

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO AS NORMAS ABNT 17094-3:2018, IEC 60034-2-1:2014 E  
IEC/TS 60034-2-3:2013

Leandro Braz de Sousa

Niterói  
Janeiro de 2020

UFF - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO AS NORMAS ABNT 17094-3:2018, IEC 60034-2-1:2014 E  
IEC/TS 60034-2-3:2013

Leandro Braz de Sousa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade  
Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof: Felipe Sass, D.Sc.  
Coorientador: Prof. Márcio Zamboti Fortes, Dr.

Niterói

Janeiro de 2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D278c De sousa, Leandro Braz  
Comparação Dos Métodos De Ensaio De Motores De Indução Trifásicos Utilizando As Normas ABNT 17094-3:2018, IEC 60034-2-1:2014 e IEC/TS 60034-2-3:2013 / Leandro Braz De sousa ; Felipe Sass, orientador ; Márcio Zamboti Fortes, coorientador. Niterói, 2020.  
166 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2020.m.13193189758>

1. Eficiência energética. 2. Sistemas de Energia Elétrica. 3. Produção intelectual. I. Sass, Felipe, orientador. II. Zamboti Fortes, Márcio, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

LEANDRO BRAZ DE SOUSA

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO AS NORMAS ABNT 17094-3:2018, IEC 60034-2-1:2014 E  
IEC/TS 60034-2-3:2013

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade  
Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Felipe Sass, D.Sc.

UFF

---

Prof. Márcio Zamboti Fortes, Dr.

UFF

---

Prof. Bruno Wanderley França, D.Sc.

UFF

---

Prof. Rodrigo Flora Calili, D.Sc.

PUC

Niterói

Janeiro de 2020

# Dedicatória

*Dedico este trabalho a minha mãe Maria de Fátima e ao meu pai Alfredo, que não tiveram a oportunidade de estudar durante a infância e conseguiram me guiar para que eu chegasse até aqui. Sabendo que o estudo é a base de todo o conhecimento.*

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter me guiado por toda minha trajetória me dando sabedoria para compreender e superar meus obstáculos.

Aos meus pais e irmãs, pelo apoio incondicional de vocês, mesmo eu estando distante de todos eu jamais teria conseguido concluir mais essa etapa em minha vida sem a ajuda de vocês. Um agradecimento especial também a toda a família que sempre me incentivou a estudar e nunca desistir.

A Franciele, sempre muito paciente e me dando coragem e força, principalmente nos momentos em que eu mesmo duvidava da minha capacidade. Muito obrigado pela atenção, carinho e pela compreensão da minha ausência em determinados momentos.

Aos professores que tive o prazer de conhecer e absorver um pouco de suas fantásticas experiências durante o meu período de discente na universidade, principalmente aos meus orientadores Felipe Sass e Márcio Zamboti, exemplos de professores com muita dedicação e paciência, me orientaram com o objetivo de elaborar um trabalho de sucesso, muito obrigado por todos os seus ensinamentos.

Ao CEPEL pela oportunidade, confiança em meu trabalho e por ter me dado a honra de poder trabalhar no Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores com uma equipe extremamente competente e dedicada.

Aos meus amigos de mestrado que tive o prazer de conhecer durante o meu período de UFF que me incentivaram por diversas vezes.

A todos os envolvidos de forma direta ou indireta, meu muito obrigado!

