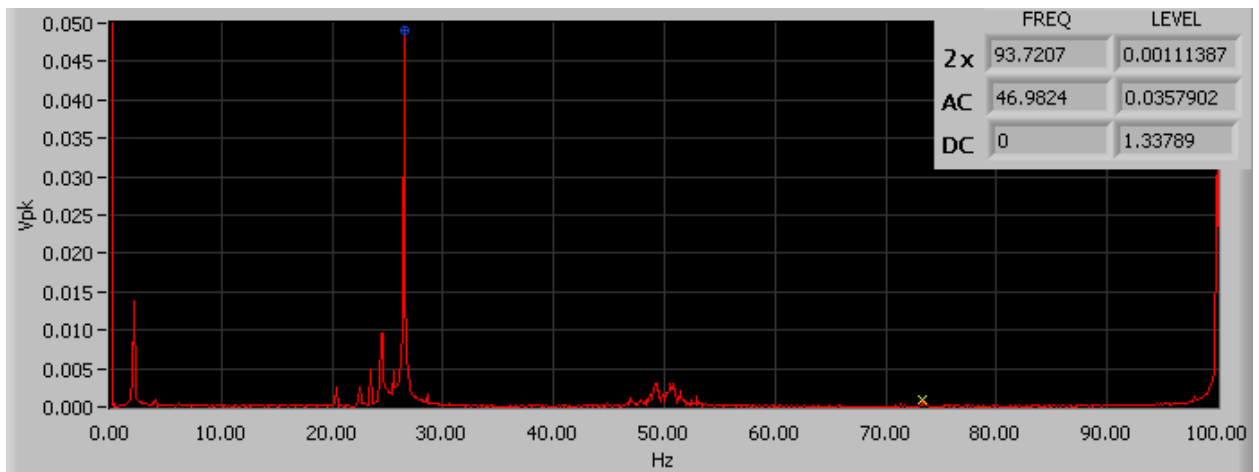
(b)



(c)

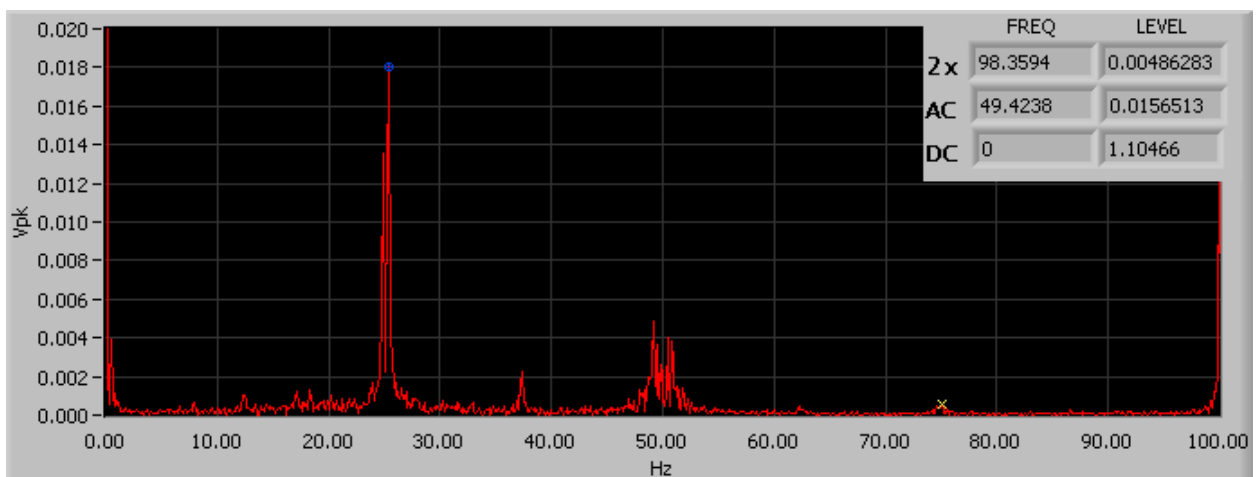


(d)

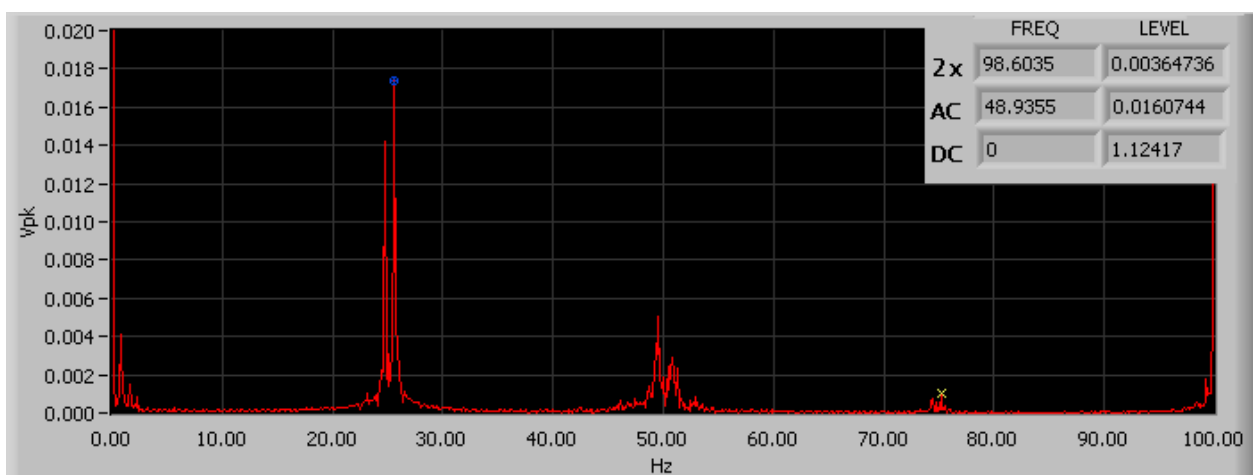


(e)

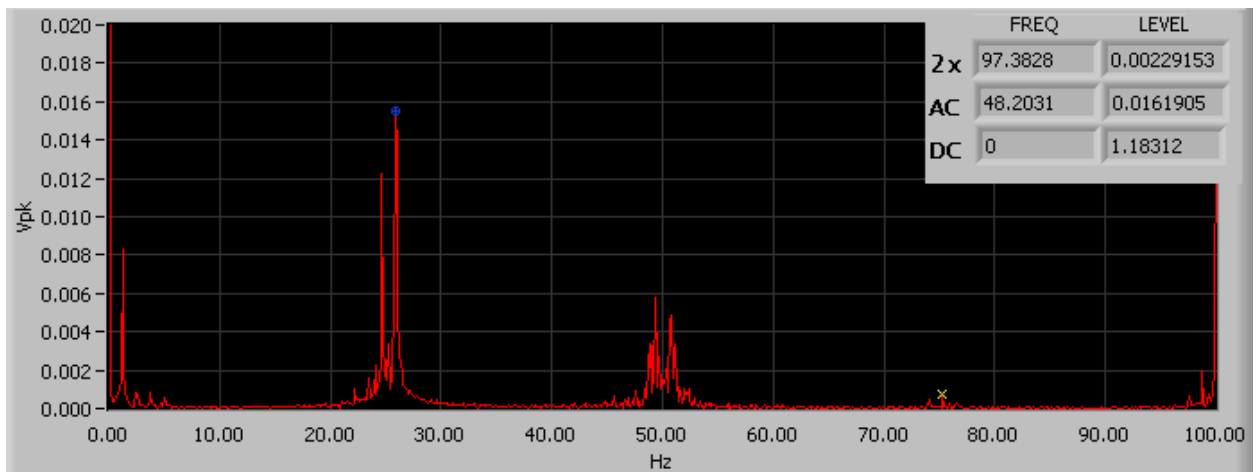
Figura D.5: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



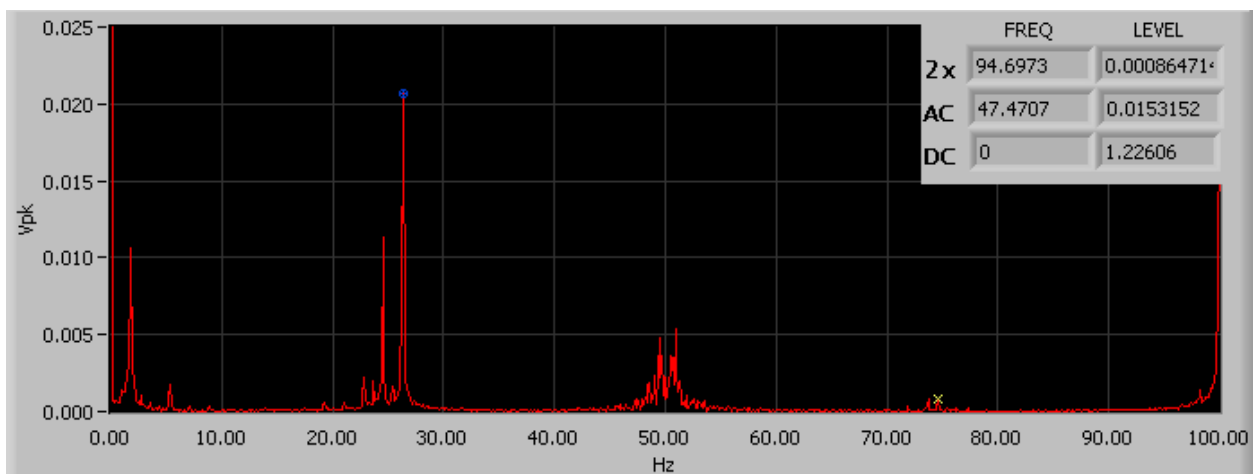
(a)



