

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IMPACTO DOS HARMÔNICOS DE TENSÃO NA TEMPERATURA E DESEMPENHO  
DE MOTORES ELÉTRICOS CLASSES IE2, IE3 E IE4.

JONATHAN MUÑOZ TABORA

DM: 02 / 2020

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

IMPACTO DAS HARMÔNICAS DE TENSÃO NA TEMPERATURA E DESEMPENHO  
DE MOTORES ELÉTRICOS CLASSES IE2, IE3 E IE4.

JONATHAN MUÑOZ TABORA

DM: 02 / 2020

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JONATHAN MUÑOZ TABORA

IMPACTO DOS HARMÔNICOS DE TENSÃO NA TEMPERATURA E DESEMPENHO  
DE MOTORES ELÉTRICOS CLASSES IE2, IE3 E IE4.

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2020



Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

T114i            Tabora, Jonathan Muñoz, 1993-  
                    Impacto dos harmônicos de tensão na temperatura e desempenho de motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4 / Jonathan Muñoz Tabora.-2019.

                    Orientador: Maria Emília de Lima Tostes  
                    Coorientador: Edson Ortiz de Matos  
                    Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2019.

                    1. Motores elétricos. 2. Harmônicos (ondas elétricas). I. Título.

CDD 23. ed. 621.46

---

Elaborada por Lucicléa S. de Oliveira – CRB -2/648

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“IMPACTO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO  
NA TEMPERATURA E DESEMPENHO DE MOTORES  
ELÉTRICOS CLASSES IE1, IE3 E IE4”**

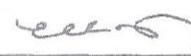
AUTOR: JONATHAN MUNOZ TABORA

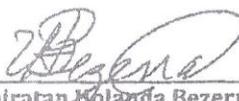
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 19/02/2020

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes  
(Orientadora - PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos  
(Co-Orientador - FEEB/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra  
(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Aparecido Ferrelra  
(Avaliador Externo - UERJ)

VISTO:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

# DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mis padres: Manuel Muñoz y Enma Tabora, que con amor y sacrificio me ayudaron a ser quien soy hoy, a Henry y Darwin por también cuidar de mí a lo largo de mi vida.*

# AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a Dios por acompañarme en todo este recorrido, fortaleciendo mis debilidades y ayudándome a vencer mis miedos. Por regalarme dos de los mejores años de mi vida llenos de personas, conocimiento, viajes y experiencias que sin duda recordaré durante toda mi vida.

A mi familia, que sin saber lo que hacía, siempre me apoyaron en la realización de cada uno de mis sueños, siempre acompañándome y ayudándome a lograr este, mi objetivo.

A Thiago Motta, por la dedicación y asesoría en la orientación de este trabajo. A Luiz Eduardo Sales, por su amistad y consejos brindados en estos dos años. A Carlos Eduardo, por siempre mostrar disponibilidad ante las dudas surgidas en el proceso.

A la profesora María Emilia Tostes, por tener en bien orientarme y sobre todo mostrar siempre disposición en el desarrollo de este trabajo. Al profesor Edson Ortiz, por su colaboración en el montaje de la banca utilizada, orientación, revisión y consejos para el mejoramiento de los experimentos y del trabajo en general.

A todos los colegas de CEAMAZON, que siempre se mostraron dispuestos a ayudarme en todo lo posible, incluyéndome en esa bonita familia que tienen y de la cual siempre me sentiré parte donde esté.

Al convenio PAEC-OEA por el soporte financiero, juntamente con los profesores de la Universidad Federal de Pará, que contribuyeron enormemente en mi crecimiento académico durante estos dos años hasta concluir mi maestría.

## RESUMO

A introdução de novas tecnologias, assim como a melhoria de materiais e processos, contribuiu para acelerar o crescimento da eficiência dos motores elétricos de indução (*Induction Motors*, IM). Atualmente no mercado é possível observar a disponibilidade de IM das classes de IE3 e IE4, bem como motores com menores eficiências, da mesma forma que propostas para IM classe IE5 estão sendo desenvolvidas. Esta dissertação visa mostrar o impacto dos harmônicos de tensão de 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem, na temperatura e desempenho de motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4, sendo o último um motor híbrido de ímãs permanentes e gaiola de esquilo (*Line Start Permanent Magnet Motor*, LSPMM's). As medições foram divididas em duas etapas, primeiro alimentando cada um dos motores com tensões sem distorção e logo inserindo cada um dos harmônicos de forma individual e combinada em porcentagens de 2% até atingir um 25%. Melhorias consideráveis em relação à temperatura e consumo são notáveis no caso do motor híbrido classe IE4, no entanto, este motor também apresenta desvantagens em sua resposta em comparação com as classes IE2 e IE3, principalmente na presença de harmônicos. Também é apresentado como a presença de harmônicos individuais nos motores elétricos, resulta na aparição de outros harmônicos, de acordo com a porcentagem de distorção presente. Finalmente e visando prever a variação da temperatura em relação à porcentagem de distorção, modelos que representassem esse comportamento foram criados, os quais representam estimações da variação da temperatura e a porcentagem de distorção inserida no motor.

Palavras-chaves: Motores elétricos, Distorção harmônica de tensão, Classes de eficiência, Distorção harmônica total de corrente, Temperatura em motores elétricos, Modelos de Temperatura para motores elétricos.

# ABSTRACT

The introduction of new technologies as well as the improvement of materials and processes has contributed to accelerate the growth in the efficiency of the electric induction motors (IM). Currently in the market it is possible to observe the operation of IM classes IE3 and IE4, as well as minor efficiencies, in the same way proposals for IM class IE5 are being developed. This work aims to show the impact of 2nd, 3rd, 5th and 7th order voltage harmonics on the temperature and performance of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes, the latter being a hybrid motor of permanent magnets and squirrel cage (Line Start Permanent Magnet Motor, LSPMM's). The measurements were divided into two stages, first feeding each of the motors with undistorted voltages and then entering each of the harmonics individually and in combination in percentages of 2% until reaching 25%. Considerable improvements in temperature, noise and consumption are notable in the case of the class IE4 hybrid motor, however, this motor also shows some weaknesses in its response compared to classes IE2 and IE3, mainly in the presence of harmonics. It is also presented as the presence of individual harmonics in electric motors, results in the appearance of other harmonics, according to the percentage of distortion present. Finally, in order to predict the variation of temperature in relation to the percentage of distortion, models representing this behavior were created, which represent good estimates of the temperature variation and the percentage of distortion inserted in the motor.

**Keywords:** Induction Motors, Total Harmonic Distortion, efficiency classes, Total Harmonic Distortion of Currents, Temperatures in electric motors, Temperature models for induction motors.

# SUMÁRIO

1.	Capítulo 1 .....	2
1.1.	Considerações Gerais.....	2
1.2.	Motivação e Objetivo.....	6
1.3.	Revisão Bibliográfica .....	7
1.4.	Estrutura da Dissertação .....	10
1.5.	Trabalhos Aceitos para Publicação.....	11
2.	Capítulo 2 .....	13
2.1.	Considerações Gerais.....	13
2.2.	Motor de Indução em Gaiola de Esquilo, (SCIM).....	14
2.2.1.	Princípios de Operação .....	14
2.2.2.	Estator.....	15
2.2.3.	Rotor .....	16
2.2.4.	Rotor de Gaiola de Esquilo ( <i>Squirrel Cage Induction Motor</i> , SCIM) .....	16
2.3.	Motor de Imãs Permanentes ( <i>Line Start Permanent Magnet Motor</i> , LSPMM) .....	17
2.3.1.	Inícios e Princípios de Operação .....	17
2.3.2.	Princípio de Operação .....	19
2.3.3.	Estator.....	20
2.3.4.	Rotor .....	20
2.4.	Segregação das Perdas no SCIM e no motor LSPMM.....	21
2.4.1.	Perdas por efeito Joule no enrolamento do Estator ( <i>Stator Joule losses</i> ).....	22
2.4.2.	Perdas no Núcleo ( <i>Iron Losses</i> ).....	23
2.4.3.	Perdas de Aquecimento no rotor ( <i>Rotor Joule losses</i> ) .....	24
2.4.4.	Perdas por aquecimento no motor de imãs permanentes (LSPMM).....	25
2.4.5.	Perdas devido ao atrito e Ventilação ( <i>Friction and Windage losses</i> ).....	25
2.4.6.	Perdas Adicionais ( <i>Stray Load Losses</i> ) .....	26
3.	Capítulo 3 .....	27
3.1	Considerações Gerais.....	27
3.2	Harmônicos em SCIM .....	28
3.2.1	Harmônicos de tempo ( <i>Time Harmonics</i> ) .....	32

3.2.2.	Harmônicos Espaciais ( <i>Space Harmonics</i> ) .....	34
3.3	Perdas adicionais causadas por distorção da tensão de alimentação em SCIM .....	34
3.3.1	Perdas adicionais no Núcleo do motor .....	35
3.3.2	Perdas adicionais por aquecimento no enrolamento do Estator .....	36
3.3.3	Perdas adicionais por aquecimento no Rotor .....	37
3.4	Harmônicos em motores de ímãs permanentes (LSPMM) .....	37
3.4.1	Perdas adicionais por aquecimento no enrolamento do Estator .....	38
3.4.2	Perdas adicionais por aquecimento no Rotor .....	39
3.4.3	Perdas no Núcleo do LSPMM .....	39
3.5	Diminuição na Eficiência em motores de Indução sob condições de harmônicos. ...	40
4.	Capítulo 4 .....	42
4.1	Considerações Gerais .....	42
4.2	Correlação .....	42
4.2.1.	Coeficiente de Correlação de Pearson .....	43
4.2.2.	Coeficiente de Correlação de Spearman .....	43
4.2.3.	Principais Características e diferenças .....	43
4.3	Teste de Significância .....	44
4.4	Modelos Probabilísticos .....	46
4.4.1.	Regressão Simples .....	46
4.4.2.	$R^2$ Ajustado .....	47
4.4.3.	Relação entre o teste F e o $R^2$ ajustado .....	48
4.4.4.	Quantidade de Dados .....	49
4.4.5.	Significância do modelo .....	50
4.4.6.	Multicolinearidade .....	50
5.	Capítulo 5 .....	52
5.1.	Considerações Gerais .....	52
5.2.	Características dos equipamentos das bancadas de medição utilizadas no estudo ...	52
5.2.1.	Equipamento analisador de QEE .....	52
<b>5.2.2.</b>	<b>Fonte CA eletrônica trifásica</b> .....	<b>53</b>
5.2.3.	Freio de Foucault .....	54
5.2.4.	Motores Elétricos .....	55
5.2.5.	Câmera termográfica .....	56

5.3.	Metodologia .....	57
5.4.	Resultados: Análise Harmônica: Comparação das Tecnologias IE2, IE3 e IE4.....	59
5.4.1.	2° Harmônico: Resultados .....	59
5.4.2.	3° Harmônico: Resultados .....	64
5.4.3.	5° Harmônico: Resultados .....	67
5.4.4.	7° Harmônico: Resultados .....	70
5.4.5.	Distorções de Tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos de forma simultânea: Resultados 73	
5.5.	Análise Harmônica: Comparação de harmônicas para cada motor analisado. ....	76
5.5.1.	Motor Alto Rendimento (Classe IE2) .....	76
5.5.2.	Motor Eficiência Premium (Classe IE3).....	79
5.5.3.	Motor Híbrido de Eficiência Super Premium (Classe IE4) .....	83
5.6.	Análise harmônica no Software do Analisador .....	86
5.7.	Matrizes de Correlação e Gráficos de Dispersão .....	91
5.7.1.	Segunda Harmônica.....	92
5.7.2.	Terceira Harmônica .....	94
5.7.3.	Quinta Harmônica.....	96
5.7.4.	Sétima Harmônica .....	98
5.7.5.	2 <sup>a</sup> -3 <sup>a</sup> -5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> harmônicas de forma combinada .....	100
5.8.	Modelos de Temperatura para cada Harmônica analisada. ....	102
5.8.1.	Resultados obtidos:.....	103
Capítulo 6	.....	109
6.1.	Conclusões.....	109
•	6.1. Trabalhos Futuros .....	111
Referências Bibliográficas	.....	112
ANEXO A: Placas de dados Motores Utilizados	.....	123

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Consumo de energia dos sistemas de motores elétricos por nível de eficiência, 2000-17 (esquerda) e desagregação regional do uso de energia do motor elétrico em 2017 (direita) [4].....	3
Figura 1.2 – Distribuição do Consumo do Setor Industrial no Brasil. [6] .....	4
Figura 1.3 - Aplicação de motores na indústria do Brasil, de acordo com o uso final. [6].....	4
Figura 1.4 - Corte de motores classes Standard efficiency (IE2), Energy efficient (IE3) e Premium efficiency (IE4) [7]. .....	5
Figura 2.1 Motor de Indução em Gaiola [35]. .....	13
Figura 2.2 Componentes de Motor de Imãs Permanentes.: a) [38] b) [58].....	14
Figura 2.3 Projeto e construção do estator [41] [42]. .....	15
Figura 2.4 Detalhe construção rotor em gaiola. [42] [45].....	17
Figura 2.5 (a) Produto energético máximo de vários materiais PM. (b) Densidade do fluxo residual do magneto. c) Impacto da temperatura na perda reversível de fluxo. d) Temperatura máxima de operação do magneto. (e) Densidade do fluxo do entreferro do motor do pico. [36] [46]. .....	18
Figura 2.6 Inserção de Imãs no rotor de motor de Imãs Permanentes. Fonte [50]. .....	21
Figura 2.7 Configurações Típicas de Rotor. Fonte [37]. .....	21
Figura 2.8 – a) Porcentagem das Perdas nos componentes do Motor [47]. b) Separação das Perdas no Motor de Indução. [52].....	22
Figura 3.1 Curva de diminuição para tensões harmônicas [75].....	40
Figura 4.1 Correlações de Pearson e Spearman (a) Pearson = +1, Spearman = +1, (b) Pearson = +0,851, Spearman = +1. Fonte [97] .....	44
Figura 4.2 Correlações de Pearson e Spearman (a) Pearson = -0,093, Spearman = -0,093, (b) Pearson = -0,799, Spearman = -1. Fonte [97] .....	44
Figura 5.1 Equipamento analisador de qualidade de energia utilizado nas medições .....	53
Figura 5.2 Fonte CA trifásica utilizada na alimentação das cargas. ....	54
Figura 5.3 a) Freio de Foucault utilizado na bancada para ensaio. b) Módulo de frenagem .....	55
Figura 5.4 Motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4 respectivamente. ....	55
Figura 5.5 Câmara Termográfica FLIR T620.....	56
Figura 5.6 Componentes de Bancada utilizada em estudo. ....	57
Figura 5.7 a) Imagem termográfica do motor classe IE4 com 25% de Distorção. b) Imagem termográfica do motor classe IE4 com 10% de Distorção. ....	58
Figura 5.8 Fluxograma da metodologia empregada para a obtenção dos resultados a partir das medições. ....	59
Figura 5.9. Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores classes IE2, IE3 e IE4 com a presença de 2ª harmônica. ....	60
Figura 5.10 Forma de onda de tensão (Ui) e corrente (Ii) sem distorção em motores elétricos a) Motor Classe IE2. b) Motor Classe IE4. ....	61
Figura 5.11 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	62
Figura 5.12 Fator de Potência com distorção de tensão de 2ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ...	62

Figura 5.13 Potência Ativa em condições de alimentação sem e com distorção para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	63
Figura 5.14 Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 2ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	64
Figura 5.15. Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores classes IE2, IE3 e IE4 com a presença de 3ª harmônica. ....	65
Figura 5.16 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 3ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	65
Figura 5.17 Fator de Potência com distorção de tensão de 3ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ...	66
Figura 5.18 Potência Ativa em condições de alimentação sem e com distorção de 3ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	66
Figura 5.19 Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 3ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	67
Figura 5.20. Corrente de Linha com distorção de 5ª harmônica em motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	68
Com a presença de quinta harmônica a THD de corrente também incremento consideravelmente, passando de 8% a 50% para o motor híbrido classe IE4, a quinta harmônica também impacto nos motores classes IE2 e IE3, os quais passaram de ao redor de 2% até 50% como apresentado na Figura 5.21. ....	68
Figura 5.21 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 5ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	68
Figura 5.22 Fator de Potência em condições de alimentação com distorção de 5ª harmônica em motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	69
Figura 5.23 Potência Ativa em condições de alimentação com distorção de 5ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	69
Figura 5.24 Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 5ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	70
Figura 5.25. Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores elétricos com a presença de 7ª harmônica. .	70
Figura 5.26 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 7ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	71
Figura 5.27 Fator de Potência com distorção de 7ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	71
Figura 5.28 Potência Ativa com distorção de 7ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	72
Figura 5.29 Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 7ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	72
Figura 5.30. Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores elétricos com a presença de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos.....	73
Figura 5.31 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	74
Figura 5.32 Fator de Potência com distorção de tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	74
Figura 5.33 Potência Ativa com distorção de tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4.....	75

Figura 5.34 Potência Reativa com distorção de tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4. ....	75
Figura 5.35 Corrente de Linha para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2. ....	76
Figura 5.36 Fator de Potência para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2. ....	77
Figura 5.37 Potência Ativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2.....	78
Figura 5.38 Potência Reativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2. ....	79
Figura 5.39 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motor classe IE2.....	79
Figura 5.40 Corrente de Linha para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3. ....	80
Figura 5.41 Fator de Potência para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3. ....	81
Figura 5.42 Potência Ativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.....	81
Figura 5.43. Potência Reativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3. ....	82
Figura 5.44 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motor classe IE3.....	82
Figura 5.45 Corrente de Linha para harmônicas de 2ª, 3ª, 5ª e 7ª ordem, motor classe IE4. ....	83
Figura 5.46 Fator de Potência para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE4. ....	83
Figura 5.47. Potência Ativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.....	84
Figura 5.48 Potência Reativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE4. ....	85
Figura 5.49 THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motor classe IE4.....	85
Figura 5.50 Harmônicas presentes no motor com distorção de segunda harmônica para motor classe IE4. ....	86
Figura 5.51 Harmônicas presentes no motor com distorção de segunda harmônica para motor classe IE3. ....	87
Figura 5.52 Harmônicas presentes no motor com distorção de terceira harmônica para motor classe IE4. ....	87
Figura 5.53 Harmônicas presentes no motor com distorção de terceira harmônica para motor classe IE3. ....	88
Figura 5.54 Harmônicas presentes no motor com distorção de quinta harmônica para motor classe IE4. ....	88
Figura 5.55 Harmônicas presentes no motor com distorção de quinta harmônica para motor classe IE3. ....	88
Figura 5.56 Harmônicas presentes no motor com distorção de sétima harmônica para motor classe IE4. ....	89
Figura 5.57 Harmônicas presentes no motor com distorção de sétima harmônica para motor classe IE2. ....	89
Figura 5.58 Harmônicas presentes no motor com distorção de 2-3-5 e 7 harmônicas de forma combinada para o motor classe IE4.....	90
Figura 5.59 Harmônicas presentes no motor com distorção de 2-3-5 e 7 harmônicas de forma combinada para o motor classe IE2.....	91
Figura 5.60 Gráfico de Dispersão para 2ª harmônica motor classe IE2. ....	92
Figura 5.61 Gráfico de Dispersão para 2ª harmônica – Motor classe IE3. ....	93
Figura 5.62 Gráfico de Dispersão para 2ª harmônica – Motor classe IE4. ....	94
Figura 5.63 Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE2.....	95
Figura 5.64 Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE3.....	95
Figura 5.65 Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE4.....	96
Figura 5.65 Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE4.....	96
Figura 5.66 Gráfico de Dispersão para 5ª harmônica – Motor classe IE3.....	97

Figura 5.67 Gráfico de Dispersão para 5ª harmônica – Motor classe IE4. ....	97
Figura 5.68 Gráfico de Dispersão para 7ª harmônica – Motor classe IE2. ....	98
Figura 5.69 Gráfico de Dispersão para 7ª harmônica – Motor classe IE3. ....	99
Figura 5.70 Gráfico de Dispersão para 7ª harmônica – Motor classe IE4. ....	99
Figura 5.71 Gráfico de Dispersão para 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor classe IE2. ....	100
Figura 5.71 Gráfico de Dispersão para 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor classe IE3. ....	101
Figura 5.73 Gráfico de Dispersão para 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor classe IE4. ....	101
Figura 5.74 Relatório de seleção de modelo criado para o incremento de Temperatura versus Distorção de 2ª harmônica motor classe IE2. ....	104
Figura 5.75 Relatório de predição de modelo criado para o incremento de Temperatura versus Distorção de 2ª harmônica motor classe IE2. ....	105
Figura 5.77 Relatório de diagnóstico de modelo criado para o incremento de Temperatura versus Distorção de 2ª harmônica motor classe IE2. ....	106

# LISTA DE TABELAS

## Capítulo 3

Tabela 3. 1 Limites de compatibilidade: harmônicos de tensão (%) em redes industriais da BT de acordo com IEC-61000-2-4 [86].	29
Tabela 3. 2 Limites das distorções harmônicas individuais e totais de acordo com <i>IEEE Standard 519, 1993</i> [27]	30
Tabela 3. 3 Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). [10]	30
Tabela 3. 4 Ordens e Sequências para cada harmônico.	34
Tabela 3. 5 Coeficientes de Steinmetz para o aço da classe comercial [12].	35
Tabela 3. 6 Comparação entre materiais do SCIM e o motor LSPM [84].	38

## Capítulo 5

Tabela 5. 1 Parâmetros das sistemas motrizes no estudo.	55
Tabela 5. 2 Matriz de Correlação 2ª Harmônica – Motor Classe IE2	92
Tabela 5. 3 Matriz de Correlação 2ª Harmônica – Motor Classe IE3	93
Tabela 5. 4 Matriz de Correlação 2ª Harmônica – Motor Classe IE4	94
Tabela 5. 5 Matriz de Correlação 3ª Harmônica – Motor Classe IE2	94
Tabela 5. 6 Matriz de Correlação 3ª Harmônica – Motor Classe IE3	95
Tabela 5. 7 Matriz de Correlação 3ª Harmônica – Motor Classe IE4	96
Tabela 5. 8 Matriz de Correlação 5ª Harmônica – Motor Classe IE2	96
Tabela 5. 9 Matriz de Correlação 5ª Harmônica – Motor Classe IE3	97
Tabela 5. 10 Matriz de Correlação 5ª Harmônica – Motor Classe IE4	97
Tabela 5. 11 Matriz de Correlação 7ª Harmônica – Motor Classe IE2	98
Tabela 5. 12 Matriz de Correlação 7ª Harmônica – Motor Classe IE3	99
Tabela 5. 13 Matriz de Correlação 7ª Harmônica – Motor Classe IE4.	99
Tabela 5. 14 Matriz de Correlação 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos – Motor Classe IE2	100
Tabela 5. 15 Matriz de Correlação 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos – Motor Classe IE3	101
Tabela 5. 16 Matriz de Correlação 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos – Motor Classe IE4	101
Tabela 5. 17 Resumo modelos de Temperatura versus Distorção para cada harmônica analisada.	107

## LISTA DE ABREVIATURAS

IM	<i>Induction Motor</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SCIM	<i>Squirrel Cage Induction Motors</i>
MEPS	<i>Minimum Energy Performance Standards</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
NEMA	National Electrical Manufacturers Associations.
LSPMM's	<i>Line Start Permanent Magnet Motors</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PM	<i>Permanent Magnet</i>
PMM's	<i>Permanent Magnet Motors</i>
SmCo	Ímã de Cobalto-Samário
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	Magneto de Neodímio Ferro Boro
FMM	Força Magneto motriz
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)
THDi	<i>Total Harmonic Distortion of Current</i> (Distorção Harmônica Total de Corrente)
VSD	<i>Variable Speed Drivers</i>
HVF	<i>Harmonic Voltage Factor</i>
SCE	Soma de Quadrado de Erro
SQT	Soma Total dos Quadrados

# Capítulo 1- Introdução

## 1.1. Considerações Gerais

Nos últimos anos, devido aos altos custos de energia e questões ambientais fortaleceu a necessidade de mudanças energéticas. Para esse propósito, os motores de indução representam uma categoria importante para economizar energia e reduzir o impacto ambiental. Segun dados da *International Energy Agency (IEA)* os motores elétricos representam ao redor do 50% do consumo elétrico global [4]. No Brasil, de acordo com Ministério de Minas e Energia no documento “Plano Nacional de Eficiência Energética” [2], a indústria consome 43,7% de toda energia elétrica nacional e a força motriz em operação usa 68% dessa energia elétrica. Sendo assim, contata-se que aproximadamente 30% de toda a energia elétrica do país é consumida por motores elétricos.

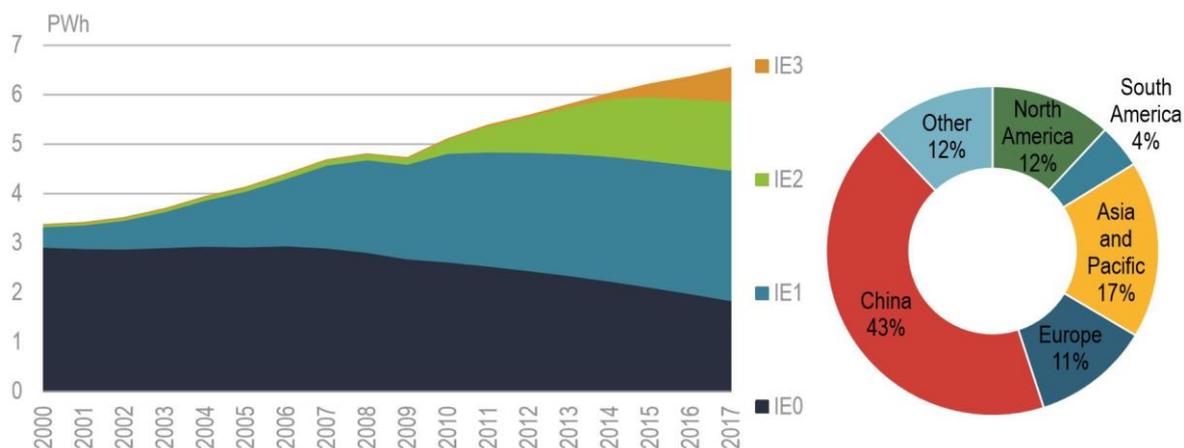
Esta necessidade, juntamente com a introdução de novas tecnologias, bem como a melhoria de materiais e processos, contribuiu para acelerar o crescimento da eficiência dos motores de indução (*Induction Motors, IM*). A melhoria na eficiência dos IM’s levou, em 2008, à *International Electrotechnical Commission (IEC)* [3] a harmonizar globalmente as classes de eficiência energética dos motores de indução de uso geral, alimentados com partida direta da linha, trifásicos, de gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Induction Motors, SCIM*). Quatro classes de eficiência são propostas na norma [3], que são (1) Eficiência Padrão (IE1), (2) Alta eficiência (IE2), (3) Eficiência *Premium* (IE3) e (4) Eficiência *Super Premium* (IE4). De acordo com a norma, depois de 2017 todas as máquinas de indução devem atingir a eficiência premium (IE3).

Aproximadamente 30% do uso de energia elétrica em todo o mundo em 2017 foi associado a motores elétricos não regulados, classificados como IE0 [4]. Isso se deve à operação de motores que estão fora da cobertura de padrões, a operação contínua de motores não regulamentados em economias onde os padrões mínimos de desempenho de energia (*Mandatory Minimum Energy Performance Standards MEPS*<sup>1</sup>) foram implementados ou motores operando em países sem nenhum MEPS. Os motores no nível IE1 cobrem 40% do consumo global de energia do motor elétrico, com os motores IE2 e IE3 tendo uma participação crescente. A China foi responsável por quase 45% do uso de energia de motores elétricos em

---

<sup>1</sup> A MEPS (Minimum Energy Performance Standard) especifica o limite máximo de consumo de energia admissível para um determinado equipamento na execução de uma tarefa específica. Para mais, veáse [5]

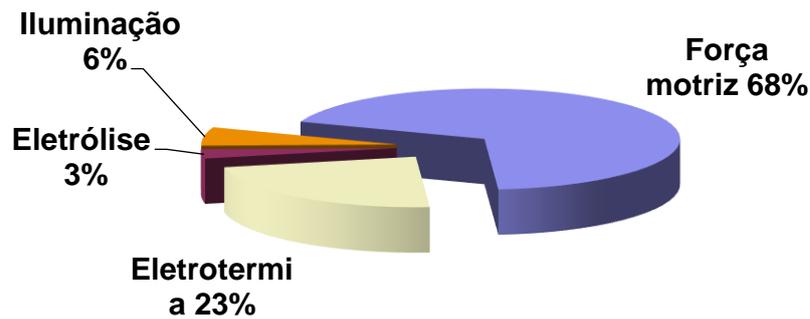
todo o mundo em 2017, cobrindo 40% dos motores que operam no nível de eficiência IE0 e 30% no nível IE1, como mostrado na Figura 1.1 [4].



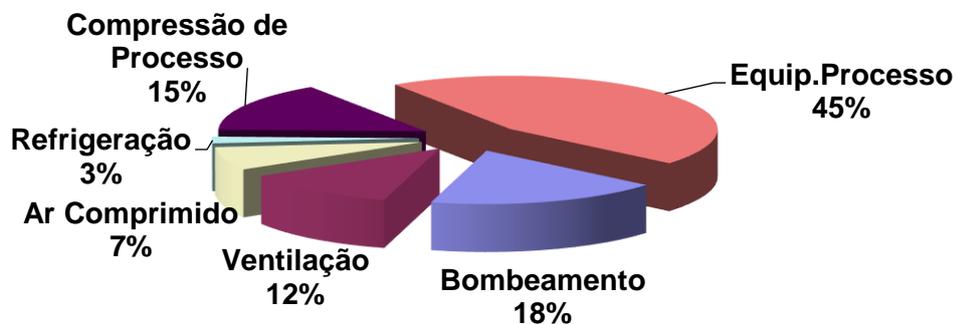
**Figura 1.1** - Consumo de energia dos sistemas de motores elétricos por nível de eficiência, 2000-17 (esquerda) e desagregação regional do uso de energia do motor elétrico em 2017 (direita) [4].

O Brasil tem sido historicamente um grande exportador de motores elétricos. O estabelecimento de padrões internos de desempenho energético em países e regiões importadoras, como os Estados Unidos e a União Europeia, preparou fabricantes brasileiros para a introdução de padrões domésticos MEPS. Para potências específicas de motores industriais foram implementados no nível IE2 em 2009. MEPS para motores elétricos no nível IE3 foram anunciados em 2017 e entraram em vigor em agosto de 2019, elevando o Brasil aos mesmos níveis da China, União Europeia, Japão e na América do Norte [4]. O fortalecimento do MEPS deverá economizar mais de 11 TWh em eletricidade entre 2019 e 2030, além de US \$ 4,7 milhões em custos de energia até 2020 e US \$ 172 milhões até 2050 [2].

O padrão mais rigoroso também poderia aumentar a eficiência energética industrial na América Latina, já que o Brasil exporta 38% de seu maquinário para os países vizinhos [4]. Como estimativa, existem 12 milhões de motores em operação na indústria brasileira [2]. De acordo com a Fig. 1.2, os motores elétricos de indução trifásicos representam 68% do consumo industrial, principalmente nos processos industriais bombas móveis, ventiladores e compressores, como mostrado na Fig. 1.3. Assim, os motores são responsáveis por 30% do consumo de energia elétrica no Brasil, tornando seu uso um alvo natural para políticas públicas voltadas para o aprimoramento do uso eficiente de energia. [2].



**Figura 1.2** – Distribuição do Consumo do Setor Industrial no Brasil. [6]



**Figura 1.3** - Aplicação de motores na indústria do Brasil, de acordo com o uso final. [6]

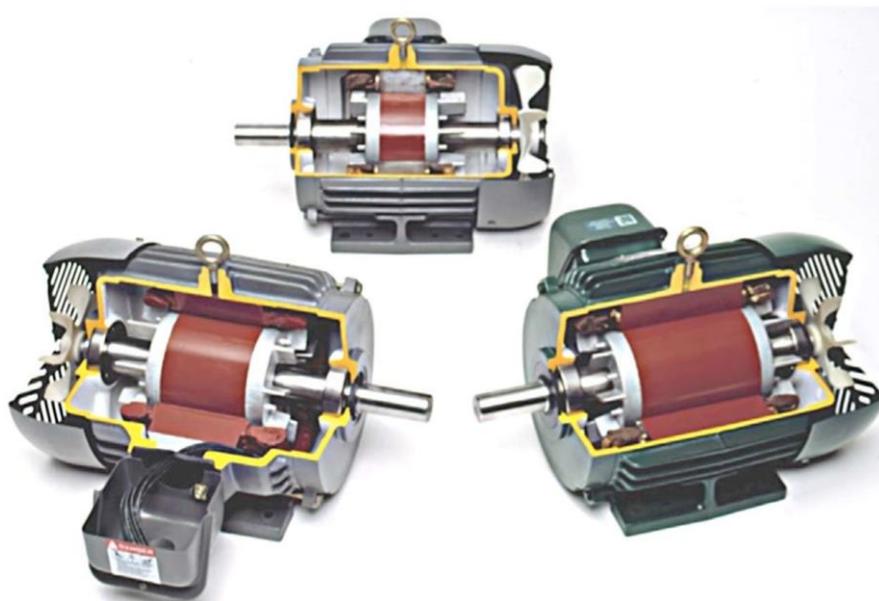
A eficiência dos motores de indução pode ser incrementada com melhoras no seu projeto e nos materiais utilizados durante a construção. Motores de alta eficiência têm um volume maior de núcleo de ferro, resultando em uma diminuição na densidade do fluxo, levando a perdas reduzidas de ferro [2]. Mesmo que os motores padrão operem eficientemente, com eficiências típicas que variam entre 80% e 93%, os motores de eficiência premium apresentam um desempenho significativamente melhor. Um ganho de eficiência de apenas 2%, de 92% para 94%, resulta em uma redução de 25% nas perdas [2]. Como a maioria das perdas do motor resulta em calor rejeitado na atmosfera, a redução de perdas pode reduzir significativamente as cargas de resfriamento no sistema de ar condicionado de uma instalação industrial [7].

As perdas de energia do motor podem ser divididas em cinco categorias principais: perdas no núcleo, perdas por fricção e atrito, perdas por resistência do estator ( $I^2R$ ), perdas por resistência do rotor ( $I^2R$ ) e perdas parasitas. Cada categoria de perda é influenciada por decisões de projeto e construção. Uma consideração de projeto, por exemplo, é o tamanho do espaço de ar entre o rotor e o estator. As grandes folgas de ar minimizam os custos de fabricação, enquanto os entreferros menores aumentam a eficiência e o fator de potência.

Os fabricantes devem usar quantidades maiores de materiais melhorados e projetar motores com tolerâncias mais próximas para reduzir as perdas e permitir que os projetos dos motores atendam maiores eficiências, modificações típicas de projeto incluem:

- Uso de um calibre de arame maior para reduzir a resistência do enrolamento do estator e minimizar suas perdas  $I^2R$ .
- Seleção de barras de rotor de baixa resistência, barras condutoras, mas longas e anéis finais anéis reduzem as perdas do rotor  $I^2R$ .
- Modificação do projeto do *slot* do estator para diminuir as perdas magnéticas e permitir o uso de fios de maior diâmetro.
- Uso de um ventilador menor. Um projeto eficiente do ventilador de resfriamento reduz o fluxo de ar e a potência necessária para acionar o ventilador.
- Otimizar o tamanho do entreferro para reduzir as perdas dispersas.
- Uso de chapas de aço de alto grau (*premium-grade core steel*) e laminações mais finas para diminuir as perdas de correntes parasitas e histerese.
- Uso de selos / blindagem ótimos de rolamentos para reduzir a perda por atrito.

A diferença nos requisitos de materiais e no comprimento do núcleo para o projeto dos motores classes: *IE2 (Standard efficiency)*, *IE3 (High efficiency)* e *IE4 (premium efficiency)* é mostrada na Figura 1.4. Todos os motores têm valores de potência idênticos, o mesmo espaçamento do parafuso de montagem, altura do eixo e diâmetro; e estão disponíveis no mesmo gabinete (*enclosure*) e tamanho de quadro (*frame*) padronizados [7].



**Figura 1.4** - Corte de motores classes: (superior) Standard efficiency (IE2), (esquerda) Energy efficient (IE3) e (direita) Premium efficiency (IE4) [7].

Os motores devem ser selecionados adequadamente de acordo com as condições de serviço conhecidas. Também a operação sob condições de serviço incomuns pode resultar em perdas de eficiência e no consumo de energia adicional. Em um sistema de energia, a energia elétrica é produzida nas usinas, as tensões nos terminais da fase do gerador são iguais em magnitude e deslocadas umas das outras em 120 graus. Porém, esta simetria total em tensões em todos os nós do sistema de potência não é possível, no processo de transmissão e distribuição de energia sofrem alterações em sua forma de onda, magnitude e fase, pois se aproximam das cargas, devido a cargas desequilibradas monofásicas em o sistema trifásico, linhas de transmissão aéreas que não são transpostas, etc.

Antes do desenvolvimento dos conversores estáticos, as principais fontes de distorção harmônica nas tensões eram devido a dispositivos eletromagnéticos convencionais, como transformadores e sistemas motrizes, a maioria dos equipamentos poderia operar normalmente devido à variação desses parâmetros, porém, com o desenvolvimento de novas tecnologias surgiram novas fontes de harmônicas, as principais são inversores e retificadores de controle de ângulo de fase. Atualmente os equipamento são mais sensíveis a esse tipo de variações, por isso é necessário analisar o efeito desses parâmetros nas tecnologias que são desenvolvidas hoje em dia [8].

## **1.2. Motivação e Objetivo**

Apesar de importantes artigos, e livros publicados na área de qualidade de energia elétrica, sua definição não foi universalmente aceita. No entanto, quase todo mundo aceita que é um aspecto muito importante dos sistemas de energia e equipamento elétrico, com impactos diretos na eficiência, segurança e confiabilidade. A julgar pelas diferentes definições, a qualidade da energia geralmente significa expressar a qualidade da tensão e / ou a qualidade da corrente e pode ser definida como: a medida, análise e melhoria da tensão do barramento para manter uma forma de onda senoidal na tensão nominal e frequência. Essa definição inclui todos os fenômenos momentâneos e estáveis [9]. Nos sistemas de energia de cada país, é responsabilidade da operadora de rede fornecer uma fonte de tensão dentro dos limites de qualidade permitidos. No Brasil, o PRODIST, em seu módulo 8 [10], estabelece cada um dos limites permitidos no fornecimento de energia.

As perturbações comuns em um sistema de energia são [10], [11]:

- a. Afundamentos de Tensão;
- b. Elevações de Tensão;

- c. Interrupções momentâneas;
- d. Transitórios;
- e. Desequilíbrio de tensão;
- f. Harmônicos;
- g. Flutuações de Tensão.

A presença permanente de tensão de alimentação é essencial para a operação contínua dos processos de produção principalmente no setor industrial. Como uma tensão de alimentação perfeita é impossível devido a limitações técnicas, a referência [10] indica todos os limites dos parâmetros relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), ou *Power Quality*, (PQ). Esta dissertação está focada no impacto dos harmônicos na tensão de alimentação e seu efeito sobre os motores de indução e motores de ímãs permanentes (IM's e LSPMM's).

Um fenômeno cada vez mais presente no sistema elétrico são os harmônicos. A presença de cargas não lineares em redes elétricas contribui para alterar as características das formas de onda de tensão e corrente nos sistemas de potência, que diferem dos sinais de amplitude constante senoidal pura.

Os IM's são equipamentos muito sensíveis a harmônicas de tensão, seus principais efeitos são resumidos a seguir:

- Em [24, 25, 26, 27, 28 e 29] testes mostraram que os harmônicos além do efeito térmico, produto das correntes no estator produzem um aumento de nível de ruído, aumento de oscilação mecânica, como resultado das harmônicas ímpares resultando em uma diminuição do rendimento do motor.

### **1.2.1 Objetivo**

O presente trabalho se propõe um estudo detalhado do efeito dos harmônicos na tensão de alimentação dos motores de indução classes IE2, IE3 e IE4, testando cada um dos motores elétricos com diferentes níveis de distorção harmônica, para com os dados obtidos avaliar sua resposta em parâmetros como corrente, fator de potência, potências ativa e reativa bem como seu impacto na vida útil da máquina assíncrona. Por último é realizada uma análise estatística com o objetivo de criar modelos que representem o comportamento da temperatura da carcaça de cada classe de motor, ante a presença de distintos harmônicos na tensão de alimentação.

### **1.3. Revisão Bibliográfica**

A expectativa de vida do SCIM é estimada na faixa de 10 a 20 anos, dependendo da qualidade do serviço e das condições de operação. Nos últimos anos, muitos estudos foram

desenvolvidos com o objetivo de conhecer o impacto da qualidade do serviço nos motores de indução. Em [13] foi demonstrado que na indústria existem motores de indução operando acima da expectativa de vida, o que na maioria dos casos se deve ao fato de terem sido reparados. A qualidade do fornecimento pelas empresas locais de energia está geralmente longe do ideal, as ondas de tensão fornecidas para a indústria são normalmente distorcidas, assim como as grandezas e fases das tensões apresentam desbalanceamento.