# Resumo

Os motores elétricos são considerados os equipamentos mais importantes entre os que consomem energia elétrica final no Brasil. Estima-se que os motores de indução e os sistemas acionados por eles são responsáveis por aproximadamente 70% do consumo de toda a energia do setor industrial Brasileiro. Portanto, obter suas perdas torna-se um desafio relevante para a eficiência energética. Qualquer iniciativa que seja desenvolvida para aumentar o rendimento destes equipamentos trará benefícios ambientais, benefícios energéticos e a redução de custos para os setores industriais, comerciais entre outros. Hoje em dia existem diversas normas de ensaios para determinar as características de desempenho de motores de indução. Entretanto, suas aplicações resultam em variações significativas nos cálculos do rendimento. Esta dissertação avaliou normas distintas realizando nove ensaios em três amostras de motores de indução trifásicos com diferentes potências. Em cada motor realizou-se um ensaio conforme a norma ABNT NBR 17094-3:2018 utilizando o método 2, um ensaio conforme a norma IEC 60034-2-1:2014 aplicando o método 2-1-1B e um ensaio conforme a norma IEC/TS 60034-2-3:2013, que determina o rendimento do motor quando acionado por um inversor de frequência utilizando o método 2-3-B. Desta forma, se tornou possível realizar uma avaliação entre os métodos aplicados, possibilitando a comparação dos procedimentos e resultados da ABNT NBR 17094-3:2018 com a IEC 60034-2-1:2014. Também foi avaliada a influência que o inversor de frequência tem sobre o rendimento de uma máquina, comparando os resultados da IEC 60034-2-1:2014 com a IEC/TS 60034-2-3:2013, possibilitando calcular as perdas harmônicas para os diferentes motores de indução trifásicos através de equações matemáticas normalizadas. Para facilitar a execução dos ensaios, foi desenvolvida uma plataforma de cálculos com uma interface gráfica para apresentar as grandezas medidas e os resultados calculados da IEC/TS 60034-2-3:2013 de forma automática. Por fim, este trabalho relata as principais dificuldades de implementação dos procedimentos estipulados pela norma IEC/TS 60034-2-3:2013.

Palavras-chave: Eficiência energética, Motores de indução trifásicos, ABNT 17094-3, IEC 60034-2-1, IEC/TS 60034-2-3, Inversor de frequência, Métodos de ensaios.

# Abstract

Electric motors are considered the most important equipment among those that consume final electric energy in Brazil. It is estimated that the induction motors and the systems driven by them are responsible for approximately 70% of the energy consumption of the Brazilian industrial sector. Therefore, obtain its losses is a relevant challenge for energy efficiency. Any initiative that is developed to increase the performance of these equipment will bring environmental benefits, energy benefits, and cost reduction for the industrial, commercial, and other sectors. Nowadays, several standards can be used to determine the performance characteristics of induction motors. However, their application results in significant variations in the performance calculations. This thesis evaluated different standards by performing nine tests on three samples of three-phase induction motors with different power. In each engine, a test was performed according to the standard ABNT NBR 17094-3: 2018 method 2, one test according to the standard IEC 60034-2-1:2014 using the method 2-1-1B, and a test according to the standard IEC/TS 60034-2-3:2013, that determines motor performance when driven by a frequency inverter using method 2-3-B. Thus, it became possible to perform an evaluation between the applied methods, allowing the comparison between the procedures and results of ABNT NBR 17094-3:2018 and IEC 60034-2-1:2014. It was also evaluated the influence of the frequency inverter on the performance of a machine, comparing the results of IEC 60034-2-1:2014 with IEC/TS 60034-2-3:2013, allowing to calculate the harmonic losses for the different three-phase induction motors using standard mathematical equations. It was developed a calculation platform with a graphical interface to present measured and calculated results of IEC/TS 60034-2-3: 2013 automatically. At last, this work reports the main difficulties in implementing the procedure stipulated by the standard IEC/TS 60034-2-3: 2013.

**Keywords:** Energy efficiency, Three-phase induction motors, ABNT 17094-3, IEC 60034-2-1, IEC/TS 60034-2-3, Frequency inverter, Test methods.