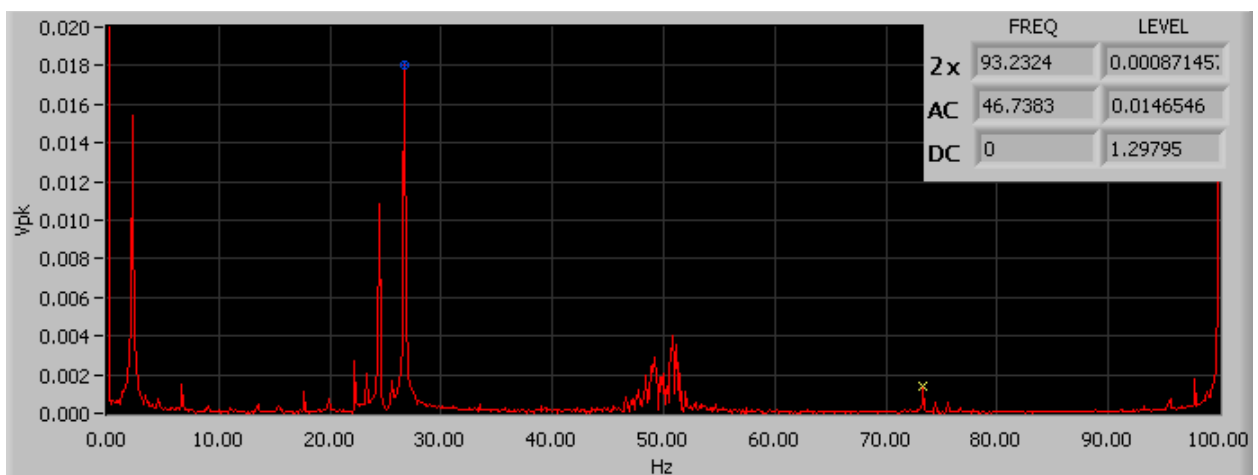
(b)



(c)



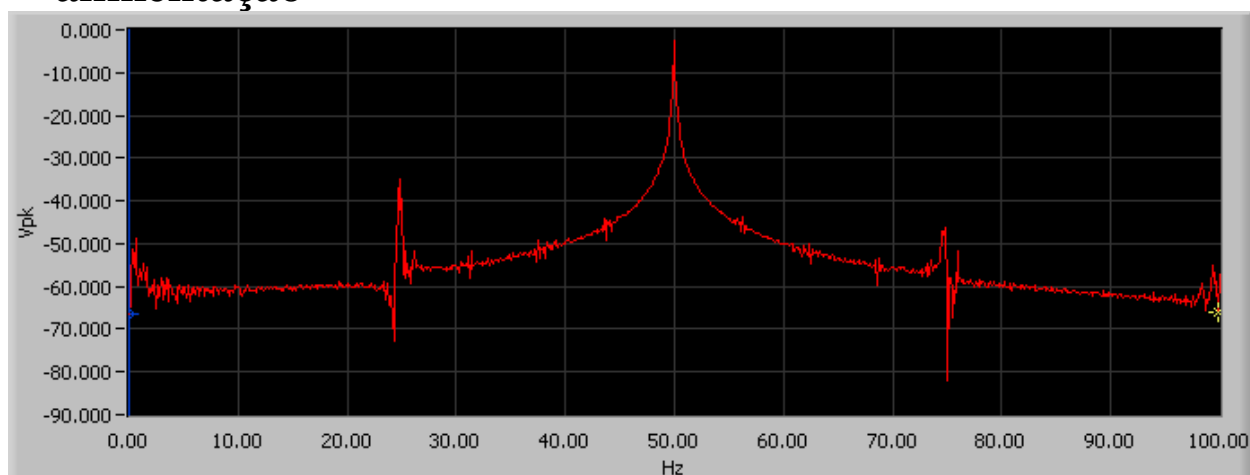
(d)



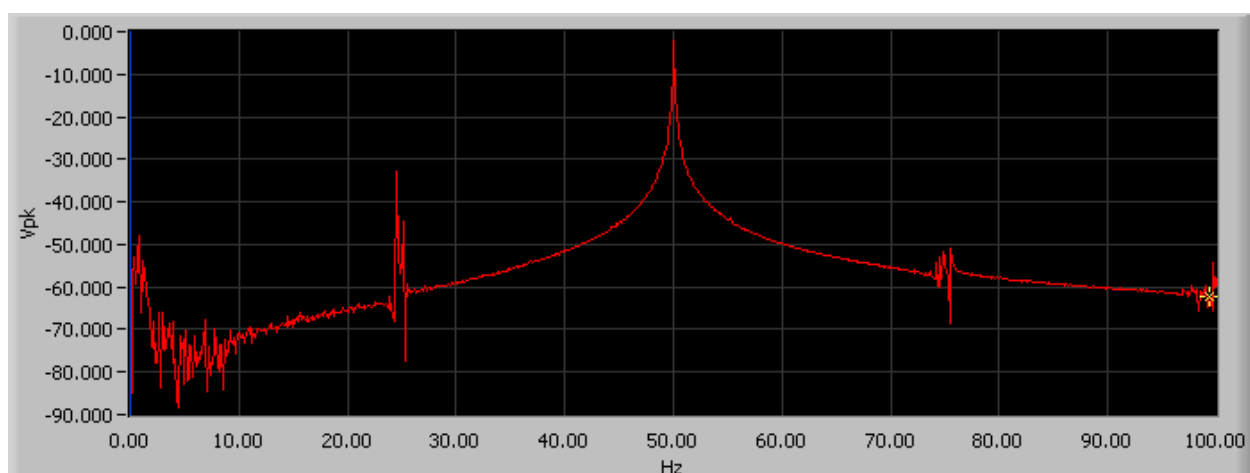
(e)

Figura D.6: Representação do espectro de frequência do módulo do vetor de Park para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%

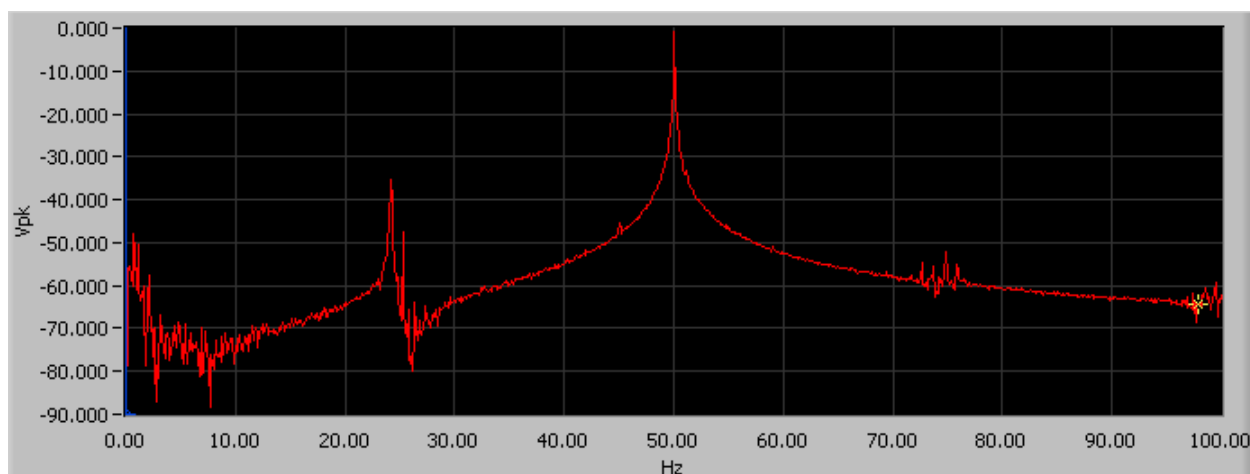
Anexo E – Resultados obtidos através da FFT da corrente de alimentação