Diferentes padrões são usados para medir a eficiência das máquinas de indução, dentre as quais podemos citar: *Institute of Electric and Electronic Engineers*, IEEE 112-2017 (Estados Unidos) [14], *International Electrotechnical Commission* IEC-60034-2-1: 2014 (Europa) [3], *Canadian Standards Association*, CSA 390-1 (Canadá), entre outros. Embora os procedimentos para medir a eficiência sejam semelhantes, existem diferenças na forma de coletar os dados. O padrão IEC exige que o teste sem carga seja feito imediatamente após o teste de carga. Isso garante que a temperatura dos enrolamentos permaneça na maior temperatura possível. Isso é diferente dos padrões IEEE e CSA, o que requer uma estabilização de rolamentos [15].

Estudos em [15] e [16] apresentam uma comparação de padrões para determinar perdas e eficiência de motores de indução trifásicos. Em [17] e [18] estudos para determinar a eficiência em motores de indução de acordo com a IEC 60034-2-1: 2014, tanto pelo método direto quanto indireto, são apresentados. O artigo de [19] apresenta uma revisão de motores de alta eficiência: Especificação, Política e Tecnologia, embora seja realizada para o caso de Taiwan, as políticas sugeridas para o desenvolvimento de motores de alta eficiência são aplicáveis a outros países.

Com a introdução de novas tecnologias, bem como a melhoria de materiais e processos, a substituição de classes de motores de indução IE0, IE1 e IE2 torna-se cada vez mais viável, na mesma linha, uma variedade de técnicas são usadas hoje para melhorar a eficiência na indução motores, como apresentado em [20], [21] e [22]. De acordo com a norma em [3], depois de 2017 todas as máquinas de indução têm que atingir a eficiência premium (IE3). O estudo em [23] mostra uma análise técnica e econômica comparativa dos motores das classes comerciais IE2, IE3 e IE4, incluindo um exemplo de substituição de um motor de indução em gaiola por um motor de ímã permanente de partida de linha (LSPM). Os resultados mostram que os motores PM provam ser significativamente mais eficientes que os SCIM's, na faixa de baixa potência ( $\leq 15$  kW), porém, sem carga, as perdas harmônicas parecem ser maiores nos LSPMM's, e também mostra que parâmetros como a variação da velocidade de rotação de um motor para outro pode significar um consumo extra de energia.

Em 2016 [24], uma comparação da expectativa de vida útil dos motores classes IE2, IE3 e IE4 quando alimentadas por uma fonte de alimentação desequilibrada e distorcida é apresentada, os resultados mostram que a margem extra de temperatura, bem como a alta tolerância ao desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica encontrados nos motores de indução da classe IE4 resultam em maiores tolerâncias ante os distúrbios presentes nos sistemas elétricos.

A referência [25] apresenta uma metodologia para determinar a tensão de carga que permite que um motor opere sem sofrer qualquer aumento de temperatura quando é alimentado por fontes de alimentação desequilibradas e distorcidas. Os resultados obtidos demonstram que o desequilíbrio de tensão afeta mais fortemente o enrolamento do estator, e as distorções harmônicas afetam principalmente o circuito do rotor.

Em [26] é mostrado que a presença da FMM do terceiro harmônico devido a correntes de terceiro harmônico induzidas pelo rotor distorce a distribuição magnetizante do FMM no entreferro, e a saturação nos dentes causa redistribuição do espectro da forma de onda da densidade de fluxo no espaço. Portanto, a magnitude e o deslocamento de fase da fundamental são alterados, resultando na produção de torque apesar da ausência de corrente de terceiro harmônico nos enrolamentos do estator.

Os ensaios conduzidos em [27] mostram que a 5ª e 7ª harmônicas, comuns nos conversores de seis pulsos, induzem correntes no estator da máquina, o que resulta em um aumento de temperatura nela. Em [24] os autores comentam que nos IM's alimentados de forma direta o harmônico mais crítico é particularmente harmônico de quinta ordem de sequência negativa.

Em [28] e [29] uma comparação entre diferentes padrões utilizados para calcular o fator de desequilíbrio de tensão é desenvolvida. Em [30], os efeitos do desequilíbrio de tensão e distorção harmônica no torque e eficiência de motores de indução são analisados, os resultados mostram que o torque é significativamente afetado pelo desequilíbrio de tensão, e que a inserção de distorção harmônica de apenas uma ordem não resultará em uma mudança significativa no valor desse parâmetro. Além disso, considerando as condições avaliadas, pode-se inferir que o aumento no valor da distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*) THD não permite estabelecer uma correlação entre as condições de teste e o torque e a eficiência do motor. A maior diminuição na eficiência é observada ao inserir a perturbação, e não quando o índice aumenta.

A referência [31] investiga os efeitos de diferentes tensões desequilibradas com o mesmo fator de desequilíbrio de tensão (*Voltage Unbalance Factor*, VUF) no desempenho de

um motor de indução trifásico e sua influência na realimentação do sistema de potência. De acordo com os resultados do experimento, os casos de desequilíbrio de tensões menores da nominal causam o pior aumento de temperatura.

Em [32] uma avaliação experimental dos efeitos dos desequilíbrios de tensão na eficiência do motor de indução é desenvolvida, para isto, dois motores de indução com projeto NEMA A e B são testados, de acordo com os resultados, motor de projeto NEMA B tem o maior incremento de perdas porque foi o mais afetado pelo efeito da pele. Na referência [31] observa-se que o desequilíbrio de fase (ângulo) afeta mais a eficiência do que o desequilíbrio nas magnitudes da tensão.

O Aprendizado de Máquina também foi aplicado na estimativa de eficiência e outros parâmetros nos motores de indução. O artigo em [33] propõe uma abordagem generalizada para estimativa de eficiência de campo motor usando *Bacterial Foraging Algorithm* (BFA). A técnica pode ser usada em condições de distorção harmônica com tensões desbalanceadas ou voltagens e frequências desviadas. Os resultados mostram porcentagens nas diferenças no cálculo da eficiência de menos de 3%, não excedendo a 1,1% em duas das cargas estudadas.

Referência [34] apresenta uma nova abordagem para detectar e classificar condições de falha abrangentes de motores de indução usando uma rede neural híbrida fuzzy min-max (FMM), *Hybrid Fuzzy min-max* (FMM) e árvore de classificação e regressão (CART). Os autores desenvolvem uma série de experimentos reais, através dos quais o método de análise de assinatura de corrente do motor é aplicado para formar um banco de dados composto por assinaturas de corrente de estator sob diferentes condições de motor. Uma lista abrangente de condições de falha do motor de indução, isto é, barras quebradas do rotor, tensões desbalanceadas, falhas no enrolamento do estator e problemas de excentricidade, foi classificada com sucesso usando FMM-CART com boas taxas de precisão. Além de produzir resultados precisos, regras úteis na forma de uma árvore de decisão são extraídas para fornecer explicação e justificativa para as previsões do FMM-CART. Os resultados são comparáveis, se não melhores, do que os relatados na literatura.

#### **1.4. Estrutura da Dissertação**

O Capítulo 1 apresenta uma introdução global desta dissertação. O panorama nacional e global em relação à presença de motores elétricos de indução e seu impacto no consumo global de eletricidade é comentado. O Capítulo 1 também apresenta uma descrição geral dos parâmetros de Qualidade de Energia e os efeitos dos harmônicos na tensão de alimentação de

motores elétricos de indução, objetivo desta investigação. Foi apresentada, ainda, uma breve revisão bibliográfica, que objetivou destacar as contribuições mais significativas no referido campo de estudo.

No Capítulo 2 analisou-se cada uma das tecnologias de motores de indução envolvidas neste estudo: Motor de Indução Gaiola de Esquilo (SCIM), *Line Start Permanent Magnet Motor* (LSPMM), nas diferentes classes de eficiência: IE2, IE3 e IE4. Além disso, a separação fundamental das perdas no motor é apresentada com as importantes melhorias feitas no projeto e construção de cada classe de eficiência para a melhoria no consumo de energia.

O Capítulo 3 apresenta as condições que geram harmônicas no sistema elétrico de potência, os respectivos limites de acordo com as normas nacionais e internacionais. Neste capítulo também é expandido o efeito dos harmônicos nos motores elétricos de indução.

Como uma análise dos dados visando criar modelos será apresentada no Capítulo 5, o Capítulo 4 apresenta uma breve introdução aos tópicos estatísticos envolvidos no estudo.

No Capítulo 5, os equipamentos e metodologia utilizada nesta investigação são descritos. Na seção [5.4](#) é realizada uma comparação dos motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4 na presença de cada harmônico. Logo, na seção 5.5 uma comparação de todos os harmônicos para cada tecnologia de motor é apresentada. Visando analisar a relação entre os parâmetros registrados no analisador e a câmara termográfica matrizes de correlação são apresentados na seção 5.7. Logo, e devido a que os parâmetros apresentaram padrões de comportamento na presença de distintos harmônicos, modelos que apresentassem o comportamento da temperatura na presença de cada harmônico de tensão foram criados, eles são apresentados ao final do Capítulo 5.

Por fim, a dissertação se encerra com o Capítulo 6, no qual serão apresentadas as conclusões obtidas mediante a realização do levantamento bibliográfico, a metodologia empregada nas medições e as análises efetuadas.

## **1.5. Trabalhos Aceitos para Publicação**

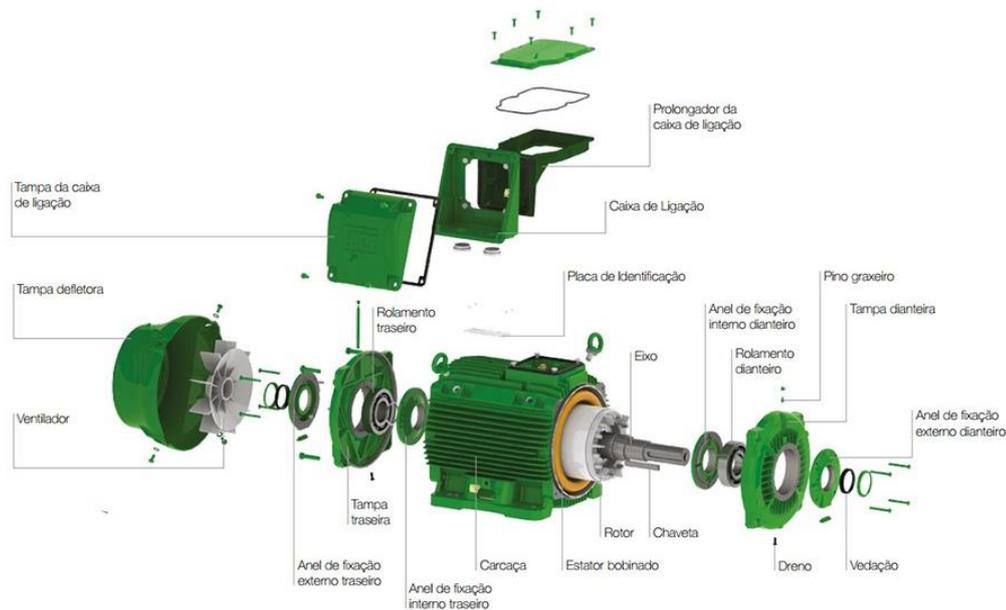
1. Jonathan M. Tabora, Thiago M. S., Edson Ortiz de Matos, M.E. de Lima Tostes, Carlos E. Moreira, *Impactos do 5º Harmônico na Temperatura de Motores Elétricos Classes IE2, IE3 e IE4*, CBQEE - Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 2019, São Caetano, São Paulo.
2. Jonathan M. Tabora, Thiago M. S., Edson Ortiz de Matos, M.E. de Lima Tostes, Juan C. Huaquisaca, *Fifth & Seventh Harmonic Effects on the Performance of IE2, IE3 &*

*IE4 Induction Motor Classes*, THE 13th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON  
ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2019

## 2. Capítulo 2 - Fundamentos de motores de indução

### 2.1. Considerações Gerais

Os motores de indução são, de longe, as sistemas motrizes mais utilizadas no setor industrial em todo o mundo, isto principalmente por sua robustez e custo. Atualmente, quase 50% da energia elétrica global e mais de 68% do consumo de energia elétrica relacionado à indústria são utilizados para conversão de energia eletromecânica [1], [2], [12]. Exemplos de aplicações industriais são bombas, ventiladores, correias transportadoras, moinhos, máquinas centrífugas, prensas, elevadores, equipamentos de embalagem entre outros. A Figura 2.1 apresenta os principais componentes de um motor de indução em gaiola (SCIM) [35].

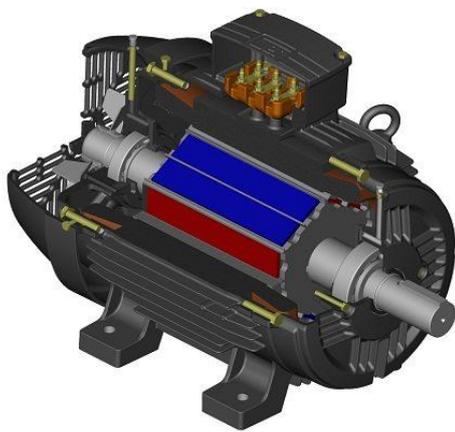


**Figura 0.1** Motor de Indução em Gaiola [35].

Como a eficiência se torna cada vez mais importante por razões econômicas e ecológicas, outras tecnologias além dos motores de indução simples devem ser consideradas. Para isso, outro grande avanço tecnológico foi a evolução dos ímãs permanentes, devido a melhorias nas propriedades magnéticas e térmicas de materiais de ímã permanente (PM) nos últimos 20 anos, juntamente com considerável redução de custos, os motores PM síncronos representam alternativas viáveis [36].

Comparado com o IM, o LSPMM tem muitas vantagens: velocidade síncrona, fator de potência maior, alta eficiência, tamanho pequeno, ampla faixa de economia funcionando de 25% a 120% da carga nominal com alta eficiência e fator de potência, etc. [37].

Os ímãs permanentes foram amplamente utilizados em motores de controle de movimento por muito tempo. Nos últimos 35 anos, os materiais magnéticos passaram por mudanças substanciais em diversos aspectos, desde a química básica até o custo. Atualmente, existem materiais disponíveis para permitir muito mais potência, menor custo e maior eficiência dos motores de ímãs permanentes (*Permanent Magnet motors*, PMM's). No entanto, a adição de PM no rotor resulta em um torque adicional que geralmente reduz as capacidades de partida, conseqüentemente as máquinas de ímãs permanentes são incapazes de iniciar na frequência da linha. São necessários métodos de partida adicionais, por exemplo: as combinações de motores *Variable Speed Drivers* (VSD) com motores de PM são geralmente sugeridas. Em casos específicos, a partida direta da linha, sem métodos de inicialização são essenciais. A Figura 2.2 apresenta projetos de motor de ímã permanente e seus rotores. [38] [59].



a) Motor de Ímãs permanentes

b) Projeto de Rotor de Ímãs Permanente

**Figura 0.2** Componentes de Motor de Ímãs Permanentes.: a) [38] b) [59]

Em seguida, as tecnologias de motores usadas neste estudo são analisadas, comentando suas principais diferenças no projeto, construção e resposta em operação. No final uma análise das perdas presentes nessas máquinas é feita.

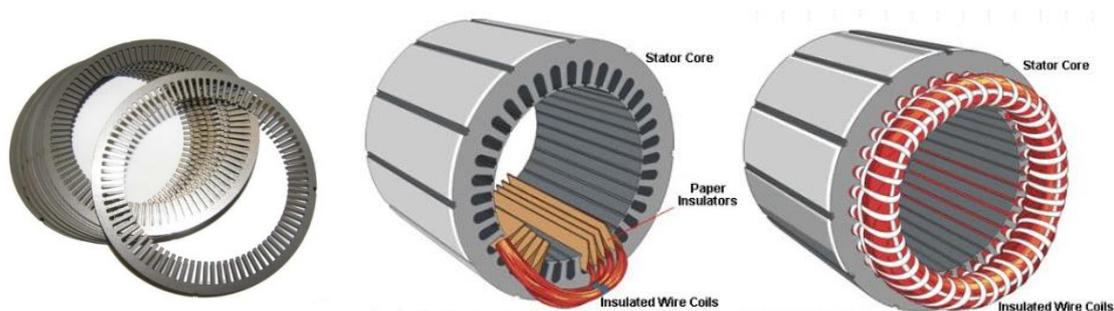
## 2.2. Motor de Indução em Gaiola de Esquilo, (SCIM).

### 2.2.1. Princípios de Operação

O SCIM é construído a partir do estator que é conectado à fonte de energia e ao rotor que gira dentro de um espaço de ar precisamente projetado. Fisicamente, o estator e o rotor não estão conectados. As correntes CA são induzidas no rotor através do entreferro dos campos magnéticos rotativos no lado do estator. A fonte de alimentação do motor cria um campo eletromagnético nos enrolamentos do estator que corta a abertura de ar nos enrolamentos do rotor. Este campo eletromagnético induz uma tensão nas barras do rotor, como descrito pela lei de Lenz, e estimula uma corrente que circula dentro delas. Assim, é criado um outro campo eletromagnético que interage com o campo eletromagnético do estator. A interação entre os dois campos eletromagnéticos gera uma força de torção, ou um torque rotativo, que gira o rotor na direção do torque resultante [40]. De acordo com livros e artigos, cada parte de um motor de indução pode ser dividida em dois grupos: elementos estacionários ou elementos rotativos. O estator sendo a parte fixa e o rotor sendo a parte móvel.

### 2.2.2. Estator

O núcleo do estator é geralmente feito de uma pilha em de lâminas de aço finas com ranhuras isoladas. As ranhuras estão se abrindo para o diâmetro interno segurando as bobinas do estator (enrolamentos) e mantidas juntas por meios adequados. Cada laminação do núcleo é separada da outra. Os dentes estão separando as ranhuras e transportam o fluxo magnético dos enrolamentos do estator para o rotor através do entreferro. A Figura 2.3. apresenta as laminações e a construção do estator:



**Figura 0.3** Projeto e construção do estator [41] [42].

Os enrolamentos do estator são feitos de fios de cobre isolados embutidos nas ranhuras (*slots*). Um número de arranjos idênticos de bobinas uniformes é colocado ao redor de cada ranhura do estator. As bobinas são conectadas juntas para formar os enrolamentos trifásicos, circulando ao redor do estator e simetricamente localizados em relação um ao outro [43].

### 2.2.3. Rotor

A coroa magnética do rotor é feita empilhando laminações altamente permeáveis de material de aço, usando o mesmo material do estator. Estas placas são isoladas eletricamente umas das outras, revestidas com uma camada de óxido que atua como um isolante evitando correntes parasitas indesejáveis. A coroa magnética do rotor é encaixada no lado de fora permitindo que o circuito elétrico permaneça. O rotor é equipado com terminais de resfriamento. Na parte de trás, há outro mancal e uma ventiladora de resfriamento fixada ao rotor [44].

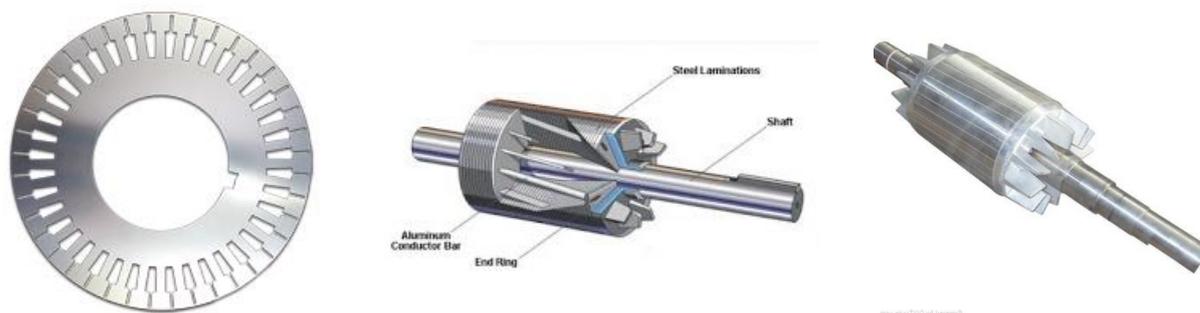
Dependendo da forma construtiva do circuito elétrico do rotor, é possível distinguir dois tipos de motores assíncronos:

- a. Rotor de gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Rotor*)
- b. Rotor bobinado (*Wound-rotor*)

A seguir é ampliado sobre o rotor de gaiola de esquilo, presente neste estudo.

### 2.2.4. Rotor de Gaiola de Esquilo (*Squirrel Cage Induction Motor, SCIM*)

Este é sem dúvida o mais comum e amplamente utilizado. Seu circuito elétrico consiste em barras de metal não isoladas que formam a gaiola de esquilo, que se assemelha às gaiolas rotativas usadas no passado para o exercício de pequenos roedores, razão pela qual dá esse nome ao rotor. Essas barras de metal instaladas nas ranhuras (*slots*), comumente feitas de alumínio, estão em curto nas duas extremidades, por meio de anéis finais. Caso os condutores sejam feitos de cobre, os anéis de extremidade são soldados. Barras de rotor de alumínio são geralmente fundidas nas fendas do rotor, o que resulta em uma construção muito robusta. Embora as barras do rotor de alumínio estejam em contato direto com as chapas de aço, praticamente toda a corrente do rotor flui através das barras de alumínio e não através das laminações. Além disso, é interessante saber que as barras da gaiola estão dispostas com uma inclinação no eixo de rotação, a fim de evitar oscilações de torque [44]. A Figura 2.4 apresenta a construção do rotor em gaiola de esquilo [42].



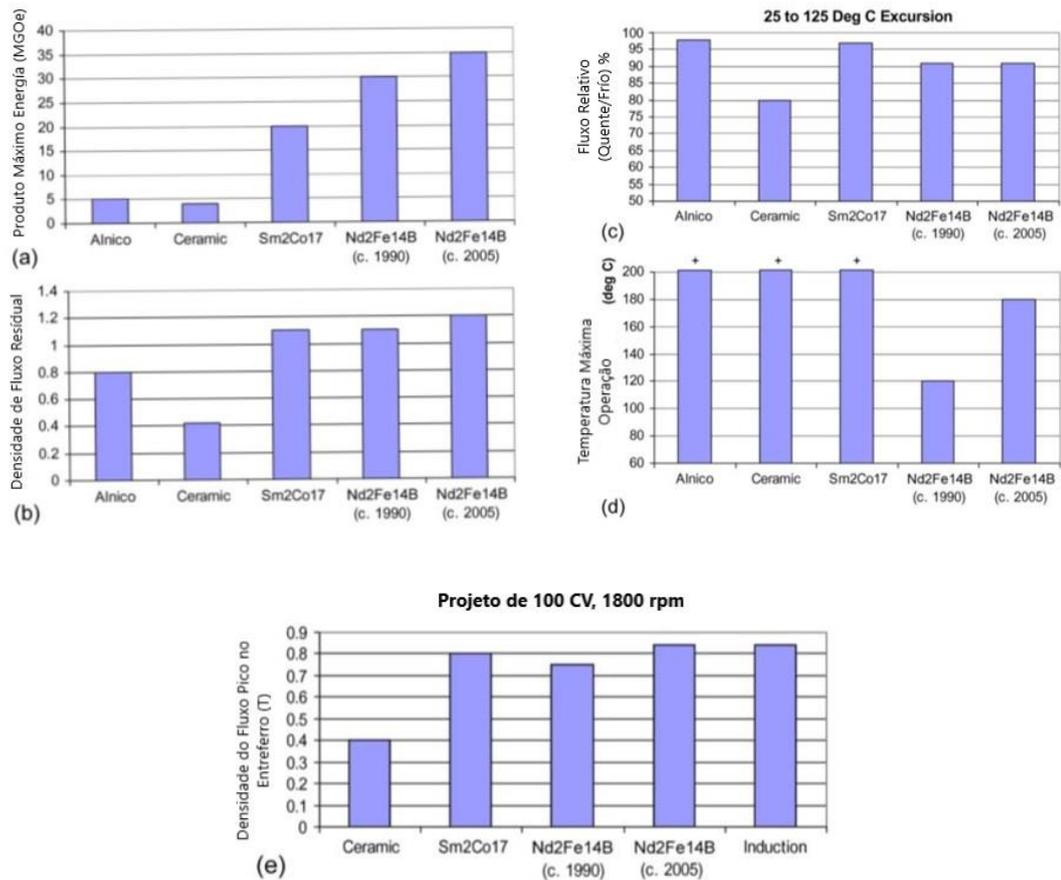
**Figura 0.4** Detalhe construção rotor em gaiola. [42] [45].

Este tipo de rotor não tem acesso ao induzido do rotor. É claro, devido às barras condutoras permanentemente em curto-circuito, que nenhum controle externo pode ser organizado sobre a resistência do circuito do rotor, uma vez que o rotor tenha sido feito.

### **2.3.Motor de Ímãs Permanentes (*Line Start Permanent Magnet Motor, LSPMM*)**

#### **2.3.1. Princípios de Operação**

Durante a década de 1940 até a década de 1960, o projeto do motor era feito principalmente com materiais de alnico ou magnéticos de cerâmica / ferrite. Embora os ímãs cerâmicos sejam bastante econômicos, as densidades de fluxo de ar do motor que podem ser alcançadas com esses ímãs não se aproximam dos níveis normalmente alcançados com os motores de indução. Enquanto os ímãs de alnico podem atingir densidades mais elevadas de fluxo, a sua fraca resistência à desmagnetização limita a sua utilização nos motores [36] [46]. A Fig. 2.5 (a) - (e) mostra propriedades comparativas desses ímãs e densidades relativas de fluxo do entreferro do motor que podem ser tipicamente alcançadas:



**Figura 0.5** (a) Produto energético máximo de vários materiais PM. (b) Densidade do fluxo residual do magneto. c) Impacto da temperatura na perda reversível de fluxo. d) Temperatura máxima de operação do magneto. (e) Densidade do fluxo do entreferro do motor do pico. Adaptado de [37] [47].

Os dados da energia magnética armazenada dentro de cada material são mostrados na Fig. 2.5 (a) são tipicamente usados como uma figura de mérito para materiais de PM porque combinam a densidade do fluxo e a coercividade (resistência à desmagnetização) do ímã. Densidade de fluxo residual [Fig. 2.5 (b)] é efetivamente proporcional ao nível de fluxo que pode ser alcançado em um motor PM. A perda de fluxo reversível térmica mostrada na Fig. 2.5 (c) mostra como o nível de fluxo do motor (e, portanto, o torque por ampère) pode mudar à medida que a temperatura do magneto muda de frio para condições quentes.

Os materiais dos ímãs permanentes foram introduzidos primeiro com produtos de cobalto samário, ambos os tipos  $\text{SmCo}_5$  e  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . Estes estavam disponíveis por volta de 1970 e forneceram a primeira oportunidade para alcançar níveis de fluxo magnético no entreferro do motor comparáveis aos motores de indução. Esses ímãs têm excelentes capacidades térmicas, tanto em termos de variação mínima no fluxo com a temperatura quanto em relação à

capacidade máxima de temperatura. No entanto, o custo permaneceu alto, sendo utilizados em aplicações limitadas [37].

A introdução de magnetos de neodímio ferro boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) na década de 1980 forneceu a promessa de um custo substancialmente menor em comparação com os ímãs de cobalto samário. Os materiais magnéticos iniciais do  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  tinham capacidades de temperatura muito limitadas, com alta suscetibilidade à desmagnetização acima de  $120^\circ\text{C}$ . Ao longo dos últimos 15 anos, as propriedades do material foram melhoradas, de modo que algumas classes podem ser utilizadas para  $180^\circ\text{C}$  [Fig. 2.5 (d)]. Além disso, as capacidades do campo magnético foram mais avançadas e, igualmente importante, os custos dos ímãs diminuíram significativamente. Também, foram desenvolvidos ímãs que podem ser moldados por injeção ou por compressão, permitindo a liberdade substancial do projeto de laminação do rotor [37].

### 2.3.2. Princípio de Operação

Um motor LSPM consiste em um estator monofásico ou trifásico como um dos motores de indução e um rotor híbrido envolvendo uma gaiola de esquilo e pares de polos magnéticos permanentes. Diferentes combinações da gaiola, formas e posições dos polos foram apresentadas para o rotor até o momento [37]. Uma das características mais importantes dos motores LSPM é a alta profundidade ou as ranhuras do rotor para superar o torque opoente devido a ímãs permanentes no início. O diâmetro do eixo deve ser menor do que um dos motores de indução nas estruturas mais para ter espaço suficiente para posicionar os polos PM no interior do corpo do rotor como será visto mais tarde [47].

O motor parte como um motor de indução pelo resultante de dois componentes de torque, isto é, torque da gaiola e o torque oposto do ímã (torque de frenagem). Quando as velocidades do motor atingirem a velocidade quase síncrona, um processo de sincronização é iniciado e a operação do motor é transferida para o estado síncrono quando nenhuma corrente parasita flui para as barras da gaiola, exceto as correntes do campo harmônico. No estado síncrono, dois componentes de torque, isto é, um componente de torque de relutância e um componente de torque síncrono causam o movimento do rotor [47].

O autor em [12] comenta as duas diferenças mais distintivas:

1. O nível de indução de um LSPM não é apenas uma função da tensão aplicada como é o caso de um SCIM. A presença de ímãs em combinação com a Força Magneto motriz (FMM) do estator determina o pico de indução. Devido à construção mais difícil e à

maior força magnética desbalanceada do rotor, um entreferro maior é obtido em um LSPMM comparado a um SCIM padrão.

2. É comumente assumido que, para um LSPMM, o fluxo gira em sincronismo com o rotor. Portanto, nenhuma corrente é induzida no rotor. Isso às vezes leva a uma construção simplificada de rotores em massa. O rotor maciço não simplifica apenas a construção, mas uma construção em massa do rotor terá um efeito de pele aumentado na partida, aumentando assim a capacidade de partida.

Atualmente níveis de eficiência são possíveis com as tecnologias de ímãs permanentes, para esta dissertação o motor Weg W22 Quattro foi utilizado para os testes. Segundo informações do fabricante [48], o motor excede os níveis de rendimento da versão IR3 Premium (rendimentos IE4, conforme norma europeia IEC 60034-30-1 [3]), isto devido a sua construção híbrida com rotor de gaiola em alumínio e ímãs permanentes de alta energia no seu interior. A gaiola em alumínio permite a partida direta da rede, enquanto os ímãs permanentes garantem operação síncrona com elevado rendimento em regime [49].

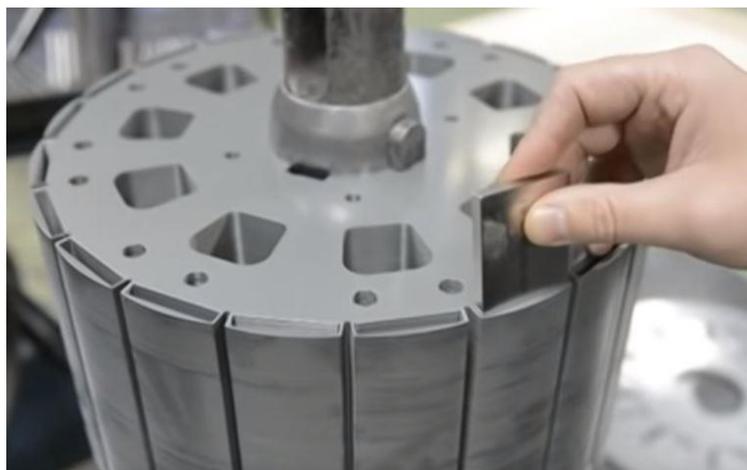
Como no motor de indução de gaiola de esquilo no LSPMM, temos a parte estacionária (estator) e a parte rotativa (rotor):

### **2.3.3. Estator**

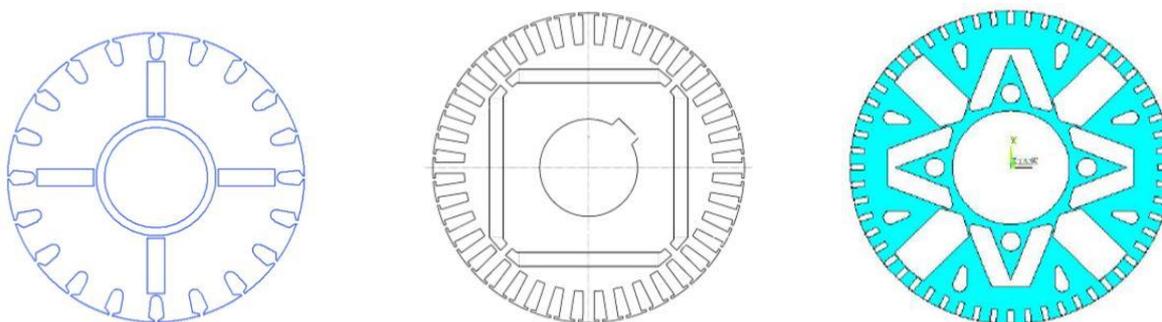
Em geral, o LSPMM usa uma configuração igual à do SCIM, com uma combinação de rotor de gaiola de esquilo e polos de ímãs permanentes para iniciar e operar o motor de forma síncrona. O estator e o enrolamento são similares como SCIM, por isso vamos nos concentrar na tecnologia de rotor desta máquina.

### **2.3.4. Rotor**

O rotor do motor de ímãs permanentes é feito de chapas de aço com silício, um motor normal pode ter entre 80 e 200 chapas de aço laminadas dependendo da capacidade do motor, na Figura 2.6 é mostrada a inserção de ímãs no rotor de um motor de ímãs permanentes, de acordo com a capacidade da máquina são inseridos entre 80 e 240 ímãs no rotor do mesmo [50]. Configurações comuns de rotores de LSPMM são apresentados na Figura 2.7.



**Figura 0.6** Inserção de Imãs no rotor de motor de Imãs Permanentes. Fonte [50].



**Figura 0.7** Configurações Típicas de Rotor. Fonte [37].

Algo que deve ser notado é que as perdas na gaiola do rotor do motor de ímã permanente desaparecem, exceto pelas perdas harmônicas insignificantes. Além disso, a perda ôhmica do estator nos últimos motores, que é a maior parte das perdas totais do motor, também se reduz devido a uma redução significativa na corrente de magnetização e, portanto, na amplitude da corrente de entrada dos motores [47].

Neste capítulo, além de apresentar uma introdução às tecnologias presentes nesta pesquisa, fechamos com uma separação das perdas presentes nos sistemas motrizes.

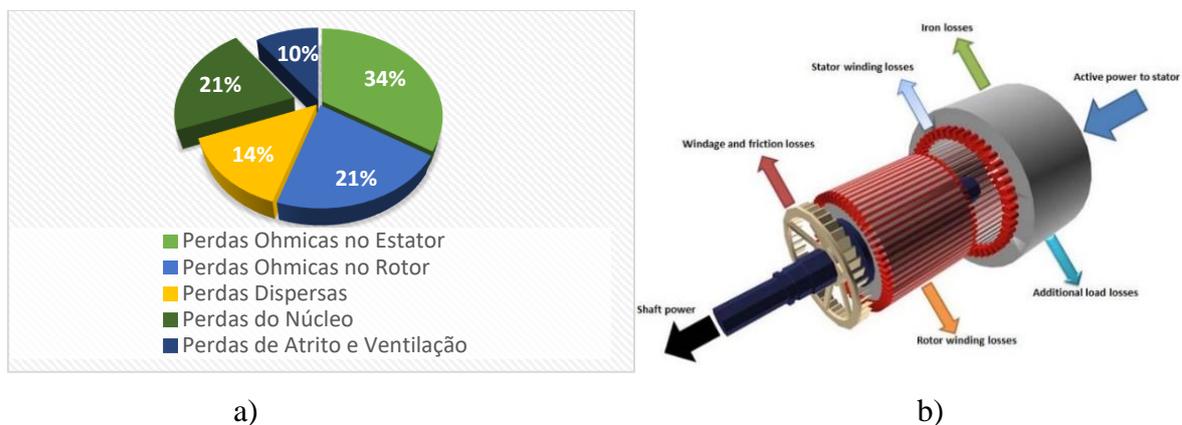
#### **2.4. Segregação das Perdas no SCIM e no motor LSPMM**

A conversão de energia sempre resulta em perdas. É importante entender que os motores elétricos transformam a energia elétrica em vez de consumi-la. A maior parte da energia de entrada elétrica é convertida em energia mecânica (eixo) com inevitavelmente, uma certa quantidade de perdas do motor que dependem da tecnologia do motor aplicado, materiais, projeto, condições ambientais etc. A eficiência de um motor de indução é definida como a relação entre a potência mecânica de saída para a potência elétrica de entrada [51]. Diferentes

padrões são usados para medir a eficiência de um motor de indução [3], [14], como será mostrado no Capítulo 4. As perdas no motor de indução podem ser separadas em 5 áreas:

1. Perdas no enrolamento do estator
2. Perdas no núcleo
3. Perdas no enrolamento do rotor
4. Perdas devido ao atrito e Ventilação
5. Perdas dispersas.

Essa energia ativa dissipada no processo de conversão de energia é detalhada na Figura 2.8 [47] [52].



**Figura 2.8** – a) Porcentagem das Perdas nos componentes do motor assíncrono [47]. b) Separação das Perdas no Motor de Indução [52]

A introdução de projetos de alta eficiência de IM com, por exemplo, um rotor de cobre, altera muito esse quadro geral. Isso se deve às inter-relações entre esses componentes de perda, conforme elucidado mais detalhadamente mais adiante. Para motores de baixa potência, as perdas ôhmicas nos enrolamentos do estator são dominantes. Eles representam aproximadamente 50% das perdas totais, enquanto para máquinas grandes eles são reduzidos para cerca de 25% [47]. As perdas de carga adicionais ou dispersas aumentam de uma contribuição relativa muito baixa para bem acima de 10% para os motores da gama de megawatts (MW). Uma contribuição mais ou menos similar pode ser registrada para a parte das perdas por atrito e ventilação [53]

#### 2.4.1. Perdas por efeito Joule no enrolamento do Estator (*Stator Joule losses*)

O estator é constituído de um enrolamento trifásico de cobre distribuído uniformemente em torno do núcleo ferromagnético da máquina, este cobre dos enrolamentos possui algumas perdas inerentes. As perdas por aquecimento nos enrolamentos são referidas como perdas de

Joule do estator e estas perdas são modeladas pela resistência  $R_s$ . A resistência do estator é uma função da frequência e temperatura  $(f, \theta)$ , conforme mostrado na equação 2.1 [12].

$$P_s = 3 * R_s * I_{RMS}^2 \quad (2.1)$$

A fim de reduzir as perdas de aquecimento do estator, tanto a corrente rms do estator quanto a resistência do estator podem ser reduzidas. Reduzir a corrente total rms é uma maneira eficaz de reduzir as perdas totais de aquecimento do estator, pois essas perdas são proporcionais ao quadrado da corrente. Em [93], foi mostrado que através da substituição do desenho de enrolamento com espiras concêntricas por um desenho de enrolamento com as bobinas iguais deslocadas é possível uma diminuição das perdas de aquecimento. Revestimentos de isolamento de enrolamento mais finos e isolamento de ranhuras são também usados para melhorar o fator de preenchimento da ranhura. A redução da corrente do estator também pode ser obtida reduzindo-se a corrente de rotor ou de magnetização [12].

#### 2.4.2. Perdas no Núcleo (*Iron Losses*)

O circuito magnético é formado pelo material ferromagnético do estator e do núcleo do rotor. É a parte mais cara de um motor de indução e fornece ao fluxo um caminho magnético de baixa relutância. No entanto, como o campo magnético muda, isso gera perdas na laminação do estator e do rotor. Uma fração significativa das perdas (15–25%) nos motores de indução resulta das correntes parasitas e histereses nas laminações do núcleo. Essas chamadas perdas do núcleo dependem da intensidade do campo magnético  $B$ , da qualidade do aço, da espessura do aço e do isolamento entre as chapas, de modo que a melhoria da eficiência pode incluir aumento no volume ativo central ou redução na intensidade do campo [53].

Bertotti [55] desenvolveu um modelo de domínio de baixa frequência que divide as perdas em três componentes: perdas por correntes parasitas ( $P_{ed}$ ), perdas por histerese ( $P_{hy}$ ) e perdas excessivas ( $^2P_{ex}$ ). As perdas totais de ferro podem ser calculadas de acordo com 2.2:

$$P_{núcleo} = P_{ed} + P_{hy} + P_{ex} \quad (2.2)$$

As perdas de corrente parasita ( $P_{ed}$ ) são devidas a correntes induzidas dentro da pilha de laminação. Em geral, três tipos de aço podem ser utilizados: SAE 1006/1008, em folhas de 0,6

---

<sup>2</sup> Inicialmente  $P_{núcleo} = P_{ed} + P_{hy}$ , porém devido a que existia uma divergência entre os valores dessa equação e os experimentais as perdas excessivas ou anômalas ( $P_{ex}$ ) foram propostas para corresponder a diferença. Para mais ver [104].

mm de espessura, com perdas específicas de 4 W / kg; o tipo de núcleo, com uma espessura de 0,6 mm e perdas de 2,5 a 4 W / kg; e chapas de aço silício, com uma espessura de 0,5-0,23 mm e perdas de 1,3–2,5 W / kg. A condução elétrica é principalmente influenciada pela adição de silício ao aço. [12] [54].