# Sumário

Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	xv
Lista de Símbolos .....	xviii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Principais Contribuições .....	4
1.4 Estrutura do Documento .....	5
Capítulo 2 - Motor de Indução e Acionamentos .....	7
2.1 Motores de Indução (Assíncronos).....	7
2.1.1 Rotor Gaiola de Esquilo .....	8
2.1.2 Estator .....	9
2.1.3 Perdas do Motor de Indução .....	9
2.1.4 Composição.....	11
2.2 Especificações Técnicas.....	12
2.2.1 Categoria ABNT .....	12
2.2.2 Vantagens da Utilização do Motor de Indução .....	13
2.2.3 Desvantagens da Utilização do Motor de Indução.....	14
2.3 Acionamentos .....	14
2.3.1 Inversor de Frequência.....	14
2.4 Métodos de Controle.....	18
2.4.1 Controle Escalar .....	18
2.4.2 Controle Vetorial.....	21
Capítulo 3 - Qualidade de Energia em Motores com Inversores de Frequência.....	23
3.1 Harmônicos .....	23
3.2 Interação entre a Rede e o Inversor.....	24
3.3 Interação entre o Inversor e o Motor.....	25
3.4 Considerações em Relação ao Rendimento .....	27
3.5 Efeito dos Harmônicos nos Cabos Elétricos.....	28
3.6 Desequilíbrios de Tensão.....	29
Capítulo 4 - Eficiência Energética e Motores Elétricos .....	31

4.1	A importância da Eficiência Energética .....	31
4.2	Normalização .....	34
4.2.1	A normativa brasileira .....	36
4.2.2	A normativa internacional .....	40
4.3	Regulamentação .....	43
4.4	Selo Procel .....	44
Capítulo 5 - Materiais e Métodos .....		45
5.1	Métodos de ensaio .....	49
5.1.1	ABNT NBR 17094-3:2018 .....	49
5.1.2	IEC 60034-2-1:2014 .....	62
5.1.3	IEC/TS 60034-2-3:2013 ( <i>Technical Specification</i> ) .....	72
Capítulo 6 - Resultados .....		77
6.1	Resultado ABNT 17094-3:2018 .....	79
6.1.1	Motor 1 .....	80
6.1.2	Motor 2 .....	85
6.1.3	Motor 3 .....	89
6.2	Resultado IEC 60034-2-1:2014 .....	93
6.2.1	Motor 1 .....	93
6.2.2	Motor 2 .....	97
6.2.3	Motor 3 .....	100
6.3	Resultados da IEC/TS 60034-2-3:2013 .....	103
6.3.1	Motor 1 .....	107
6.3.2	Motor 2 .....	110
6.3.3	Motor 3 .....	112
6.4	Comparação das principais diferenças nos procedimentos da ABNT 17094-3:2018 e IEC 60034-2-1:2014 .....	115
6.5	Avaliação dos resultados da IEC 60034-2-1:2014 e IEC/TS 60034-2-3:2013 .....	122
6.5.1	Motor 1 .....	122
6.5.2	Motor 2 .....	128
6.5.3	Motor 3 .....	132
Capítulo 7 - Conclusões e Trabalhos Futuros .....		137
7.1	Conclusões .....	137
7.2	Trabalhos Futuros .....	139
Referências Bibliográficas .....		141