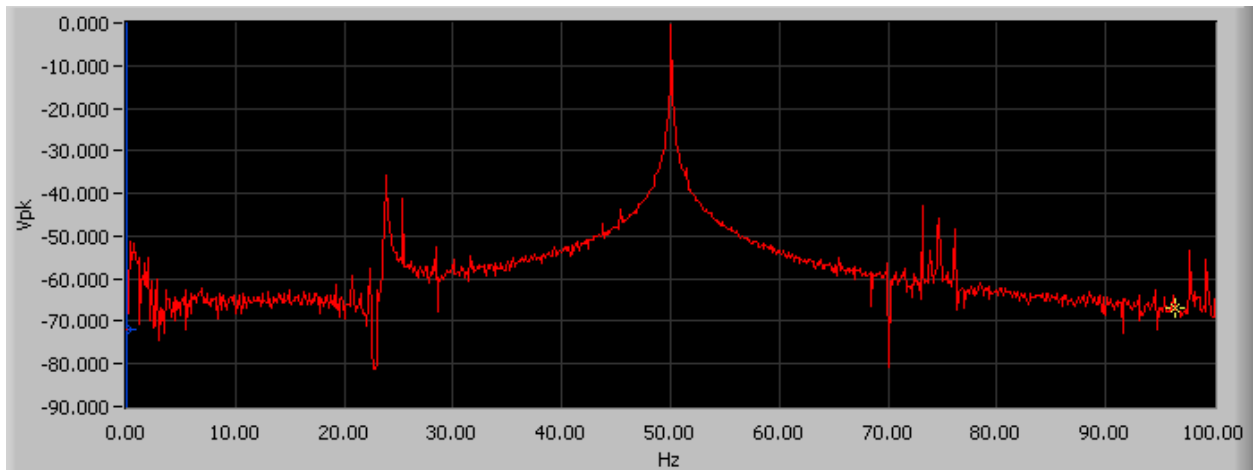
(a)



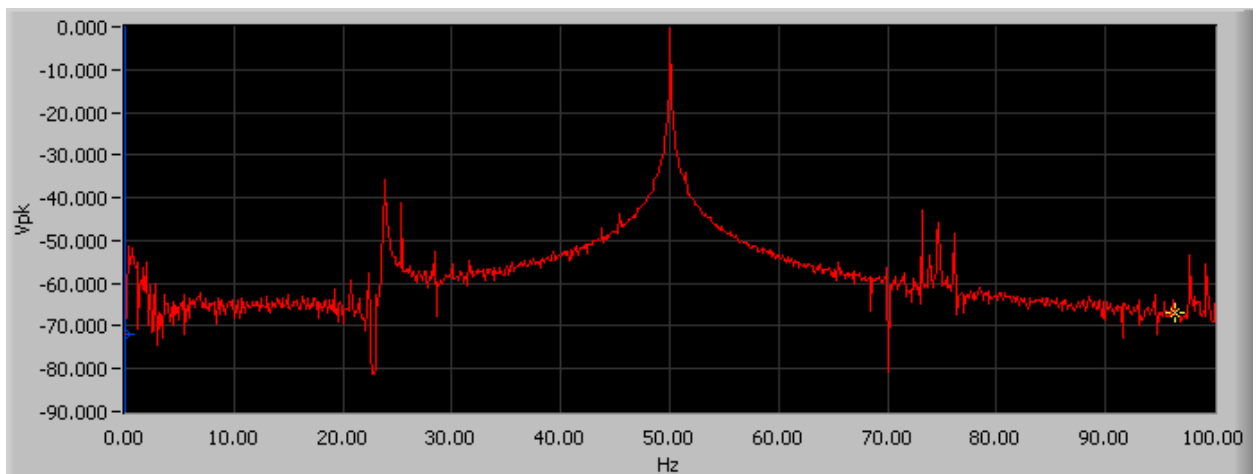
(b)



(c)

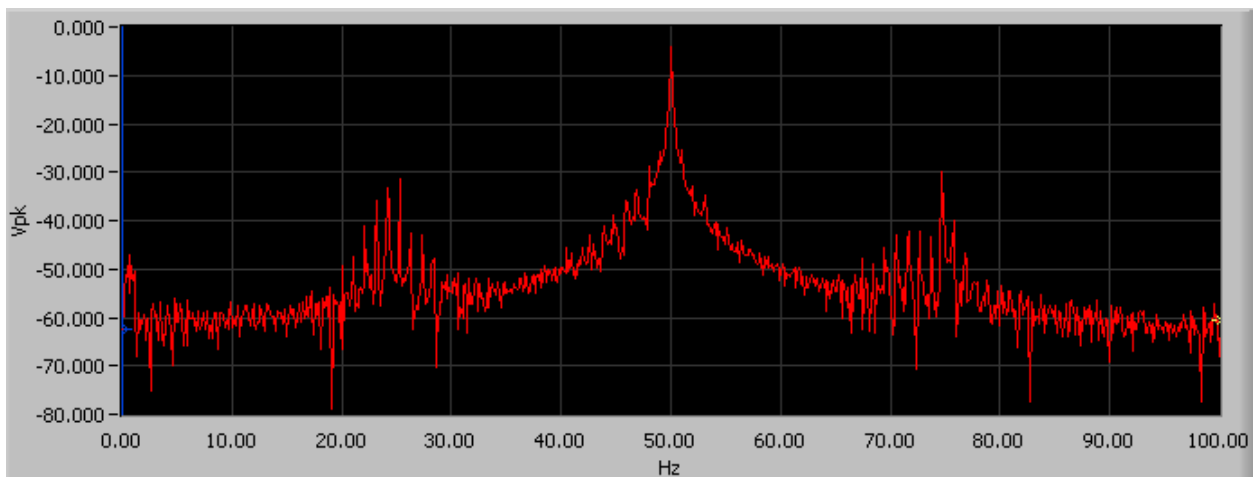


(d)

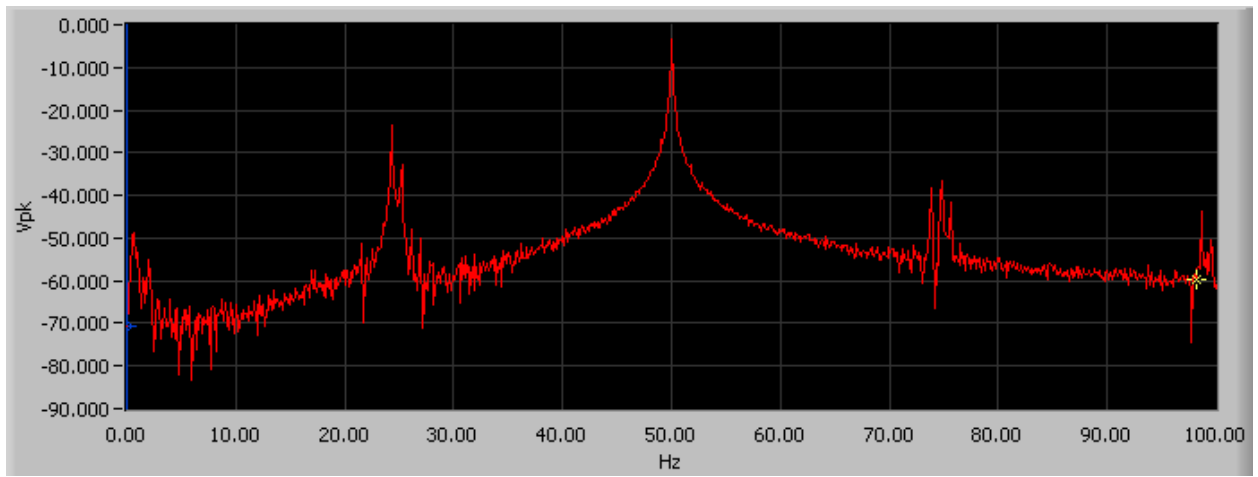


(e)

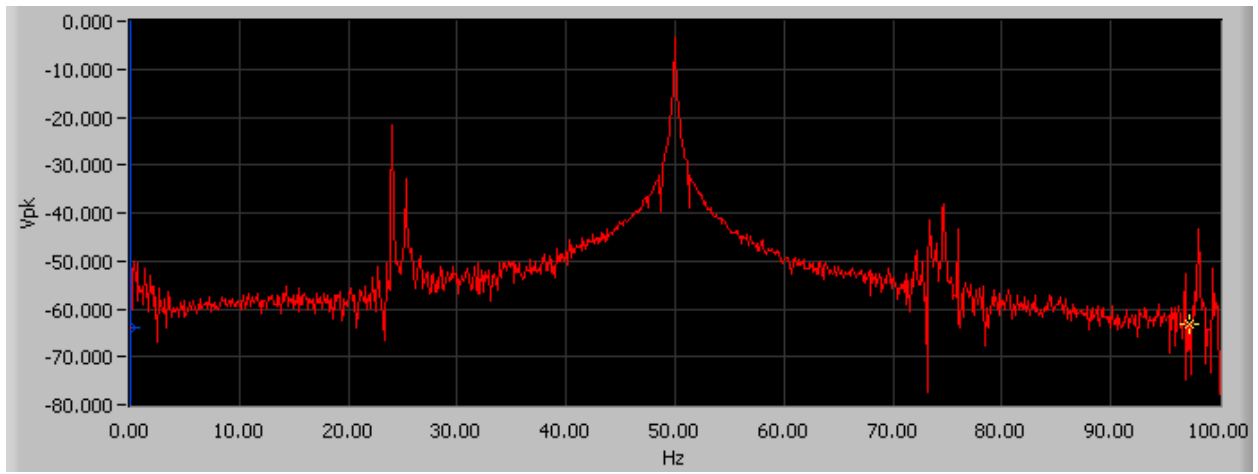
Figura E.1: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