Quando um campo magnético variável excita materiais magnéticos, a perda constante (perda de histerese), ( $P_{\text{Histerese}}$ ) ocorre na área de Weiss<sup>3</sup>. As perdas por histerese são causadas por deslocamentos irreversíveis das superfícies das áreas de Weiss, quanto mais imperfeições na rede cristalina, maiores são as perdas por histerese. A perda de histerese é independente da espessura da laminação [12] [56]. Para a diminuição das perdas em [93] foi implementado o uso de chapa de aço eletromagnética, com menores perdas específicas. Dois tipos de aço magnético são usados em máquinas elétricas [12], a M400-50A e M800-50A, quando se utiliza M270-50 perdas materiais específicos 1,1 W / Kg perdas foram diminuiu na faixa de 36% a cerca de 70% para o M400-50A e o M800-50A respetivamente.

#### **2.4.3. Perdas de Aquecimento no rotor (*Rotor Joule losses*)**

Para gerar torque, o rotor é composto por condutores e, no caso do SCIM, as barras do rotor são curto-circuitadas por um anel de extremidade. Como o rotor de um IM gira fora de sincronismo com o estator, a tensão e conseqüentemente as correntes são induzidas dentro das barras do rotor, resultando em torque de saída. Essas barras do rotor são geralmente fundidas dentro do aço de laminação e colocadas em um eixo maciço [12].

Como os fluxos de corrente nestas barras do rotor, perdas adicionais são geradas devido à resistência da barra do rotor. Similar às perdas de aquecimento, ou perdas do Joule do estator, as perdas de aquecimento do rotor são modeladas por  $P_r$  [12]:

$$P_r = 3 * R_r * I_{RMS}^2 \quad (2.3)$$

Em contraste com a resistência do estator, a resistência do rotor é altamente funcional da frequência aplicada, principalmente devido à grande seção transversal relativa das barras do rotor. À medida que a frequência aumenta, a corrente é forçada para a região superior da barra e, conseqüentemente, a densidade de corrente é reduzida para o centro da parte inferior da barra.

---

<sup>3</sup> A teoria do domínio magnético foi desenvolvida pelo físico francês Pierre-Ernest Weiss. Weiss explicou a razão para o alinhamento espontâneo de momentos atômicos dentro de um material ferromagnético, e ele surgiu com o chamado campo médio de Weiss.

A diminuição da superfície ativa é bem conhecida como o "efeito pele". No rotor, a redução da superfície ativa resulta em resistência adicional, o que às vezes é desejável para aumentar o torque de partida, como é o caso da gaiola dupla IM [12].

#### **2.4.4. Perdas por aquecimento no motor de ímãs permanentes (LSPMM)**

Em [73] comenta-se como nos motores de ímãs permanentes as perdas ôhmicas do rotor e do estator representam mais de 45% das perdas totais. Destes, quase 20% das perdas se dissipam na gaiola do rotor, como mostrado na Figura 2.8 (a). Além disso, as perdas ôhmicas do estator nos últimos motores, que é a maior parte da perda total do motor, também são reduzidas devido a uma redução significativa na corrente de magnetização e, portanto, na amplitude da corrente de entrada do motor. O autor em [57] comenta que as perdas de corrente parasita e por aquecimento nos ímãs permanentes do rotor são causadas por três razões diferentes [57].

1. O enrolamento do estator produz uma quantidade significativa de harmônicos de corrente gerados por densidades de fluxo viajando através dos ímãs permanentes, causando assim correntes parasitas. Estes são chamados harmônicos de enrolamento.
2. As aberturas das ranhuras causam variações de densidade de fluxo que induzem correntes parasitas nos ímãs permanentes. Estes são chamados de harmônicos de permeabilidade.
3. E os harmônicos de tempo causados pelo conversor de frequência na forma de onda da corrente do estator causam perdas extras no rotor.

#### **2.4.5. Perdas devido ao atrito e Ventilação (*Friction and Windage losses*)**

As perdas mecânicas causadas por atrito nos mancais e ventilação constituem 5 a 15% das perdas [47] [54]. Temperaturas excessivas dentro dos motores elétricos devem ser evitadas. Como os estatores de máquina são construídos a partir de aço laminado, 70% do calor gerado é transferido em uma direção radial através das laminações do estator. A laminação não apenas impõe uma alta resistência elétrica na direção axial, ela possui inerentemente uma alta resistência térmica axial. Para reduzir a resistência térmica do chassi ao ambiente, a transferência de calor em máquinas é forçada por um ventilador que geralmente é montado no final do eixo [12].

#### **2.4.6. Perdas Adicionais (*Stray Load Losses*)**

As perdas adicionais, são as últimas, mas as mais notórias perdas dependentes de carga. Elas podem ser relacionadas a três restrições práticas da máquina [53].

1. Limitações da propriedade magnética do aço no núcleo do motor elétrico, que leva à saturação local;
2. O fato de que uma geometria prática é usada, com ranhuras e um enrolamento discreto em vez de perfeitamente senoidal, dando origem a harmônicos de espaço (relacionados com o projeto do motor) e fluxos magnético de fuga;
3. Imperfeições industriais devido ao fabrico, por exemplo, as correntes da barra transversal que podem ocorrer devido ao isolamento imperfeito das barras da gaiola do rotor.

Estas perdas resultam em aquecimento adicional do motor e uma redução no torque. Elas têm sido objeto de muitos projetos de pesquisa e publicações que investigam sua origem, consequências, determinação e simulação [53].

# Capítulo 3 - Efeitos da distorção harmônica de tensão em motores elétricos de Indução e motores LSPMM

## 3.1 Considerações Gerais

Em um sistema de energia, a energia elétrica é produzida nas usinas, as tensões nos terminais da fase do gerador são iguais em magnitude e deslocadas umas das outras em 120 graus. Esta simetria total em tensões em todos os nós do sistema de potência não é possível, no processo de transmissão e distribuição de energia sofrem alterações em sua forma de onda, magnitude e fase, pois se aproximam das cargas, devido a cargas desequilibradas monofásicas em sistemas trifásicos e linhas de transmissão aéreas não transpostas etc.

Se a tensão de alimentação não estiver igualmente equilibrada nas três fases, isso resultará em desequilíbrio de tensão de alimentação. Os harmônicos e o desequilíbrio de tensões geralmente não resultam em um mau funcionamento instantâneo de equipamentos elétricos, mas causam perdas excessivas e, conseqüentemente, uma expectativa de vida reduzida e um custo operacional aumentado [12].

Antes do desenvolvimento dos conversores estáticos, as principais fontes de distorção harmônica nas tensões eram devido a dispositivos eletromagnéticos convencionais, como transformadores e sistemas motrizes, a maioria dos equipamentos poderia operar normalmente devido à variação desses parâmetros, porém, com o desenvolvimento de novas tecnologias surgiram novas fontes de harmônicas. No sistema de energia elétrica, as principais fontes de harmônicas podem ser classificadas como segue [8].

1. Não-linearidades de magnetização do transformador
2. Sistemas motrizes
3. Dispositivos de arco
4. Sistema de fornecimento de energia baseado em semicondutores
5. Inversores de Corrente Alternada (A.C. Drives)
6. Reatores controlados por tiristores
7. Controladores de fase

A presença de fontes de distorção no sistema de potência determina a criação e distribuição de curvas deformadas de tensões ou corrente elétrica nas redes elétricas. Na prática, as distorções mais comuns têm frequências de apenas alguns hertz a quase 10 kHz [12].

O fluxo de correntes harmônicas através dos elementos da rede elétrica produz um aumento das perdas de potência ativa nos materiais condutores, magnéticos e dielétricos. As perdas de energia suplementares no material condutor são geradas pelas correntes harmônicas que passam pelos elementos da rede elétrica, assim como pelo aumento da resistência elétrica desses elementos (este último é influenciado pelo efeito pele) [53].

Neste capítulo, vamos expandir o efeito dos harmônicos de tensão nos sistemas motrizes presentes neste estudo.

### **3.2 Harmônicos em SCIM**

De acordo com o padrão IEEE Std 1159-2009 [61], Harmônicos são tensões ou correntes senoidais que possuem frequências múltiplas inteiras da frequência na qual o sistema de alimentação é projetado para operar (denominado frequência fundamental; geralmente 50 Hz ou 60 Hz). Combinado com a tensão ou corrente fundamental, os harmônicos produzem distorção de forma de onda.

A distorção harmônica existe devido às características não-lineares dos dispositivos e cargas no sistema de potência. Correntes harmônicas criadas por cargas não lineares interagem com as impedâncias do sistema para produzir distorções de tensão, principalmente em redes fracas (baixo nível de curto circuito). Distorções excessivas de tensão causam mau funcionamento em equipamentos eletrônicos sensíveis e no próprio equipamento de conversão de energia. Além disso, as correntes harmônicas adicionais adicionam à corrente de carga da frequência fundamental existente, o que, por sua vez, aumenta as perdas no sistema. Excesso de conteúdo harmônico em circuitos de energia requer transformadores especiais e condutores de tamanho excessivo para evitar a sobrecarga pelos harmônicos [62].

A maioria dessas cargas é sensível a alto conteúdo harmônico, além de serem fontes harmônicas, se cargas não lineares forem adicionadas a um sistema existente, e elas gerar harmônicos no sistema, é importante examinar os possíveis efeitos prejudiciais no sistema como nos equipamentos presentes neste.

Para garantir um fornecimento com limites de qualidade de onda e com perdas aceitáveis, a distorção de tensão deve ser limitada a certos valores dados pelos padrões

internacionais (IEC na Europa e IEEE nos Estados Unidos). Especificamente para o ambiente industrial, a norma europeia que regula a qualidade da onda de tensão em termos de harmônicos é a IEC-61000-2-4 (Níveis de compatibilidade em plantas industriais para perturbações conduzidas de baixa frequência). A Tabela 3.1 indica os limites de qualidade de onda ou os limites de compatibilidade estabelecidos pelo referido padrão para o ambiente industrial em Baixa Tensão (BT). As diferentes classes mencionadas na referida tabela correspondem a [86] [87]:

- Classe 1: Ambiente industrial previsto para o fornecimento de equipamentos eletrônicos sensíveis.
- Classe 2: Ambiente industrial normal. Limites comuns para redes públicas.
- Classe 3: Ambiente industrial degradado (geralmente devido à presença de conversores). Não é adequado para alimentar equipamentos sensíveis. São recomendados para ambas as tensões e correntes.

Os motores elétricos formam parte da classe dos na Tabela 3.1

**Tabela 3. 1** Limites de compatibilidade: harmônicos de tensão (%) em redes industriais da BT de acordo com IEC-61000-2-4 [86].

Orden do Harmónico h	Classe 1 Vn%	Classe 2 Vn%	Classe 3 Vn%
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
>10 múltiplos. de 2	0,2	0,2	1
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5

15	0,3	0,3	2
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
21	0,2	0,2	1,75
>21 múltiplos de 3	0,2	0,2	1
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25 no múltiplos de 2 ni 3	0,2+12,5/ h	0,2+12,5/ h	$5 \times \sqrt{11/h}$
THD(V)	5%	8%	10%

A Tabela 3.2 apresenta os Limites das distorções para distintos níveis de tensão de acordo com o Padrão 519 da IEEE (Norma Americana)

**Tabela 3. 2** Limites das distorções harmônicas individuais e totais de acordo com *IEEE Standard 519, 1993* [27]

Tensão no Ponto de Acoplamento Comum	Harmônicos individuais (%)	Distorção Harmônica Total (THD%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

No Brasil, existe a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, de acordo com a legislação e em conformidade com as diretrizes e as políticas do governo federal. Em seu Módulo 8 do PRODIST estabelece os limites ou valores de referência aplicáveis para as distorções harmônicas totais como mostrado na Tabela 3.2 [10]

**Tabela 3. 3** Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). [10]

INDICADOR	Tensão Nominal
-----------	----------------

	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
<sup>4</sup> DTT 95%	10 %	8 %	5 %
<sup>5</sup> DTT <sub>P</sub> 95%	2.5 %	2 %	1 %
<sup>6</sup> DTT <sub>i</sub> 95%	7.5 %	6 %	4 %
<sup>7</sup> DTT <sub>3</sub> 95%	6.5 %	5 %	3 %

Os valores recomendados nesta cláusula são baseados no fato de que algum nível de distorção de tensão é geralmente aceitável e tanto os proprietários do sistema quanto os operadores e usuários devem trabalhar cooperativamente para manter a distorção de tensão real abaixo dos níveis questionáveis.

Para o cálculo da taxa de distorção harmônica atual, foi introduzido o conceito de Distorção Harmônica Total (THD), que é um dos parâmetros mais comumente usados para avaliar a qualidade de tensão ou corrente, a expressão matemática é dada por:

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (3.1)$$

Onde

$V_h$  é a tensão harmônica da ordem  $h$ ;

$V_1$  é a tensão fundamental medida;

$h_{max}$  é a ordem do harmônico máximo considerado.

Dois tipos de harmônicos são investigados para motores de indução: harmônicos de espaço e harmônicos de tempo. Os harmônicos espaciais são gerados devido à interação de diferentes enrolamentos de fase quando a fonte de alimentação é senoidal e eles podem ser reduzidos aplicando um projeto de máquina adequado. Por exemplo, o campo eletromagnético e harmônicos correspondentes de uma máquina elétrica são calculados usando o método de elementos finitos, os fatores de enrolamento harmônicos mostram como os harmônicos de espaciais podem ser reduzidos significativamente pelo bom projeto do enrolamento. Porém devido à ampla aplicação de *Variable Speed Drivers* (VSD), os harmônicos de tempo tornaram-se uma preocupação principal relacionada ao desempenho do motor em operações de campo.

<sup>4</sup> Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT%)

<sup>5</sup> Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT<sub>P</sub>%)

<sup>6</sup> Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT<sub>i</sub>%)

<sup>7</sup> Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT<sub>3</sub>%)

### 3.2.1 Harmônicos de tempo (*Time Harmonics*)

A presença de distorção harmônica de tensão na alimentação do motor leva a perdas harmônicas adicionais, redução de torque, aumento de escorregamento e vibrações mecânicas, todos contribuindo para o aumento da temperatura interna do motor, particularmente dos enrolamentos e núcleo do estator. Um distúrbio muito presente é a presença de harmônicos no suprimento de entrada dos motores elétricos. A fonte pode conter 2, 3, 5, 7 ... harmônicos.

Os relacionamentos a seguir são verdadeiros para os componentes de corrente de frequência fundamental no sistema de energia trifásico:

$$i_{a1} = I_{a1} \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$i_{b1} = I_{b1} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.3)$$

$$i_{c1} = I_{c1} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (3.4)$$

A rotação ou sequência de fase normal é a – b – c, que é no sentido anti-horário e designada como a sequência de fase positiva. Para análises harmônicas, essas relações ainda são aplicáveis, mas os componentes fundamentais de tensões e correntes são usados como referência. É bem sabido que, se uma forma de onda é deslocada em  $\phi$  graus, seus harmônicos são deslocados em  $h\phi$  graus, onde  $h$  é a ordem do harmônico. Assim, as expressões para  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  para o terceiro harmônico seriam [63]:

$$i_{a3} = I_{a3} \sin(3\omega t - 3 * 0) = I_{a3} \sin(3\omega t) \quad (3.5)$$

$$i_{b3} = I_{b3} \sin(3\omega t - 3 * 120^\circ) = I_{b3} \sin(3\omega t) \quad (3.6)$$

$$i_{c3} = I_{c3} \sin(3\omega t - 3 * 240^\circ) = I_{c3} \sin(3\omega t) \quad (3.7)$$

As expressões para os terceiros harmônicos mostram que elas estão em fase e possuem ângulo de deslocamento nulo entre elas, por isso são conhecidas como harmônicas de sequência zero devido ao ângulo de deslocamento zero entre as três fases.

A máquina de indução é, portanto, um circuito aberto para terceiros harmônicos. De fato, pode-se ver que qualquer harmônico cuja ordem é um múltiplo de três, isto é, os harmônicos triplos, enfrentarão uma situação idêntica. Como a máquina é um circuito aberto para harmônicos triplos na tensão de excitação, estes não têm efeito na máquina.

No entanto, o autor em [26] mostra que a presença da Força magnetomotriz (FMM) do terceiro harmônico devido a correntes de terceiro harmônico induzidas pelo rotor distorce a

distribuição magnetizante da FMM no entreferro, e a saturação nos dentes causa redistribuição do espectro da forma de onda da densidade de fluxo no espaço. Portanto, a magnitude e o deslocamento de fase da fundamental são alterados, resultando na produção de torque apesar da ausência de corrente de terceiro harmônico nos enrolamentos do estator. Mas isso só ocorre em condições de saturação excessiva.

Vamos agora considerar o quinto harmônico:

$$i_{a5} = I_{a5} \sin(5\omega t - 5 * 0) = I_{a5} \sin(5\omega t) \quad (3.8)$$

$$i_{b5} = I_{b5} \sin(5\omega t - 5 * 120^\circ) = I_{b5} \sin(5\omega t - 240) \quad (3.9)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \sin(5\omega t - 5 * 240^\circ) = I_{c5} \sin(5\omega t - 120) \quad (3.10)$$

Note que a sequência de fases das quintas correntes harmônicas é no sentido horário e oposta àquela da fundamental. Os quintos harmônicos são harmônicos de sequência negativa. A FMM causado por uma excitação de sequência negativa causa um padrão de fluxo giratório oposto (comparado com a direção da fundamental). O torque gerado por ele atuará como um torque oposto ao gerado pelo fundamental. Também, os ensaios conduzidos em [27] mostram que o 5° e 7° harmônicos, comuns nos conversores de seis pulsos, induzem correntes no estator da máquina, o que resulta em um aumento de temperatura nela

Em SCIM's, os harmônicos mais críticos são os de ordem 5, 7 e 11 (mas particularmente harmônicos de 5ª ordem de sequência negativa), afetando severamente as perdas no estator e no rotor, dependendo de sua amplitude [24].

Olhando para o sétimo harmônico, podemos ver que:

$$i_{a7} = I_{a7} \sin(7\omega t - 7 * 0) = I_{a7} \sin(7\omega t) \quad (3.11)$$

$$i_{b7} = I_{b7} \sin(7\omega t - 7 * 120^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 120) \quad (3.12)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \sin(7\omega t - 7 * 240^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 240) \quad (3.13)$$

Os componentes sétimos harmônicos da excitação formam um sistema de sequência positiva. O torque produzido por essas correntes será, portanto, aditivo em relação ao torque do componente fundamental. Os harmônicos analisados até agora são *harmônicos de tempo (time Harmonics)*, uma vez que são gerados por uma fonte que varia de forma não senoidal no tempo. Ao analisar um número maior de harmônicos, um padrão interessante no que diz respeito à rotação ou sequência das frequências harmônicas, como mostrado na Tabela 3.4. a seguir:

**Tabela 3. 4** Ordens e sequências para cada harmônico.

Sequência para cada Harmônico		
Sequência	Sequência	Sequência
Positiva (+)	Negativa (-)	Zero (0)
Harmônico	Harmônico	Harmônico
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15

### 3.2.2. Harmônicos Espaciais (*Space Harmonics*)

Os harmônicos espaciais são considerados principalmente pelos engenheiros de projeto de motores. Quando a fonte de alimentação para o motor de indução é senoidal, os harmônicos na Força magnetomotriz (FMM) do espaço de ar são harmônicos espaciais. Este tipo de harmônicos afetará o arranque do motor e vai produzir ruído magnético e vibração. Os harmônicos espaciais não podem ser evitados, pois são gerados pela interação magnética dos diferentes enrolamentos de fase, a fim de produzir o campo magnético rotativo, mas eles podem ser reduzidos otimizando o projeto da máquina [64].

Esses componentes harmônicos resultam em perdas adicionais, as perdas relacionadas a essa distorção são agrupadas nas Perdas Adicionais ou (*Stray Load Losses*) vistas em 2.4.6 e essas perdas podem ser efetivamente atenuadas por ajustes construtivos como mostrado em [65].

Embora os harmônicos causados pela distorção da tensão de alimentação interajam com os harmônicos causadas pela distribuição espacial, o autor em [12] explica que não há torque médio significativo e potência média resultante na interação de harmônicos de espaço e tempo. Como as harmônicas de tempo e espaço podem ser consideradas separadamente em termos de perdas e eficiência, esta pesquisa negligenciará as harmônicas de espaço e focará exclusivamente na distorção de tensão harmônica (Harmônicos de Tempo).

### 3.3 Perdas adicionais causadas por distorção da tensão de alimentação em SCIM

Além das perdas presentes nos motores de indução e analisadas no Capítulo 2, há perdas adicionais devido à distorção no fornecimento de energia, estas se manifestam como perdas adicionais de aquecimento no estator e no rotor, bem como perdas no núcleo do motor de indução, como segue.

### 3.3.1 Perdas adicionais no Núcleo do motor

As máquinas elétricas rotativas são construídas com vários tipos de ferro, aço e outras ligas metálicas. O estator e o rotor são construídos com classes específicas de aço elétrico laminado. O dimensionamento adequado da máquina exige uma estimativa exata das curvas B-H e a perda de ferro das laminações. Isso precisa ser feito usando à medida que atende aos requisitos do padrão internacional. Existem dois sistemas de medição padrão para determinação das características do aço elétrico, do quadro Epstein e do testador de folha única [66] [67]. Ambos os sistemas, juntamente com sua funcionalidade, são descritos nas normas IEC 60404-2 e IEC 60404-3 [68] [69].

Embora as perdas no núcleo sejam divididas em Perdas de *Eddy*, Perdas de Histerese e Perdas anômalas, para usos práticos, elas podem ser combinadas na equação de Steinmetz<sup>8</sup>.

$$P_{núcleo} = C_m f^\alpha B^\beta \quad (3.14)$$

Com  $P_{núcleo}$  como as perdas do núcleo [W / kg],  $C_m$  o primeiro coeficiente de Steinmetz,  $f$  a frequência [Hz],  $\alpha$  o segundo coeficiente de Steinmetz,  $B$  representando o pico de indução [T] e  $\beta$  o terceiro coeficiente de Steinmetz. Os coeficientes em (3.14) dependem do aço usado. Dois tipos de aço elétrico usado comercialmente em máquinas elétricas são M400-50A e M800-50A, listados na Tabela 3.5. O primeiro número indica as perdas específicas de ferro em W / kg a um pico de indução de 1,5 T. Para o M400-50A, as perdas específicas de ferro são de 4W / kg. O segundo número indica a espessura da laminação, para M400-50A a espessura é de 0,5 mm [12].

**Tabela 3. 5** Coeficientes de Steinmetz para o aço da classe comercial [12].

	$C_m$	$\alpha$	$\beta$
M400-50 <sup>a</sup>	0.0035	1.516	2.05
M800-50A	0.00112	1.363	1.92

<sup>8</sup> Charles Steinmetz, engenheiro elétrico alemão-americano, propôs uma equação semelhante sem a dependência de frequência em 1890.

O artigo em [70] mostra que um maior conteúdo harmônico na forma de onda de tensão tem um efeito adverso sobre as perdas no núcleo do motor, devido ao aumento da corrente de magnetização. Embora a distorção da tensão de alimentação tenha uma influência mensurável nas perdas de ferro, as medições apresentadas em [12] indicarão que o ângulo de fase da distorção é apenas de menor importância em termos de variação geral de perdas para máquinas pequenas com carga parcial. Além disso, os resultados confirmarão que, mesmo para máquinas de larga escala, a linearização pode ser presumida se a distorção de tensão for inferior a 15% do quinto. Conseqüentemente, a avaliação da perda harmônica negligência a menor influência da distorção da tensão de alimentação nas perdas totais. Resultados similares foram encontrados em [71]. A laminação do rotor pode saturar e resultar em um aumento na resistência magnética ou, conseqüentemente, uma diminuição na indutância magnética

### 3.3.2 Perdas adicionais por aquecimento no enrolamento do Estator

Se a tensão de alimentação para a máquina rotativa estiver distorcida, isso resultará em correntes distorcidas. Como afirmado no capítulo 2, as perdas de aquecimento no estator podem ser calculadas de acordo com (2.1). No caso de harmônicos na corrente, as perdas nas bobinas do estator podem ser calculadas por (3.15). O valor RMS da corrente harmônica da ordem  $h$  é indicado por  $I_{RMS h}$

$$P_s = 3 * \sum_{h=0}^{\infty} R_{s_h} * I_{RMS h}^2 \quad (3.15)$$

Como as bobinas do estator são geralmente fio de cobre enrolado, a seção é pequena e a influência do efeito da pele dentro das bobinas do estator é insignificante para a distorção de baixa frequência [72]. Conseqüentemente (3.15) pode ser calculado como segue:

$$\begin{aligned} P_s &= 3 * R_{s_h} * \sum_{h=0}^{\infty} I_{RMS h}^2 \\ P_s &= 3 * R_{s_h} * I_{RMS h}^2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

A distorção harmônica não apenas aumenta o valor eficaz da corrente do estator, mas também produz grandes picos de corrente, o que aumenta a corrente nominal requerida dos transistores do inversor ou o dever de comutação imposto aos tiristores do inversor se fosse o caso [72].

### 3.3.3 Perdas adicionais por aquecimento no Rotor

A presença de frequências mais altas na corrente do rotor não somente aumentará o valor RMS da corrente do rotor. Devido à alta frequência, voltagens adicionais serão induzidas dentro da barra do rotor forçando a corrente a fluir em uma seção reduzida [12]. A redução da superfície ativa resulta em resistência adicional que no funcionamento normal, é indesejável porque isto resulta em perdas adicionais

O efeito da pele é muito mais pronunciado no rotor da gaiola, que exibe um aumento significativo na resistência nas frequências harmônicas. Como a resistência do rotor é uma função da frequência harmônica, a perda de cobre do rotor é calculada independentemente para cada harmônico. Se a corrente do rotor harmônico for conhecida, as perdas correspondentes do rotor podem ser calculadas de acordo com (3.17) [12]:

$$P_r = 3 * \sum_{k=-\infty}^{+\infty} I_{RMS k}^2 R_r * K_{r_h} \quad (3.17)$$

Com  $I_{RMS k}$  o valor RMS da corrente do rotor harmônico  $k$ ,  $R_r$  a resistência do rotor na frequência fundamental  $h = 1$ . Devido à alta frequência de  $6k + s$  para as correntes do rotor, voltagens adicionais serão induzidas forçando a corrente do rotor a fluir próximo a parte superior da barra do rotor. Este efeito é modelado para cada harmônico individual pelo parâmetro  $K_{r_h}$ . Embora seja permitida a superposição das perdas do rotor, é proibida uma simplificação como apresentada em (3.16) para as perdas por aquecimento do estator, devido ao efeito da pele. [12] [72].

### 3.4 Harmônicos em motores de ímãs permanentes (LSPMM)

Se os LSPMM se tornarem um substituto real para os SCIM *padrão*, a influência de anomalias de tensão em sua eficiência energética global deve ser avaliada. No Capítulo 2, Seção 2.3.1. Duas diferenças foram comentadas na construção do motor SCIM e do LSPMM. Estes eram, um entreferro maior no caso do motor de ímã permanente e devido à sua construção mais simples, sua fabricação em larga escala, aumentando assim o efeito da pele neles. Quando a máquina é fornecida com uma forma de onda não senoidal, presume-se que esses dois parâmetros de projeto tenham um efeito mais pronunciado no LSPMM em relação ao SCIM padrão, porque [12] [58]:

- O entreferro maior, em combinação com a presença de PM, leva a uma maior relutância magnética. A alta relutância significa uma diminuição da indutividade. Para a mesma distorção de tensão harmônica, a diminuição da indutividade resulta em maiores correntes harmônicas, levando a um aumento do FMM harmônica na máquina e ao aumento das perdas por aquecimento do estator.
- Se o rotor for construído como uma estrutura maciça, haverá um aumento de correntes harmônicas induzidas e mais correntes parasitas no rotor. Perdas harmônicas resultarão em aquecimento adicional do rotor e, à medida que a temperatura do rotor aumentar, a indução do PM diminuirá.

Nas seções seguintes, o efeito das harmônicas nos motores de ímã permanente é apresentado.

### 3.4.1 Perdas adicionais por aquecimento no enrolamento do Estator

Melhorias e novos materiais e tecnologias dão como resultado a redução do volume do material ativo dos SCIM da classe IE2 para as classes IE3 e IE4, a Tabela 3.6 mostra a porcentagem de materiais para cada tecnologia. Com base nisso, considera-se que a redução das perdas do núcleo e do estator ( $I^2R$ ) é diretamente proporcional à respectiva diminuição do volume.

**Tabela 3. 6** Comparação entre materiais do SCIM e o motor LSPMM [84].

	Aço do Núcleo	Cobre	Ímãs
Motor Gaiola de Esquilo, Classe IE2	100 %	100 %	0 %
Motor de Ímãs Permanentes (LSPMM), Classe IE4	40 %	42 %	100 %

O artigo em [23] apresenta os efeitos desses materiais na temperatura dos enrolamentos, onde uma comparação entre as classes IE2, IE3 e IE4 é apresentada, os resultados mostram as cabeças de enrolamento do estator (pontos mais quentes no enrolamento) do lado de acionamento tem um aumento de temperatura muito menor e menor variação com a carga, em relação às outras classes de eficiência.

O LSPMM tem alto fator de potência de acordo com a capacidade anda em torno de 0,9-1 [5], já que os ímãs no motor são os principais responsáveis pelo fluxo do entreferro. Isso reduz a corrente do estator necessária para a magnetização. A redução na corrente do estator resulta

em menor perda de cobre no estator e melhora ainda mais a eficiência. Além disso, o entreferro no LSPMM é geralmente maior, o que ajuda a reduzir as perdas de carga e as perdas harmônicas. Como a construção do estator no SCIM e no motor de ímã permanente é semelhante, a maneira de calcular as perdas é a mesma mostrada em (3.16).

### **3.4.2 Perdas adicionais por aquecimento no Rotor**

Nos motores de indução, as perdas do rotor incluem dois componentes, isto é, perda de ferro e perda da gaiola. Nos motores LSPMM, graças à velocidade síncrona, a perda da gaiola desaparece com uma perda de corrente parasita insignificante causada pelos harmônicos do espaço de entreferro [73] [12]. Portanto, a temperatura do rotor desses motores é cerca de 30% menor que a dos motores de indução com a mesma potência de saída. No entanto, como o estado de partida dos motores LSPMM pode ser mais lento do que o dos motores de indução, o sobreaquecimento do rotor deve ser verificado durante o projeto do LSPMM.

Além disso, como o motor opera em velocidade síncrona, teoricamente não terá corrente de rotor. Sem perda de rotor, a eficiência do motor será maior e a temperatura de operação do motor será menor do que um motor de indução do mesmo tamanho. Porém nos sistemas elétricos atuais harmônicos de tensão e corrente estão presentes. se harmônicos de alimentação estiverem presentes, isto induzirá uma quantidade significativa de perdas adicionais de aquecimento no rotor [73].

### **3.4.3 Perdas no Núcleo do LSPMM**

As perdas de ferro no estator serão aumentadas pelos componentes harmônicos no fluxo de magnetização. As correntes mais altas traçadas com harmônicos presentes também causarão mais perdas nos caminhos de vazamento de fluxo. Suas frequências mais altas farão com que as correntes harmônicas dissipem mais potência no ferro. Todos esses efeitos são iguais aos de um SCIM normal apresentados em 3.3.1 e não são de grande preocupação.

Com a introdução dos ímãs permanentes no rotor é obtida uma diminuição do aço utilizado no núcleo do motor, com o que as perdas também diminuiriam.

O rotor, no entanto, não tem perdas de ferro em operação normal, mas a presença de fluxos harmônicos pode causar uma perda considerável. Isso seria particularmente importante se o projeto do rotor aproveitasse a operação síncrona usando menos laminação ou ferro de maior perda [74]. Também, como as perdas de ferro são mais dominantes nas perdas totais, o

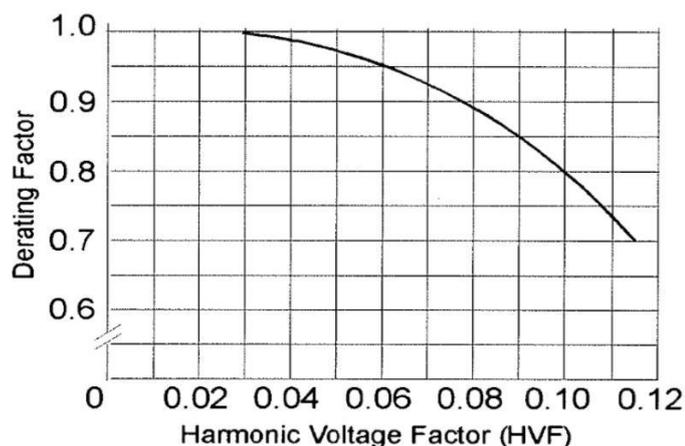
efeito da mudança de fase harmônica pode ser mais pronunciado em caso de distorção da tensão de alimentação lembrando que as perdas de ferro são principalmente dependentes da frequência de fornecimento, tensão e o material de laminação [12].

As perdas mecânicas, consistindo tanto de fricção como de perdas por gotejamento, são determinadas principalmente pela velocidade mecânica da máquina. Para baixas taxas de distorção, a velocidade do LSPMM é fixada pela frequência fundamental de suprimento. Conseqüentemente, as perdas mecânicas são assumidas independentemente da distorção da tensão de alimentação [12] [74].

### 3.5 Diminuição na Eficiência em motores de Indução sob condições de harmônicos.

A eficiência do motor elétrico será reduzida quando for operado em um barramento com conteúdo harmônico. Os harmônicos presentes aumentarão as perdas elétricas que, por sua vez, diminuem a eficiência. Esse aumento nas perdas também resultará em um aumento na temperatura do motor, o que reduz ainda mais a eficiência. Devido à presença de harmônicos, a elevação de temperatura do motor operando em uma carga específica e por fator harmônico de tensão unitária será maior do que a do motor operando sob as mesmas condições com apenas tensão na frequência fundamental aplicada [75].

Quando um motor é operado em suas condições nominais e a tensão aplicada ao motor consiste em componentes em frequências distintas da nominal, a potência nominal do motor deve ser multiplicada por um fator de redução calculado conforme a Figura 3.1. para reduzir a possibilidade de danos no motor.



**Figura 0.1** Curva de diminuição para tensões harmônicas [75]

Esta curva é desenvolvida sob a suposição de que somente harmônicos iguais a múltiplos ímpares (exceto os que são visíveis por três) da frequência fundamental estão

presentes. Assume-se que qualquer desequilíbrio de tensão ou quaisquer harmônicos pares, ou ambos, presentes na tensão são insignificantes. Esta curva de desclassificação não se destina a ser aplicada quando o motor é operado com frequência diferente da sua, nem quando operado a partir de uma tensão ajustável ou uma fonte de alimentação de frequência ajustável, ou ambos [75].

O Fator de Tensão harmônico é definido como segue:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_h^2}{h}} \quad (3.18)$$

Onde:

$h$  = Ordem do harmônicos ímpar, não incluindo aqueles divisíveis por 3.

$V_h$  = A magnitude por unidade (p.u.) da tensão na  $n$  frequência harmônica.

Conseqüentemente, para uma dada eficiência em condições de onda senoidal, a eficiência reduzida do motor de indução fornecida com tensão distorcida pode ser estimada usando os resultados obtidos em (3.18), Figura 3.1 como mostrado em (3.19).

$$\eta_c = \frac{DF^2}{\eta^{-1} + DF^2 - 1} \quad (3.19)$$

Com  $\eta_c$  a eficiência reduzida para um fator de redução (*Derating Factor*) como função do HVF (Equação 3.18) como calculado na Figura 3.1 e  $\eta$  a eficiência de referência, que é a eficiência em condições de ideais de alimentação (onda senoidal sem harmônicos) [12].

Seguindo estes padrões, um motor de indução trifásico submetido a uma distorção harmônica de 6% da tensão total terá sua capacidade máxima reduzida para 95%, a fim de preservar sua expectativa de vida útil.

# Capítulo 4 - Análise de Correlação e Criação de modelos.

## 4.1 Considerações Gerais

A presença de harmônicas na tensão de alimentação produzirá um impacto no desempenho de cada motor analisado, como será apresentado no Capítulo 5. A distorção harmônica de tensão resulta em um comportamento nos sistemas motrizes que varia de acordo com a ordem do harmônico presente (sequência positiva, negativa e zero), com a porcentagem presente na tensão de alimentação assim como classe de eficiência do motor analisado.

Visando analisar o comportamento e a relação de cada um dos parâmetros registrados durante os experimentos, foi criada uma base de dados para cada harmônico aplicada na tensão de alimentação de cada um dos motores. Na análise da medição de grandezas é observado que existem variáveis que apresentam certos padrões. Em estatística, essas variáveis que resultam de processos de medição são denominadas como variáveis aleatórias contínuas [95]. Para essas variáveis e com base nesses comportamentos típicos, podem ser criados modelos que representem o comportamento para cada uma das harmônicas e dos motores analisados. Este Capítulo visa mostrar a análise seguida para a análise dos dados e da criação dos modelos a apresentar no Capítulo 5.

## 4.2 Correlação

Na estatística, por meio de diagramas de dispersão, pode-se determinar o tipo de relação existente entre variáveis quantitativas. Muitas vezes esse relacionamento pode ser realizado por meio de uma linha reta que procura se ajustar a todos os pontos de amostragem. No entanto, um diagrama de dispersão não é suficiente para conhecer a força e a direção de um relacionamento entre duas variáveis, isso pode ser conhecido pelo coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação mede até que ponto duas variáveis tendem a mudar juntas. O coeficiente descreve a força e a direção do relacionamento. Dentre os existentes dos tipos de correlação ressaltam na literatura:

- **Coeficiente de correlação de Pearson**
- **Correlação de correlação de Spearman**

As principais características de cada um deles assim como suas diferenças são ampliadas a seguir.

#### 4.2.1. Coeficiente de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é o mais utilizado, ele mede a força da relação linear entre variáveis normalmente distribuídas. Um relacionamento é linear quando uma alteração em uma variável é associada a uma alteração proporcional na outra variável. O coeficiente de correlação é chamado de  $r$ , e é expressado como segue [95]:

$$r = \frac{(\sum XY) - (\sum X) * (\sum Y) / n}{\sqrt{(\sum X^2 - (\sum X)^2 / n) * (\sum Y^2 - (\sum Y)^2 / n)}} \quad (4.1)$$

Onde  $n$  é o número de observações.

#### 4.2.2. Coeficiente de Correlação de Spearman

A correlação de Spearman avalia a relação monotônica entre duas variáveis contínuas ou ordinais. Em uma relação monotônica, as variáveis tendem a mudar juntas, mas não necessariamente a uma taxa constante. O coeficiente de correlação de Spearman é frequentemente indicado pelo símbolo  $r_s$  (ou a letra grega  $\rho$ , pronunciada rho). É um teste útil quando a correlação de Pearson não pode ser executada devido a violações de normalidade, um relacionamento não linear ou quando variáveis ordinais estão sendo usadas. O desenvolvimento da fórmula é apresentado a seguir [95]:

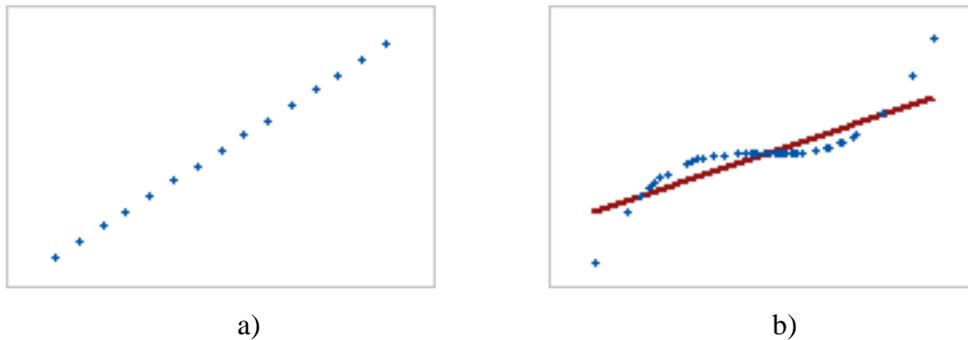
$$r_s = \rho = 1 - \frac{6 * \sum D^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4.2)$$

Onde  $n$  é o número dos pares dos valores e  $D$  é a diferença entre cada posto de valor correspondentes de  $X$  e  $Y$ .

#### 4.2.3. Principais Características e diferenças

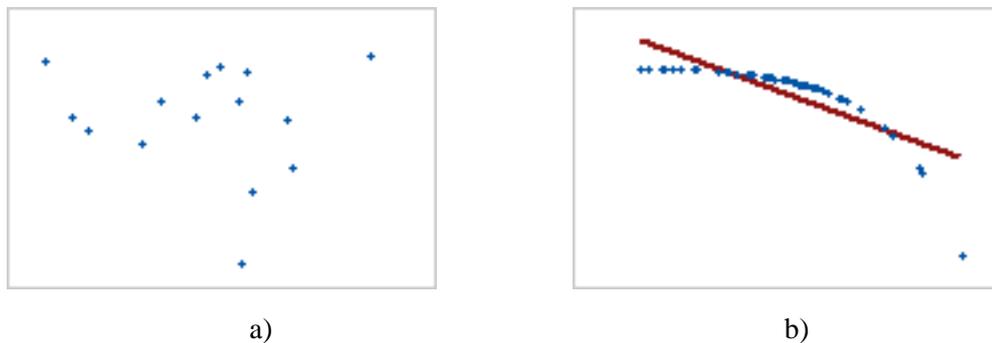
Os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman podem variar em valor de -1 a +1. Para que o coeficiente de correlação de Pearson seja +1, quando uma variável aumenta, a outra variável aumenta em um valor consistente, esse relacionamento forma uma linha perfeita, para o mesmo caso o coeficiente de correlação de Spearman também é +1, como apresentado na Figura 4.1(a). Pode acontecer que quando uma variável aumente, a outra também aumente, porém a uma quantidade não consistente, neste caso o coeficiente de correlação é positivo, mas

menor que +1, enquanto que o coeficiente de Spearman ainda é igual a +1 para esse cenário, apresentado na Figura 4.1 (b).