# Lista de Figuras

FIGURA 1 - ENROLAMENTO DO ESTATOR TRIFÁSICO. ADAPTADO DE [33].....	8
FIGURA 2 - DETALHES DO ROTOR GAIOLA DE ESQUILO [34].....	8
FIGURA 3 - CICLO TÍPICO DE HISTERESE [3]. .....	10
FIGURA 4 - ASPECTO CONSTRUTIVO DO MIT [37].....	11
FIGURA 5 – CURVA DE CONJUGADO VERSUS VELOCIDADE ABNT [41]. .....	13
FIGURA 6 - ESTRUTURA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA [49].....	15
FIGURA 7 –CIRCUITO DO INVERSOR [50]. .....	16
FIGURA 8 – MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO. ADAPTADO DE [50]. .....	17
FIGURA 9 –CHAVEAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE RESULTANTE [50].....	17
FIGURA 10 – VARIAÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO X VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA [50]. .....	19
FIGURA 11 – ENFRAQUECIMENTO DE CAMPO [50].....	20
FIGURA 12 – COMPENSAÇÃO I X R [50]. .....	20
FIGURA 13 – FORMA DE ONDA DE CORRENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO [24]. .....	26
FIGURA 14 – FORMA DE ONDA DE TENSÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO. ADAPTADO DE [26]. .....	26
FIGURA 15 – FONTES DE ENERGIA PRIMARIA 1973 x 2014 [72].....	32
FIGURA 16 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL. ADAPTADO DE [2]. .....	33
FIGURA 17 – DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO SETOR INDUSTRIAL. ADAPTADO DE [2]. .....	33
FIGURA 18 – VENDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS. ADAPTADO DE [37]. .....	36
FIGURA 19 – VALORES MÍNIMOS DE RENDIMENTO. ....	36
FIGURA 20 - LINHA DO TEMPO DOS DOCUMENTOS DE EE DOS MITs. ....	40
FIGURA 21 – COMPARAÇÃO DO DECRETO 4508/2002, PORTARIA 553/2005 E PORTARIA 1/2017 [82]. .....	40
FIGURA 22- VALORES MÍNIMOS PARA AS DISTINTAS CLASSES DE EFICIÊNCIA DEFINIDOS NA IEC 60034-30-1 [82]. .....	41
FIGURA 23 – PERÍODO DE IMPLEMENTAÇÃO DE CLASSES DE RENDIMENTO PARA MITRGE [82].....	42
FIGURA 24 – ARRANJO DO ENSAIO PARA A NORMA ABNT 17094-3:2018. ....	46
FIGURA 25 – ARRANJO DO ENSAIO PARA A NORMA IEC 60034-2-1:2014. ....	46
FIGURA 26 – ARRANJO DO ENSAIO DA NORMA IEC/TS 60034-2-3:2013. ....	47
FIGURA 27 – SUPERVISÓRIO DO LABORATÓRIO. ....	48
FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS DA ABNT NBR 17094-3:2018. ....	49
FIGURA 29 – ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA. ....	50
FIGURA 30 – ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO MIT. ....	51
FIGURA 31 – ENSAIO A VAZIO. ....	53
FIGURA 32 – SEPARAÇÃO DAS PERDAS DE ATRITO E VENTILAÇÃO. ....	55
FIGURA 33 – SEPARAÇÃO DAS PERDAS DO MIT. ADAPTADO DE [88]. ....	63
FIGURA 34 - FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DA IEC 60034-2-1:2014. ....	63
FIGURA 35 – PERDAS CONSTANTES X TENSÃO AO QUADRADO. ....	67
FIGURA 36 – PERDA NO FERRO X TENSÃO DO ENSAIO A VAZIO. ....	69
FIGURA 37 – FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DA IEC/TS 60034-2-3:2013. ....	73
FIGURA 38 – MOTOR 1. ....	78
FIGURA 39 – MOTOR 2. ....	79
FIGURA 40 – MOTOR 3. ....	79
FIGURA 41 – CURVA DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1. ....	81
FIGURA 42 – CURVA DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA 17094-3:2018 MOTOR 2.....	86
FIGURA 43 – CURVA DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3. ....	90
FIGURA 44 – CURVA DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1. ....	94
FIGURA 45 – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3. ....	101
FIGURA 46 – ARRANJO PRÁTICO IEC/TS 60034-2-3:2013 MOTOR 1.....	106
FIGURA 47 – ARRANJO PRÁTICO IEC/TS 60034-2-3:2013 MOTOR 2.....	106
FIGURA 48 – ARRANJO PRÁTICO IEC/TS 60034-2-3:2013 MOTOR 3.....	107
FIGURA 49 – COMPARAÇÃO DA ESTABILIDADE TÉRMICA ABNT 17094-3:2018 x IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.....	116
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO DA ESTABILIDADE TÉRMICA ABNT 17094-3:2018 x IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2.....	116
FIGURA 51 - COMPARAÇÃO DA ESTABILIDADE TÉRMICA ABNT 17094-3:2018 x IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3.....	117
FIGURA 52 – CURVA DE RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA MOTOR 1. ....	120