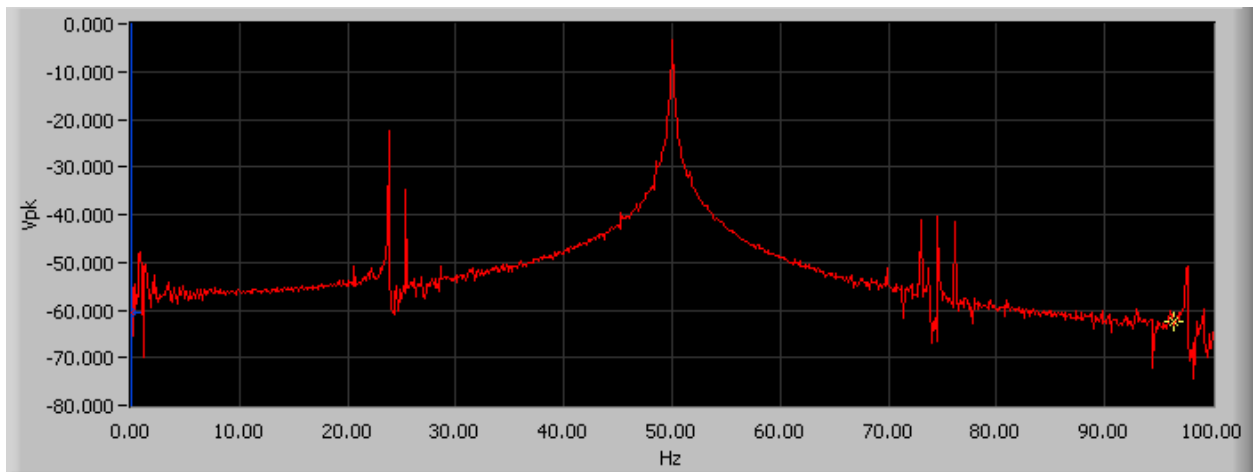
(a)



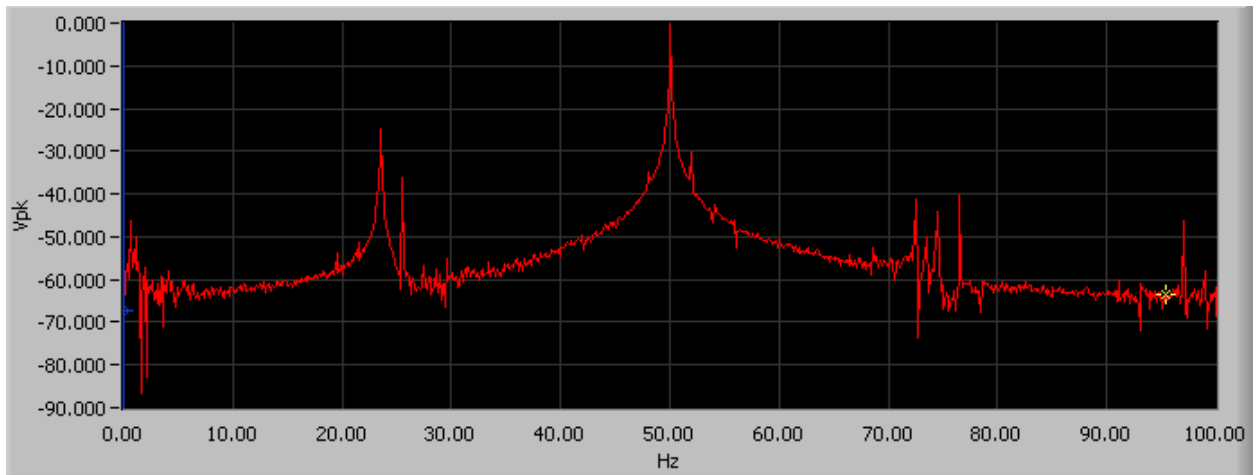
(b)



(c)

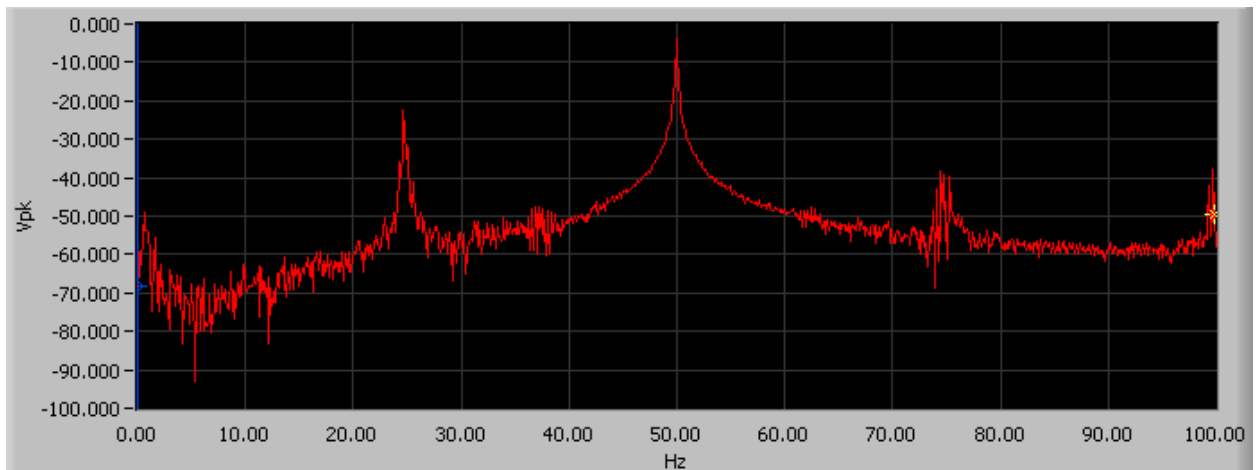


(d)

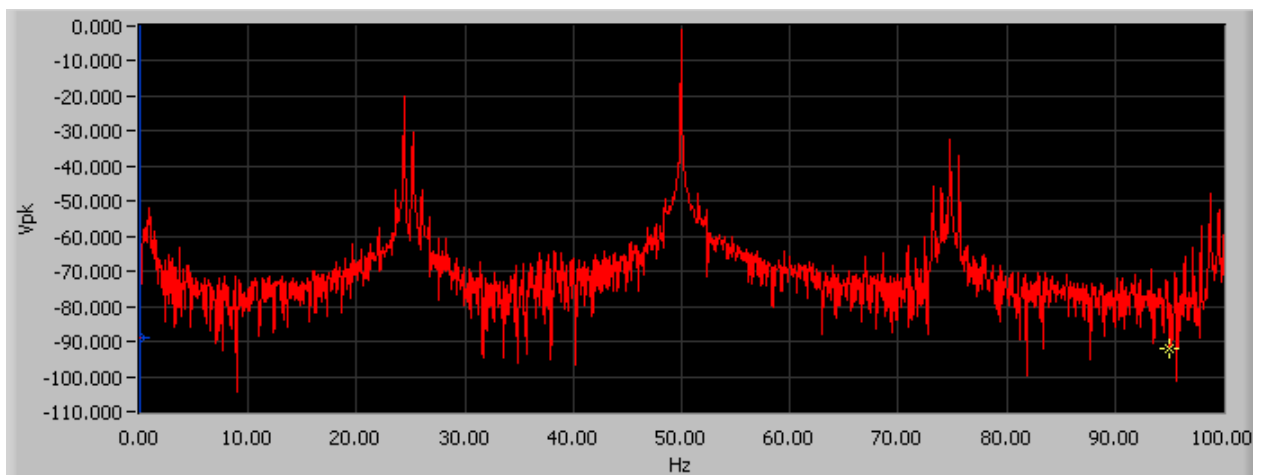


(e)