**Figura 0.1** Correlações de Pearson e Spearman (a) Pearson = +1, Spearman = +1, (b) Pearson = +0,851, Spearman = +1. Fonte [97]

Existem casos em que um relacionamento é aleatório ou inexistente, nesse caso ambos coeficientes de correlação são quase zero, isso é mostrado na Figura 4.2 (a). Também pode acontecer cenários inversos ao mostrado na Figura 4.1(b), em que uma variável diminui quando a outra aumenta, mas a quantidade não é consistente, então o coeficiente de correlação de Pearson é negativo, mas maior que -1, porém o coeficiente de Spearman ainda é igual a -1, como apresentado na Figura 4.2 (b).



**Figura 0.2** Correlações de Pearson e Spearman (a) Pearson = -0,093, Spearman = -0,093, (b) Pearson = -0,799, Spearman = -1. Fonte [97]

Também podem existir dados ou variáveis que tenham um relacionamento significativo mesmo se os coeficientes de correlação forem 0, denominado relacionamentos não lineares.

### 4.3 Teste de Significância

Um dos objetivos da estatística é frequentemente fazer inferências sobre parâmetros populacionais desconhecidos com base em informações contidas em dados de amostras [98]. Frequentemente o problema para o investigador não é tanto a estimativa de um parâmetro da

população, mas a informação de um procedimento de decisão baseado nos dados e que possa produzir uma conclusão sobre uma determinada pesquisa.

O teste de significância é uma regra de decisão que permite aceitar ou rejeitar como verdadeira uma hipótese com base na evidência amostral [95]. Ele avalia a evidência fornecida pelos dados sobre alguma afirmação relativa à população. Quando o pesquisador realiza uma prova estatística, inicialmente formula duas hipóteses:

$H_0$ : Hipótese nula ou hipótese básica, que será aceita ou rejeitada.

$H_1$ : Hipótese alternativa, que será automaticamente aceita caso  $H_0$  seja rejeitada.

A hipótese nula é a declaração que está sendo testada. Normalmente, a hipótese nula é uma declaração de “nenhum efeito” ou “nenhuma diferença”. A hipótese alternativa é a declaração que você quer ser capaz de concluir que é verdadeira com base em evidências fornecidas pelos dados da amostra [96]. Para fazer essa determinação e testar a significância, existem as alternativas do intervalo de confiança e do valor p, os quais são os mais utilizados atualmente na área de pesquisa estatística. Para este trabalho a significância foi analisada por meio do valor p. O valor p é o grau de confiança que a informação amostral dá a hipótese formulada. É uma medida de credibilidade de  $H_0$  [95].

Ao obter o valor-p é importante analisar sua significância estatística. Podemos comparar o valor-p com um valor fixo que consideramos decisivo, este valor decisivo do valor p é o nível de significância ( $\alpha$ ). Se o valor-p é igual ou menor do que  $\alpha$ , dizemos que a estimativa é significativa no nível de  $\alpha$ , até este limite, o valor-p pode ser considerado como pequeno, indicando baixa credibilidade da hipótese nula.

Para gerações inteiras de análises estatísticas, tornou-se habitual escolher um  $\alpha$  de 0,05 ou 0,01 [98], para este trabalho um  $\alpha$  de 0.05 foi adotado como nível de significância. É importante ressaltar que em linguagem de estatística, significativo não significa “importante”, se não simplesmente “não provável” de ocorrer. O valor-p é mais informativo do que uma afirmação de significância (probabilidade de erro de estimação), porque foi calculado e é fruto da observação empírica. Para o cálculo do valor-p utiliza-se a distribuição t, calculado pelo estimador a seguir

$$t = r \sqrt{\frac{n - 2}{1 - r^2}} \quad (4.3)$$

A expressão acima tem distribuição *t-student* com  $\varphi = n-2$  graus de liberdade. Sendo  $n$  o número de observações e  $r$ , o coeficiente de correlação. O valor-p é obtido junto a tabela *t-Student*. Na linha do grau de liberdade  $\varphi$ , procura-se o valor mais próximo do valor absoluto de  $t$ . O valor-p é a probabilidade  $\alpha$  na linha bilateral do cabeçalho da tabela associada a este valor mais próximo de  $t$  [95].

#### 4.4 Modelos Probabilísticos

A presença de harmônicos na tensão de alimentação resulta em um consumo maior de corrente e por tanto maiores perdas, o que incrementa a temperatura de operação do motor. As perdas presentes são proporcionais a distorção de tensão aplicada, da ordem harmônica, como da tecnologia do motor analisado. O incremento das temperaturas devido a distorções na tensão de alimentação também resultará em uma diminuição do isolamento e por tanto da vida útil do motor.

Com o objetivo de analisar as variáveis que tem uma maior influência no incremento de temperatura de cada motor foram criados modelos que representassem esse comportamento, tendo como variável dependente a temperatura da carcaça do motor para cada porcentagem e ordem harmônica e como variáveis independentes os parâmetros de registrados no analisador de qualidade na entrada do motor.

Para a criação dos modelos foi utilizado o *Software* estatístico *Minitab* [96], o qual fornece um conjunto abrangente de estatísticas para a exploração de dados, criação de modelos e a resposta gráfica para cada um deles. Ele é utilizado em numerosos textos de estatística, como ser [98-100] entre outros. A seguir é explicado sobre o procedimento que o software utiliza para a criação dos modelos.

##### 4.4.1. Regressão Simples

O procedimento de regressão simples no Assistente ajusta modelos lineares e quadráticos com uma preditora contínua ( $X$ ) e uma resposta contínua ( $Y$ ), usando estimação por mínimos quadrados. O usuário pode selecionar o tipo de modelo ou permitir que o Assistente selecione o modelo de melhor ajuste.

Um modelo de regressão relacionando uma variável preditora  $X$  a uma resposta  $Y$  é da forma:

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (4.4)$$

Em que a função  $f(X)$  representa o valor esperado (média) de Y dado X.

Existem dois modelos que podem ser escolhidos:

$$\text{Linear: } f(X) = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (4.5a)$$

$$\text{Quadrático: } f(X) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (4.5b)$$

Os valores de  $\beta$  não são conhecidos e devem ser estimados a partir dos dados. O método de estimação é o método de mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos na mostra:

$$SCE = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{f}(X_i))^2 \quad (4.6)$$

Um resíduo é a diferença entre a resposta observada  $Y_i$  e o valor ajustado  $\hat{f}(X_i)$  com base nos coeficientes estimados. O valor minimizado desta soma dos quadrados é o SCE (Soma de Quadrados de Erro) para um determinado modelo e é a variação devida ao erro, ou variação não explicada.

Logo o modelo é submetido a uma teste de F geral, o qual é um teste do modelo geral (linear ou quadrático). Para a forma selecionada da função de regressão  $f(X)$ , o método verifica o seguinte:

$H_0$ :  $f(X)$  é constante.

$H_1$ :  $f(X)$  não é constante.

#### 4.4.2. $R^2$ Ajustado

Um critério que é geralmente usado para ilustrar a adequação de um modelo de regressão ajustado é o coeficiente de determinação múltipla ou  $R^2$ . O  $R^2$  ajustado indica que proporção da variação total da resposta Y é explicada pelo modelo ajustado. Existem duas maneiras comuns de medir a força da relação observada entre X e Y, elas são mostradas em 4.7 e 4.8

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{STC} \quad (4.7)$$

$$R_{ajus}^2 = 1 - \frac{SCE/(n-p)}{STC/(n-1)} \quad (4.8)$$

Onde

$$SQT = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (4.9)$$

$Y_i$  = Valor medido de Temperatura para cada porcentagem;

$\bar{Y}$  = Valor médio da Temperatura.

O SQT é a soma total dos quadrados, que mede a variação das repostas em torno de sua  $\bar{Y}$  promédio geral. O SCE mede a variação de repostas em torno da função de regressão  $f(X)$ . O ajuste em  $R_{ajus}^2$  é para o número de coeficientes ( $p$ ) no modelo completo, que deixa  $n-p$  graus de liberdade para estimar a variância de  $\epsilon$ .

Então, trazendo isto para nosso trabalho, um  $R^2 = 0,9854$  significaria que um 98,54% da variação da temperatura para uma determinada harmônica é explicada pelo modelo de regressão gerado. Pode acontecer que um modelo criado, tenha mas variáveis preditoras das necessárias, tanto que uma delas poderia ser tirada do modelo, neste caso o  $R^2$  diminuiria, porém isso aconteceria mesmo se o modelo estivesse sobre ajustado, para isso o  $R^2$  ajustado apresentado na equação 4.8 é projetado para fornecer um estatístico que pune um modelo sobre ajustado.

$R^2$  nunca diminui quando são agregados mais coeficientes no modelo. No entanto devido ao ajuste  $R_{ajus}^2$  pode diminuir quando os coeficientes adicionais não melhoram o modelo. Então, se a adição de outro termo para o modelo não explica qualquer variação adicional na resposta,  $R_{ajus}^2$ , diminui, indicando que o termo adicional não é útil. Portanto, a medida ajustada deve ser usada para comparar modelos de tamanhos diferentes. Para evitar esse problema nos modelos para a temperatura propostos foram criadas matrizes de correlação para analisar cada uma das variáveis independentes no modelo visando a equação que melhor represente o comportamento dos parâmetros analisados.

#### 4.4.3. Relação entre o teste F e o $R^2$ ajustado

O valor F é a estatística de teste usada para determinar se o modelo está associado com a resposta. Minitab utiliza esse valor para calcular o valor-p, que pode ser usado para a tomada de decisão sobre a significância estatística do modelo. Ele contrasta a hipótese nula de que o valor populacional do R é para o teste do modelo geral pode ser expressado em termos de SCE e SQT, que também são utilizados no cálculo de  $R_{ajus}^2$  como segue:

$$F = \frac{(STC - SCE)/(p - 1)}{SCE/(n - p)} = 1 + \frac{(n - 1)}{(p - 1)} \frac{R_{ajus}^2}{1 - R_{ajus}^2} \quad (4.10)$$

A equação anterior mostra que o estatístico F é uma função crescente de  $R_{ajus}^2$ . Portanto, o teste rejeita  $H_0$  se e só se  $R_{ajus}^2$  excede o valor específico determinado pelo nível de significância ( $\alpha$ ) do teste.

#### 4.4.4. Quantidade de Dados

A potência tem a ver com a probabilidade de que um teste de hipótese rejeite a hipótese nula quando seja falsa. No caso da regressão, a hipótese nula afirma que não existe relação entre X e Y. O número de observações também afeta a potência do teste do modelo geral e a precisão de  $R_{ajus}^2$ , a estimação da força do modelo. Para quantificar a força da relação é introduzido uma nova quantidade  $\rho_{ajus}^2$  como a contrapartida na população do estatístico  $R_{ajus}^2$  da amostra. A partir de 4.8 definimos:

$$\rho_{ajus}^2 = 1 - \frac{E(SCE|X)/(n-p)}{E(SQT|X)/(n-1)} \quad (4.11)$$

O operador  $(E|X)$  denota o valor esperado ou a média de uma variável aleatória dado o valor de X. Supondo que o modelo correto é  $Y=f(X)+\varepsilon$  com um  $\varepsilon$  independente e distribuído de forma idêntica, tem-se:

$$\frac{E(SCE|X)}{(n-p)} = \sigma^2 = \text{Var } \varepsilon \quad (4.12)$$

$$\frac{E(SQT|X)}{(n-1)} = \sum_{i=1}^n \frac{(f(X_i) - \bar{f})^2}{(n-1)} + \sigma^2 \quad (4.13)$$

Onde

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(X_i)$$

Por conseguinte:

$$\rho_{ajus}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f(X_i) - \bar{f})^2 / (n-1)}{\sum_{i=1}^n (f(X_i) - \bar{f})^2 / (n-1) + \sigma^2} \quad (4.14)$$

Para os modelos gerados no Minitab, foi utilizada uma base de dados de 65 amostras para cada variável dependente como independente.

#### 4.4.5. Significância do modelo

Ao avaliar a significância estatística do modelo geral, foi considerado que os erros aleatórios  $\varepsilon$  são independentes e distribuídos normalmente. Logo sob a hipótese nula de que a média de Y é constante ( $f(x) = \beta_0$ ), o estatístico da proba F tem uma distribuição F (p-1, n-p). Sob a hipótese alternativa, a estatística F tem uma distribuição F (p-1, n-p,  $\Theta$ ). não central com parâmetro de não centralidade:

$$\theta = \sum_{i=1}^n (f(X_i) - \bar{f})^2 / \sigma^2 = \frac{(n-1)\rho_{ajus}^2}{1 - \rho_{ajus}^2} \quad (4.15)$$

A probabilidade de rejeitar a hipótese nula  $H_0$  aumenta com o parâmetro de não centralidade, que incrementa tanto em n, como em  $\rho_{ajus}^2$ .

#### 4.4.6. Multicolinearidade

Na análise de regressão, o termo variável independente é usado para se referir a qualquer variável que é usada para prever ou explicar o valor da variável dependente. No entanto, esse termo não significa que essas variáveis independentes sejam independentes entre si, em um sentido estatístico. Pelo contrário, em um problema de regressão múltipla, a maioria das variáveis independentes é, até certo ponto, correlacionada entre si [100].

Para determinar se a multicolinearidade é alta o suficiente para causar problemas, sendo um problema potencial se o valor absoluto do coeficiente de correlação da amostra for maior que 0,7 para qualquer par de variáveis independentes. Na seção 5.7 serão apresentadas as matrizes de correlação para as variáveis registradas no cálculo, será observado como as variáveis mostram grandes coeficientes de correlação.

A apostila em [101] apresenta o procedimento que é utilizado para a escolha dos termos do modelo no assistente do Minitab, os passos são mostrados a seguir.

- É usado método que seleciona o modelo com base na significância estatística do termo de ordem mais alta no modelo. O Assistente primeiro examina o modelo quadrático e testa se o termo quadrado ( $\beta_2$ ) no modelo é estatisticamente significativo. Se esse termo

não for significativo, ele descarta o termo quadrático do modelo e testa o termo linear ( $\beta_1$ ). O modelo selecionado por meio desta abordagem é apresentado no Relatório de Seleção de Modelos.

- A escolha do método pelo software é devido aos pareceres de profissionais da qualidade que disseram que preferem modelos mais simples, que excluam termos que não sejam significativos. Além disso, com base em nossa comparação dos métodos, a utilização da significância estatística do termo mais alto no modelo é mais rigorosa do que o método que seleciona o modelo com base no valor mais alto de  $R^2$  ajustado

# Capítulo 5 - Medições e Discussão dos Resultados

## 5.1. Considerações Gerais

São notórias as muitas melhorias no projeto e construção que os motores elétricos experimentaram nos últimos anos em resposta ao interesse global em reduzir o consumo de eletricidade por razões econômicas e ecológicas. Neste contexto, este capítulo expõe como, além de conseguir uma diminuição nas perdas presentes nessas máquinas, elas são menos sensíveis às perturbações presentes na rede elétrica.

Para analisar o efeito dos harmônicos nos motores elétricos, foram realizadas campanhas de medição em ambiente de laboratórios para as diferentes classes de eficiência apresentadas neste estudo.

As medições em cada motor foram feitas em duas condições diferentes de alimentação, primeiro com um sinal senoidal puro e balanceado, e depois injetando harmônicas nas tensões de alimentação. O objetivo desta separação é tomar uma referência no primeiro caso, para então fazer uma comparação no desempenho de cada tecnologia diante destas perturbações. A análise dos resultados obtidos será feita nas seções posteriores deste capítulo.

## 5.2. Características dos equipamentos das bancadas de medição utilizadas no estudo

### 5.2.1 Equipamento analisador de QEE

O equipamento analisador de qualidade de energia empregado nas medições consiste em um HIOKI PW3198-90, como mostrado na Figura 5.1, capaz de medir harmônicos, interharmônicos, supraharmônicos, transitórios, oscilações, desequilíbrio afundamentos e elevações de tensão. O analisador consiste em um equipamento classe-A de acordo com a IEC 61000-4-30 [88] e classe-I de acordo com a IEC 61000-4-7 [89].



**Figura 5.1** Equipamento analisador de qualidade de energia utilizado nas medições

O funcionamento do equipamento descrito consiste na definição de níveis máximos para os distúrbios de QEE mencionados. Dessa forma, caso o analisador detecte alguma violação desses limites na medição efetuada, um evento será então armazenado dentro de uma janela de análise e sob uma determinada frequência de amostragem. Após a detecção do evento, o analisador permite que os dados sejam coletados e posteriormente analisados no software do equipamento ou outro software que forneça informação adicional em relação às características do sinal.

### 5.2.2. Fonte CA eletrônica trifásica

A fonte CA trifásica utilizada para a alimentação das cargas consiste em um modelo SUPPLIER FCATHQ 900-50-50-n-55250 mostrada na Figura 5.2, capaz de gerar um sinal senoidal puro bem como os demais distúrbios de QEE, como harmônicos (até a 50ª ordem), desequilíbrio, afundamentos e elevações de tensão, oscilação de tensão, desvios de frequência e transitórios. O modelo utilizado possui os seguintes parâmetros:

- Tensão nominal de alimentação: 380 VAC;
- Corrente nominal de entrada: 16 A;
- Frequência de alimentação: 50/60 Hz;
- Tensão de saída modo trifásico: 0 a 500 V (Tensão de linha);
- Corrente nominal de saída modo trifásico: 13,6 A;
- Tensão de saída modo monofásico: 0 a 288,5 V;
- Corrente nominal de saída modo monofásico: 40 A;
- Frequência de saída: 15 a 500 Hz.



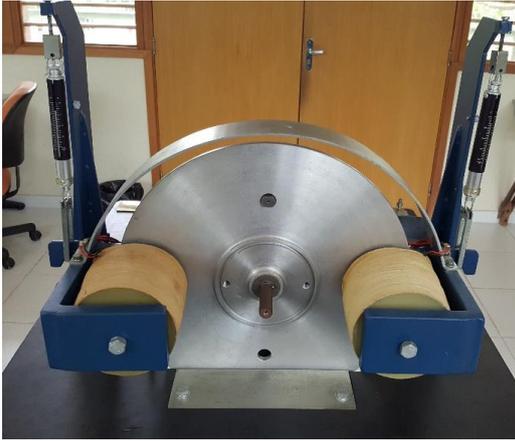
**Figura 5.2** Fonte CA trifásica utilizada na alimentação das cargas.

### **5.2.3. Freio de Foucault**

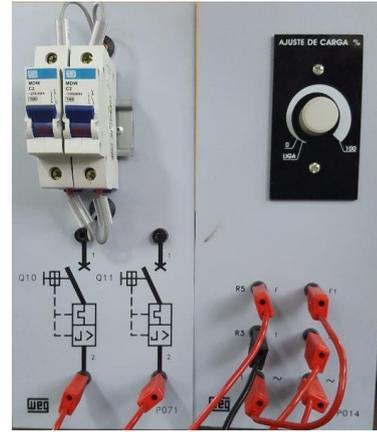
A carga utilizada neste trabalho é constituída por um freio eletromagnético ou Freio de Foucault, mostrado na Figura 5.3a. O funcionamento básico de um freio de Foucault consiste em um disco de material condutor elétrico que, ao cruzar uma região de campo magnético, provocado por um eletroímã localizado em determinado ponto do disco, faz variar o fluxo magnético naquele ponto, o que provoca a indução de correntes parasitas nessa área. Duas células de carga são conectadas aos extremos do Freio de Foucault com as que é possível medir a força oposta produzida pelas correntes parasitas, ao ser multiplicado pela distância ao eixo é possível encontrar o torque de saída do motor.

A ação dos campos do eletroímã e o campo induzido pelas correntes induzidas se opõem, tendendo a se anularem, o que gera uma força que tende a frear o disco, simulando assim uma carga no eixo do motor. O circuito do freio é composto por duas bobinas em série, tendo sua excitação em corrente contínua. Seus parâmetros de tensão e corrente vão de 63V/ 0, 118A a 190V/ 0, 381A.

A excitação CC do freio é obtida com o auxílio do módulo de frenagem da Weg, placa P014, de acordo com a Figura 5.3b. O seu circuito é composto por um retificador, alimentado com a tensão senoidal de rede em 220V-60Hz e gerando a excitação CC necessária para as aplicações adotadas. O controle do nível de excitação é feito através de um potenciômetro.



a)



b)

**Figura 5.3** a) Freio de Foucault utilizado na bancada para ensaio. b) Módulo de frenagem

#### 5.2.4. Motores Elétricos

Para o estudo apresentado neste trabalho, foram utilizados motores elétricos das classes (*High Efficiency*) IE2, (*Premium Efficiency*) IE3 e (*Super Premium Efficiency*) IE4, sendo o último um motor híbrido com rotor de ímãs permanentes e gaiola de esquilo. A Figura 5.4 mostra essas tecnologias. Suas principais características e diferenças foram analisadas nos capítulos anteriores. Os dados de cada um dos motores são apresentados na Tabela 5.1. Pode-se observar que cada um deles tem a mesma capacidade, e foi submetido aos mesmos distúrbios para fazer uma comparação em seu desempenho.

Tabela 5. 1 Parâmetros das sistemas motrizes no estudo.

Classe do Motor	IE2	IE3	IE4
Tecnologia do Motor	SCIM	SCIM	LSPM
Potência Nominal	1hp	1 hp	1 hp
Tensão Nominal	220 V/380 V	220 V/380 V	220 V/380 V
Velocidade nominal (r/min)	1730 rpm	1725 rpm	1800 rpm
Torque Nominal (Nm)	4,12	4,13	3,96
Eficiência Nominal (%)	82,60	82,6	87,4
Fator de Potência Nominal	0,80	0,82	0,73



Figura 5.4 Motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4 respectivamente.

### 5.2.5. Câmera termográfica

No processo de conversão de energia elétrica em energia mecânica em motores elétricos, ocorrem perdas que se transformam em calor e são liberadas para o meio ambiente, por exemplo, perdas de estator e rotor, perdas por atrito e força do vento, etc. É possível analisar o aumento da temperatura neste processo através de uma câmera termográfica infravermelha. As imagens térmicas dos motores elétricos mostram sua temperatura superficial, uma indicação essencial de seu status operacional. Na indústria eles são amplamente utilizados principalmente em manutenção.

O artigo em [91] apresentou um método para estimar a eficiência do motor de indução trifásico em serviço utilizando os dados de temperatura da termografia infravermelha, os resultados mostram que embora haja um desvio em relação aos valores de referência, o método proposto poderia efetivamente e convenientemente ser aplicado para estimar a eficiência do motor de indução trifásico em serviço. Para este estudo foi utilizada a câmera infravermelha da marca FLIR modelo T620, esta câmera possui um detector infravermelho de 640 x 480 a 30 Hz, UltraMax, WiFi, sensibilidade térmica de 0,04 ° C e uma faixa de medição de temperatura de -40 a 650 ° C (-40 a 1202 ° F) [92]. A Figura 5.5 mostra a representação da câmera descrita.



**Figura 5.5** Câmera Termográfica FLIR T620.

### 5.3. Metodologia

No presente trabalho, buscou-se analisar a influência dos harmônicos de tensão de 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem na temperatura da carcaça como em outros parâmetros de motores elétricos de diferentes eficiências, isso devido a sua presença nos sistemas elétricos bem como o estudo analisar tecnologias pouco exploradas como o motor de ímãs permanentes. Com este objetivo, o laboratório de qualidade da energia no Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), na Universidade Federal do Pará (UFPA) foi utilizado devido a contar com todos os equipamentos necessários, para isso a bancada apresentada na Figura 5.6 foi utilizada.

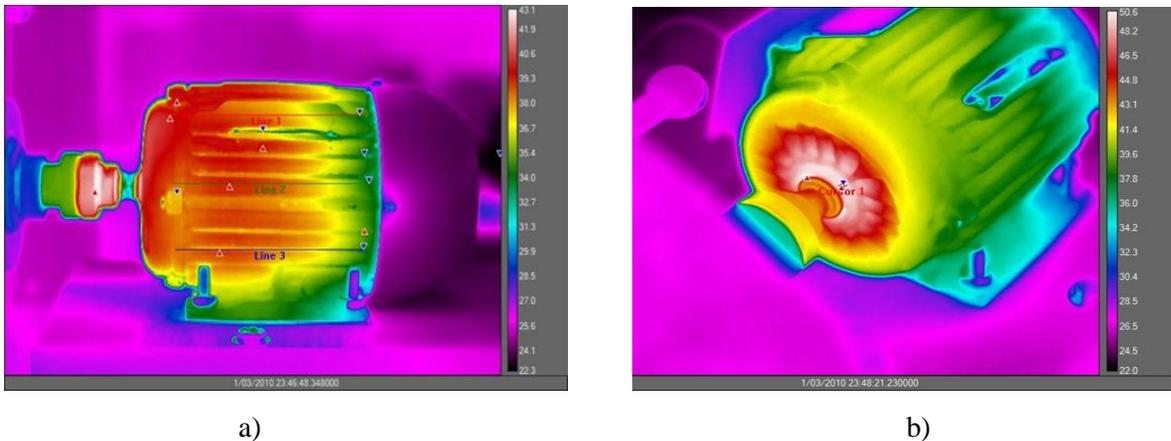


**Figura 5.6** Componentes de Bancada utilizada em estudo.

Num primeiro momento, os motores de indução foram submetidos a uma tensão trifásica senoidal pura de 220 V por 1 hora e 10 minutos de forma que os mesmos atingissem seu equilíbrio térmico. E, num segundo momento, aumentou-se 2% no valor da tensão de cada harmônico a cada 10 minutos até atingir 25% mantendo a mesma porcentagem de carga para cada motor e para cada harmônico analisado. Para o estudo um torque de 3.8 Nm foi aplicado no freio de Foucault que representa 92-95% do torque nominal dos motores em estudo.

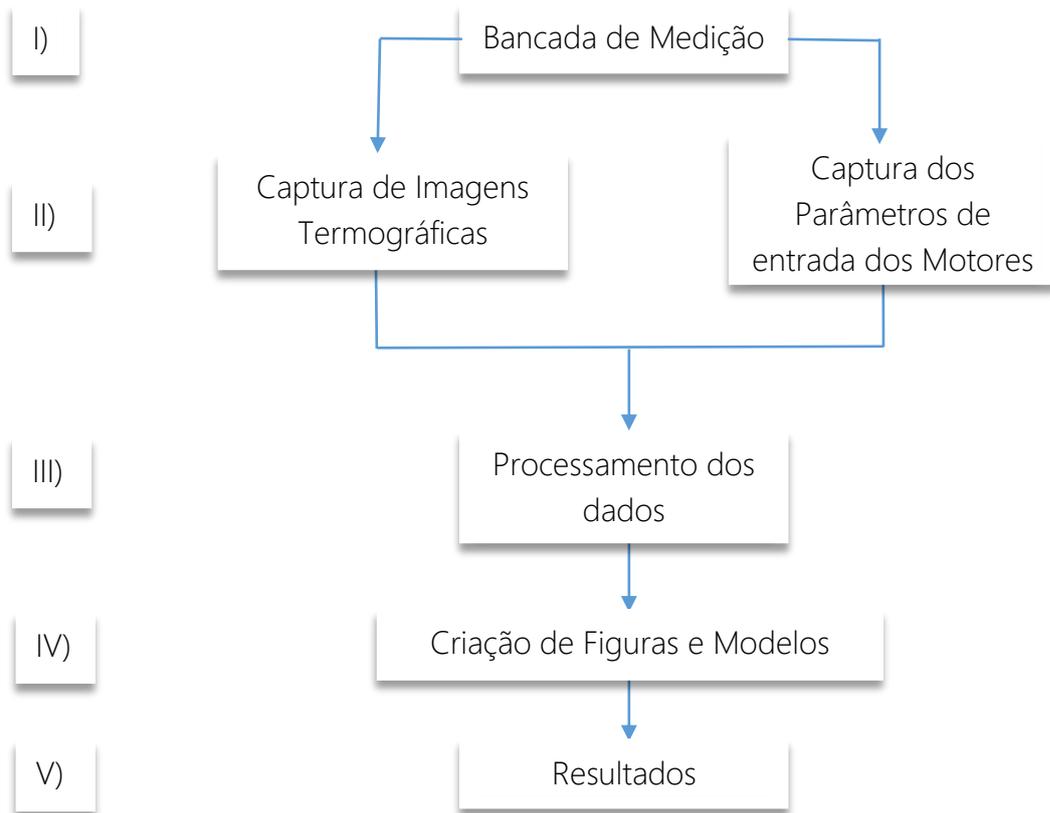
Para medir a temperatura da carcaça foi utilizada a câmera infravermelha da marca FLIR modelo T620, apresentada em 4.2.5, com uma emissividade de 0,94. E as imagens

termográficas dos motores foram capturadas em dois ângulos a cada 2 minutos para cada porcentagem de distorção. Os testes foram realizados em um ambiente controlado, com uma temperatura ambiente de 23°C. A Figura 5.7 a) e b) mostram os ângulos fotografados durante os experimentos.



**Figura 5.7** a) Imagem termográfica do motor classe IE4 com 25% de Distorção. b) Imagem termográfica do motor classe IE4 com 10% de Distorção.

Com relação à metodologia empregada para o tratamento dos dados das medições e obtenção dos resultados, a Figura 5.8 apresenta as etapas realizadas no trabalho. Em um primeiro momento, foram executados os ensaios na bancada de teste para cada um dos motores analisados (I) e então realizadas as medições por meio do equipamento analisador de QEE assim como a toma das imagens com a Câmara infravermelha (II), considerando os pontos de medição da figuras 5.7 a) e b). A próxima etapa consiste na transferência dos dados de medição do equipamento para o software proprietário do analisador (Hioki) e da câmara (FLIR T620) (III). Depois do análise dos dados, os mesmos foram convertidos em arquivos no formato CSV, compatíveis para a leitura no software estatístico Minitab (IV). No Minitab, foram analisados os dados processados para a plotagem dos resultados e da análise estatística feita sobre o estudo.



**Figura 5.8** Fluxograma da metodologia empregada para a obtenção dos resultados a partir das medições.

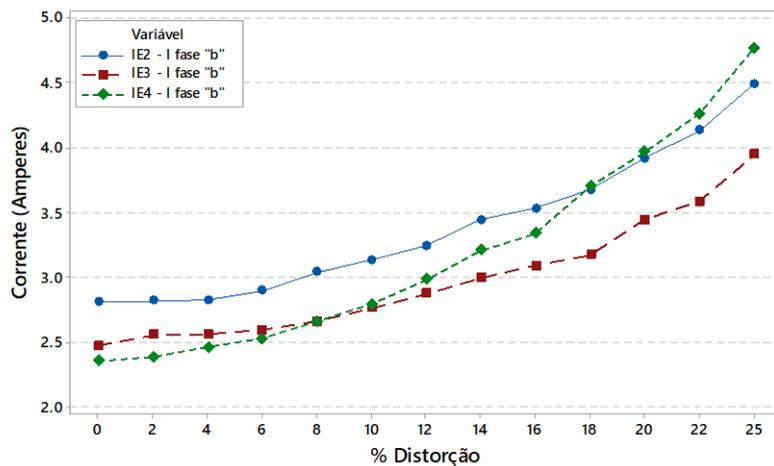
#### 5.4. Resultados: Análise Harmônica: Comparação das Tecnologias IE2, IE3 e IE4.

Os resultados das medições efetuadas com a presença de harmônicas na tensão de alimentação, de cada motor elétrico no presente estudo foram divididos em duas partes: A primeira que realiza uma comparação da resposta dos motores para cada harmônico analisada e que é apresentada a seguir. Logo em 5.5 será apresentado o impacto de todos os harmônicos para cada motor analisado, visando realizar uma comparação entre os harmônicos mais daninhos para os sistemas motrizes em questão.

##### 5.4.2. 2º Harmônico: Resultados

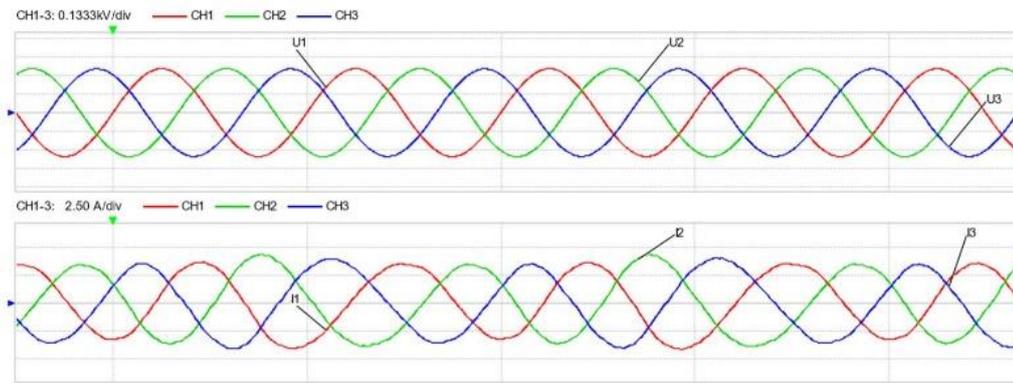
O primeiro harmônico analisado é o 2º harmônico de tensão de sequência negativa, foi comentado na [Seção 3.2.1](#) e Tabela 3.4 como os harmônicos de sequência negativa geram um padrão de fluxo giratório oposto (comparado com a direção da fundamental) que resultava em um torque contrário ao gerado pela componente fundamental e cujo impacto nas correntes de cada motor é apresentado na Figura 5.9. O eixo horizontal mostra a porcentagem de distorção aplicada na tensão de alimentação de cada motor, partindo de 0% até atingir o 25% de distorção de 2ª harmônica na tensão. Deve-se ressaltar que cada motor foi submetido à mesma

porcentagem de carga, sendo possível observar que a demanda atual é mais de 15% maior no caso da classe de motores de indução IE2 quando comparada com o motor híbrido classe IE4 em condições de distorção zero. Esta diminuição na corrente é devida à presença de ímãs permanentes no rotor da máquina, que contribuem consideravelmente para a redução da corrente de magnetização da máquina e, portanto, da amplitude da corrente de entrada do motor [14]. Logo a presença da segunda harmônica resulta em um incremento na sua magnitude até superar o consumo dos motores de indução classes IE2 e IE3 a partir do 18% de distorção na tensão de alimentação.

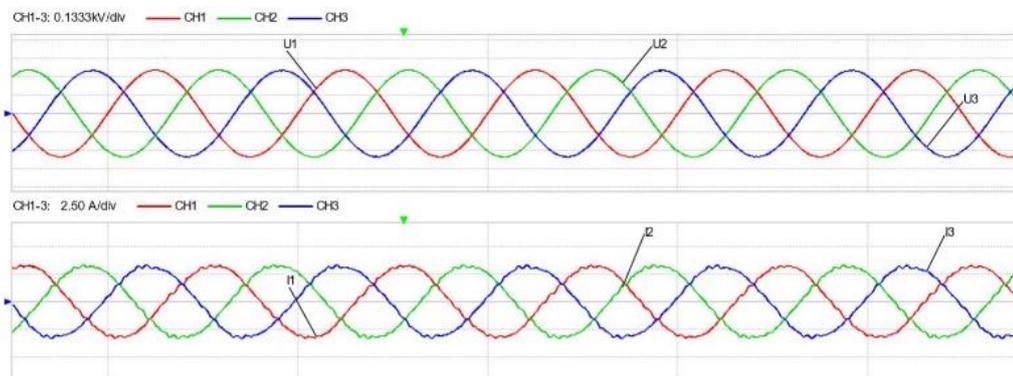


**Figura 5.9.** Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores classes IE2, IE3 e IE4 com a presença de 2ª harmônica.

Durante os experimentos as três tecnologias foram alimentadas com tensão senoidal sem distorção por uma hora e dez minutos, até que o equilíbrio térmico fosse atingido, entretanto, ao observar as medidas no analisador, no caso do motor híbrido classe IE4 observou-se que a corrente demandada apresentava uma distorção em sua forma de onda, na literatura já foi comentado sendo principalmente devida à distorção produzida nos campos magnéticos criados pelos ímãs permanentes [65]. Isto sem a presença de harmônicos na tensão de alimentação. As formas de onda de tensão e corrente para os motores classes IE2 e IE4 são apresentados na Figura 5.10 a) e b).



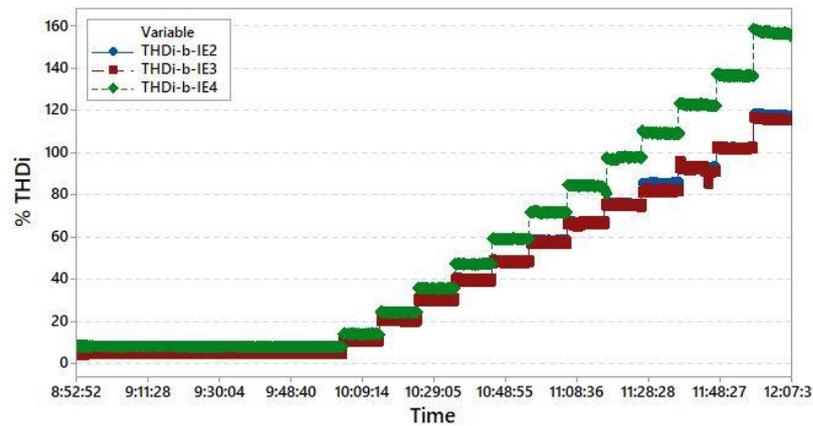
a)



b)

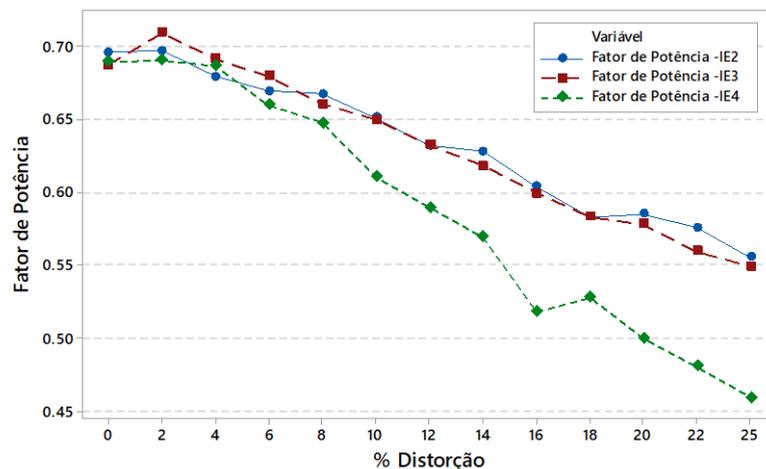
**Figura 5.10** Forma de onda de tensão ( $U_i$ ) e corrente ( $I_i$ ) sem distorção em motores elétricos a) Motor Classe IE2. b) Motor Classe IE4.

Após a análise dos dados coletados no *software* do analisador, foi possível observar como a corrente do motor da classe IE4 possui um THD de corrente mais elevado em comparação às tecnologias IE2 e IE3. Estes resultados são apresentados na Figura 5.11. Observa-se como à medida que a porcentagem de distorção de tensão é incrementada a segunda harmônica resulta em incrementos da distorção da forma de onda para cada um dos motores analisados. Deles o motor híbrido resulta no maior incremento da porcentagem de THDi. Observa-se como a 20% de distorção para o motor classe IE4 já é superior a distorção de 25% de distorção para os motores classes IE2 e IE3, atingindo valores de até 160% de distorção enquanto para os motores classes IE2 e IE3 não supera o 120% de distorção.



**Figura 5.11** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

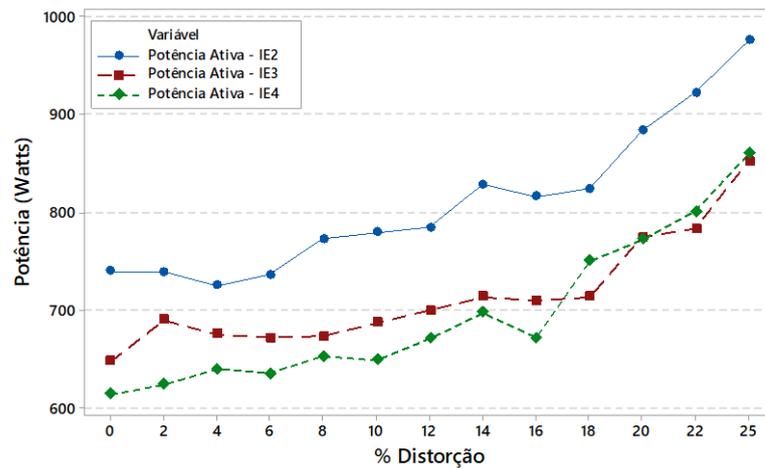
É possível observar que, no caso do motor de ímã permanente, a distorção de corrente total sem harmônicas na tensão de alimentação, é quase 4 vezes maior quando comparada com a distorção encontrada nas classes IE2 e IE3, atingindo um percentual de 8% de distorção na corrente. Esta distorção produzida em motores com ímãs permanentes já foi documentada em [59] e [95]. Em um uso em grande escala, estudos devem ser realizados nos LSPMM's para analisar o impacto da distorção sobre a tensão de alimentação. Neste caso o THD de tensão não ultrapassou 1%, porém apresenta valores mais altos quando comparados com as tecnologias IE2 e IE3. A variação do Fator de Potência é apresentada na Figura 5.12.



**Figura 5.12** Fator de Potência com distorção de tensão de 2ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

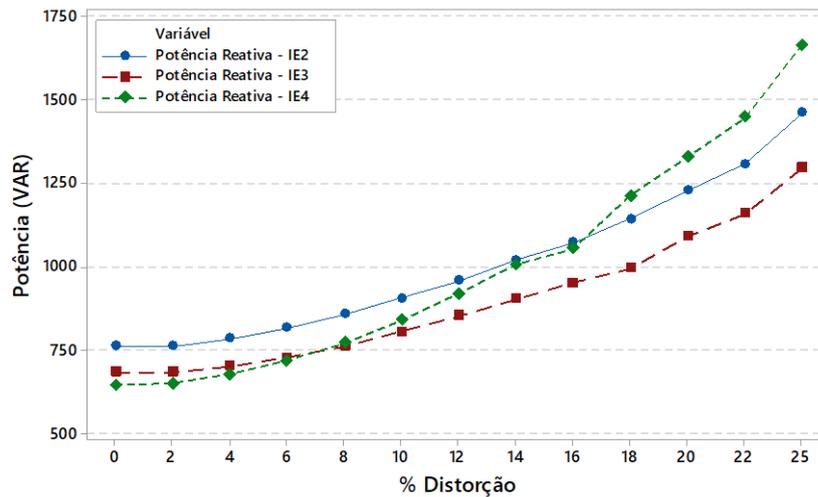
Observando a placa característica de cada motor, observa-se que o motor híbrido apresenta o menor fator de potência, na Figura 5.12 é observado como os três motores apresentam valores próximos de fator de potência para o caso de tensão sem distorção. A presença de harmônicos de tensão resulta em um incremento da tensão de alimentação do

motor, devido a que a potência reativa, está relacionada com a tensão de alimentação, à medida que o harmônico é incrementado, a potência reativa terá também um incremento, isso levará a uma potência total maior e por tanto a uma diminuição do fator de potência. Das três classes, o motor híbrido apresenta a maior diminuição, caindo de 0,68 até próximo a 0,45, enquanto que o motor classe IE2 e IE3 diminuem até 0,55. A potência ativa também terá um incremento com a presença de 2ª harmônica, como apresentado na Figura 5.13.



**Figura 5.13** Potência Ativa em condições de alimentação sem e com distorção para motores classes IE2, IE3 e IE4.

Inicialmente pode ser observado como o motor híbrido de ímãs permanentes demanda uma menor potência quando comparado com os motores classes IE2 e IE3, isso para a mesma carga na saída de cada motor, porém a medida que a segunda harmônica é incrementada ele sofre um incremento até igualar o consumo do motor classe IE3, mesmo assim ambos motores IE3 e IE4 apresentam uma potência ativa menor quando comparada com o motor classe IE2, que superou os 950 Watts de potência para o 25% de distorção. A Figura 5.14 mostra o incremento de potência reativa para cada motor na presença de 2ª harmônica.



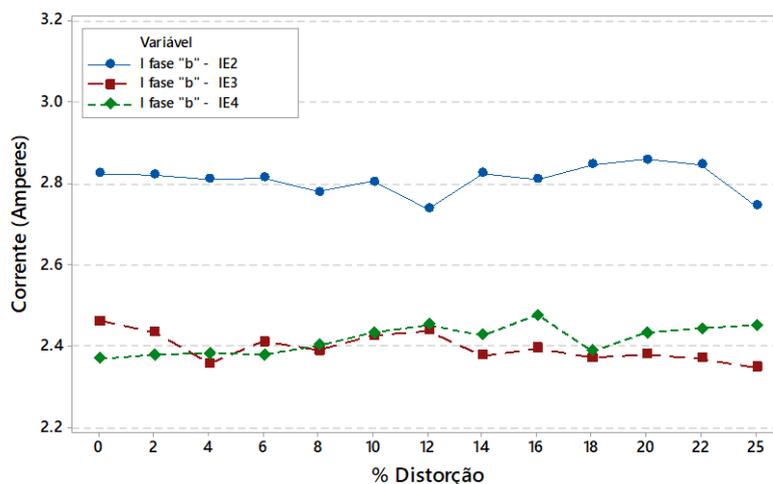
**Figura 0.14** Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 2ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.

A Figura 5.14 mostra a variação do fator de potência para cada motor, observa-se com inicialmente o consumo do motor híbrido classe IE4 apresenta valores menores, isso devido principalmente à diminuição da corrente de magnetização deste motor devido a contribuição dos campos magnéticos gerados pelos ímãs permanentes, o que resulta em uma potência reativa necessária menor. Logo o 2º harmônica produz um maior incremento de potência reativa no motor híbrido, o que resulta na diminuição do fator de potência para este motor como apresentado na Figura 5.12. Enquanto o motor classe IE3, é o que apresenta menor consumo dos três, abaixo do motor classe IE2 que quase atinge os 1500 VAR

Em resumo observou-se como a 2ª harmônica resulta ser mais prejudicial para o motor híbrido classe IE4, resultando em um maior incremento de corrente, e potências ativas e reativas consumidas, como a maior diminuição do fator de potência A seguir é ampliado sobre a terceira harmônica analisada também para cada motor.

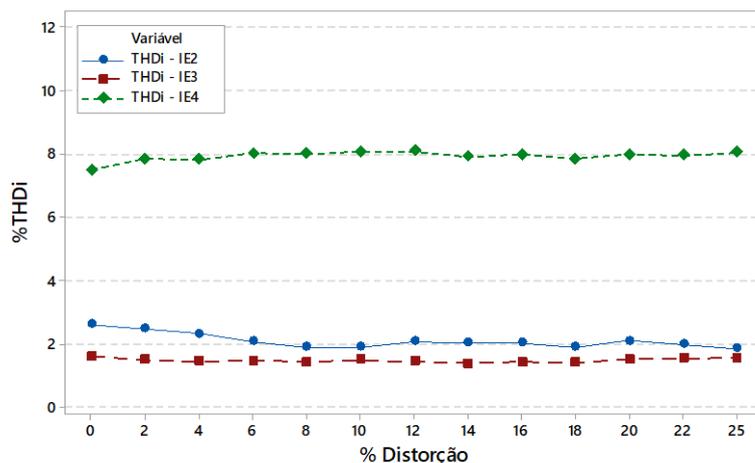
### 5.4.3. 3º Harmônico: Resultados

O terceiro harmônico de sequência zero ([Tabela 3.4](#)) também foi inserido na tensão de alimentação de cada um dos motores, cabe ressaltar que a tensão de alimentação utilizada para os testes foi de 220 V em ligação Delta. Devido a ser a terceira harmônica de sequência zero, suas componentes estão em fase, portanto os motores de indução são um circuito aberto para terceiros harmônicos, não tendo assim nenhum efeito na máquina ([Seção 3.2.1](#)) [63]. A Figura 5.15 apresenta a corrente para cada motor na presença de 3ª harmônica.



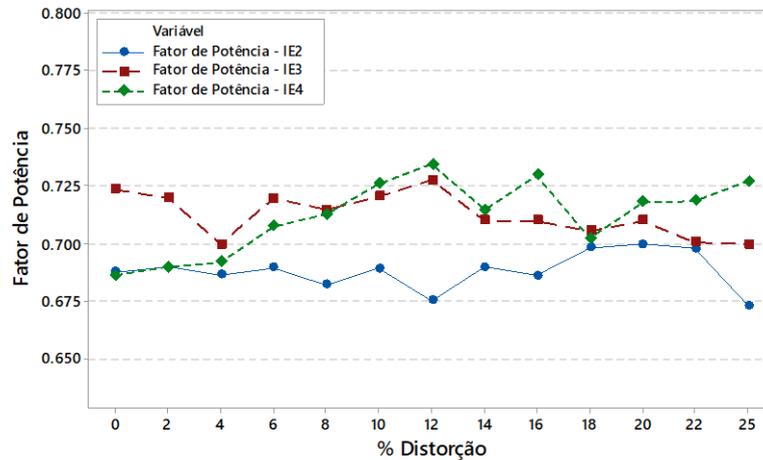
**Figura 0.15.** Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores classes IE2, IE3 e IE4 com a presença de 3ª harmônica.

Observa-se na Figura 5.15, como as magnitudes não sofrem um incremento considerável em sua corrente de linha, mostrando pequenas variações que rondam seus valores iniciais mesmo com a presença de 25% de distorção de 3ª harmônica. No entanto observa-se como os motores classes IE2 e IE3 sofrem uma pequena diminuição na sua corrente, enquanto o motor híbrido classe IE4, sofre um pequeno incremento. No momento dos testes foi observado no analisador que para o caso desta harmônica o analisador mostrou que a forma de onda de tensão e de corrente permanece inalterada para cada incremento de distorção inserida. A Figura 5.16 apresenta a distorção harmônica total de corrente para a 3ª harmônica. Como já foi comentado o motor híbrido apresenta uma distorção de corrente consideravelmente maior quando comparado com os motores classes IE2 e IE3, o qual permanece inalterado ao longo do teste para cada motor.



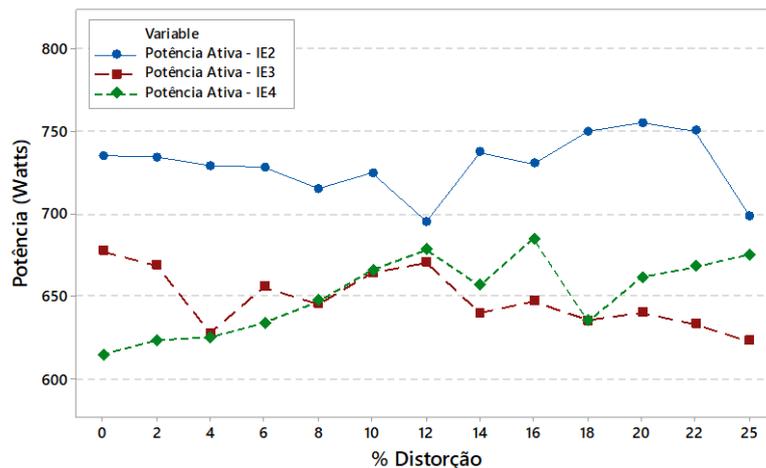
**Figura 0.16** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 3ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.

A Figura 5.17 apresenta o fator de potência com a presença de terceira harmônica, para o qual cada motor apresenta valores semelhantes, com pequenas variações para o caso do motor híbrido classe IE4, o qual passa que 0,68 para 0,725 e do motor classe IE3 que passa de 0,725 para 0,70, enquanto que o motor classe IE2 apresenta uma diminuição até 0,675.



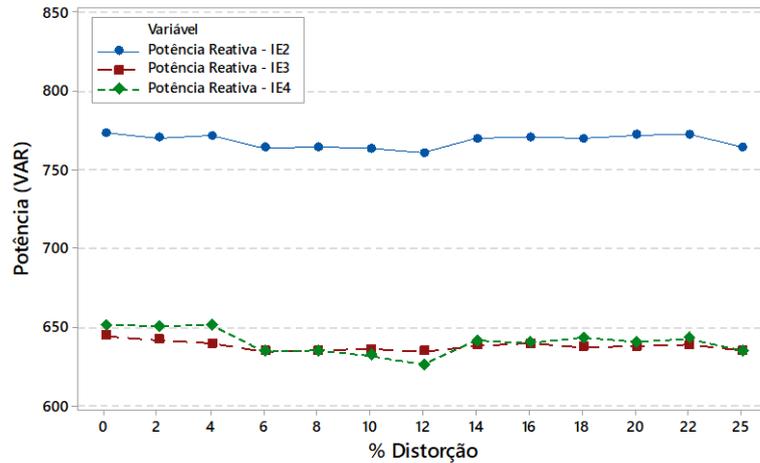
**Figura 0.17** Fator de Potência com distorção de tensão de 3ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

A potência ativa é apresentada na Figura 5.18 observa-se que apresenta um comportamento parecido com a corrente de linha, na qual os motores IE2 e IE3, apresentam uma diminuição enquanto o motor híbrido classe IE4 apresenta um pequeno incremento da potência consumida, como aconteceu com a corrente de linha.



**Figura 0.18** Potência Ativa em condições de alimentação sem e com distorção de 3ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

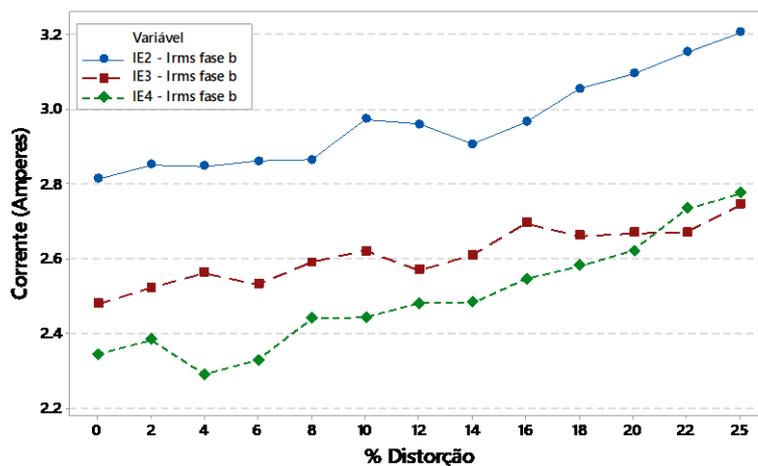
A potência reativa não sofreu variação com a presença de terceiro harmônico, mostrando variações mínimas em relação a seu valor sem distorção de tensão, como apresentado na Figura 5.19.



**Figura 0.19** Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de tensão 3<sup>a</sup> harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.

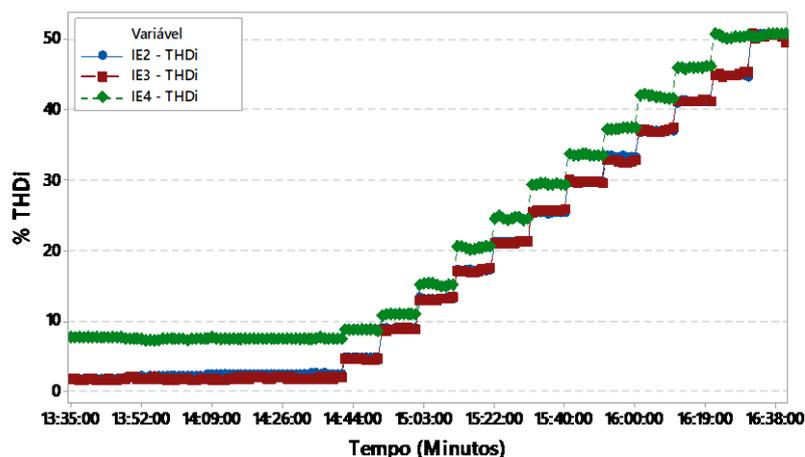
#### 5.4.4. 5<sup>o</sup> Harmônico: Resultados

O quinto harmônico de sequência negativa também foi analisada neste estudo, este harmônico em combinação com o 7<sup>o</sup> harmônico de sequência negativa são comuns nos variadores de velocidade com grande penetração no setor industrial. De forma geral, o aumento da tensão do 5<sup>o</sup> harmônico provocou um aumento da corrente de entrada nos três motores, onde a corrente do motor IE2 sempre se manteve maior do que as correntes dos outros motores. Pode-se observar que a presença do quinto harmônico na tensão de alimentação produz um incremento maior de corrente de linha no caso do motor híbrido classe IE4 com um 18,3%, em relação às classes de motores IE2 com 17% e IE3 com 14%. Porém, a corrente do motor IE4 apresentou os menores níveis de corrente, com exceção dos momentos em que a distorção do 5<sup>o</sup> harmônico atingiu níveis acima de 20% como apresentado na Figura 5.20.



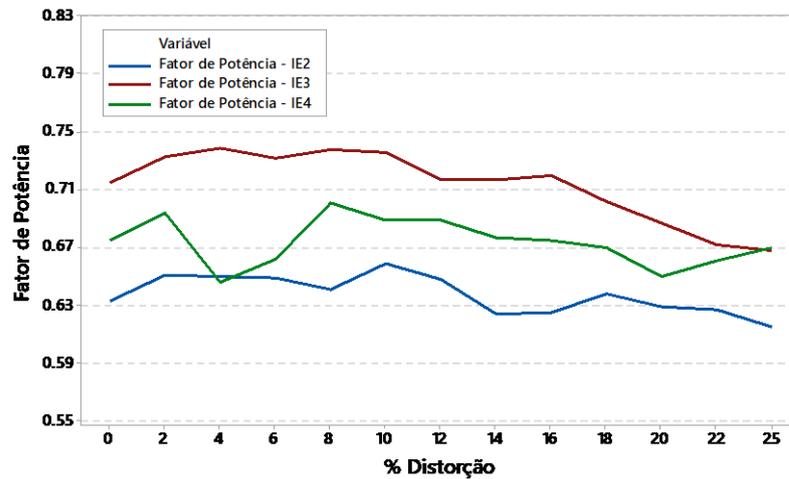
**Figura 0.20.** Corrente de Linha com distorção de 5ª harmônica em motores classes IE2, IE3 e IE4.

Com a presença de quinta harmônica a THD de corrente também incremento consideravelmente, passando de 8% a 50% para o motor híbrido classe IE4, a quinta harmônica também impacto nos motores classes IE2 e IE3, os quais passaram de ao redor de 2% até 50% como apresentado na Figura 5.21.



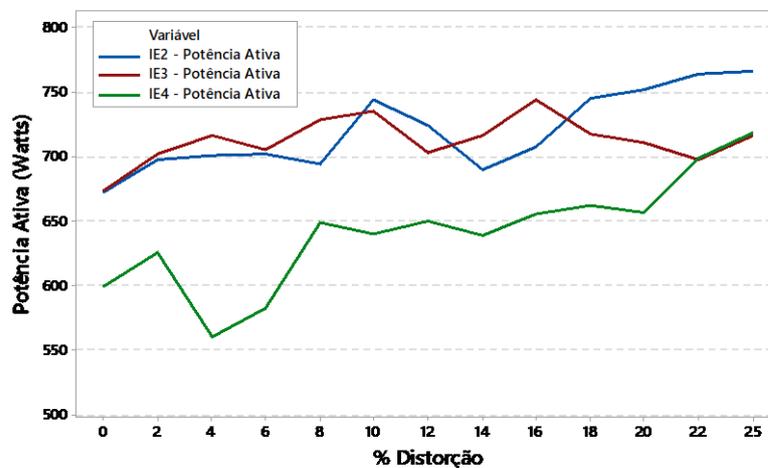
**Figura 0.21** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 5ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

O aumento do 5º harmônico não causou uma variação significativa no fator de potência do motor IE4, uma vez que o fator de potência se manteve em torno de 0,67, conforme mostrado na Figura 5.22. Porém, é importante ressaltar que, apesar do motor IE4 ter apresentado os maiores níveis de distorção harmônica de corrente com o aumento da tensão do 5º harmônico, o fator de potência do motor IE2 manteve-se menor. Por outro lado, o fator de potência do motor IE3 manteve-se acima do IE4 durante quase todo experimento, com exceção do momento em que a distorção de tensão do 5º harmônico foi de 25%.



**Figura 0.22** Fator de Potência em condições de alimentação com distorção de 5ª harmônica em motores classes IE2, IE3 e IE4.

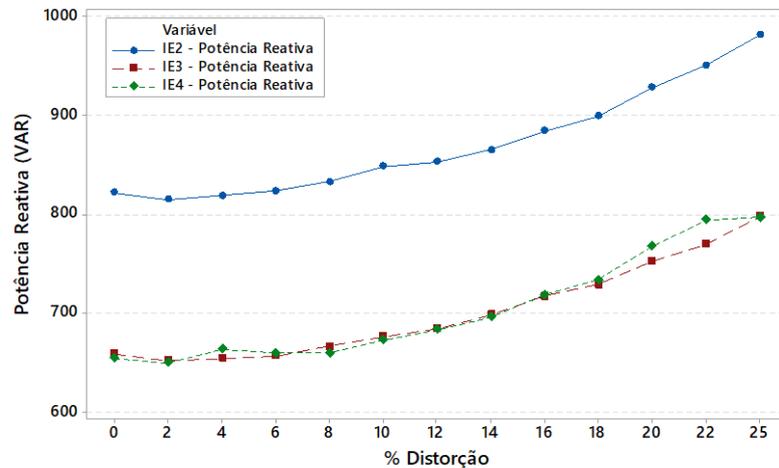
Quanto a potência ativa medida na entrada dos motores IE2, IE3 e IE4, a figura 5.23 mostra essa grandeza sofreu um aumento ao longo do experimento. Logo, a tensão do 5º harmônico dos terminais do enrolamento do estator dos motores produziu uma corrente, que, por sua vez, produziu um torque de frenagem do motor causando um aumento das perdas e, conseqüentemente, um aumento na potência de entrada do motor, conforme pode ser visto na Figura 5.23.



**Figura 0.23** Potência Ativa em condições de alimentação com distorção de 5ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

Também a potência reativa sofreu um incremento do seu valor nominal, como apresentado na Figura 5.24. Esse incremento pode ser justificado com a natureza do quinto harmônico, o qual é de sequência negativa. A Força Magneto Motriz (FMM) causado por uma excitação de sequência negativa causa um padrão de fluxo giratório oposto (comparado com a direção da fundamental). O torque gerado por ele atuará como um torque oposto ao gerado pelo

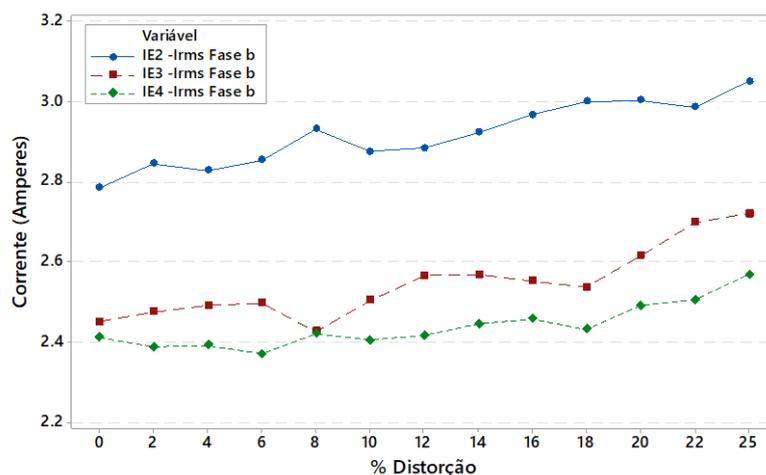
fundamental, demandando assim uma potência reativa maior a rede com o incremento de distorção inserido, como apresentado.



**Figura 0.24** Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 5ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.

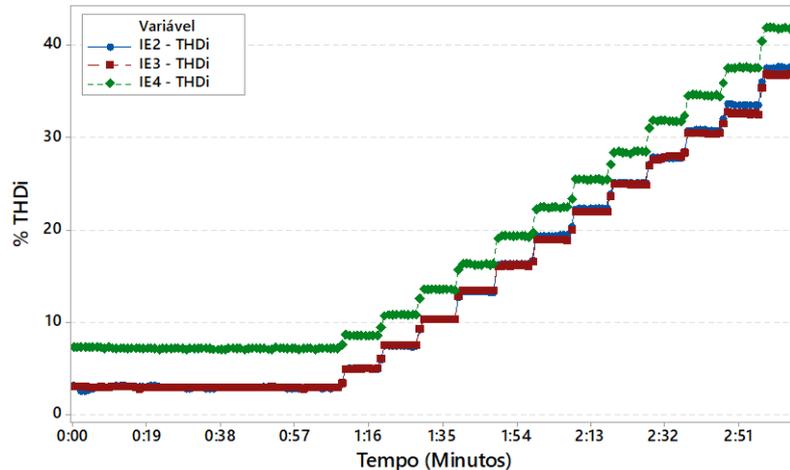
#### 5.4.5. 7º Harmônico: Resultados

O 7º harmônico, comum nos conversores de 6 pulsos foi inserida a cada um dos motores em estudo, ao ser de sequência positiva seus impactos documentados são menores quando comparados com os harmônicos de sequência negativa. A Figura 5.25 apresenta a comparação entre a corrente de linha demandada na fase “b” por cada um dos motores. Deve-se ressaltar que embora o 7º harmônico seja de sequência positiva também resulta em um aumento nas correntes exigidas, das quais, o motor híbrido classe IE4 tem o menor consumo.



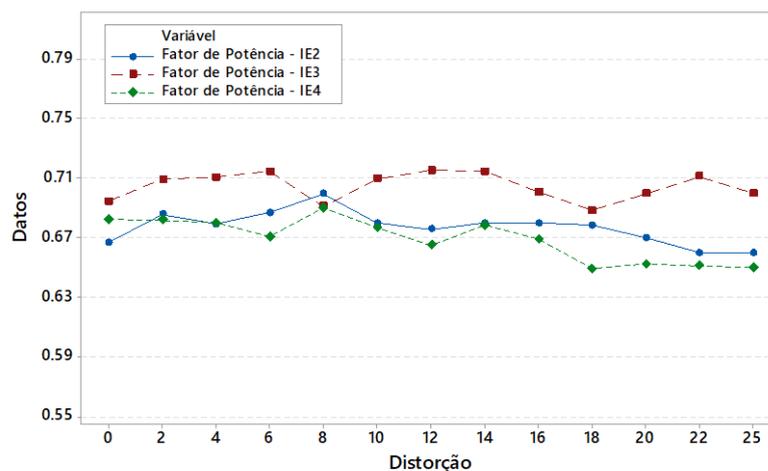
**Figura 0.25.** Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores elétricos com a presença de 7ª harmônica.

A porcentagem de distorção harmônica total de corrente para cada motor com a 7ª harmônica presente e apresentada na figura 5.26. O valor de THDi superou o 40% para o motor híbrido enquanto que nos motores classes IE2 e IE3 ficou em torno de 37% para o 25% de distorção na tensão de alimentação, dados menores em relação ao 2º e 5º harmônico que atingiram valores de 160% e 50% para o motor híbrido classe IE4 respectivamente.



**Figura 0.26** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 7ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

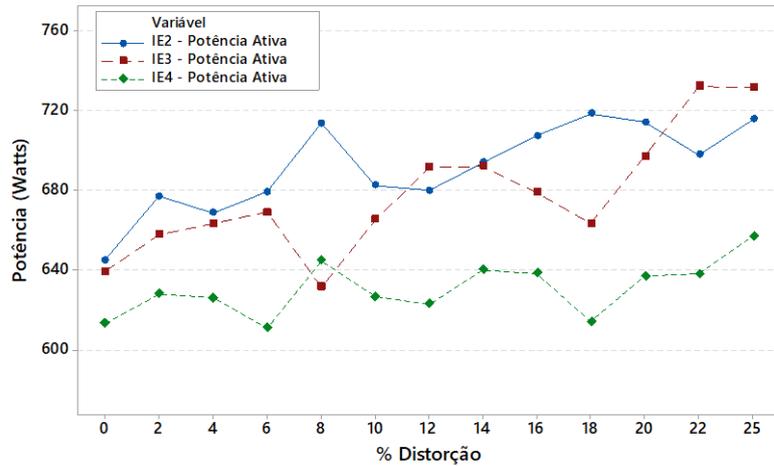
Em relação ao fator de potência observa-se na Figura 5.27 a maior diminuição é observada no motor híbrido classe IE4, no qual passa de 0,68 para 0,65 a partir do 18% de distorção. Os motores classes IE2 e IE3 mantiveram valores próximos ao nominal sem distorção ao longo do experimento.



**Figura 0.27** Fator de Potência com distorção de 7ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

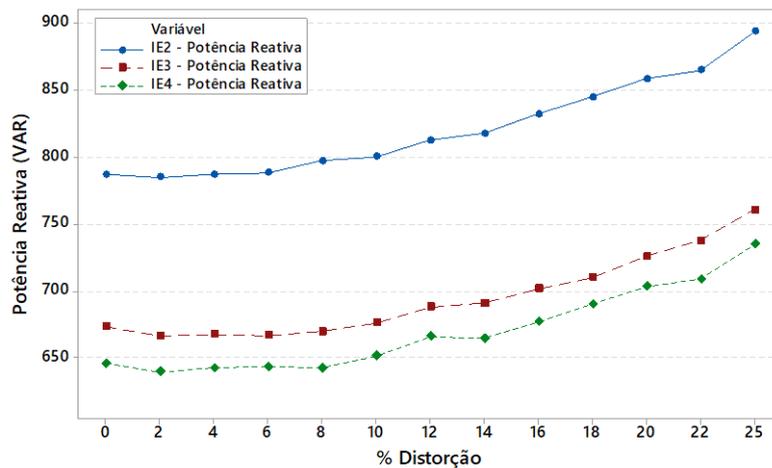
A Figuras 5.28 mostra o aumento das potência ativa em cada um dos motores durante o experimento com a sétima harmônica, o maior incremento de potência demandada foi por parte

dos motores classes IE2 e IE3, que superaram os 700 watts com o 25% de distorção. O motor híbrido classe IE4, apresentou o menor consumo durante todo o experimento, apenas superando os 640 Watts para o 25% de distorção.



**Figura 0.28** Potência Ativa com distorção de 7ª harmônica para motores classes IE2, IE3 e IE4.

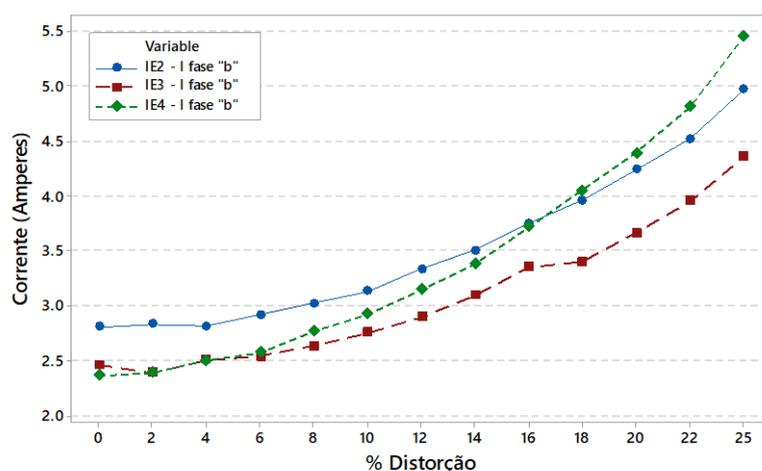
A sétima harmônica resulta em um incremento da potência reativa consumida pelos motores analisados, sobressaindo o motor classe IE2 com um consumo superior quando comparado com as classes IE3 e IE4. O motor híbrido apresentou o menor consumo de reativo ao longo do experimento, distinto do 3º e 5º harmônico no qual apresentou um consumo semelhante com o motor classe IE3, apresentado na Figura 5.29.



**Figura 0.29** Potência Reativa em condições de alimentação sem e com distorção de 7ª harmônica de tensão para motores classes IE2, IE3 e IE4.

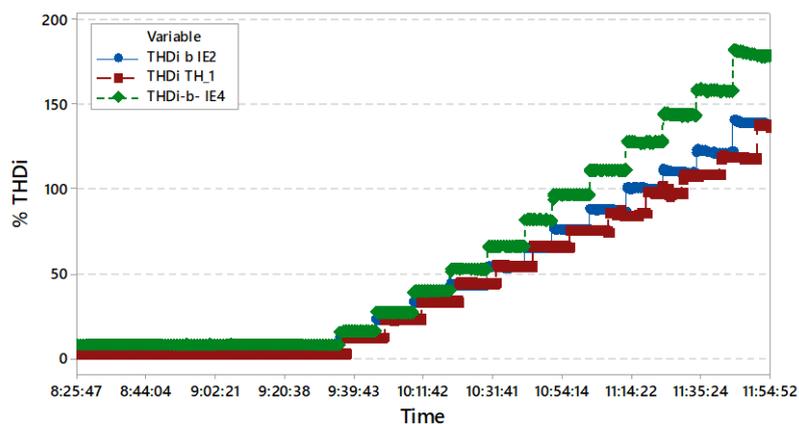
#### 5.4.6. Distorções de Tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos de forma simultânea: Resultados

Para o último teste analisado foram aplicadas os harmônicos de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicas de forma simultânea, isso com o objetivo de observar a resposta de cada motor ante a presença de distintas harmônicas, um cenário que pode acontecer principalmente em sistemas elétricos com grande conteúdo de cargas não lineares. Também para os testes foi utilizada a mesma metodologia apresentada anteriormente. A Figura 5.30 apresenta o impacto de todas as harmônicas de forma simultânea para cada um dos motores. Observa-se como na presença da distintas harmônicas o motor híbrido classe IE4 apresenta o maior incremento de corrente demandada, onde a partir do 6% de distorção de tensão supera o motor classe IE3, e logo já com um 18% de distorção apresenta consumos superiores ao motor de indução classe IE2. O incremento da magnitude das correntes para cada motor supera as apresentadas para o caso de distorção de 2ª harmônica, para o caso do motor híbrido é de 2,33 vezes a corrente sem distorção, enquanto que para os motores classes IE2 e IE3 ficaram ao-redor de 1,80 vezes.



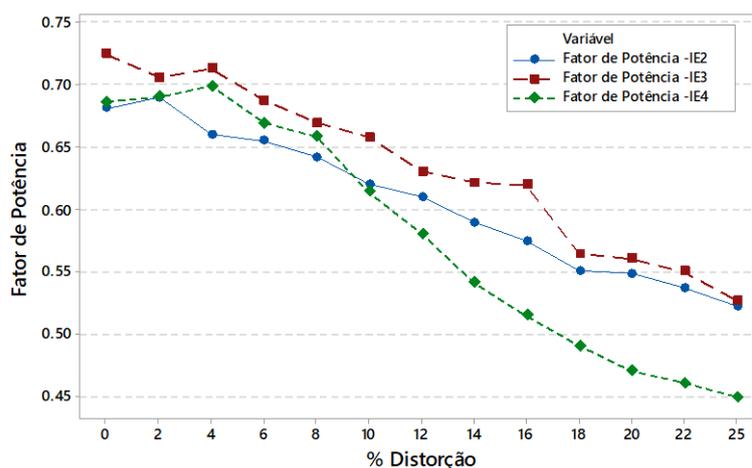
**Figura 0.30.** Corrente de Linha fase “b” demandada pelos motores elétricos com a presença de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos.

A Figura 5.31 apresenta a distorção harmônica total de corrente para cada motor com a presença das harmônicas analisadas. Como pode ser observado os valores apresentados mostram os valores bastante altos de distorção de corrente, esse cenário parece ser pior para o caso do motor híbrido que apresenta valores próximos a 200% de distorção de harmônica de corrente. Em relação aos motores classes IE2 e IE3 essa porcentagem quase atinge os 150% de distorção, sendo um tanto maior para o caso do motor classe IE2, como apresentado. Isso e dependendo das características da rede, pode ter um impacto na distorção de tensão.



**Figura 0.31** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4.

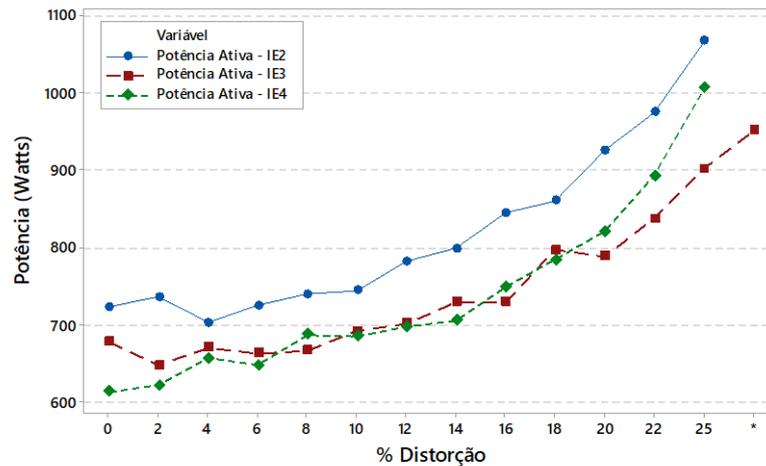
O aumento dos distintos harmônicos causou uma diminuição do fator de potência para cada um dos motores, principalmente para o motor híbrido, foi observada como ele apresentava o maior incremento na corrente de linha. O fator de potência, apresentado na Figura 5.32, para o motor híbrido, inicialmente apresenta valores menores que o motor classe IE3 e maiores que o motor classe IE2, porém, quando a porcentagem de harmônica é incrementada observa-se como sofre uma diminuição, chegando a ser menor que o apresentado pelo motor classe IE2 a partir do 10% de distorção e chegando a valores de menores que 0,50 para um 18% de distorção. Para os motores classes IE2 e IE3, observa-se como o motor classe IE2 apresenta menores valores, chegando a ser iguais com 0.52 para um 25% de distorção.



**Figura 0.32** Fator de Potência com distorção de tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4.

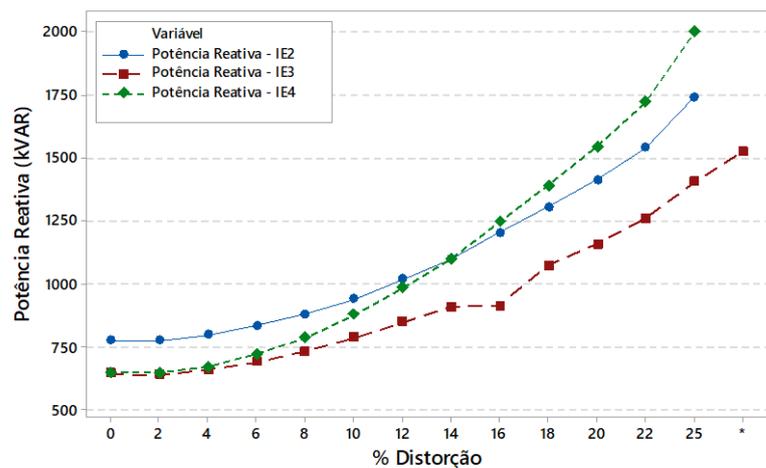
Em relação a potência ativa demandada por cada motor, o motor classe IE2 mostrou os maiores consumos durante todo o experimento, superando os 1000 Watts junto com o motor híbrido classe IE4 para o 25% de distorção. O motor classe IE3 apresentou valores parecidos com

o motor híbrido classe IE4 até o 20% de distorção onde este último apresentou maiores incrementos de potência ativa, como apresentado na Figura 5.33.



**Figura 0.33** Potência Ativa com distorção de tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4.

A combinação de todas as harmônicas provocou um incremento considerável em cada um dos motores analisados, dos quais o motor híbrido parece ser o mais afetado, como apresentado na Figura 5.34. Observa-se como no início e até o 4% apresenta consumos semelhantes de reativo com o motor classe IE3, logo a partir do 6% de distorção supera a esse motor, para logo, com um 14% igualar e superar o consumo demandado pelo motor classe IE2, atingindo 2kVAR de potência reativa, enquanto que os motores classes IE2 e IE3 ficaram em 1,750 kVAR e 1,5 kVAR aproximadamente. Com base na análise das harmônicas individuais apresentado anteriormente se concluiu que a harmônica que mais influência nesse incremento é a segunda harmônica de sequência negativa, que em combinação com as harmônicas de 5ª e 7ª ordem resultam em um valor ainda maior de reativo demandado.



**Figura 0.34** Potência Reativa com distorção de tensão de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motores classes IE2, IE3 e IE4.

## 5.5. Análise Harmônica: Comparação de harmônicas para cada motor analisado.

Com o objetivo de verificar o impacto de cada harmônica para cada motor analisado a presente seção visa mostrar uma comparação entre as harmônicas analisadas nos experimentos (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), e seu impacto na resposta dos motores elétricos classes IE2, IE3 e IE4.

### 5.5.2. Motor Alto Rendimento (Classe IE2)

A corrente demandada para cada corrente de linha sofreu um incremento de acordo com a harmônica aplicada, isso é mostrado na Figura 5.35. Observa-se como na presença de 3ª harmônica resulta em pequenas variações nas suas magnitudes, porém sem nenhum incremento considerável. Esse cenário não é observado para a 5ª e 7ª harmônicas que apresentam um incremento em seu valor nominal a medida que a porcentagem de harmônica é incrementada, esse valor é maior para o caso do harmônico de quinta ordem que resulta em um torque contrário provocando um incremento maior na corrente de entrada, quando comparada com a terceira e sétima harmônicas. O maior incremento é observado para a segunda harmônica e todas as harmônicas juntas, as correntes de linha para essas harmônicas apresentam valores iguais de corrente até um 8% de distorção, a partir dessa porcentagem a combinação de harmônicas provoca o maior incremento em relação à segunda harmônica de forma individual. Ressaltar que dentro da combinação de harmônicas está a segunda harmônica, então a diferença entre ambas curvas de corrente, deve-se a contribuição das outras harmônicas além da 2ª harmônica aplicada. Na prática, ante essas correntes superiores as nominais, os dispositivos de proteção deveriam de atuar, isto é o interruptor termomagnético e o relé de temperatura, porém o motivo deve ser analisado, devido a que para este caso, a porcentagem de carga permaneceu constante e só variou a porcentagem de distorção ao longo do experimento.