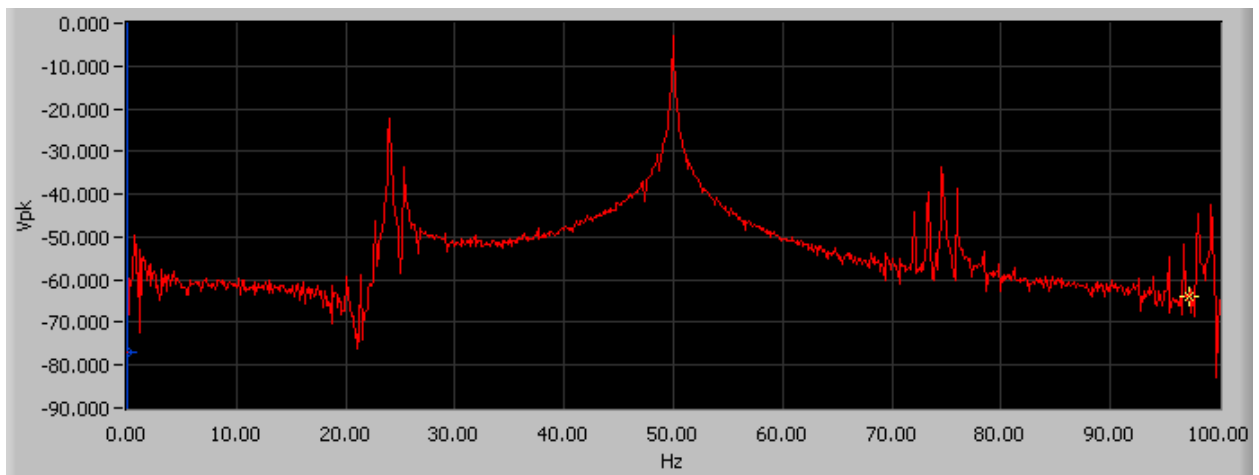
Figura E.2: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



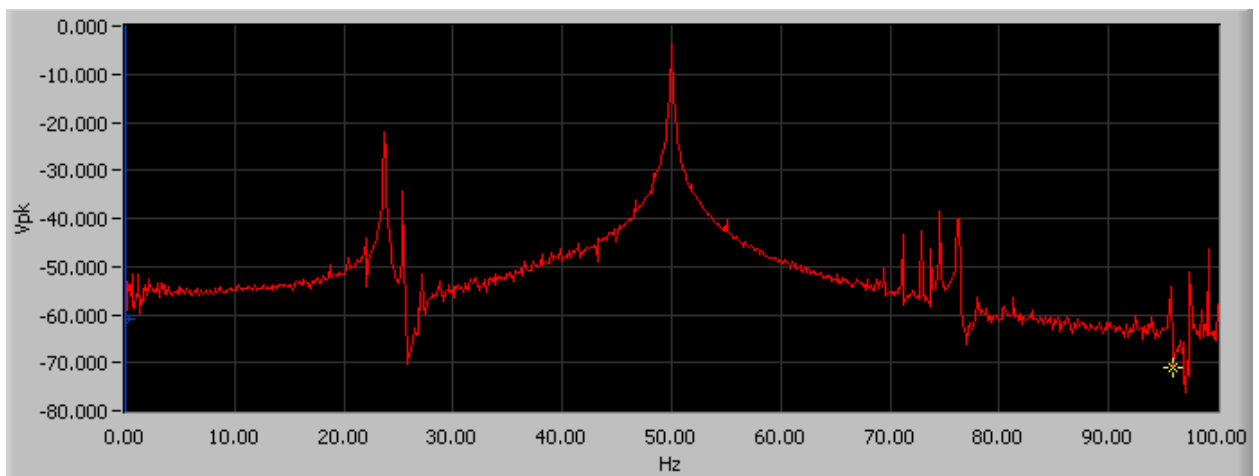
(a)



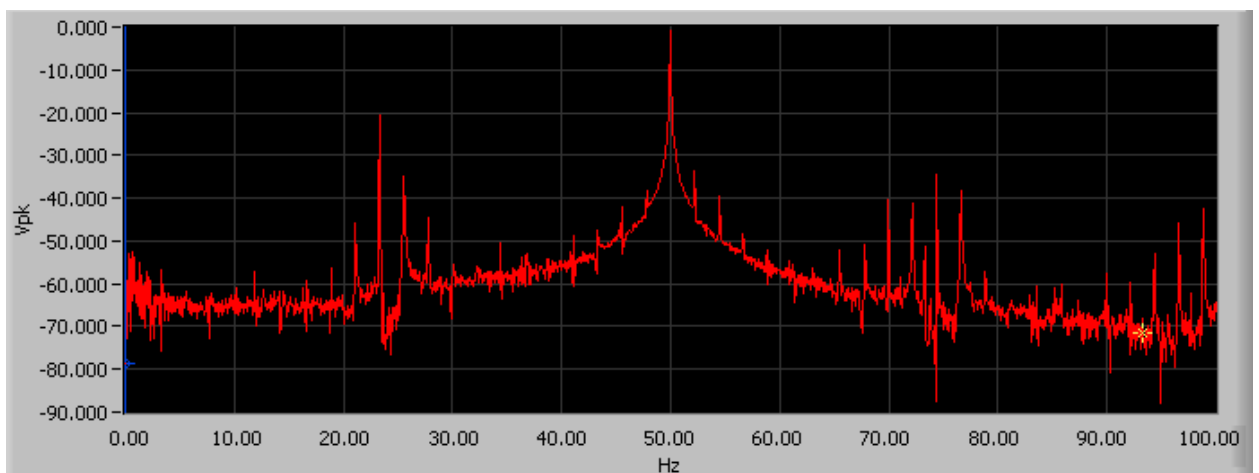
(b)



(c)

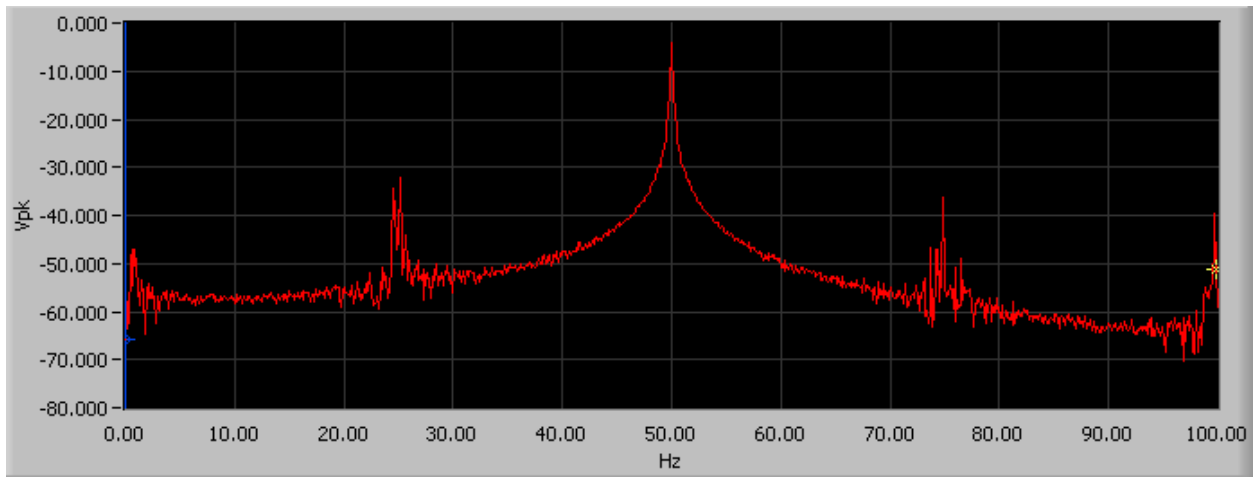


(d)

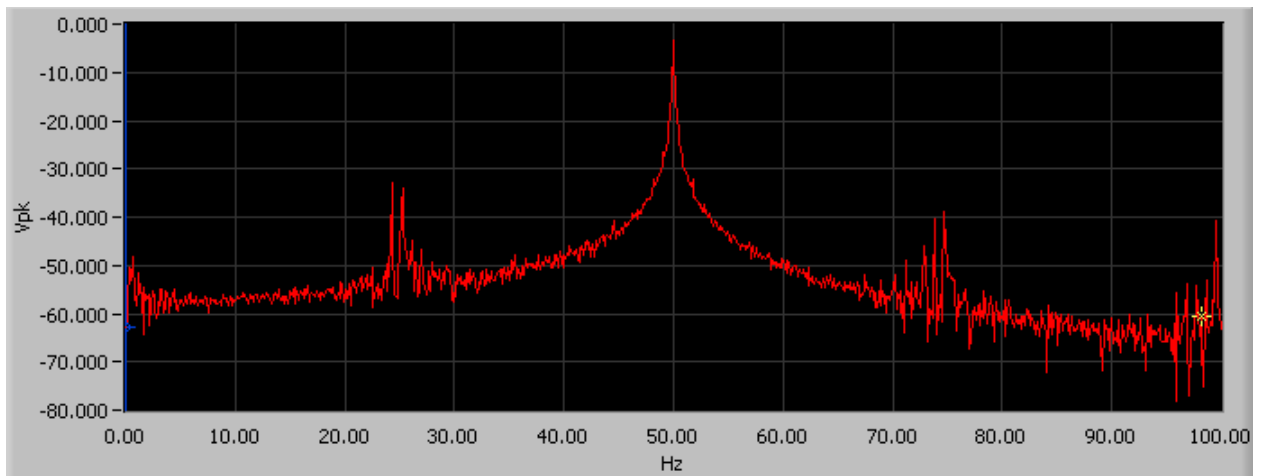


(e)

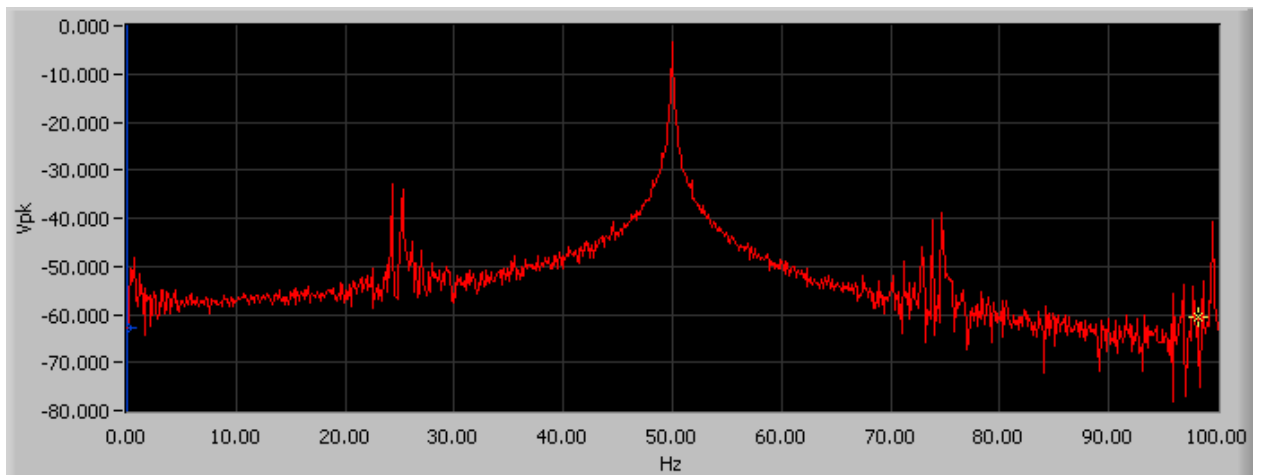
Figura E.3: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0,4 e excentricidade dinâmica 0 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



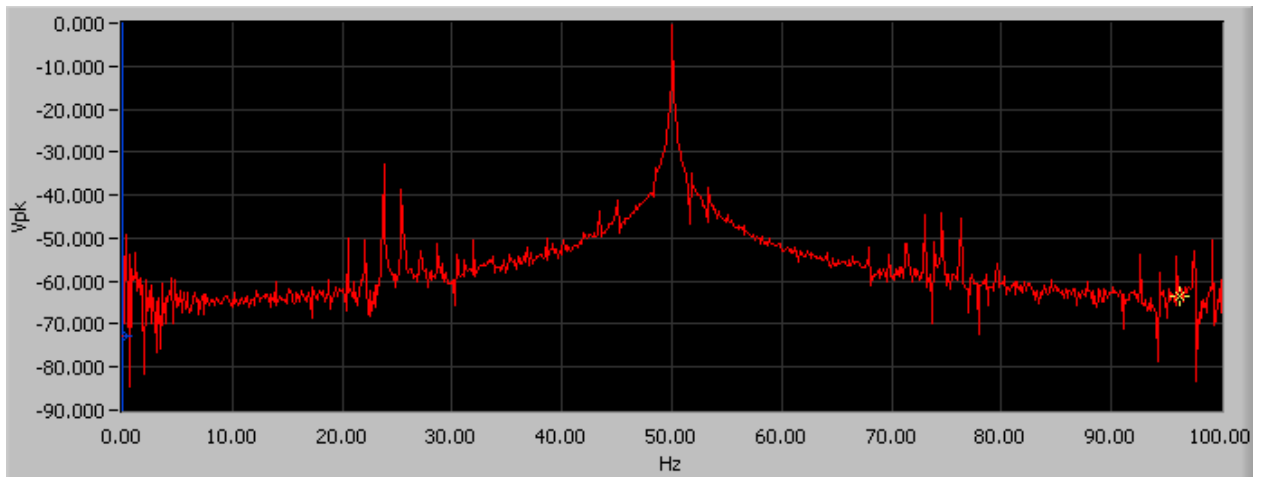
(a)



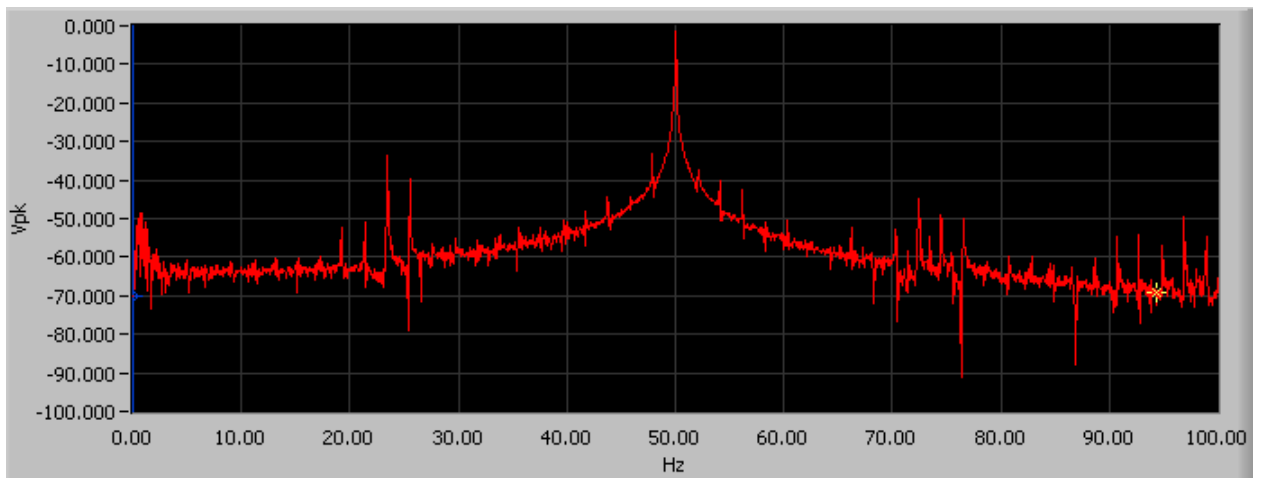
(b)



(c)

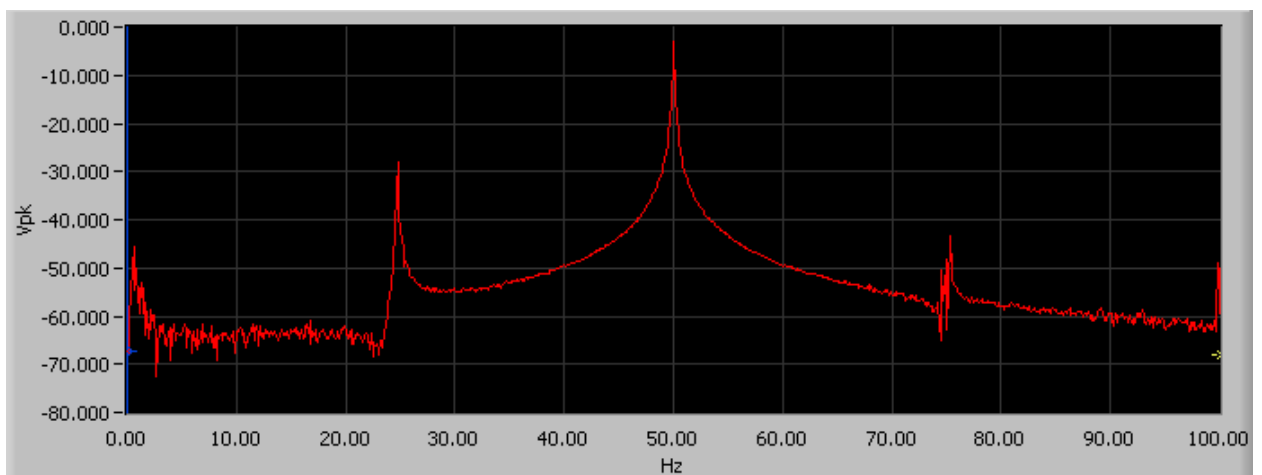


(d)