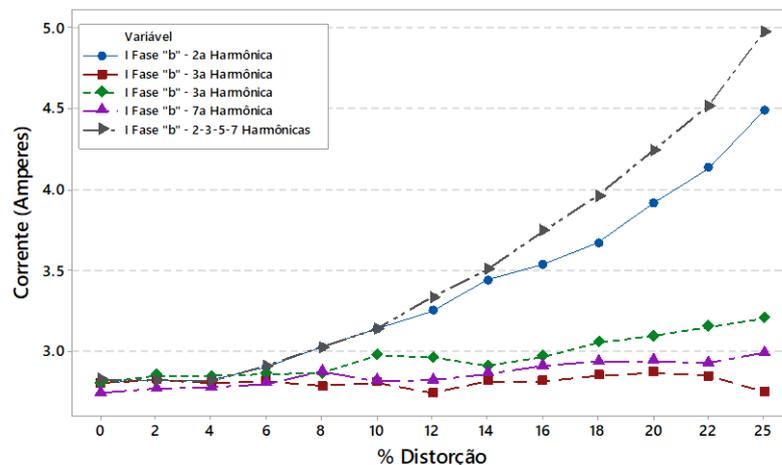
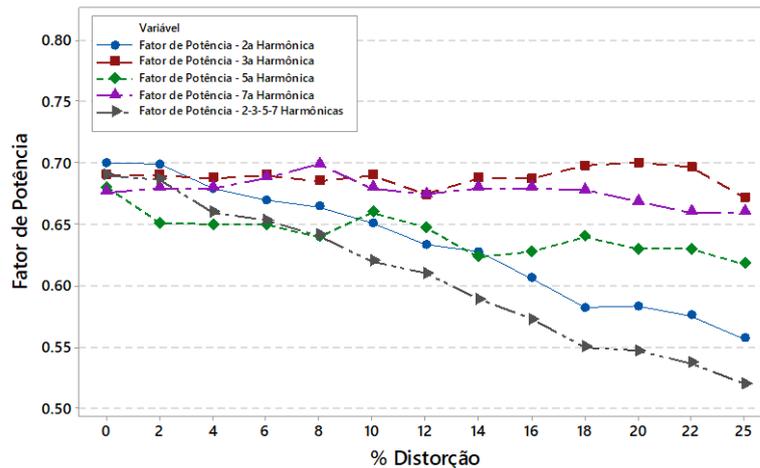


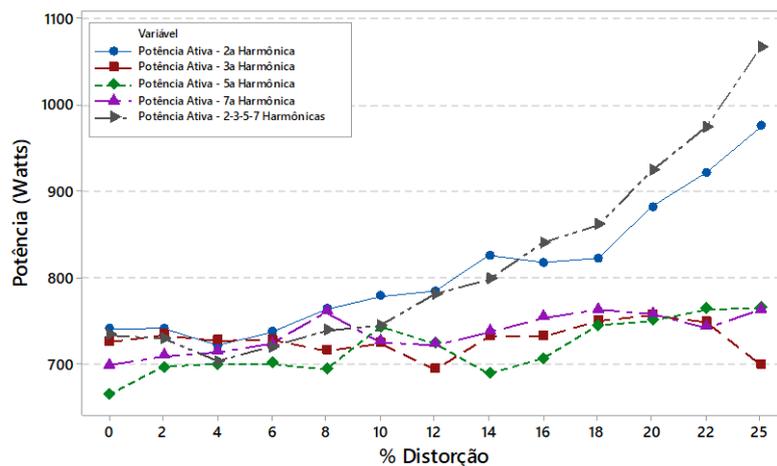
Figura 5.35 Corrente de Linha para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2.

A diminuição do fator de potência para o motor classe IE2 é apresentada na Figura 5.36. Para as harmônicas de 3ª e 7ª ordem ele sofreu pequenas variações, porém com uma pequena diminuição do seu valor original. A presença de quinta e segunda harmônicas de tensão provocaram uma diminuição maior, mostrando valores semelhantes até o 14% de distorção, logo descendo até 0,62 e 0,56 respectivamente. A menor diminuição é observada para a combinação de todas as harmônicas, apresentando valores inferiores durante quase todo o experimento, e diminuindo até chegar a um fator de potência próximo a 0,52, como mostrado.



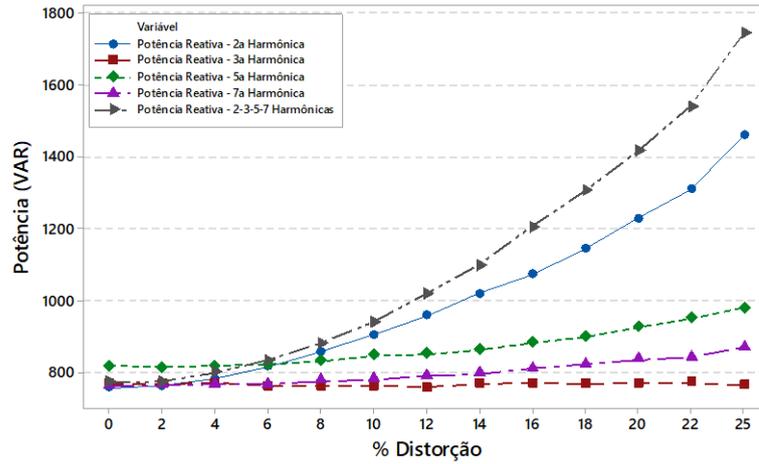
**Figura 5.36** Fator de Potência para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2.

A Figura 5.37 apresenta o incremento da potência ativa com o incremento da distorção harmônica de tensão para cada harmônica. A terceira harmônica sofre pequenas variações ao redor do seu valor inicial sem distorção, enquanto a quinta e sétima harmônicas provocam um incremento da sua potência consumida em relação a seu valor inicial. O maior incremento na potência ativa por harmônica individual é produzido pela segunda harmônica de sequência negativa, que resulta em um consumo próximo de 1000 Watts, um consumo relativamente grande quando comparado com o consumo apresentado pelas outras harmônicas. A combinação das outras harmônicas resulta no maior incremento de potência ativa demandada a rede, ficando próxima a 1.100Watts, acima de todas as harmônicas consumidas, em geral observa-se como a presença de várias harmônicas traz maiores impactos para cada motor, mais a segunda harmônica resulta ser mais prejudicial de forma individual que as outras harmônicas individuais analisadas.



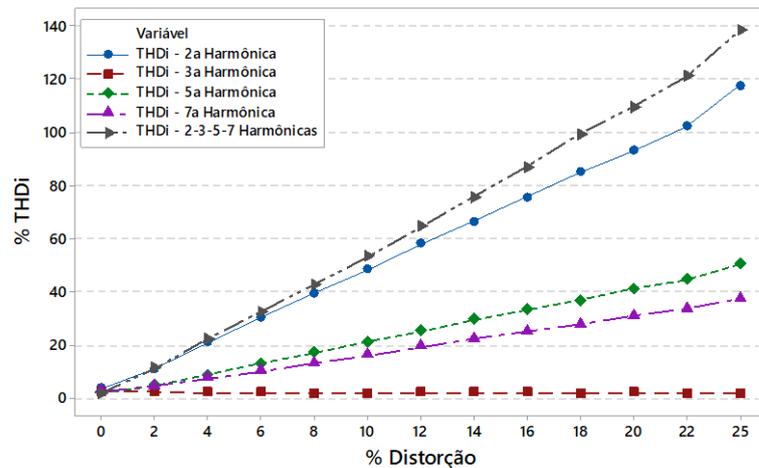
**Figura 5.37** Potência Ativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2.

A potência ativa apresenta um maior incremento de potência reativa, observa-se na Figura 5.38 como o incremento de distorção de tensão resulta em um grande aumento da potência reativa consumida, esse incremento depende da natureza da harmônica analisada, para este caso como comentado inicialmente, as harmônicas inseridas são de sequência negativa (2ª e 5ª), positiva (7ª) e zero (3ª). Observa-se como a potência reativa demandada na presença de distorção de terceira harmônica não sofre alteração no seu valor sem distorção. Já com a 5ª e 7ª harmônica a potência consumida sofre um incremento, o qual é maior para a quinta harmônica devido a produzir um torque oposto ao fundamental, faz o motor demandar uma potência reativa adicional, útil para criar os campos magnéticos presentes na sua operação. Das harmônicas de sequência negativa, a 2ª resulta ser a mais prejudicial para os motores analisados, como observado a partir do 8% de distorção sofre um crescimento exponencial à medida que a porcentagem de harmônica é incrementada. O mesmo cenário acontece com a combinação de todas as harmônicas analisadas, apresentando um consumo maior de reativo à medida que a porcentagem de distorção é incrementada, em comparação a potência ativa, o incremento da reativa é bem maior, o que justifica a diminuição do fator de potência para cada porcentagem acrescentada.



**Figura 5.38** Potência Reativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE2.

A distorção harmônica de corrente é apresentada na Figura 5.39. Observa-se como cada harmônica resulta em um incremento distinto de acordo com a natureza dele. A terceira harmônica não resulta em um incremento da porcentagem de distorção de corrente no motor, distinto da quinta e sétima que resultam em porcentagens de quase 50 e 40% de distorção respectivamente. A maior distorção de corrente é provocada pela 2ª harmônica e a combinação de todas as anteriores, chegando a valores próximos de 120 e 140% de distorção respectivamente, sendo assim as mais prejudiciais para o motor analisado.

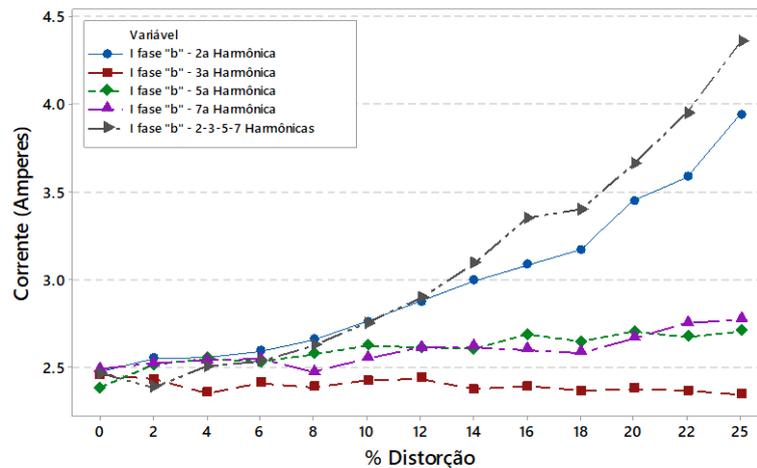


**Figura 0.39** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motor classe IE2.

### 5.5.3. Motor Eficiência Premium (Classe IE3)

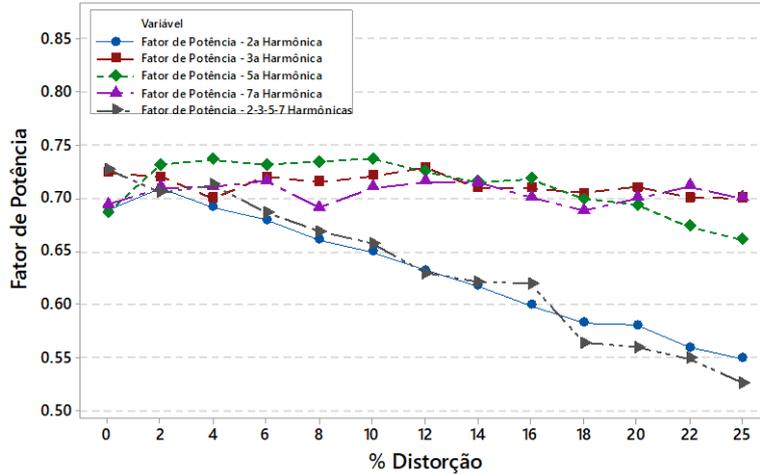
O incremento na magnitude de corrente de linha para cada harmônica analisada no motor classe IE3 é apresentada na Figura 5.40, pode-se observar como a 3ª harmônica (sequência zero) traçada em vermelho, não produz nenhum incremento na corrente de linha

para o motor, isso devido a que a ligação utilizada para todos os motores é Delta (220V). A quinta e sétima harmônica, (sequência negativa e positiva respectivamente) resultam no mesmo incremento em relação a seu valor inicial. Dos harmônicos inseridos individualmente ressalta a segunda harmônica de sequência negativa (em azul), que produz um incremento de quase 35% da corrente nominal do motor resultando em um incremento considerável das perdas e por tanto da temperatura como será apresentado adiante. Em cinza é apresentado o incremento da corrente de linha com a presença de 2ª, 3ª, 5ª e 7ª de forma combinada, resultando no maior incremento de corrente, porém com valores bastante próximos aos obtidos com a segunda harmônica de forma individual.



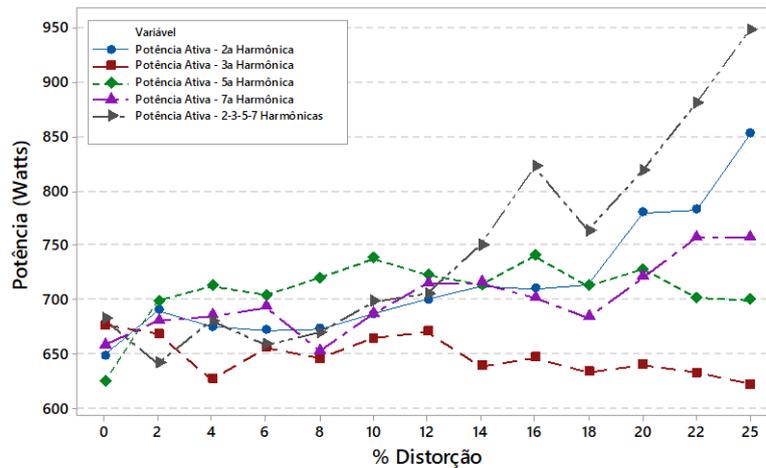
**Figura 5.40** Corrente de Linha para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.

A figura 5.41 apresenta o impacto de cada harmônica no fator de potência do motor premium classe IE3. Observa-se como o fator de potência passa de ao redor de 0,70 para quase 0,50 com a presença de todos os harmônicos. Também, como a 2ª harmônica produz a maior diminuição no fator de potência, quando comparada com as outras harmônicas inseridas de forma individual, enquanto a 3ª e 7ª harmônica mostram uma resposta parecida com uma diminuição pequena ficando em 0,70 para o 25% de distorção. O quinto harmônico apresenta menores valores em relação as distorções de 3ª e 7ª harmônicos chegando até quase 0,65.



**Figura 5.41** Fator de Potência para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.

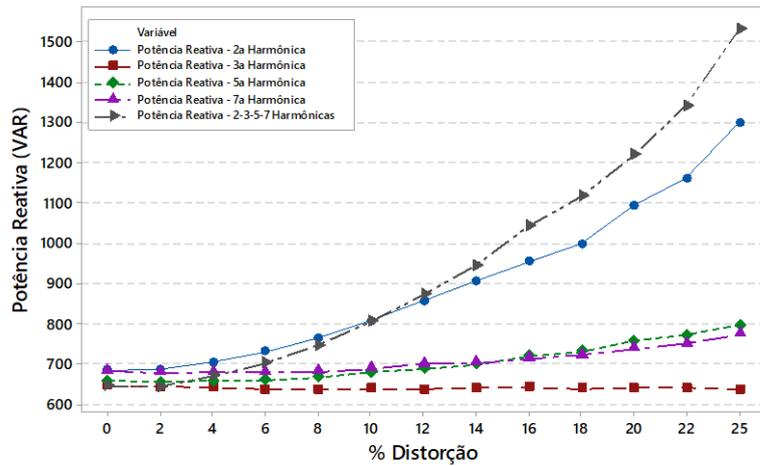
A variação de potência ativa registrada nos experimentos é mostrada na Figura 5.42. Como mostrado na Figura 5.40, a combinação de todos os harmônicos resulta no maior incremento de corrente, isso também é observado para a potência ativa consumida, seguida pelo 2º harmônico, porém com uma diferença de quase 100 Watts, 7ª, 5ª e 3ª harmônica resultam em um consumo menor de potência ativa para o motor classe IE3.



**Figura 5.42** Potência Ativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.

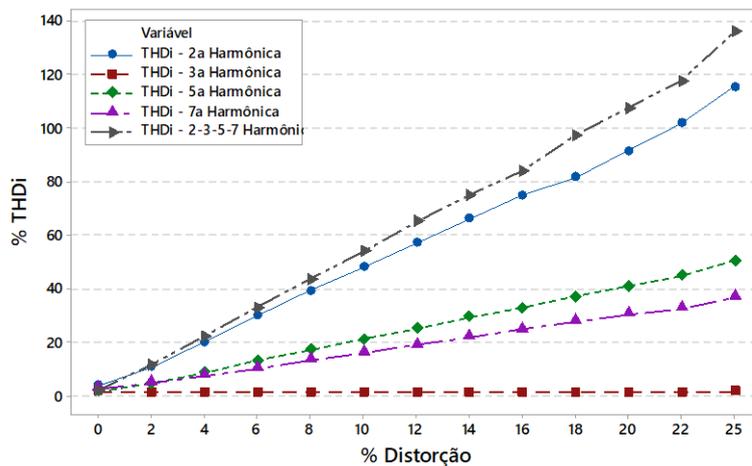
Em relação a potência reativa, observa-se como apresenta um patron definido de incremento para cada harmônica, como apresentado na Figura 5.43. A terceira harmônica não resulta em uma demanda maior de potência reativa, mantendo os valores iguais que para o caso sem distorção, 5ª e 7ª harmônica apresentam incrementos semelhantes chegando perto de 800 VAR para cada harmônica, das harmônicas individuais, a segunda harmônica resulta no maior incremento de potência reativa demandada pela rede, atingindo 1300 VAR para o 25% de

distorção, ao ser uma harmônica de sequência negativa resulta em um torque oposto que faz aumentar a potência reativa demandada para poder compensar esse torque de frenagem.



**Figura 5.43.** Potência Reativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.

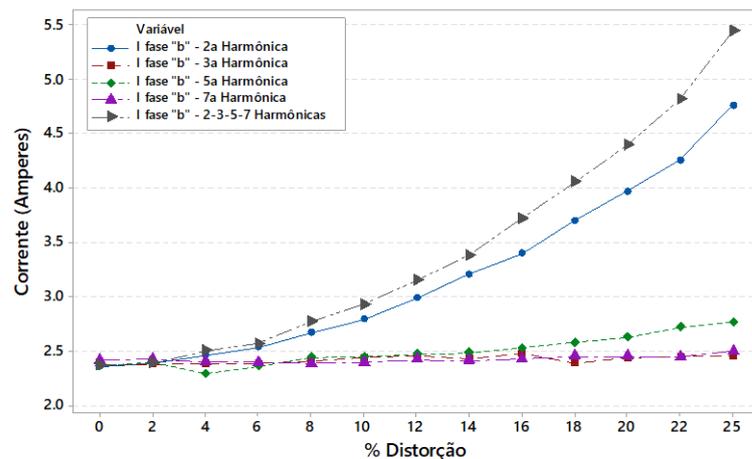
O resumo da distorção harmônica total de corrente para cada harmônica no motor classe IE3 é apresentada na Figura 5.44. Observando cada uma das linhas mostradas observa-se quase o mesmo comportamento e valores apresentados para o caso do motor classe IE2, ressaltando que ambas classes são da mesma tecnologia, com algumas melhoras em relação ao consumo e fator de potência para o motor premium (classe IE3) em relação ao motor de alta eficiência (classe IE2), porém com THD de correntes com os mesmos valores, como mostrado.



**Figura 0.44** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos para motor classe IE3.

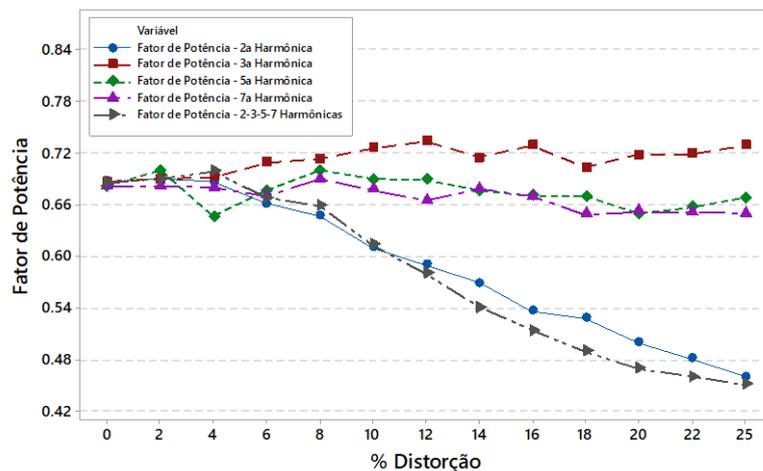
#### 5.5.4. Motor Híbrido de Eficiência Super Premium (Classe IE4)

Devido à natureza de cada harmônico, vai ter um impacto distinto para o motor analisado de acordo com a tecnologia utilizada e a porcentagem de distorção presente. O impacto de cada harmônica é apresentado na Figura 5.45. Onde observa-se como a 5ª harmônica apresenta um consumo maior de corrente quando comparada com a 3ª e 7ª harmônicas. Em relação a segunda harmônica, observa-se como ela resulta em um incremento exponencial parecido com a resposta de todas as harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª) de forma simultânea, sendo os mais prejudiciais para este e os outros motores analisados.



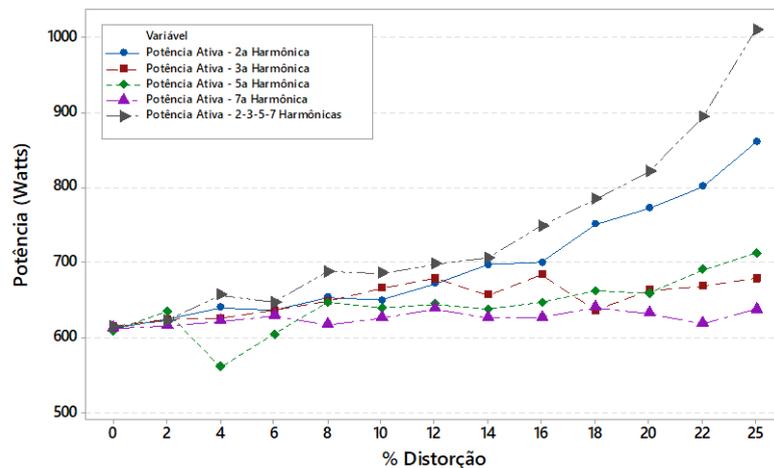
**Figura 5.45** Corrente de Linha para harmônicas de 2ª, 3ª, 5ª e 7ª ordem, motor classe IE4.

O fator de potência para cada harmônica analisada no motor híbrido é apresentada na Figura 5.46. Observa-se como a 2ª harmônica apresenta valores parecidos até o 12% de distorção e logo no final com o 25% de distorção. Em relação a terceira harmônica e distinto das outras observa-se que apresenta um incremento em relação a seu valor original, passando de 0,68 para 0,73 com o 25% de distorção.



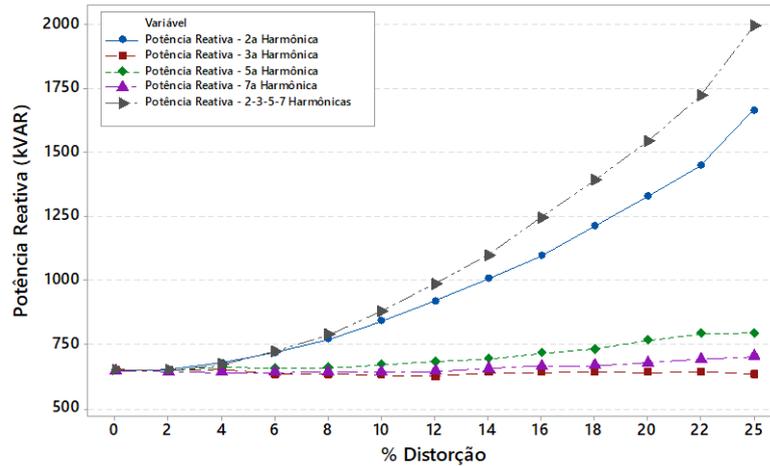
**Figura 5.46** Fator de Potência para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE4.

O comportamento da potência ativa é analisada na Figura 5.47, onde observa-se como neste caso a combinação das harmônicas resulta no maior incremento da potência consumida, atingindo 1 kW de consumo para o 25% de distorção, acompanhando esses resultados encontra-se a 2ª harmônica, com um consumo que supera os 850 Watts, por acima das harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem.



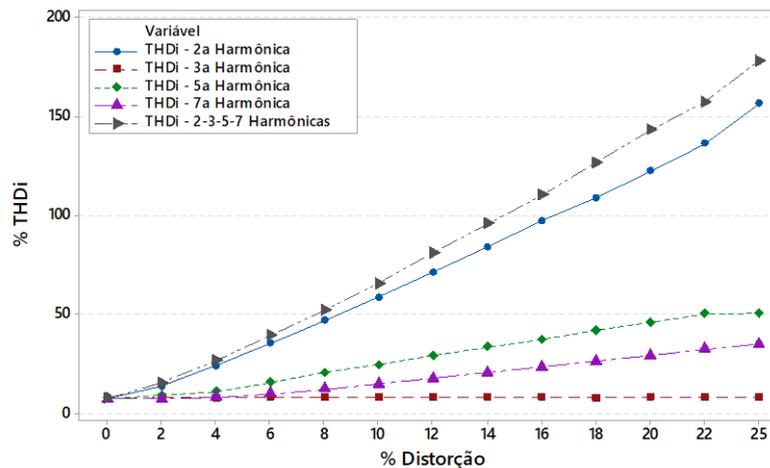
**Figura 5.47.** Potência Ativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE3.

O consumo de potência reativa para o motor híbrido também é apresentado na Figura 5.48. Observa-se como com a presença de terceira harmônica, não sofre variação do seu consumo inicial, mesmo com o 25% de distorção. Esse cenário é distinto para a 5ª e 7ª harmônicas, nas quais é observado um incremento do consumo de reativo que resulta ser maior para o caso da 5ª harmônica. O pior cenário acontece para o caso de 2ª harmônica, onde o valor atinge um consumo de mais do dobro da potência inicial requerida. O maior incremento e consumo é obtido para o caso de todas as harmônicas de forma combinada, com o qual foi demandada uma potência de 2 kVAR, o que confirma o baixo fator de potência encontrado para essa porcentagem de distorção.



**Figura 5.48** Potência Reativa para harmônicas (2ª, 3ª, 5ª e 7ª), motor classe IE4.

O motor classe IE4 foi o que apresentou as maiores distorções harmônicas de corrente, observou-se como sem distorção harmônica de tensão ele apresentava distorções de corrente próximas a 10%, na Figura 5.49 é apresentado o incremento de THDi para cada harmônica analisada. Observa-se como a 3ª harmônica não resulta em um incremento em relação ao seu valor original. Já a quinta harmônica resulta em uma maior distorção na forma de onda da corrente, com valores próximos a 50%, a 7ª harmônica apresenta um comportamento semelhante, porém com valores menores em todo o teste. A harmônica individual que resulta na maior THDi, com valores que superam o 150% de distorção é a de segunda ordem. Já a combinação de todas as harmônicas resulta em maiores valores, sendo essa combinação a mais prejudicial para este e todos os motores analisados.

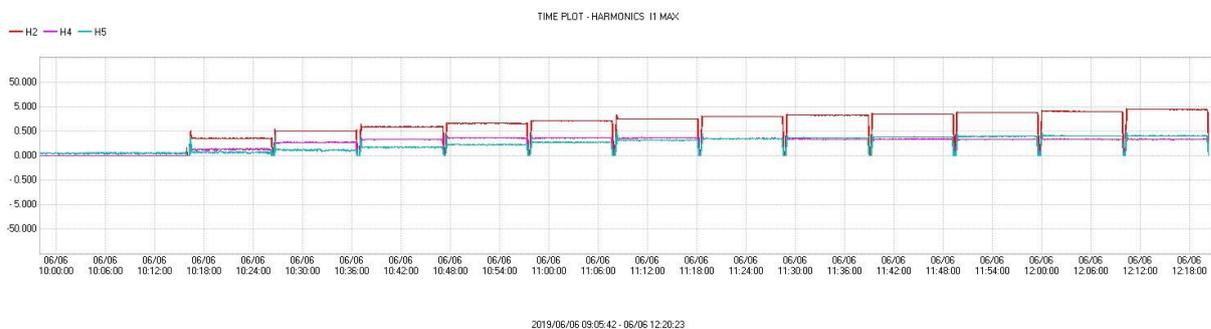


**Figura 0.49** THD de Corrente em condições de alimentação sem e com distorção de 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos para motor classe IE4.

## 5.6. Análise harmônica no Software do Analisador

Como comentado na metodologia os dados registrados pelo analisador na entrada de cada motor foram analisados no software do equipamento. Nas seções anteriores foi mostrado o impacto que cada harmônica em cada motor analisado, observou-se que a porcentagem de THDi presente no motor híbrido de ímãs permanentes classe IE4 era superior quando comparada com os outros motores, isso levou a realizar uma análise mais aprofundada para conhecer os principais motivos e harmônicos presentes que faziam com que a forma de onda da corrente apresentasse distorção mesmo com tensão senoidal sem distorção.

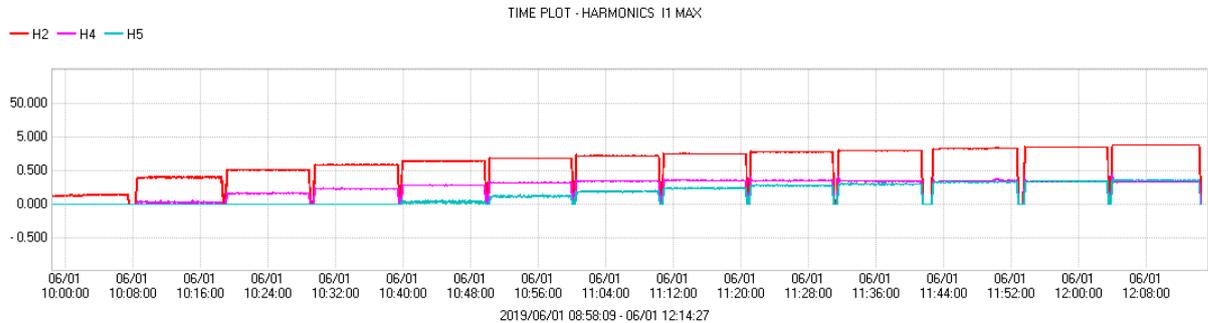
Com esse objetivo foram observadas as harmônicas presentes na forma de onda da corrente do motor híbrido classe IE4 e dos outros motores em estudo, para cada harmônica analisada de forma individual. Iniciando com a *segunda harmônica*, mostrada na Figura 5.50.



**Figura 0.50** Harmônicas presentes no motor com distorção de segunda harmônica para motor classe IE4.

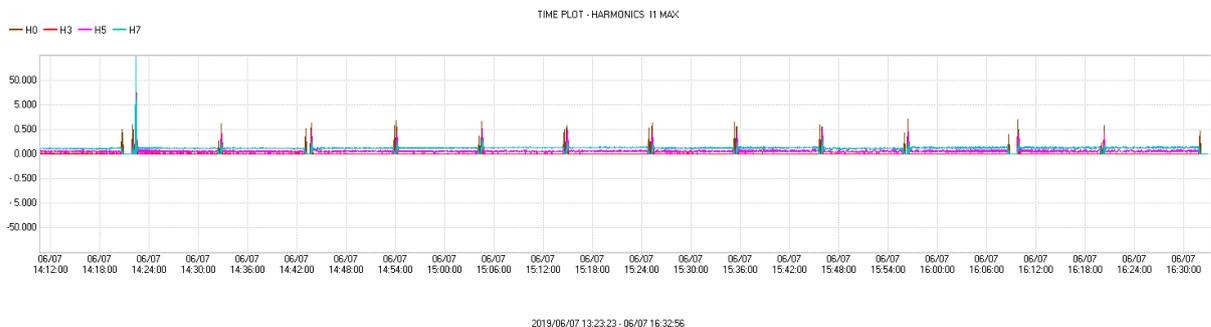
A Figura 5.50 tomada do software do analisador apresenta as harmônicas presentes durante todo o experimento no qual foi inserida só a segunda harmônica no motor híbrido. Observa-se como no início que representa parte da hora e dez minutos que o motor foi alimentado com tensão sem distorção que as harmônicas apresentam valores mínimos, porém sempre estão presentes. Logo e após atingir o equilíbrio térmico foi incrementada a segunda harmônica em porcentagens de 2% até atingir o 25% de distorção, isso é mostrado em vermelho na Figura 5.50. Porém e como pode ser observado a partir do 4% de distorção uma componente harmônica de 4ª e 5ª ordem começam a incrementar e que estão presentes durante todo o experimento atingindo um valor quase constante a partir do 8% de distorção de 2ª harmônica. Esse comportamento também foi analisado para os motores classes IE2 e IE3, onde as mesmas harmônicas apareceram, porém, com distintos porcentagens de distorção. A Figura 5.51 apresenta as harmônicas presentes no motor classe IE3 (os resultados para o motor classe IE2 são iguais para esta harmônica analisada). Observa-se como com o incremento de distorção de segunda harmônica uma componente de 4ª ordem começa a aparecer e que se mantém constante

a partir de um 10% de distorção. Também a partir de um 10% de distorção uma harmônica de 5ª ordem começa a incrementar e que iguala o valor da segunda harmônica para um 20% de distorção, essa harmônica também foi observada para o motor híbrido na Figura 5.50, mais incrementa a partir de um 2% de distorção de segunda harmônica.



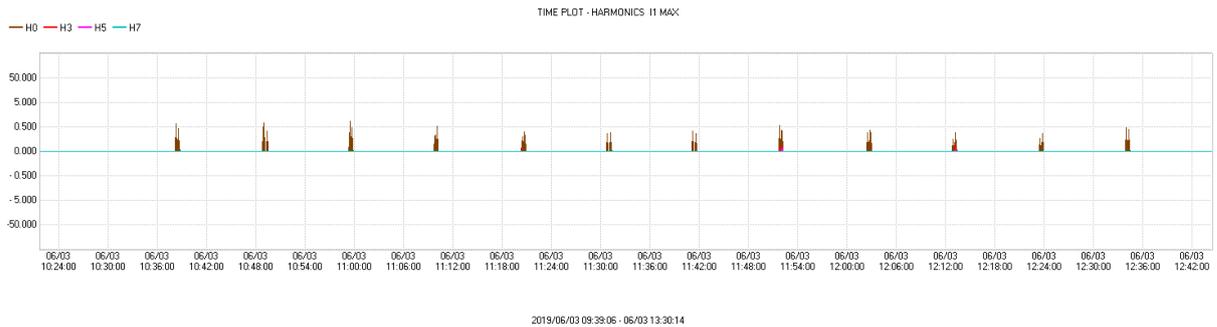
**Figura 0.51** Harmônicas presentes no motor com distorção de segunda harmônica para motor classe IE3.

Foi comentado anteriormente como os motores elétricos eram um circuito aberto para as terceiras harmônicas e nos resultados não causo um impacto significativo para cada um dos motores elétricos analisados. A figura 5.52 apresenta as harmônicas presentes no motor híbrido classe IE4 com a presença de distorção de tensão de 3ª harmônica, observasse que não sofre nenhum incremento de distorção harmônica, porém com porcentagens pequenos de 5ª e 7ª harmônica, mais maiores que a componente de 3ª harmônica que atingiu porcentagens de distorção de até 25% para os últimos dez minutos.



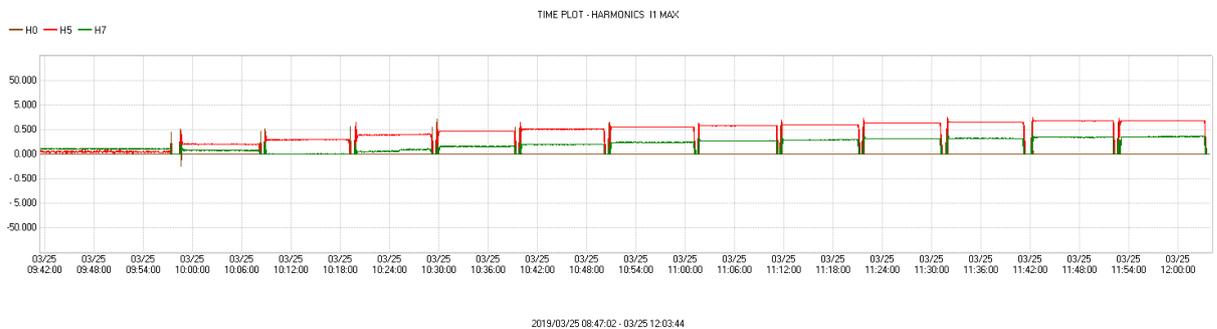
**Figura 0.52** Harmônicas presentes no motor com distorção de terceira harmônica para motor classe IE4.

Ao observar os motores classes IE2 e IE3, na Figura 5.53, observou-se comportamentos iguais, onde a terceira harmônica não resulto em um incremento de distorção o na geração de mais harmônicas, observasse como mesmo observando as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem elas não aparecem durante o experimento, confirmando assim como essa harmônica não resulta em efeitos daninhos para os motores analisados, como mostrado na literatura.

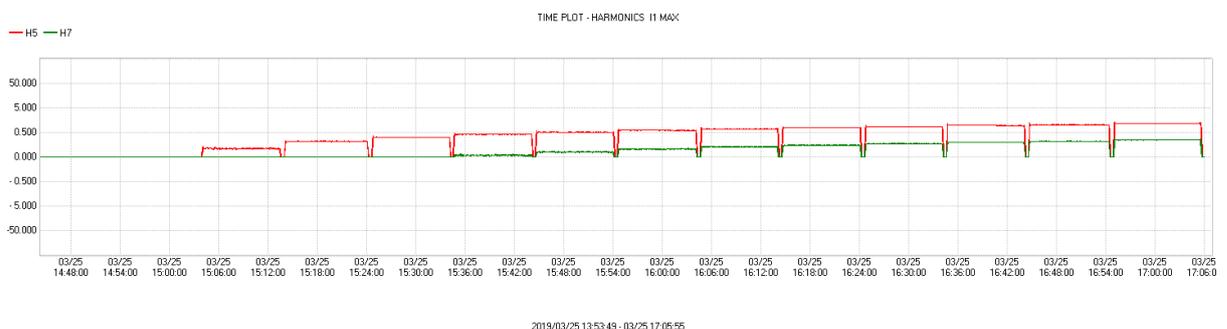


**Figura 0.53** Harmônicas presentes no motor com distorção de terceira harmônica para motor classe IE3.

Para a 5ª harmônica pode-se observar na Figura 5.54, como no motor classe IE4 como à medida que a sua porcentagem foi incrementada uma componente de 7ª harmônica começa a aparecer e que a partir do 6% de distorção incremento junto com a porcentagem de 5ª harmônica. Essa componente de 7ª harmônica apareceu só para a distorção de 5ª harmônica. O mesmo cenário foi observado para os motores classes IE2 e IE3, como apresentado na Figura 5.55, para o motor classe IE3, onde a componente de 7ª harmônica começa a incrementar a partir do 10% de distorção. Como é observado nas Figuras 5.54 e 5.55 para o motor classe IE3 e o IE2 que apresentaram o mesmo comportamento antes de inserir distorção harmônica não se observa presença de outras harmônicas, enquanto para o motor híbrido já é observada a presença de 5ª e 7ª harmônicas.

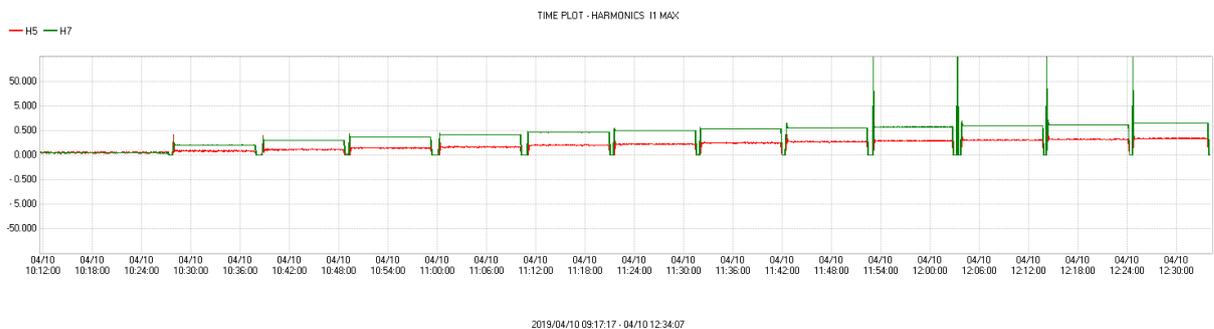


**Figura 0.54** Harmônicas presentes no motor com distorção de quinta harmônica para motor classe IE4.

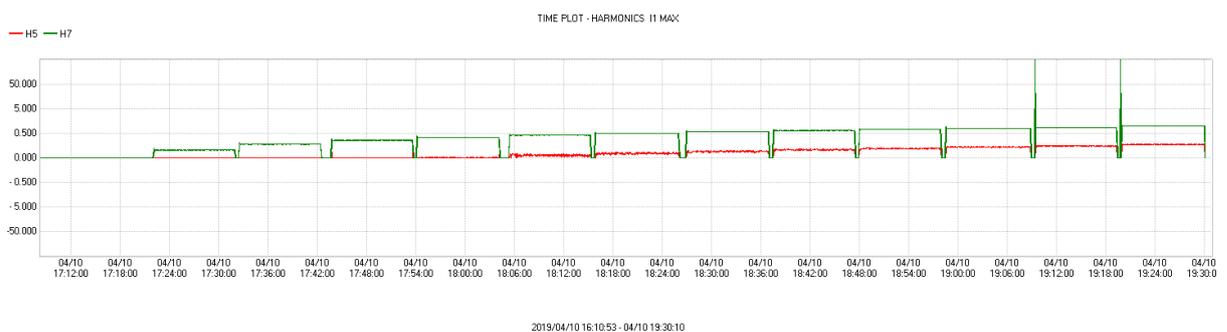


**Figura 0.55** Harmônicas presentes no motor com distorção de quinta harmônica para motor classe IE3.

Logo a *sétima harmônica* foi inserida em cada um dos motores analisados, percebeu-se que à medida que a distorção de tensão de 7ª harmônica foi incrementada, uma harmônica de 5ª ordem foi incrementando acompanhando o incremento da 7ª harmônica. Este cenário se apresentou tanto para o motor híbrido classe IE4 (Figura 5.56) como para os motores classes IE2 e IE3 (Figura 5.57). Observa-se para o caso do motor híbrido de ímãs permanentes como a 5ª harmônica que já está presente, antes de inserir distorção de 7ª harmônica, começa a incrementar a partir do 2% e logo acompanha cada incremento de sétima harmônica no motor, isso faz com que uma componente de sequência negativa que resulta em um torque contrário ao fundamental apareça, resultando em maiores perdas e por tanto maiores temperaturas. A mesma harmônica de 5ª ordem aparece nos motores classes IE2 e IE3, porém só até o motor apresentar uma distorção de tensão maior de 10% de 7ª harmônica, é que também incrementa ao longo do experimento, como mostrado na Figura 5.57.



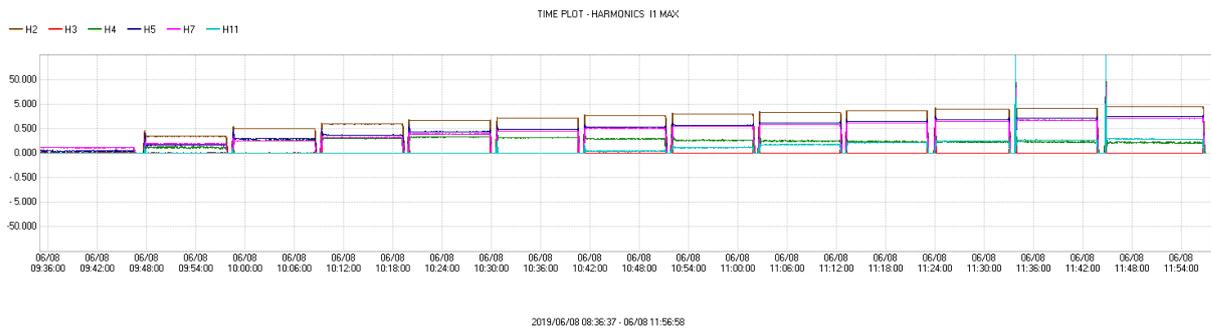
**Figura 0.56** Harmônicas presentes no motor com distorção de sétima harmônica para motor classe IE4.



**Figura 0.57** Harmônicas presentes no motor com distorção de sétima harmônica para motor classe IE2.

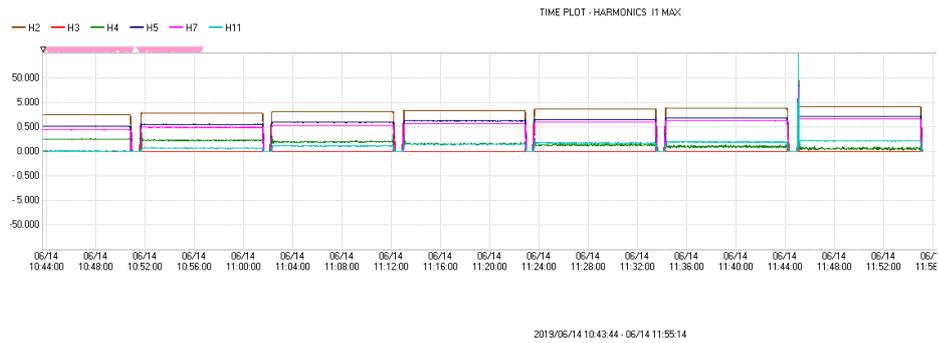
Para o último teste onde todas as harmônicas foram inseridas em cada um dos motores, observou-se como novas harmônicas de corrente apareceram. A Figura 5.58 apresenta as harmônicas presentes e que apareceram durante o experimento para o motor híbrido classe IE4, ressaltar que para o teste a 2ª, 3ª, 5ª e 7ª harmônica foram inseridas. Os resultados mostram que mesmo com as mesmas porcentagens de distorção para cada harmônica analisada a segunda harmônica apresentou valores superiores quando comparado com as outras harmônicas

analisadas. A terceira harmônica de corrente não sofreu nenhum incremento durante todo o experimento, apresentando o valor mínimo, como mostrado em vermelho. A quinta e sétima harmônicas em azul e fúcsia apresentaram os mesmos valores de distorção ao longo do teste. Pode-se observar também como além dos harmônicos inseridos uma componente de 4ª ordem aparece e que acompanha as harmônicas de 5ª e 7ª ordem, para logo diminuir à medida que a distorção das harmônicas é incrementada. Uma componente de decimo primeira ordem também aparece a partir do 14% de distorção e que logo supera a porcentagem de 4ª ordem que apresentou o motor.



**Figura 0.58** Harmônicos presentes no motor com distorção de 2º-3º-5º e 7º harmônicos de corrente de forma combinada para o motor classe IE4.

A Figura 5.59 apresenta de forma ampliada as harmônicas presentes no experimento com a combinação de 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos no motor classe IE2, o motor classe IE3 apresento resultados semelhantes, observa-se como as mesmas harmônicas presentes e que surgem no motor híbrido, também aparecem para estas tecnologias. A segunda harmônica apresenta maiores valores de distorção que as outras harmônicas analisadas, enquanto a 5ª e 7ª harmônicas apresentam os mesmos porcentagens ao longo do experimento, enquanto a terceira harmônica não sofreu nenhum incremento para os motores analisados. A componente de 4ª e 11ª ordem também apareceram para os motores classes IE2 e IE3, a harmônica de 4ª ordem começa incrementando para logo diminuir no final do teste. A décimo primeira harmônica incrementou a partir do 14% de distorção ficando acima das harmônicas de 3ª e 4ª ordem para o final do experimento.



**Figura 0.59** Harmônicas presentes no motor com distorção de 2-3-5 e 7 harmônicas de forma combinada para o motor classe IE2.

Em conclusão foi observado como a presença de harmônicas de tensão resulta na produção de mais harmônicas para cada motor analisado, assim com a presença de segundo harmônicos de tensão, harmônicos de corrente de 4ª e 5ª ordens apareceram, com a presença de 3º harmônicos de tensão, não apareceram correntes harmônicas, com a presença de 5º harmônico de tensão apareceram harmônicas de corrente de 7ª ordem, enquanto que para a presença de 7º harmônico apareceram correntes de 5º harmônico, para finalizar com a presença de 2º, 3º, 5º e 7º combinados harmônicas de 4ª e 11ª ordens apareceram, o que resulta em maiores porcentagens de THDI quando comparado com as outras tecnologias. A produção de harmônicas adicionais também tem que ver com a porcentagem de harmônica inserida, onde a partir de certos valores de distorção onde chegou a superar valores de 150% de corrente nominal, trabalhando de forma saturadas e por tanto, resultando em maiores distorções e harmônicas.

## 5.7. Matrizes de Correlação e Gráficos de Dispersão

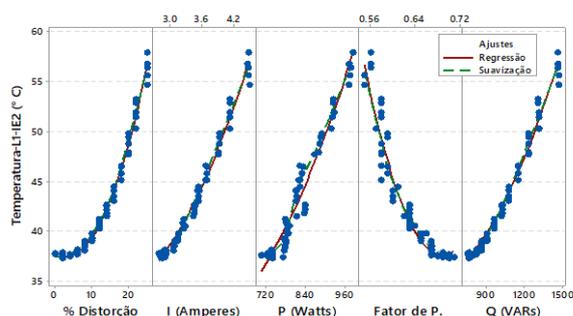
Como apresentado no Capítulo 4, no desenvolvimento dos experimentos foi observado com os à temperatura, corrente, potências ativa e reativa apresentavam um padrão de crescimento, visando analisar a correlação entre essas variações foram criadas matrizes de correlação para cada harmônica individual e para cada harmônico analisado. Assim e devido a que os harmônicos de sequência negativa resultaram em curvas não lineares o coeficiente de [correlação de Spearman](#) foi utilizado, e que varia de -1 até 1, apresentado na célula superior da matriz, na parte inferior é mostrado o [valor-p](#), útil para rejeitara hipótese nula e que foi comparado com o nível de significância ( $\alpha$ ) de 0.05. As matrizes e gráficos foram gerados no *software* estatístico Minitab 18 [97]. Além disso esta seção apresenta o incremento de temperatura observado ao longo dos experimentos para cada porcentagem de distorção presente no motor. Os resultados são apresentados nas seções a seguir:

## 5.7.2. Segunda Harmônica

As Tabela 5.2 apresenta as correlações entre a temperatura da linha 1 da Figura 5.7(a) e os principais parâmetros registrados no analisador de qualidade na entrada do **motor classe IE2**, para a segunda harmônica de tensão. Devido a que foram encontradas relações não lineares foi utilizada a correlação de Spearman, como apresentado no Capítulo 4. A Figura 5.60 apresenta os gráficos de dispersão para as principais variáveis relacionadas nas matrizes de correlação apresentada.

**Tabela 5.2** Matriz de Correlação 2ª Harmônica – Motor Classe IE2

IE2 - 2a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0,977	0				
Corrente (A)	0,975	0,992	0			
Q (VAR)	0,971	0,998	0,993	0		
% THDi	0,972	0,997	0,988	0,995	0	
FP	-0,969	-0,985	-0,966	-0,981	-0,986	0
P (W)	0,95	0,954	0,971	0,955	0,945	-0,909
	0	0	0	0	0	0



**Figura 0.60** Gráfico de Dispersão para 2ª harmônica motor classe IE2.

O valor de correlação de Spearman pode variar de -1 a +1, um valor próximo a  $\pm 1$  indica uma maior relação entre duas variáveis. Na Tabela 5.2 observa-se como os valores de correlação entre a temperatura e as variáveis em questão apresentam fortes correlações, sendo a maior correlação entre a temperatura e a porcentagem de distorção com 0,977. Na matriz de correlação apresentada observa-se como além da temperatura, os outros parâmetros estão também fortemente correlacionados, sendo o menor coeficiente de correlação de 0,909. Isso é importante no momento de analisar os modelos que representem a variação da temperatura para cada harmônica analisada, com será apresentado mais tarde.

A Figura 5.60 apresenta o gráfico de dispersão das variáveis mostradas na matriz antes comentada, observa-se como à medida que a porcentagem de distorção incrementa, a temperatura também incrementa em uma curva não linear, uma curva similar é obtida para a Temperatura versus Corrente. Em relação a potência ativa um padrão mais linear é observado. Enquanto ao Fator de Potência, a matriz de correlação apresenta valores de correlação negativos em relação com a temperatura, essa correlação negativa é observada na Figura 5.60 que mostra como a medida que o fator de potência diminuí, a temperatura da carcaça do motor sofre

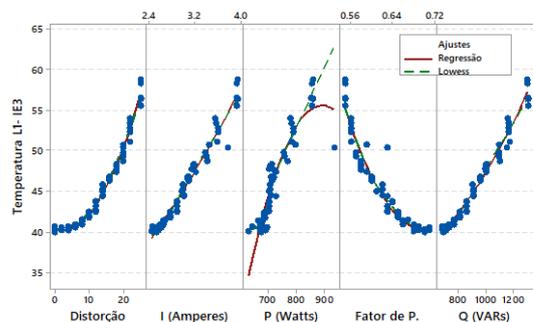
incrementos e em relação à potência reativa, observa-se como tem uma simetria com o fator de potência, onde a medida que o reativo demandado incrementa, o fator de potência diminui.

Foi observado nas seções anteriores como das harmônicas individuais analisadas, a segunda harmônica resulto em maiores incrementos nos parâmetros registrados pelo analisador. Em relação a temperatura, observa-se como a temperatura passa de 38 °C, a quase 60 °C, para um 25% de distorção. Um incremento bastante considerável e que resultará em um deterioro prematuro dos materiais do motor, quando submetido nessas porcentagens durante períodos longos.

A Tabela 5.3 e a Figura 5.61 apresentam as matrizes de correlação e os gráficos de regressão para a segunda harmônica de tensão no **motor classe IE3**. Observa-se como al igual que no motor classe IE2, as correlações apresentam valores próximos a  $\pm 1$ , sendo ainda maiores os parâmetros relacionados com a temperatura do motor. A Figura 5.61 apresenta as gráficas de dispersão para cada um dos parâmetros em relação à temperatura. Em relação à temperatura observa-se que também o valor se aproxima a 60 °C para o 25% de distorção, porém a temperatura inicial do motor iniciou com valores próximos a 40 °C, com o qual um  $\Delta T$  menor foi observado para o motor premium classe IE3.

**Tabela 5.3** Matriz de Correlação 2ª Harmônica – Motor Classe IE3

IE3 - 2a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP
% Distorção	0.987	0				
Corrente (A)	0.986	0.994	0			
Q (VAR)	0.981	0.998	0.994	0		
% THDi	0.983	0.997	0.992	0.995	0	
FP	-0.971	-0.98	-0.964	-0.975	-0.978	0
P (W)	0.899	0.899	0.917	0.901	0.891	-0.845
	0	0	0	0	0	0



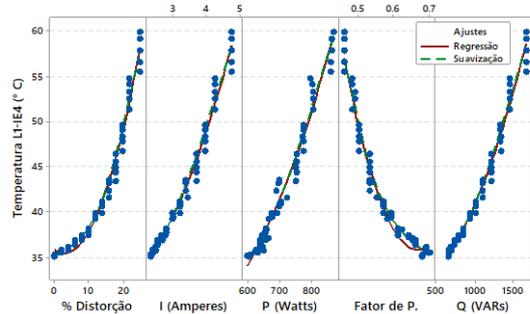
**Figura 0.61** Gráfico de Dispersão para 2ª harmônica – Motor classe IE3

Por último o **motor híbrido classe IE4** foi submetido a distorção de tensão de 2ª harmônica, a matriz de correlação e os gráficos de dispersão são mostrados na Tabela 5.4 e Figura 5.62. Menores valores de correlação podem ser observados para este motor, em relação à temperatura a corrente apresenta a maior correlação de Spearman, e das quais a distorção resulta ser a menor. Cabe ressaltar que este motor difere dos outros devido à presença de ímãs permanentes em seu rotor, pelo qual, são esperados resultados distintos, que serão confirmados na criação dos modelos para este motor. Em relação à temperatura, a segunda harmônica resulto

ser a mais prejudicial para o motor de ímãs permanentes, onde a partir de uma temperatura de equilíbrio de 35 °C, passo a atingir 60 °C, enquanto a corrente, observa-se como passa de 2,36 Amperes para quase 5 A, o que resulta em um maior incremento das perdas e por tanto da temperatura de operação.

**Tabela 5. 4** Matriz de Correlação 2ª Harmônica – Motor Classe IE4

IE4 - 2a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0.928	0				
Corrente (A)	0.983	0.971				
Q (VAR)	0.982	0.973	1			
% THDi	0.944	0.998	0.982	0.984		
FP	-0.929	-0.987	-0.97	-0.974	-0.991	
P (W)	0.98	0.955	0.991	0.987	0.964	-0.936



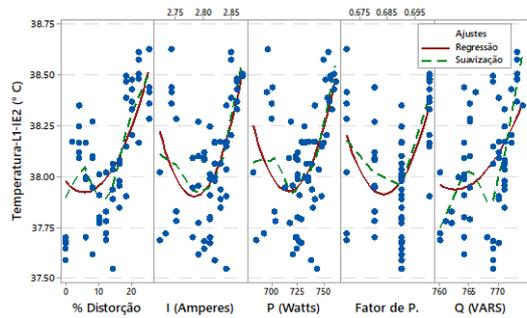
**Figura 0.62** Gráfico de Dispersão para 2ª harmônica – Motor classe IE4

### 5.7.3. Terceira Harmônica

Matrizes de correlação foram criadas para distorção de terceira ordem, foi já mostrado como ela não produzia um impacto considerável em cada um dos motores ao tratar-se de uma harmônica de sequência zero, e para a qual os motores eram enxergados como um circuito aberto. A Tabela 5.5 e Figura 5.63 apresentam as correlações e gráficos de dispersão entre os principais parâmetros registrados durante o experimento para o **motor de alto rendimento, classe IE2**. Observa-se como os parâmetros apresentam valores baixos de correlação entre eles, principalmente em relação à temperatura. Praticamente não existe uma relação forte entre variáveis o que pode ser observado na Figura 5.63 onde a regressão intenta adaptar-se ao modelo, porém sem sucesso, esse caso foi comentado no Capítulo 4, Figura 4.2 (a) e acontece quando o relacionamento é aleatório ou inexistente, mostrando coeficientes de correlação de valores baixos. Em relação a temperatura do motor, observa-se como, com a presença de terceira harmônica, sofreu pequenas variações até chegar próximo de 38,75 °C, um incremento bastante pequeno, mais esperado dada a natureza da harmônica inserida.

**Tabela 5. 5** Matriz de Correlação 3ª Harmônica – Motor Classe IE2

IE2 - 3a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0.528					
	0					
Corrente (A)	0.411	0.238				
	0.001	0.056				
Q (VAR)	0.475	0.208	0.728			
	0	0.096	0			
% THDi	-0.058	-0.504	0.205	0.439		
	0.648	0	0.102	0		
FP	0.311	0.211	0.31	0.585	0.095	
	0.012	0.092	0	0	0.452	
P (W)	0.392	0.234	0.988	0.742	0.217	0.908
	0.001	0.061	0	0	0.082	0

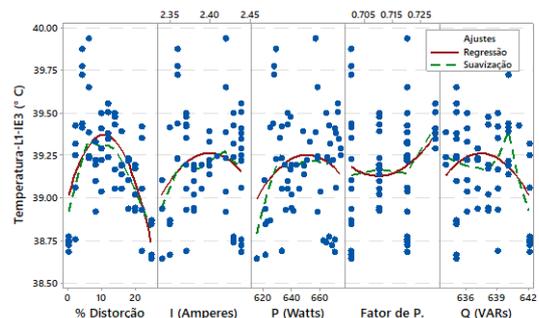


**Figura 0.63** Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE2

Para o **motor classe IE3**, (Tabela 5.6) a terceira harmônica teve resultados semelhantes, quando comparados com o motor classe IE2, apresentando valores de correlação baixos, e para este caso o valor-p, comentado no Capítulo 4, é maior que 0,05 para algumas correlações, com o qual não é possível rejeitar a hipótese nula, desta forma não é possível afirmar que existe uma relação entre as variáveis em questão. Os gráficos de dispersão na Figura 5.64 mostram como os pontos registrados ao longo do experimento não mostram um padrão de comportamento com a harmônica analisada. A temperatura sofreu uma variação no início do teste, mais se manteve aproximadamente no valor inicial, ao-redor de 39 °C

**Tabela 5. 6** Matriz de Correlação 3ª Harmônica – Motor Classe IE3

IE3 - 3a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	-0.252					
	0.043					
Corrente (A)	0.095	-0.548				
	0.45	0				
Q (VAR)	-0.116	-0.35	0.141			
	0.358	0.004	0.264			
% THDi	-0.403	0.087	0.045	0.057		
	0.001	0.493	0.725	0.65		
FP	0.162	-0.544	0.931	-0.092	-0.037	
	0.196	0	0	0.466	0.767	
P (W)	0.125	-0.55	0.989	0.124	0	0.949
	0.32	0	0	0.324	0.998	0



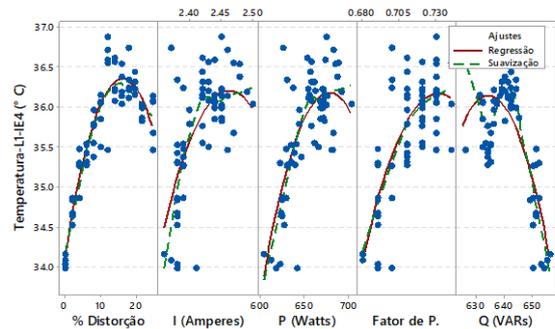
**Figura 0.64** Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE3

A terceira harmônica de tensão mostrou resultados diferentes para o **motor híbrido classe IE4**, mostrado na Tabela 5.7 e Figura 5.65. Maiores coeficientes de correlação podem ser observados para o caso do motor de ímãs permanentes, porém não tão fortes como os obtidos para a segunda harmônica de tensão. O valor-p também se manteve menor que 0,05 entre a maioria das variáveis, como apresentado. Essas correlações podem ser observadas nas gráficas de dispersão onde o motor passou de 34 °C para 35,5 °C, o incremento na corrente e potências

ativa e reativa também pode ser observado. O fator de potência também sofreu um incremento ao passar de 0,68 para 0,73 no final do experimento, incrementos similares foram observados nos motores classes IE2 e IE3.

**Tabela 5. 7** Matriz de Correlação 3ª Harmônica – Motor Classe IE4

IE4 - 2a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0.678					
Corrente (A)	0.549	0.68				
Q (VAR)	-0.379	-0.29	-0.539			
% THDi	0.002	0.019	0			
FP	0.29	0.321	0.46	-0.568		
P (W)	0.019	0.009	0	0		
	0.587	0.611	0.908	-0.777	0.515	
	0	0	0	0	0	
	0.591	0.697	0.976	-0.656	0.497	0.952
	0	0	0	0	0	0



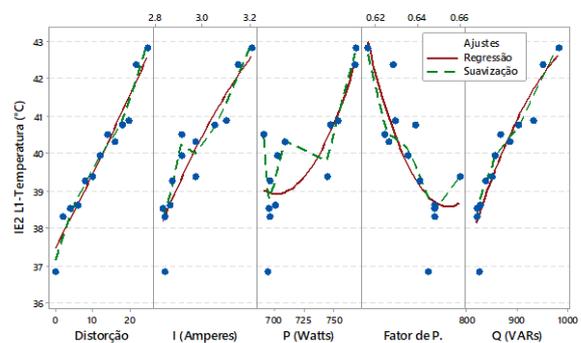
**Figura 0.65** Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE4

### 5.7.4. Quinta Harmônica

A quinta harmônica de sequência negativa também apresenta características não lineares para algumas variáveis do **motor classe IE2**, como apresentado na Figura 5.65, onde a temperatura incremento de um valor inicial de 36,8 °C para 43 °C. O fator de potência e a potência reativa também apresentaram diminuições e crescimentos diferentes, distinto da segunda harmônica onde se observa uma simetria em suas curvas. Em relação à matriz de correlação, foram observados altos coeficientes de Spearman, a exceção da potência ativa que apresenta valores de 0,768 em relação à temperatura.

**Tabela 5. 8** Matriz de Correlação 5ª Harmônica – Motor Classe IE2

IE2 - 5a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP
% Distorção	0.995					
Corrente (A)	0.946	0.957				
Q (VAR)	0.973	0.978	0.974			
% THDi	0.995	1	0.957	0.978		
FP	-0.779	-0.773	-0.655	-0.796	-0.773	
P (W)	0.768	0.806	0.88	0.795	0.806	-0.351
	0.002	0.001	0	0.001	0.001	0.239



**Figura 0.65** Gráfico de Dispersão para 3ª harmônica – Motor classe IE4

Os resultados para o **motor classe IE3** com distorção de tensão de quinta harmônica são apresentados na Tabela 5.9 e Figura 5.66. Os resultados mostram valores e comportamentos

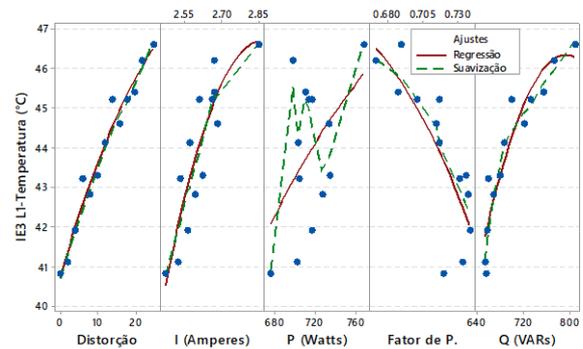
semelhantes aos obtidos no motor classe IE2. Em relação à temperatura, o motor premium apresenta maiores temperaturas iniciais e finais, porém com um incremento de temperatura igual que o motor classe IE2 apresentado na Figura 5.65.

**Tabela 5. 9** Matriz de Correlação 5ª Harmônica – Motor Classe IE3

IE3 - 5a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP
% Distorção	0.985					
Corrente (A)	0.884	0.933				
Q (VAR)	0.979	0.995	0.927			
% THDi	0.985	1	0.933	0.995		
FP	-0.842	-0.839	-0.691	-0.85	-0.839	
P (W)	0.302	0.355	0.581	0.344	0.355	0.121

	Conteúdo da célula	Rho de Spearman	Valor p
	1	0.8	0.6
	0.8	0.4	0.2
	0.6	0.2	0
	0.4	0	0
	0.2	0	0
	0	0	0
	-0.2	0	0
	-0.4	0	0
	-0.6	0	0
	-0.8	0	0
	-1	0	0



**Figura 0.66** Gráfico de Dispersão para 5ª harmônica – Motor classe IE3.

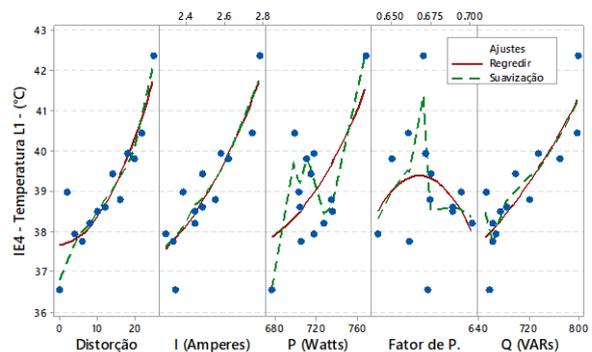
A Tabela 5.10 e a Figura 5.67 mostram os resultados para o motor classe IE4 na presença de quinta harmônica de tensão. Os menores coeficientes de Spearman foram obtidos para este motor, observa-se como em relação à temperatura o nenhum coeficiente superou o 0,90, o que indica que além da porcentagem de distorção presente na tensão de alimentação outras variáveis podem influenciar na temperatura. Os outros parâmetros registrados no analisador apresentaram melhores correlações como pode ser observado. O motor híbrido apresenta menores temperaturas de operação na presença de quinta harmônica de tensão quando comparado com as classes IE2 e IE3, como se observa na Figura 5.67. Os outros parâmetros apresentaram relações menos lineares como mostrado.

**Tabela 5. 10** Matriz de Correlação 5ª Harmônica – Motor Classe IE4

	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP
% Distorção	0.863					
Corrente (A)	0.898	0.953				
Q (VAR)	0.82	0.977	0.909			
% THDi	0.863	1	0.953	0.977		
FP	-0.173	-0.322	-0.157	-0.457	-0.322	
P (W)	0.841	0.912	0.97	0.856	0.912	-0.094

	Conteúdo da célula	Rho de Spearman	Valor p
	1	0.8	0.6
	0.8	0.4	0.2
	0.6	0.2	0
	0.4	0	0
	0.2	0	0
	0	0	0
	-0.2	0	0
	-0.4	0	0
	-0.6	0	0
	-0.8	0	0
	-1	0	0



**Figura 0.67** Gráfico de Dispersão para 5ª harmônica – Motor classe IE4.

### 5.7.5. Sétima Harmônica

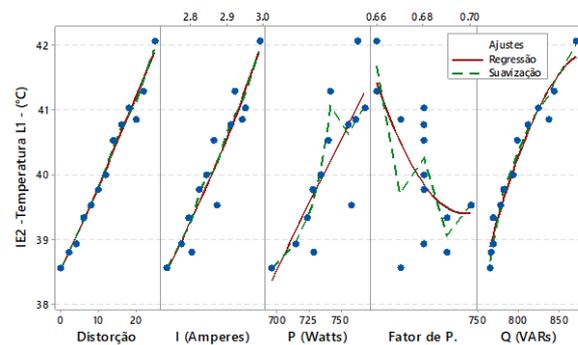
Distorções de quinta e sétima harmônicas são comuns nos inversores de frequência com bastante presença na indústria. Foi mostrado anteriormente como o quinto harmônico resultava ser mais prejudicial quando comparado com o sétimo de sequência positiva. Os resultados obtidos de temperatura e a matriz de correlação para as variáveis registradas são apresentadas na Tabela 5.11 e Figura 5.68 para o **motor classe IE2**. Em relação a quinta harmônica, a sétima apresenta uma maior linearidade entre suas variáveis como apresentado nos gráficos de dispersão. Enquanto as variáveis na matriz de correlação, elas mostraram altos coeficientes de Spearman, devido a relação diretamente proporcional entre elas.

**Tabela 5.11** Matriz de Correlação 7ª Harmônica – Motor Classe IE2

IE2 - 7a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP
% Distorção	0.995					
Corrente (A)	0.934	0.929				
Q (VAR)	0.995	1	0.929			
% THDi	0.995	1	0.929			
FP	-0.563	-0.586	-0.398	-0.586	-0.586	
P (W)	0.824	0.813	0.967	0.813	0.813	-0.206

Conteúdo da célula	Valor
Rho de Spearman	1
	0.8
	0.6
	0.4
	0.2
	0
	-0.2
	-0.4
	-0.6
	-0.8
	-1

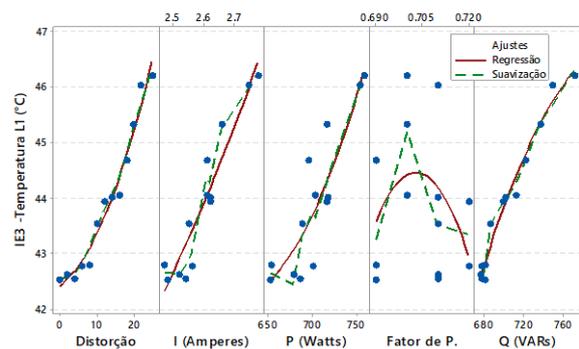


**Figura 0.68** Gráfico de Dispersão para 7ª harmônica – Motor classe IE2.

A sétima harmônica resulta na mesma temperatura final para o **motor classe IE3**, quando comparada com a quinta harmônica, porém com um  $\Delta T$  menor, devido a temperatura inicial do motor antes de inserir harmônica de 7ª ordem na tensão de alimentação como apresentado na Figura 5.69. O fator de potência apresenta coeficientes de Spearman baixos com as outras variáveis e varia durante o experimento, como mostrado no gráfico de dispersão. Observa-se na matriz de correlação como a porcentagem de distorção apresenta um coeficiente de Spearman de 1 em relação com a porcentagem de distorção harmônica de corrente, isso indica que no momento de considerar as variáveis preditoras para o modelo, só uma delas poderia ser considerada para evitar uma equação com termos desnecessários no modelo.

**Tabela 5. 12** Matriz de Correlação 7ª Harmônica – Motor Classe IE3

IE3 - 7a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP	
% Distorção	0.995						Conteúdo da célula
	0						Rho de Spearman
Corrente (A)	0.882	0.887					Valor p
	0	0					
Q (VAR)	0.948	0.956	0.848				
	0	0	0				
% THDi	0.995	1	0.887	0.956			
	0	*	0	0			
FP	-0.135	-0.135	0.211	-0.286	-0.135		
	0.661	0.661	0.489	0.344	0.661		
P (W)	0.842	0.847	0.972	0.778	0.847	0.314	
	0	0	0	0.002	0	0.296	

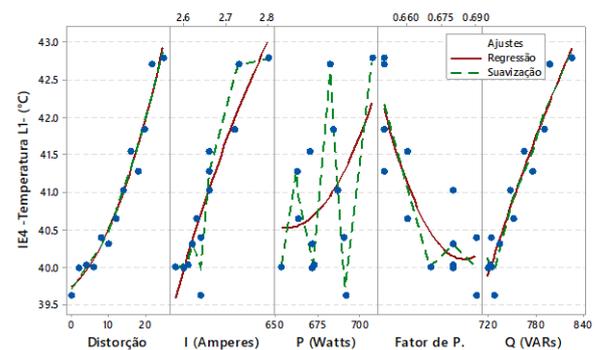


**Figura 0.69** Gráfico de Dispersão para 7ª harmônica – Motor classe IE3.

Para o motor híbrido classe IE4, também foram obtidas relações aproximadamente lineares entre as variáveis analisadas, como apresentado na Tabela 5.13 e Figura 5.70. A temperatura do motor apresenta valores aproximados com os obtidos para a distorção de quinta harmônica, porém com um  $\Delta T$  menor devido ao desfase na temperatura inicial. A potência ativa ficou variando ao longo do experimento e com base nos valores de correlação obtidos, assim como o valor-p, pode-se concluir que não existe uma relação direta, estatisticamente, entre ela e as variáveis analisadas, como apresentado. Dos três motores analisados o motor híbrido apresenta o menor incremento de temperatura, porém com temperaturas semelhantes com o motor classe IE2, o motor classe IE3 por outro lado, apresenta valores maiores de temperatura ao longo do experimento.

**Tabela 5. 13** Matriz de Correlação 7ª Harmônica – Motor Classe IE4.

	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	P (W)	FP	
% Distorção	0.984						Conteúdo da célula
	0						Rho de Spearman
Corrente (A)	0.882	0.858					Valor p
	0	0					
Q (VAR)	0.901	0.934	0.88				
	0	0	0				
% THDi	0.984	1	0.858	0.934			
	0	*	0	0			
FP	-0.805	-0.853	-0.611	-0.842	-0.853		
	0.001	0	0.027	0	0		
P (W)	0.184	0.11	0.501	0.146	0.11	0.238	
	0.547	0.72	0.081	0.635	0.72	0.433	



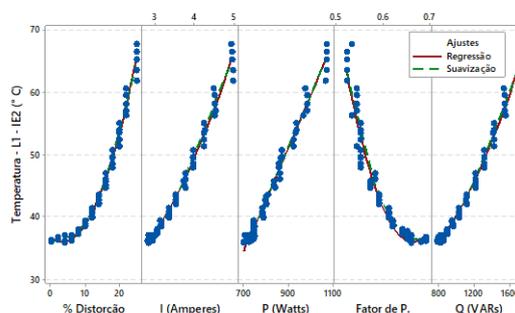
**Figura 0.70** Gráfico de Dispersão para 7ª harmônica – Motor classe IE4.

### 5.7.6. 2ª-3ª-5ª e 7ª harmônicas de forma combinada

A presença de várias harmônicas na tensão de alimentação resulto ser junto com a 2ª harmônica a pior para cada um dos motores, isso em relação a corrente de entrada, potências ativa e reativa como fator de potência. O incremento desses parâmetros resultará também em um incremento com a temperatura do motor, de acordo com a porcentagem e a tecnologia do motor analisada. A Figura 5.71 apresenta o incremento da temperatura versus cada incremento na porcentagem de distorção para o **motor elétrico classe IE2**. Pode-se observar o incremento considerável que tem a temperatura para cada 2% de distorção incrementada, onde a partir de uma temperatura próxima a 36 °C passa para quase 70 °C, isso como resultado de um incremento da corrente de 1,75 vezes seu valor inicial, o que incrementa as perdas e por tanto a temperatura da carcaça do motor, isso levara a danos e envelhecimento prematuro dos matérias dentro do motor. Com relação ao valores de correlação de Spearman, mostrados na Tabela 5.14 observa-se como os valores apresentam coeficientes altos, o que se observa pelo padrão de crescimento observado nos gráficos de dispersão.

**Tabela 5. 14** Matriz de Correlação 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor Classe IE2

IE2 - Todos	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0.976					
Corrente (A)	0.984	0.987				
Q (VAR)	0.972	0.998	0.967			
% THDi	0.97	0.997	0.984	0.997		
FP	-0.966	-0.993	-0.974	-0.991	-0.993	
P (W)	0.976	0.953	0.98	0.953	0.946	-0.936
	0	0	0	0	0	0

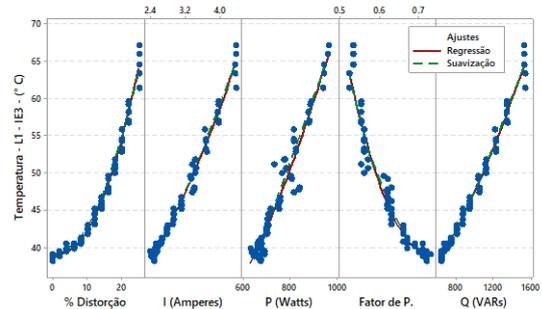


**Figura 0.71** Gráfico de Dispersão para 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor classe IE2.

Em relação ao **motor premium classe IE3**, a tabela 5.15 e a Figura 5.72 apresentam os coeficientes de correlação e os gráficos de dispersão para cada um dos parâmetros registrados. Pode-se observar a forte correlação existente entre as variáveis analisadas, onde o valor-p para cada uma delas é zero, anulando assim a hipótese nula planteada. Em relação à temperatura para este motor, ele passa de uma temperatura inicial de 38,07 °C para 67,08 °C, com incrementos de temperatura cada vez maiores para cada porcentagem de distorção. A potência ativa apresenta um crescimento bastante linear e o fator de potência crescem e decrescem de forma semelhante com cada incremento da temperatura.

**Tabela 5. 15** Matriz de Correlação 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor Classe IE3

IE3 - Todas	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0.995	0				
Corrente (A)	0.987	0.996	0			
Q (VAR)	0.989	0.996	0.993	0		
% THDi	0.976	0.981	0.971	0.975	0	
FP	-0.981	-0.986	-0.965	-0.979	-0.973	0
P (W)	0.931	0.928	0.955	0.934	0.908	-0.886
	0	0	0	0	0	0

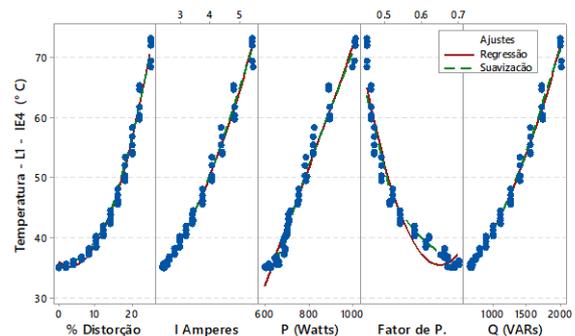


**Figura 0.71** Gráfico de Dispersão para 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor classe IE3.

Por último o **motor híbrido classe IE4** foi analisado com a combinação de todas as harmônicas estudadas individualmente, como com os outros motores, coeficientes de correlação altos foram obtidos, o que confirma a forte relação entre as variáveis analisadas A distorção apresenta maiores valores de correlação com a temperatura, com um coeficiente de Spearman de 0,996 (Tabela 5.16). O motor de ímãs permanentes mostrou as maiores temperaturas de operação passando de uma temperatura inicial de 35,1 °C até superar os 72 °C, isso pode ser justificado pelo incremento da corrente na qual chegou a ser 2,31 vezes a corrente inicial para o 25% de distorção. O Fator de potência também caiu para 0,45 para essa porcentagem.

**Tabela 5. 16** Matriz de Correlação 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor Classe IE4

IE4 - 2a	T (°C)	% Distorção	Corrente (A)	Q (VAR)	% THDi	FP
% Distorção	0.996	0				
Corrente (A)	0.993	0.996	0			
Q (VAR)	0.988	0.992	0.99	0		
% THDi	0.99	0.997	0.996	0.992	0	
FP	-0.973	-0.975	-0.972	-0.98	-0.973	0
P (W)	0.985	0.987	0.988	0.977	0.982	-0.949
	0	0	0	0	0	0



**Figura 0.73** Gráfico de Dispersão para 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos – Motor classe IE4.

Nesta seção foi mostrado o incremento da temperatura para cada harmônica inserida nos motores analisados no presente trabalho. Observou-se como a 2ª harmônica e a combinação de todas as harmônicas resultaram nos maiores incrementos de temperatura para cada um dos motores. Em base aos resultados apresentados, algumas conclusões podem ser enumeradas em relação à Temperatura.

- Observou-se como das harmônicas analisadas de forma individual, a segunda harmônica de sequência negativa resulto no maior incremento de todos os parâmetros e por tanto da temperatura.
- Que as harmônicas de sequência negativa (2ª e 5ª) resultam em maiores valores de corrente, temperatura e menor fator de potência para os motores analisados quando comparados com as harmônicas de sequência positiva (7ª) e zero (3ª) analisadas.
- Também foi observado como a temperatura de cada motor é proporcional a distorção de tensão aplicada e inversamente proporcional a ordem harmônica, isso sem considerar a 3ª harmônica que não teve um impacto considerável na temperatura.