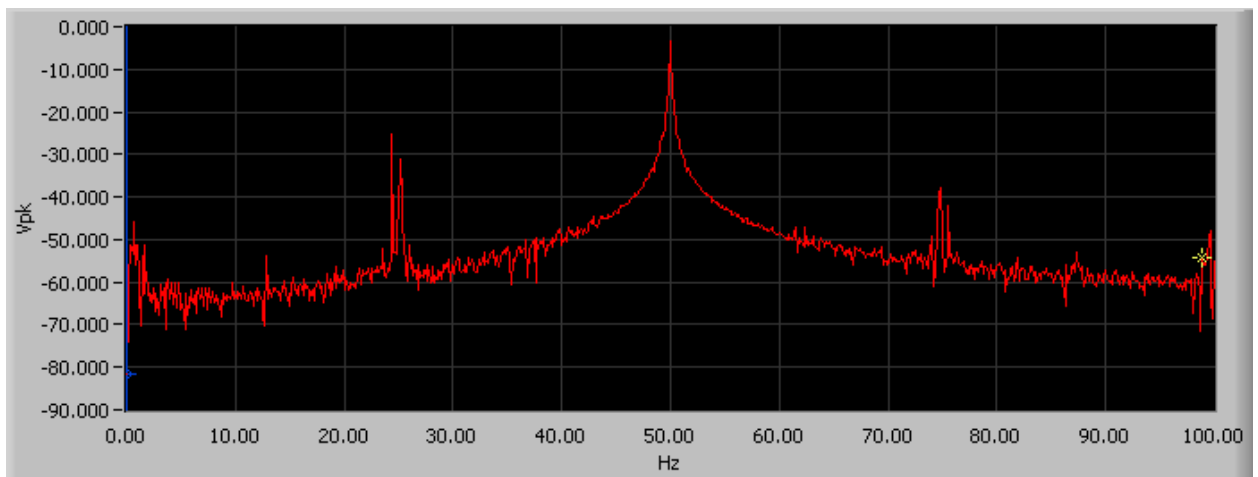


(e)

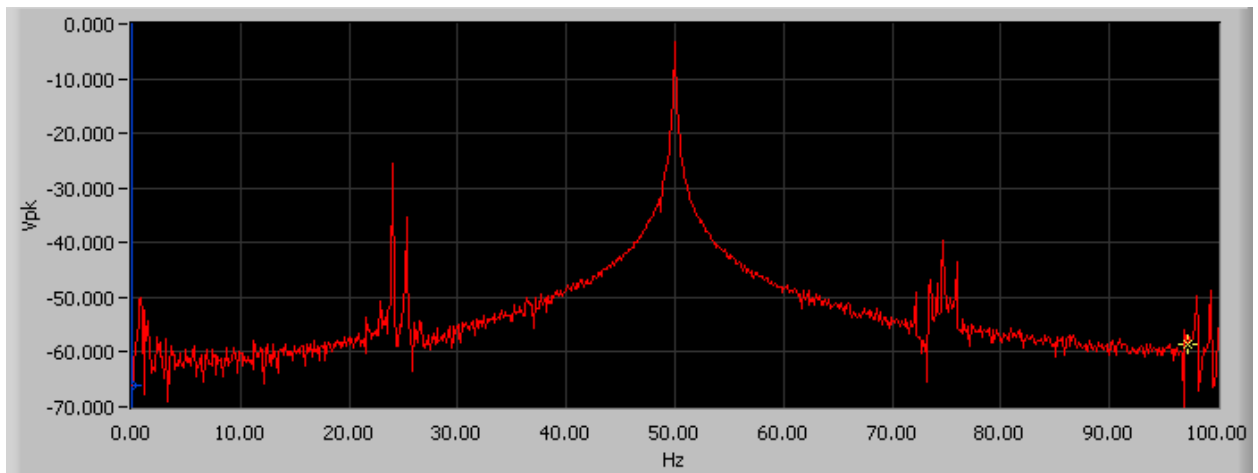
Figura E.4: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



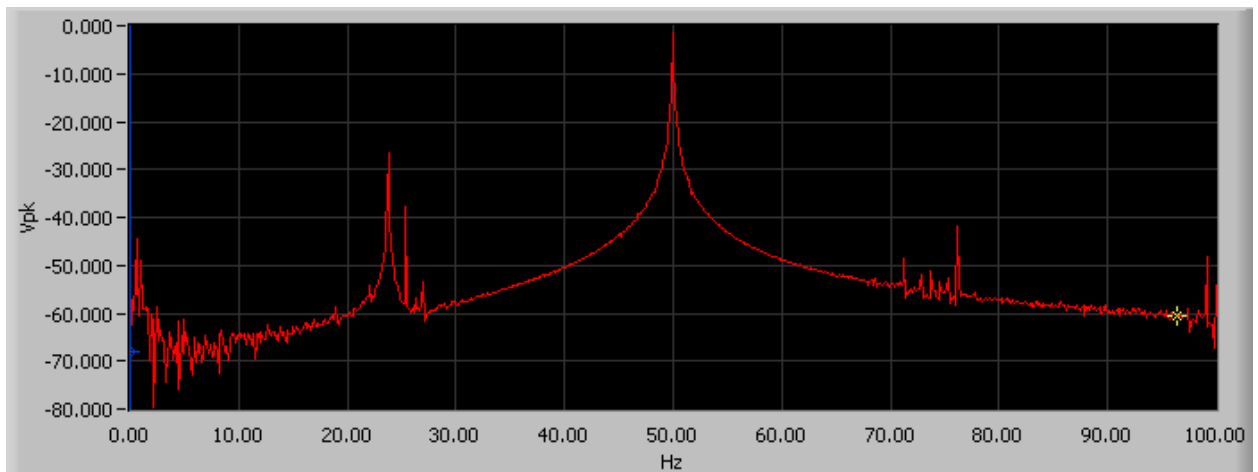
(a)



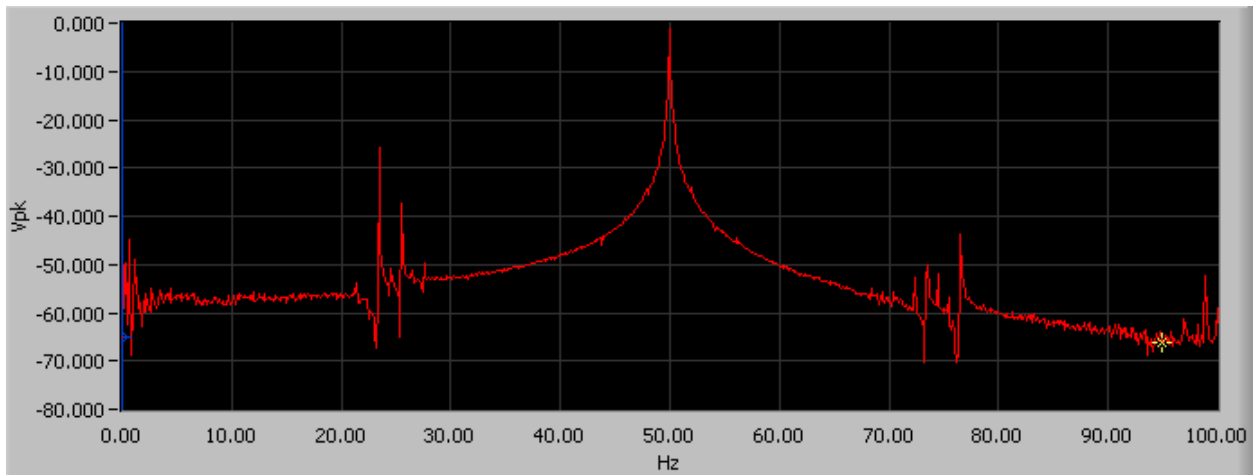
(b)



(c)

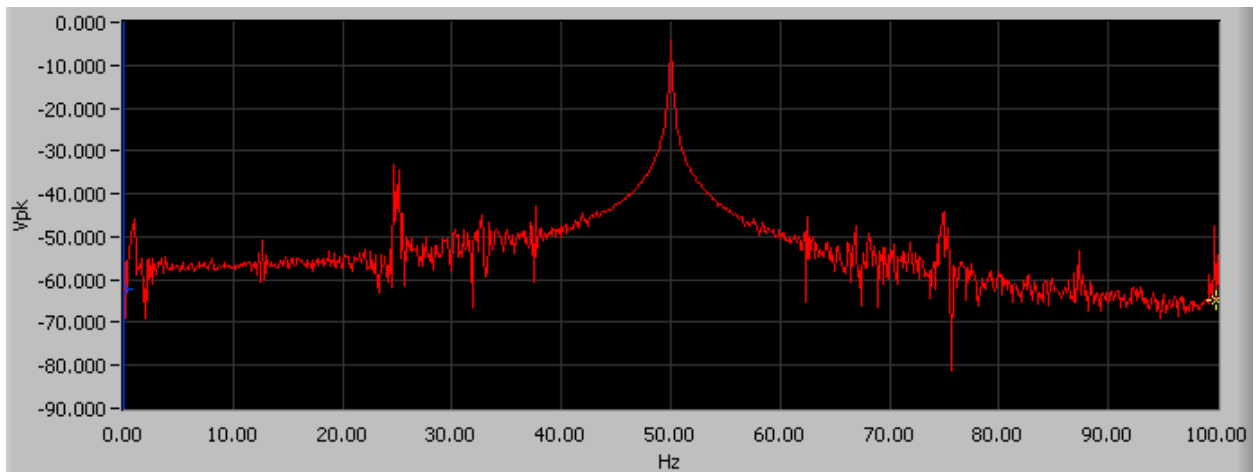


(d)

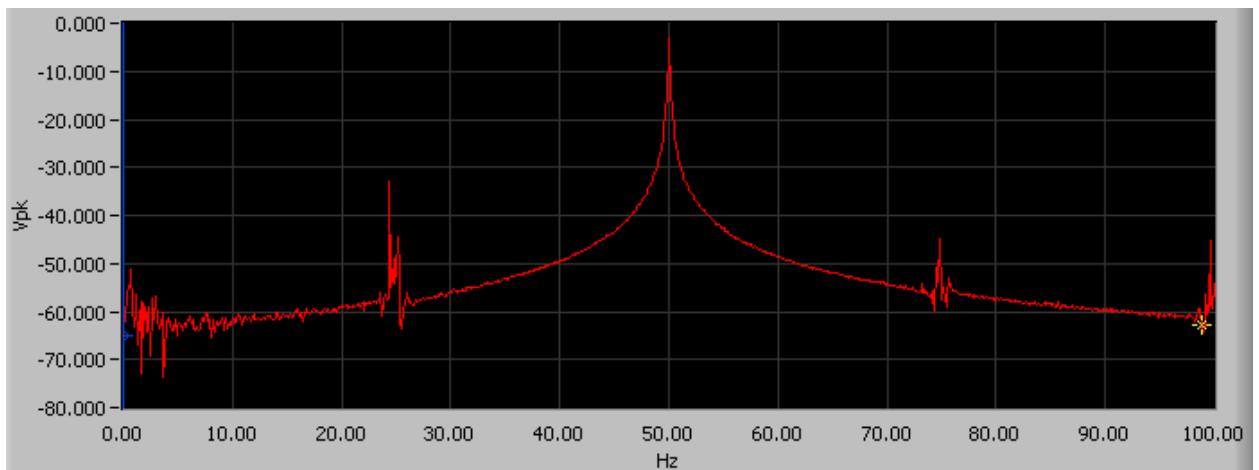


(e)

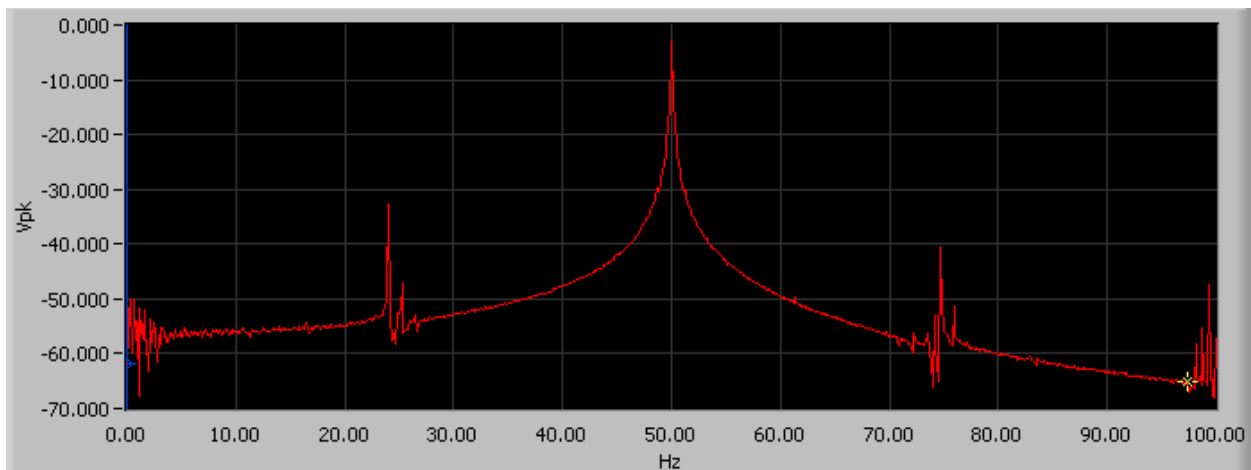
Figura E.5: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0,2 e excentricidade dinâmica 0,2 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%



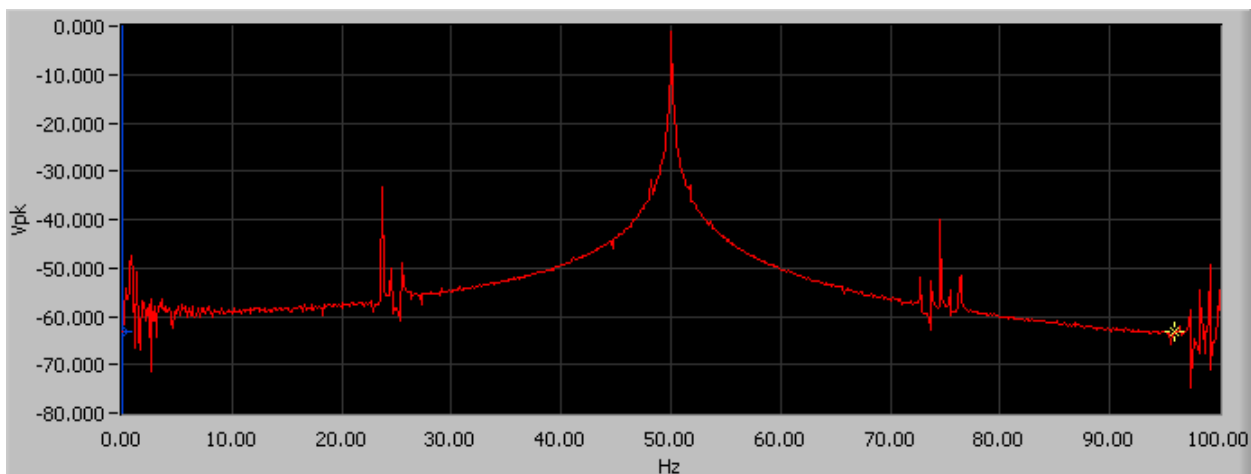
(a)



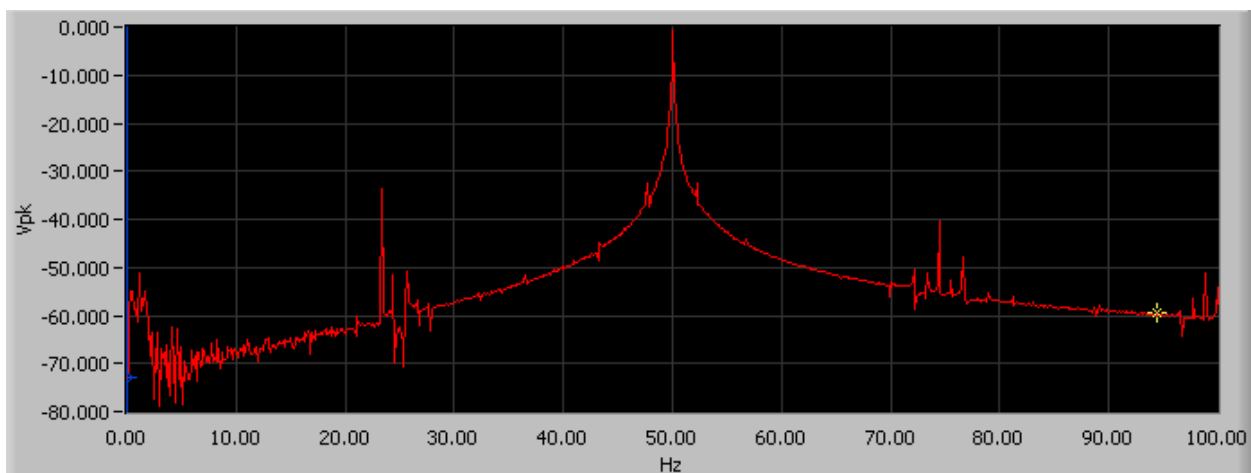
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura E.6: Representação da FFT da corrente para excentricidade estática 0 e excentricidade dinâmica 0,4 e nível de carga: (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 100%