Também uma análise de correlação entre as variáveis registradas durante os experimentos foi desenvolvida, como também gráficos de dispersão, que visaram analisar a relação entre as variáveis registradas entre cada estudo, a verificação do nível de significância para cada uma dessas relações, observou-se uma grande multicolinearidade entre elas, o qual deve ser considerado se chegasse a realizar uma regressão múltipla. A análise realizada para a criação dos modelos será apresentado na seção a seguir.

## **5.8. Modelos de Temperatura para cada Harmônica analisada.**

Durante o processo de conversão ocorrem perdas dentro do motor elétrico; enquanto a maior parte da corrente é convertida em energia mecânica necessária para acionar a carga conectada, parte dela é convertida em calor. Foi apresentado como alguns materiais isolantes são mais capazes de resistir ao calor, ou seja, têm maior capacidade térmica que outros, também na seção anterior mostra como a tecnologia do motor influencia na temperatura do motor, que para o caso do motor híbrido de ímãs permanentes menores temperaturas de operação foram observadas durante a maior parte dos experimentos. Como mencionado o material isolante é o mais vulnerável aos incrementos de temperatura, é por isso que é ele que define a classe de isolamento do motor.

O incremento de temperatura está intimamente ligado ao sistema de ventilação da máquina, que é o responsável de remover esse calor gerado. Essas perdas que se manifestam na forma de calor dependem tanto das condições de carga, bem como da qualidade da forma de onda vinda da concessionária. De acordo com [102], o tipo de fonte de tensão afeta

significativamente as perdas na máquina. Um motor alimentado pelo conversor de frequência tem maiores perdas em comparação com o motor alimentado por um suprimento puramente senoidal. Harmônicos em motores elétricos resultam em um aumento na temperatura de seus componentes, assim como uma diminuição na eficiência, esta energia adicional gerada circula nos enrolamentos do motor, contribuindo para as perdas internas de energia, que são dissipadas forma de calor, que com o tempo resultará na deterioração da capacidade de isolamento dos enrolamentos [12].

Durante a análise das grandezas registradas pelo analisador e a câmara infravermelha foi observado como esses parâmetros apresentavam certos padrões de comportamento, que variavam de acordo com a harmônica analisada. Com base nisso uma análise dos dados foi desenvolvida com o objetivo de criar modelos que representem o comportamento da temperatura de cada motor para cada uma das harmônicas e dos motores em estudo, e da qual a fundamentação teórica e procedimento utilizado foi ampliado no Capítulo 4. Os modelos a seguir mostram os modelos criados para cada motor analisado (IE2, IE3 e IE4) na presença de cada harmônica inserida na tensão de alimentação.

### **5.8.2. Resultados obtidos:**

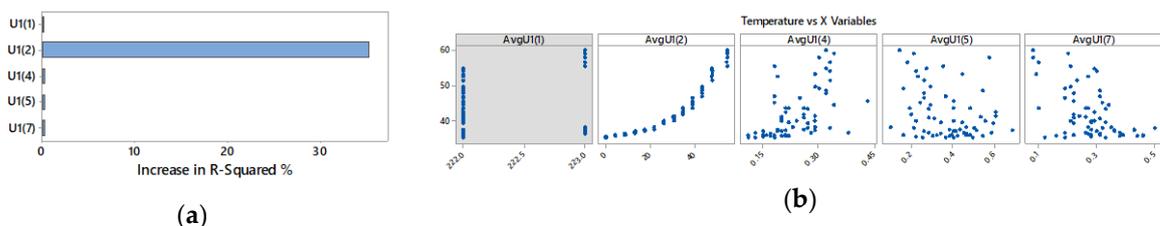
A seguir são apresentados os resultados gerados para cada harmônica de tensão inserida nos motores classes IE2, IE3 e IE4 analisados. Para analisar a influência desses harmônicos adicionais na temperatura de cada tecnologia, foi utilizada a regressão múltipla do software Minitab [97], que ajusta modelos lineares e quadráticos com até cinco variáveis preditoras e uma variável contínua usando estimativa por mínimos quadrados em um procedimento passo a passo. Essa seleção de modelo passo a passo é sem dúvida a melhor abordagem sob essa condição, pois permite que os termos sejam inseridos em uma etapa, mas removidos posteriormente, dependendo de outros termos incluídos no modelo. Os termos são inseridos ou removidos do modelo com base no valor de significância de  $\alpha = 0,10$  [97].

Para realizar a análise, a classe LSPMM IE4 é considerada com a presença de distorção de tensão de 2ª ordem. A temperatura lateral do motor apresentada na Figura 5.7 (a) é usada como variável para prever e cujo aumento é apresentado na Figura 5.62 e como variáveis preditoras, as distorções de tensão do 1ra U1 (1), 2da U1 (2), 4ta ordem U1 (4), 5ta U1 (5) e 7ma ordem U1 (7) foram consideradas devido à presença de corrente harmônicas na onda

senoidal analisada na seção 5.6. A Equação (1) apresenta o modelo para representar o aumento de temperatura para o IE4 LSPMM na presença de distorção de tensão de 2ª ordem.

$$\text{Temp}(\text{°C}) = 32.32 - 0.0924X_2 + 2.06X_2 + 7.83X_5 + 0.009398 * X_2^2 - 0.1036X_2X_4 - 32.6X_3X_5 \quad (1)$$

Onde  $X_2, X_3, X_4$  e  $X_5$  são a distorções de tensão de 2ª, 4ª, 5ª e 7ª ordem, respectivamente. Para verificar a adequação do modelo gerado, pode ser utilizado o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), que indica qual proporção da variação total da resposta Y é explicada pelo modelo ajustado. Um  $R^2$  ajustado igual a 0,9859 é obtido com o modelo apresentado em (1), também o valor de p é menor que 0,05, com o qual é possível rejeitar a hipótese nula e afirmar que existe uma relação entre essas variáveis. Para analisar o impacto incremental que cada tensão harmônica traz para o modelo, o aumento no  $R^2$  ajustado com cada variável preditora é apresentado na Figura 5.74 (a). Embora as distorções de tensão de 4ª, 5ª e 7ª ordem estejam presentes no modelo de forma de onda e equação, elas não contribuem significativamente para o ajuste do modelo, sendo a segunda distorção harmônica a que melhor representa o aumento de temperatura para cada porcentagem de distorção, conforme apresentado na Figura 5.74 (b).



**Figura 0.74** (a) Impacto incremental da distorção da tensão na temperatura (barras longas representam um preditor que contribui com as informações mais novas para o modelo); (b) Preditores usados no modelo (um fundo cinza representa uma variável X que não está no modelo).

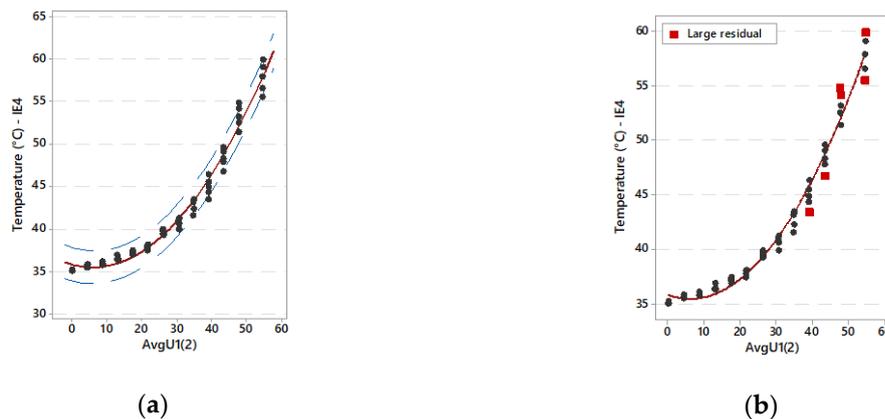
Com base no exposto, é possível reduzir a equação do modelo gerado para a temperatura considerando apenas a segunda distorção harmônica de tensão sem significar uma redução considerável no valor do  $R^2$  ajustado. A equação do modelo resultante ao considerar apenas a tensão do 2º harmônico como variável preditora de temperatura é apresentada em (2).

$$\text{Temp} (\text{°C}) = 35.84 - 0.1199X + 0.009547X^2 \quad (2)$$

Onde X é a distorção de tensão de 2ª ordem. Para o modelo apresentado em (2), obtém-se um  $R^2$  ajustado = 0,9822, também com um valor de p menor que 0,05. A diminuição nas

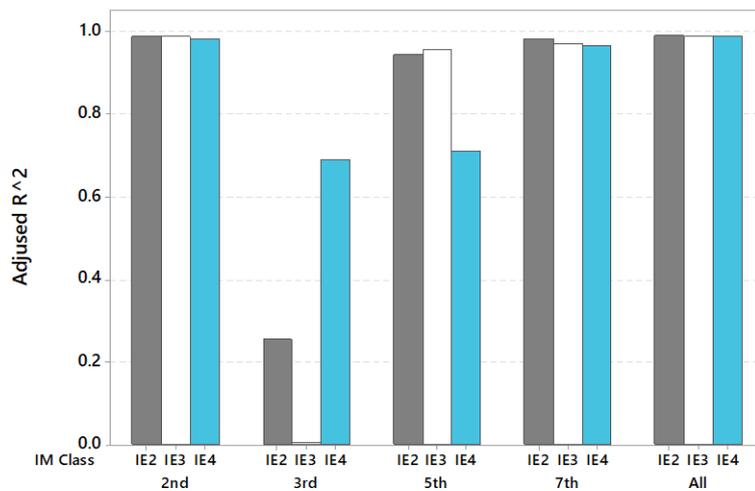
variáveis preditoras traz uma redução nos termos da equação para o modelo de temperatura, mas também resulta em uma diminuição no valor ajustado de  $R^2$ , no entanto, o modelo representa de maneira totalmente aceitável o aumento da temperatura para cada aumento na segunda distorção harmônica de tensão.

A Figura 5,75 (a) apresenta a curva de previsão do IE4 LSPMM para a distorção de tensão de 2ª ordem, onde a linha ajustada vermelha mostra a temperatura prevista para qualquer distorção de tensão de 2ª ordem e as linhas tracejadas azuis mostram o intervalo de previsão de 95%. Na figura 5,75 (b), é apresentada a mesma curva com grandes resíduos em vermelho, esses pontos não são bem ajustados pelo modelo, isso se deve ao fato de a temperatura ter sofrido  $\Delta T$  mais altos, principalmente pelas maiores porcentagens de distorção, pelo que a os pontos da amostra sofreram grandes desvios em relação à linha de regressão à medida que a distorção atual aumenta.



**Figura 0.75** (a) Gráfica de previsão de temperatura versus distorção de 2da harmônica para um intervalo de confiança de 0;95; (b) Gráfico de previsão mostrando grandes resíduos para os pontos no modelo criado.

Essa análise foi realizada para a criação dos modelos de distorção de temperatura versus tensão para cada harmônico analisado, desde que isso não signifique uma redução para o ajuste do modelo. A Figura 5.76 apresenta os valores de  $R^2$  ajustados para cada modelo criado, e a Tabela 5.17 apresenta os resultados dos modelos criados.



**Figura 0.77** Valores de  $R^2$  ajustado para motores classes IE2, IE3 e IE4 na presença de harmônicas de 2°, 3°, 5° e 7° harmônicos de tensão.

Em relação aos modelos criados para cada harmônico analisado, o resumo de cada um deles é apresentado na Tabela 5.17. O primeiro valor corresponde ao intercepto ( $\beta_0$ ), mostrado no capítulo 4, e conforme observado nos resultados, é o valor a partir do qual a temperatura começa a sofrer  $\Delta T$  maiores à medida que a porcentagem de harmônica é inserida, o valor de  $\beta_0$  presente em cada modelo variou a partir do 2% até 6% de distorção para a maioria das harmônicas analisadas. Para a segunda harmônica, observa-se como os modelos apresentaram termos quadráticos, justificados por um melhor valor do  $R^2$  ajustado, como apresentado na Figura 5.74, e com coeficientes acima de 98%, como apresentado. Esse cenário foi distinto para a terceira harmônica, que apresentou valores de 25,54% e 0,48% para os motores classes IE2 e IE3. O motor híbrido já apresenta um padrão de variação que pode ser ajustado com maior precisão pelo modelo criado. Porém com um  $R^2$  ajustado menor que 0,70

O incremento da temperatura versus distorção para as harmônicas de 5ª e 7ª ordem apresentaram relações aproximadamente lineares, pelo qual, em parte dos modelos gerados não foi necessária uma componente quadrática, como apresentado. O motor híbrido de ímãs permanente apresentou a menor precisão do modelo, com um  $R^2$  ajustado de 71% para a quinta harmônica, com o qual, deve ser avaliada a influência de algum outro parâmetro na temperatura do mesmo.

A combinação de todas as harmônicas resultou em modelos que logram representar com uma alta precisão a variação de temperatura com a presença destas harmônicas, como o caso da

segunda harmônica, que influencia consideravelmente sobre as outras presentes, o modelo apresenta termos quadráticos.

**Tabela 5. 17** Resumo modelos de Temperatura versus Distorção para cada harmônica analisada.

Ordem Harmônica	Classe IM	Equação do Modelo	R <sup>2</sup> ajustado
2 <sup>nd</sup>	IE2	$T (^{\circ}C) = 37.77 - 0.1052 X_2 + 0.008128 X_2^2$	98.94%
	IE3	$T(^{\circ}C) = 40.38 - 0.05692 X_2 + 0.006554 X_2^2$	98.69%
	IE4	$T (^{\circ}C) = 35.84 - 0.1199 X_2 + 0.009547 X_2^2$	98.27%
3 <sup>rd</sup>	IE2	$T (^{\circ}C) = 37.81 + 1.424 X_3$	25.54%
	IE3	$T(^{\circ}C) = 38.9 + 0.5120 X_3$	0.48%
	IE4	$T(^{\circ}C) = 33.60 + 22.21 X_3 - 44.58 X_3^2$	68.93%
5 <sup>th</sup>	IE2	$T(^{\circ}C) = 37.43 + 0.0965 X_5$	94.55%
	IE3	$T(^{\circ}C) = 41.11 + 0.1105 X_5$	95.57%
	IE4	$T (^{\circ}C) = 37.12 + 0.07724 X_5$	71%
7 <sup>th</sup>	IE2	$T(^{\circ}C) = 38.94 + 0.06673 X_7$	98.23%
	IE3	$T(^{\circ}C) = 42.40 + 0.02418 X_7 + 0.001114 X_7^2$	97.21%
	IE4	$T(^{\circ}C) = 39.74 + 0.02029 X_7 + 0.000862 X_7^2$	96.49%
Todos Combinados	IE2	$T(^{\circ}C) = 38.545 + 1.876 X_2 - 8.17 X_4 - 2.239 X_5 - 0.0380 X_2^2 + 0.0557 X_5^2 + 0.354 X_4 X_5$	99.15%
	IE3	$T(^{\circ}C) = 39.147 - 0.0654 X_2 + 0.009538 X_2^2$	98.79%
	IE4	$T(^{\circ}C) = 36.361 + 2.65 X_2 - 3.03 X_5 + 0.1077 * X_5^2 - 0.0861 X_2 X_5$	98.83%

Atualmente, o uso da termografia tornou-se uma das ferramentas mais poderosas para a manutenção preditiva das instalações e equipamentos elétricos. É importante lembrar que cada motor é projetado para operar em uma temperatura específica, neste estudo que envolveu distintas tecnologias e eficiências em motores elétricos, foi observado que cada classe de eficiência apresenta temperaturas distintas de operação, sendo estas menores para as maiores classes de eficiência.

A metodologia aplicada para este trabalho analisou a temperatura dos motores em condições de alimentação sem distorção, como com a presença de distintas harmônicas. Em condições ideais, a inspeção do motores deve ser realizada no estado de operação normal e com a carga projetada para o mesmo, assim e mesmo que a câmera infravermelha não seja capaz de ver o interior do motor, a temperatura da carcaça é um indicativo da temperatura interna dele. Com isso o especialista, pode utilizar as imagens térmicas exteriores para identificar condições de operacionais anormais como ser problemas no acoplamento, fluxo de ar inadequado ou

inexistente, falta dos enrolamentos etc. A criação dos modelos apresentados neste estudo representa uma contribuição para a literatura tanto no âmbito teórico como prático do comportamento de motores elétricos de distintas classes de eficiência na presença de distorções harmônicas na tensão de alimentação.

# Capítulo 6 - Conclusões

## 6.1. Conclusões

Considerando o interesse global para atingir maiores índices de eficiência energética e a futura substituição dos motores elétricos existentes, o presente trabalho mostrou um estudo do impacto das harmônicas de tensão no desempenho de motores elétricos de distintas classes de eficiência. Os resultados dos testes evidenciaram que um menor consumo e temperatura são obtidos com motores elétricos de maiores eficiências.

Com relação aos harmônicos, os resultados mostraram que das harmônicas individuais inseridas em cada motor, a 2ª harmônica de tensão é mais prejudicial para os motores elétricos, resultando incrementos de até o dobro da corrente sem distorção para a mesma porcentagem de carga, o que resulta em maiores perdas e uma maior temperatura de operação. As harmônicas de 5ª, 7ª ordem também resultam em incrementos no consumo de cada motor, pequenas diminuições no fator de potência e incremento na temperatura da carcaça de cada motor. A 3ª harmônica que não apresentou um impacto notável nas tecnologias classes IE2 e IE3 analisadas, resultou em variações nos parâmetros do motor híbrido classe IE4. Também em relação ao motor híbrido, foi observado como em condições de alimentação ideal e de baixa distorção harmônica, apresenta melhoras significativas em relação a consumo e temperatura, com principais dificuldades no momento de arranque, principalmente com carga conectada. Mas com a presença de algumas harmônicas a resposta dessa tecnologia resulta ser pior quando comparada com as tecnologias das classes IE2 e IE3.

Também foi observado como o motor híbrido classe IE4, sem a presença de harmônicas na tensão de alimentação apresentava uma distorção harmônica de corrente de quase 8%, já na presença de harmônicos na tensão, além de incrementar o porcentagem de harmônico presente, produziu harmônicos de 4ª, 5ª, 7ª e 11ª ordem, de acordo com o harmônico presente, esse fato também foi observado nos motores classes IE2 e IE3, porém quando submetidos a maiores porcentagens de distorção. Em relação a análise termográfica realizada foi observado como a temperatura de cada motor é proporcional a distorção de tensão aplicada e inversamente proporcional a ordem harmônica, isso sem considerar a 3ª harmônica que não teve um impacto considerável na temperatura.

No presente trabalho também foram analisada a relação dos parâmetros do motor com a temperatura da carcaça com o objetivo de criar modelos. Observou-se como a variação da temperatura do motor na presença das harmônicas de 2<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> apresentam uma boa estimativa entre a temperatura e a porcentagem de distorção inserida no motor. Já a terceira não resulto em uma boa aproximação para os modelos criados, pelo qual seu uso não é recomendado.

A análise de temperatura também mostro como existem harmônicas que resultam em incrementos em grandes incrementos de temperatura, que resultaram ser maiores para as harmônicas de sequência negativa.

O estudo também demostro como a introdução de novas tecnologias, com melhorias nos materiais e nas técnicas de produção resulta em uma maior eficiência de produção por kWh consumido devido as melhoras em consumo demandado pelos motores com melhores eficiências. Porém, para a substituição de um motor antigo classe IE2 ou de menores eficiências, algumas considerações devem ser realizadas:

- A primeira é uma análise da qualidade do subministro elétrico no lugar de instalação dos motores elétricos, para verificar a presença de harmônicas na tensão de alimentação. Foi observado neste estudo como o motor híbrido classe IE4, na presença de harmônicas de tensão, apresenta um comportamento não linear, onde com pequenas distorções de tensão produz um incremento da harmônica presente como a aparição de outras harmônicas, de acordo com a harmônica inserida. Em condições de altos porcentagens de distorção no local de instalação poderia ter um impacto na forma de onda da tensão, dependendo do nível de curto circuito da rede.
- O tipo de aplicação do motor também deve ser considerada. Para o motor híbrido, classe IE4, foi observado no momento da partida uma dificuldade para partir com carga, isso pode ser crítico principalmente para aplicações com frequentes ciclos de partida/parada.
- Para possíveis substituições dever ser considerada a parte econômica, o tempo de operação do motor antigo com o objetivo de verificar o *payback* devido aos altos custos dos motores com imãs permanentes em relação aos motores de indução convencionais. Atualmente no mercado brasileiro, o valor do motor classe IE3 para o classe IE2 é de 1,1 até 1,3 seu custo. Enquanto para o motor classe IE3, é de 1,3 vezes o custo do motor classe IE2 [105].

Por último e considerando o panorama energético Brasileiro com o novo patamar de eficiencia (Classe IE3) para motores elétricos em vigor desde agosto de 2019, o estudo

apresentado mostrou de forma geral como o motor de indução classe IE3 resulta em melhoras consideráveis com relação à classe IE2, com e sem a presença de distorções harmônicas analisadas neste estudo, com relação ao motor classe IE4, em condições ideais de operação apresenta o melhor desempenho, porém com a presença de harmônicos de tensão se torna o pior, com dificuldades na partida e características não lineares, pelo qual estudos aprofundados considerando motores de distintas potências é recomendado para o governo antes de inserir a classe IE4 com a tecnologia de ímãs permanentes.

- **6.1. Trabalhos Futuros**

Para trabalhos futuros relacionados a esta dissertação, seguem as seguintes sugestões:

- Comparar as novas tecnologias existentes além dos LSPMM's, como ser o motor de relutância síncrona e o motor de rotor de cobre, e analisar sua resposta ante condições de distorção e desequilíbrio e seu impacto na qualidade da energia.
- Analisar a resposta de distintas classes de eficiência ante outros distúrbios como ser desequilíbrios, afundamentos e elevações de tensão, principalmente seu impacto na velocidade síncrona do motor de ímãs permanentes.
- Realizar uma análise estatística sobre as bases de dados registradas com o objetivo de criar modelos que representem a resposta em temperatura de cada motor e ante a presença de desequilíbrio na tensão de alimentação.
- Comparar o desempenho de motores elétricos rebobinados com motores elétricos eficientes, visando as diferenças econômicas e técnicas entre substituir e reparar motores da mesma potência.
- Realizar estudos sobre o decremento do fator de potência em relação com o incremento da eficiência em motores elétricos.
- Analisar a relação que existe entre eficiência e qualidade, foi observado que a maior eficiência a qualidade da energia diminui.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. György and K. A. Biró, "Genetic Algorithm based design optimization of a three-phase induction machine with external rotor," 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), Side, 2015, pp. 462-467.
- [2] Ministério de Minas e Energia – Plano Nacional de Eficiência Energética. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica>> Último acesso em fevereiro, 2020.
- [3] *IEC Rotating Electrical Machines – Part 30-1*, IEC 60034-30-1, 2014.
- [4] IEA, Energy Efficiency 2018, Analysis and outlooks to 2040. Disponível em <"<http://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2018/11/Energy-efficiency-2018.pdf>"> [Acesso em dezembro, 2018]
- [5] Melo, Conrado & Jannuzzi, Gilberto & Januzzi, Martino (2009). PADRÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE USO RESIDENCIAL NO BRASIL. *Revista Brasileira de Energia*. 15. 51-71.
- [6] Procelinfo – Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=&params=itemID=%7B726E91D1-882A-47C5-9358-F32598E99851%7D; &UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>; [Acesso em fevereiro de 2018]
- [7] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, "Premium Efficiency motor selection and application guide, A handbook for industry". Disponível em: <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo\\_motors\\_handbook\\_web.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf)> [Acesso em Fevereiro de 2018]
- [8] S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta, *Electric Power Quality*, vol. I. New York: Springer, 2011, p. 6.
- [9] Fuchs, F.E., Masoum, Mohammad A. S, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Perth, WA, Australia, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica"

- [10] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica”
- [11] Vedam, R. Sastry, Sarma, Mulukuta S. “Power Quality VAR Compensation in Power Systems” Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2008.
- [12] Debruyne, C. (2014). Impact of voltage distortion on energy efficiency of induction machines and line start permanent magnet machines. Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, Ghent, Belgium.
- [13] R. Werle, “Swiss audit program ‘Easy,’ Presentation Slides, Motor Summit, Zurich, Switzerland, Oct. 2014.
- [14] *IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, IEEE Standard 112, 2017*
- [15] H. M. Mzungu, A. B. Sebitosi and M. A. Khan, "Comparison of Standards for Determining Losses and Efficiency of Three-Phase Induction Motors," *2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa - PowerAfrica*, Johannesburg, 2007, pp. 1-6.
- [16] G. Cummings, Paul & D. Bowers, W & J. Martiny, Walter. (1981). Induction Motor Efficiency Test Methods. Industry Applications, IEEE Transactions on. 17. 253 - 272.
- [17] Esen, Güvenir Kaan & Ozdemir, Engin, “A Case Study of Determining Energy Efficiency in Squirrel Cage Induction Motor According to IEC 60034-2-1:2014 Standard,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2016, pp. 1-6
- [18] M. Doppelbauer, “Measurement Uncertainty of Direct and Indirect Efficiency Testing of Induction Machines”, Presentation Slides, EEMODS’15 CONFERENCE, Helsinki, Finland, September 2015.
- [19] Lu, Shyi-Min, “A review of high-efficiency motors: Specification, policy, and technology”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016
- [20] A. Komura, “Development of IE5 High Efficiency Motor with Iron-base Amorphous Magnetic Cores”, Presentation Slides, EEMODS’15 CONFERENCE, Helsinki, Finland, September 2015.
- [21] J. Pyrhonen, J. Vauterin, J. Montonen, P. Lindh, “At the Cusp of the Next Electric Motor Revolution: Replacing Copper with Carbon Nanomaterials”, Presentation Slides, EEMODS’15 CONFERENCE, Helsinki, Finland, September 2015.

- [22] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira and G. Baoming, "Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 2103-2114, May-June 2014.
- [23] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira and A. Q. Duarte, "Technical and Economic Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, pp. 1274-1285, March-April 2014.
- [24] F. J. T. E. Ferreira, G. Baoming and A. T. de Almeida, "Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 4628-4637, Nov.-Dec. 2016.
- [25] E. C. de Lima, J. M. de Carvalho Filho and J. S. de Sá, "Diagnosis of induction motors operating under distorted and unbalanced voltages," 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016, pp. 786-791.
- [26] LIAO, YUEFENG & Lipo, Thomas. "Effect of saturation third harmonic on the performance of squirrel-cage induction machines," *Electric Machines and Power Systems - ELEC MACH POWER SYST.* 22. 155-171, 1994.
- [27] *IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, IEEE Standard 519, 1993*
- [28] A. D. Rodriguez, F. M. Fuentes and A. J. Matta, "Comparative analysis between voltage unbalance definitions," 2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA), Bogota, 2015, pp. 1-7.
- [29] P. Pillay and M. Manyage, "California Electricity Situation," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 5, pp. 10-12, May 2001.
- [30] A. B. F. Neves, M. V. B. de Mendonça, A. d. L. Ferreira Filho and G. Z. Rosa, "Effects of voltage unbalance and harmonic distortion on the torque and efficiency of a Three-Phase Induction Motor," 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016, pp. 943-948.
- [31] X Ching-Yin Lee, Bin-Kwie Chen, Wei-Jen Lee and Yen-Feng Hsu, "Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition," 1997 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Conference Record, Philadelphia, PA, USA, 1997, pp. 51-59.
- [32] J. Rengifo, H. Salazar, A. Bueno and J. M. Aller, "Experimental evaluation of the voltage unbalance in the efficiency of induction motors," 2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), Bogota, 2017, pp. 1-6.

- [33] V. Sousa Santos *et al.*, "Bacterial Foraging Algorithm application for induction motor field efficiency estimation under harmonics and unbalanced voltages," *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, Chicago, IL, 2013, pp. 1108-1111.
- [34] M. Seera, C. P. Lim, D. Ishak and H. Singh, "Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors Using Motor Current Signature Analysis and a Hybrid FMM–CART Model," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 97-108, Jan. 2012.
- [35] DOTH Motores. Disponível em:<  
<https://www.dothmotores.com.br/p.php?v=b1b615d7d905c0641e09afeb63a6346c> >
- [36] Acesso em 26 de fevereiro de 2020.
- [37] M. J. Melfi, S. D. Rogers, S. Evon and B. Martin, "Permanent Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications," *2006 Record of Conference Papers - IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Philadelphia, PA, 2006, pp. 1-8.
- [38] X. Feng, L. Liu, J. Kang and Y. Zhang, "Super-premium efficient line start-up permanent magnet synchronous motor," *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, 2010, pp. 1-6.
- [39] Process Industry Informer, "WEG DESARROLLARA EL ENFOQUE POST-NORMAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA CON DISEÑOS HIBRIDOS QUE ESTABLECEN NUEVOS PUNTOS DE REFERENCIA EN LA EFICIENCIA" 23 de março de 2012, Disponível em:<<https://es.processindustryinformer.com/weg-developers-post-standards-approach-to-energy-saving-with-hybrid-designs-that-set-new-benchmarks-for-efficiency/>> Acesso em 18 de fevereiro de 2019.
- [40] XYLEM, "PREMIUM EFFICIENCY MOTORS". Disponível em:<  
<https://www.xylem.com/en-us/brands/flygt/flygt-engineering--expertise/pump-technologies/motors/premium-efficiency-motors/>> Acesso em 18 de fevereiro de 2019.
- [41] Abu Saad, Samieh (2015) "*The Utilisation of Information Available in a Sensorless Control System of an AC Induction Motor for Condition Monitoring*". Doctoral thesis, University of Huddersfield.
- [42] POLARIS LASER LAMINATIONS, "Motor Laminations". Disponível em:<  
<http://www.polarislaserlaminations.com/motor-laminations.html>> Acesso em 18 de fevereiro de 2019.

- [43] TIC GALICIA, “El motor de jaula de ardilla, la base de coches eléctricos”. Disponível em:< <http://www.ticgalicia.com/2016/06/el-motor-de-jaula-de-ardilla-la-base-de.html>> Acesso em 18 de fevereiro de 2019.
- [44] L Kosow, Irving. (1991). Máquinas eléctricas y transformadores.
- [45] C. Fernández, M. “Identification of mathematical model parameters of induction motor”. Kraków, 2016. Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Biomedical Engineering. Oviedo, Espanha.
- [46] DIY Trade, “Electrical steel lamination cores” Disponível em:< [https://www.diytrade.com/china/pd/12826959/electrical\\_steel\\_core\\_lamination\\_cores.htm](https://www.diytrade.com/china/pd/12826959/electrical_steel_core_lamination_cores.htm) l> Acesso em 18 de fevereiro de 2019.
- [47] Standard Specifications for Permanent Magnet Materials, MMPA Standard 100-00, Aug. 1990.
- [48] Hassanpour Isfahani, Arash & Vaez-Zadeh, Sadegh. (2009). Review: Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. *Energy*. 34. 1755-1763. 10.1016/j.energy.2009.04.022.
- [49] WEG, “Motores, Aplicações Industriais”. Disponível em:< <https://www.helenge.com.br/uploads/8ea931f8798f83cee1963c70dbbdd802.pdf>> Acesso em 20 de fevereiro de 2019.
- [50] WEG, “W22 Quattro, Rendimento IR4 Super Premium”. Disponível em:< <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h81/hc8/WEG-w22-quattro-rendimento-ir4-super-premium-50025714-brochure-portuguese-web.pdf>> Acesso em 20 de fevereiro de 2019.
- [51] EiTB, “Así se fabrican los motores eléctricos”. Disponível em:< <https://www.youtube.com/watch?v=QfNrEBODs3s>> Acesso em 22 de fevereiro de 2019.
- [52] Chapman, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [53] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci and A. Ometto, "Uncertainty Issues in Direct and Indirect Efficiency Determination for Three-Phase Induction Motors: Remarks About the IEC 60034-2-1 Standard," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 12, pp. 2701-2716, Dec. 2016.
- [54] Sumper, A., Baggini, A. “Electrical Energy Efficiency, Technologies and applications” 1<sup>st</sup> Edition, United Kingdom, Wiley & Sons, Ltd. 2012.

- [55] Sauer, Ildo L. & Tatizawa, Hédio & Salotti, Francisco A.M. & Mercedes, Sonia S., 2015. "A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 41(C), pages 308-318.
- [56] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 621-630, Jan. 1988.
- [57] Wen-Chang, T. "Estimation of Core Losses in an Induction motor under PWM Voltage Excitations Using Core Loss Curves Tested by Epstein Specimens". International Forum on Systems and Mechatronics, 2007.
- [58] Hanne, J., Nerg, J., Pyrhönen, J., "Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Motor for Industrial Use., XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome
- [59] Ferreira, Fernando & Cistelecan, M.V. & de Almeida, Aníbal. (2019). Voltage Unbalance Impact on the Performance of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors.
- [60] K. J. Tseng and S. B. Wee, "Analysis of flux distribution and core losses in interior permanent magnet motor," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 969-975, Dec. 1999.
- [61] Shashi Bhushan Singh & Asheesh K. Singh (2013) Steady-state Performance Assessment of Induction Motor under Unbalanced Voltage Condition, *Electric Power Components and Systems*, 41:13, 1248-1263
- [62] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," in *IEEE Std 1159-1995*, vol., no., pp. i-, 1995
- [63] POWER System Harmonic Analysis. [S. l.: s. n.], 18 fev. 2018.
- [64] VASUDEVAN, Krishna; G. SRIDHARA, Rao; P. SASIDHARA, Rao. "Harmonics in Induction Machines." Disponível em <<https://nptel.ac.in/course.php>> Último acesso em fevereiro 2019.
- [65] X. Liang and Y. Luy, "Harmonic Analysis for Induction Motors," 2006 *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa, Ont., 2006, pp. 172-177.

- [66] Y. Kawase, T. Yamaguchi, Z. Tu, N. Toida, N. Minoshima and K. Hashimoto, "Effects of Skew Angle of Rotor in Squirrel-Cage Induction Motor on Torque and Loss Characteristics," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1700-1703, March 2009.
- [67] Koprivica, Branko & Milovanovic, Alenka & Brkovic, Vladimir. (2016). ELECTRICAL STEEL TESTING USING MODIFIED EPSTEIN FRAME.
- [68] A. Krings and J. Souldard, "Experimental characterization of magnetic materials for electrical machine applications," *2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Torino, 2015, pp. 85-89.
- [69] IEC 60404-2, "Magnetic materials – Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame", International Electrotechnical Commission, June 2008.
- [70] IEC 60404-3, "Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester", International Electrotechnical Commission, April 2010.
- [71] Kefalas, Themistoklis & K b Papazacharopoulos, Z & Kladas, A. (2012). Experimental and theoretical analysis of iron losses of electrical steels subjected to distorted supply voltage waveform conditions. *Materials Science Forum*. 721. 171-176.
- [72] PIRES, Igor Amariz. "Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais – Parte II". Disponível em < <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-iii-efeitos-de-harmonicos-no-sistema-de-distribuicao-e-limites-segundo-as-principais-normas-nacionais-e-internacionais-parte-ii/>> , O Setor Elétrico, 2010
- [73] Singh, G.K. (2005). A research survey of induction motor operation with non-senoidal supply wave forms. *Electric Power Systems Research*. 75. 200-213. 10.1016/j.epsr.2005.04.001.
- [74] Hassanpour Isfahani, A., & Vaez-Zadeh, S. (2009). Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. *Energy*. Elsevier Ltd.

- [75] Taylor, N “Network effects of line start permanent magnet synchronous motors as replacements for induction motors.” MSc Thesis, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). Stockholm Swedeen.
- [76] NEMA, “Motors and generators,” NEMA Standards Publication No. MG1-2009.
- [77] Ching-Yin Lee, "Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 202-208, June 1999.
- [78] Miloje Kostic. “Effects of Voltage Quality on Induction Motors Efficient Energy Usage”. Disponível em< <https://www.intechopen.com/books/induction-motors-modelling-and-control/effects-of-voltage-quality-on-induction-motors-efficient-energy-usage>> Novembro, 2012.
- [79] Zhang, Dongdong & An, Ruichi & Wu, Thomas. (2017). Effect of Voltage Unbalance and Distortion on the Loss Characteristics of Three Phase Cage Induction Motor. IET Electric Power Applications.
- [80] D. Kouchih, R. Hachelaf, O. Benzineb, M. Tadjine and M. S. Boucherit, "Diagnosis of cage induction motors subject to unbalanced supply voltage conditions including space and time harmonics," *14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering - STA'2013*, Sousse, 2013, pp. 486-492.
- [81] M. Dupuis, N. Mahoney, A. Padmanabhan and K. Bhuvaneshwaran, "Negative-sequence overcurrent considerations for induction motor loads," *2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, 2017, pp. 1-8.
- [82] Kini, Giridhar & Bansal, Ramesh & S. Aithal, R. (2006). Impact of voltage unbalance on the performance of three-phase induction motor. *The South Pacific Journal of Natural Science*. 24. 10.1071/SP06007.
- [83] Mendes, André & Quispe, Enrique & Lopez-Fernandez, Xose M. & Cardoso, A.J.M.. (2010). Influence of the positive sequence voltage on the temperature of three-phase induction motors. 1-6.

- [84] REZENDE, P. H. O.; SAMESIMA, M. I. “EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES DE SUPRIMENTOS NOS MOTORES DE INDUÇÃO”. *Horizonte Científico (Uberlândia)*, v. 6, p. 1-30, 2012.
- [85] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira and J. A. C. Fong, "Standards for Super-Premium Efficiency class for electric motors," *Conference Record 2009 IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, Calgary, AB, 2009, pp. 1-8.
- [86] Norma IEC 61000-2-4 (2002-06) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.
- [87] Mendes, André & Quispe, Enrique & Lopez-Fernandez, Xose M. & Cardoso, A.J.M.. (2010). Influence of the positive sequence voltage on the temperature of three-phase induction motors. 1-6.
- [88] J. Balcells, “Aspectos Técnico-económicos de la calidad de Suministro eléctrico, Asesor Técnico de CIRCUTOR S.A.
- [89] IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, IEC 61000-4-30, 3rd edition; committee draft for vote, 2014.
- [90] IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurements techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements [...], IEC 61000-4-7: 2002 + A1: 2008.
- [91] F. Ferreira and A. De Almeida. Technical and Economic Considerations on Line-Start PM Motors including the Applicability of the IEC60034-2-1 Standard, In 7th Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS’11), Alexandria, USA, 2011.
- [92] P. Nantivatana, W. Kongyim, P. Tasungnuen, P. Nivorn and P. Kocharoen, "Efficiency estimation of on-service three-phase induction motors using infrared thermography," *2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Chiang Mai, 2018, pp. 1-3.

- [93] FLIR T620 - Thermal imaging guidebook for industrial applications. Disponível em < [https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264\\_EN.pdf](https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_EN.pdf)> Acessado em 11 de março de 2019.
- [94] I. Peter, G. Scutaru and C. G. Nistor, "Manufacturing of asynchronous motors with squirrel cage rotor, included in the premium efficiency category IE3, at S.C. Electroprecizia Electrical-Motors S.R.L. Săcele," 2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Bran, 2014, pp. 421-425.
- [95] Zawilak, Tomasz & Zawilak, Jan. (2008). MINIMIZATION OF HIGHER HARMONICS IN LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR. Przegląd Elektrotechniczny.
- [96] GIOVANI GLAUCIO DE OLIVEIRA COSTA, Curso de Estatística Inferencial e Probabilidades Teoría e Prática. Editora Atlas, São Paulo, 2012.
- [97] Minitab 18 Statistical Software (2010). [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. ([www.minitab.com](http://www.minitab.com)).
- [98] Minitab 18, "Uma comparação dos métodos de Correlação de Pearson e Spearman, Disponível em < <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/correlation-and-covariance/a-comparison-of-the-pearson-and-spearman-correlation-methods/>> Acessado em 1 de Julio de 2019.
- [99] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). Probability & statistics for engineers & scientists (9th edition.). Boston: Prentice Hall.
- [100] Devore, J. L. (2016). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (9a. ed.). Distrito Federal: CENGAGE Learning.
- [101] Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A., Hano, R. M. C., & López, A. T. (2008). Estadística para administracion y economia. México: Cengage Learning.
- [102] Support Minitab 18, "Regressão Simples em Minitab". Disponível em < <https://support.minitab.com/es->

[mx/minitab/18/Asistente\\_Regresi%C3%B3n\\_m%C3%BAltiple.pdf](mx/minitab/18/Asistente_Regresi%C3%B3n_m%C3%BAltiple.pdf)> Acessado em 01 de julho de 2019.

- [103] H. V. Khang, J. Saari and A. Arkkio, "Form-wound stator winding for high-speed induction motors," *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, 2014, pp. 169-175. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960176
- [104] Zhang, Yu & Cheng, Ming-Cheng & Pillay, P.. (2009). Magnetic Characteristics and Excess Eddy Current Losses. Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). 1 - 5. 10.1109/IAS.2009.5324814.
- [105] WEG- Substituição de Motores Elétricos <<https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp>> Último Acesso em 28/02/2020.

## ANEXO A: Placas de dados Motores Utilizados



(a)



(b)



(c)

**Figura A.1** Placas características de motores elétricos em estudo: (a) Motor Classe IE2; (b) Motor Classe IE3; (c) Motor Classe IE4