FIGURA 53 – CURVA DE RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA MOTOR 2. ....	121
FIGURA 54 – CURVA DE RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA MOTOR 3. ....	121
FIGURA 55 – FORMA DE ONDA DE TENSÃO SENOIDAL APLICADA AO MOTOR 1. ....	122
FIGURA 56 – FORMA DE ONDA DA TENSÃO DE SAÍDA DO INVERSOR FILTRADA. ....	123
FIGURA 57 - REPRESENTAÇÃO GENÉRICA DA TENSÃO DE SAÍDA PWM DO INVERSOR MOTOR 1. ....	123
FIGURA 58 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE ENTRADA MOTOR 1. ....	124
FIGURA 59 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA MOTOR 1. ....	124
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS RESIDUAIS DO MOTOR 1. ....	125
FIGURA 61 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES MOTOR 1. ....	125
FIGURA 62 – PERDAS TOTAIS E PERDAS HARMÔNICAS MOTOR 1. ....	126
FIGURA 63 – ORDENS HARMÔNICAS ALIMENTAÇÃO SENOIDAL. ....	127
FIGURA 64 – ORDENS HARMÔNICAS ALIMENTAÇÃO PWM. ....	127
FIGURA 65 – RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA MOTOR 1. ....	128
FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE ENTRADA MOTOR 2. ....	129
FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA MOTOR 2. ....	129
FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS RESIDUAIS MOTOR 2. ....	130
FIGURA 69 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES MOTOR 2. ....	130
FIGURA 70 – PERDAS TOTAIS E PERDAS HARMÔNICAS MOTOR 2. ....	131
FIGURA 71 – COMPARAÇÃO DO RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA MOTOR 2. ....	132
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE ENTRADA MOTOR 3. ....	132
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA MOTOR 3. ....	133
FIGURA 74 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS RESIDUAIS MOTOR 3. ....	133
FIGURA 75 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES MOTOR 3. ....	134
FIGURA 76 – PERDAS TOTAIS E PERDAS HARMÔNICAS TOTAIS PARA O MOTOR 3. ....	134
FIGURA 77 – RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA MOTOR 3. ....	135
FIGURA 78 – COMPARAÇÃO DAS PERDAS HARMÔNICAS. ....	136

# Lista de Tabelas

TABELA 1 – ORDEM E FREQUÊNCIA DOS HARMÔNICOS. ADAPTADO DE [48].	24
TABELA 2 – MÉTODOS DE REDUÇÃO DOS HARMÔNICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS [24].	27
TABELA 3 – DIFERENÇA DE VALORES MÍNIMOS DE RENDIMENTO EXIGIDO PELA IEC E NBR.	35
TABELA 4 – ÍNDICES MÍNIMOS DE RENDIMENTO PARA MOTORES ELÉTRICOS DECRETO Nº 4508/2002 [81].	38
TABELA 5 – VALORES DE RENDIMENTOS MÍNIMOS PARA MOTORES CONFORME PORTARIA Nº 1/2017 [10].	39
TABELA 6 – NORMAS DE MÉTODOS DE ENSAIOS E NORMAS DE VALORES MÍNIMOS DE RENDIMENTO.	43
TABELA 7 – INTERVALO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA POR FAIXA DE POTÊNCIA [9].	51
TABELA 8 – DADOS DE PLACA DE UM MIT QUE SERÁ UTILIZADO COMO EXEMPLO.	54
TABELA 9 – RESULTADO DA SEPARAÇÃO DAS PERDAS DE ATRITO E VENTILAÇÃO.	56
TABELA 10 – ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR ABNT.	59
TABELA 11 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR ABNT.	59
TABELA 12 – ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR PARA DETERMINAR A PERDA DE ATRITO E VENTILAÇÃO ZERO IEC.	68
TABELA 13 – EXEMPLO DE INTERPOLAÇÃO LINEAR.	70
TABELA 14 – ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR IEC.	71
TABELA 15 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA REGRESSÃO LINEAR IEC.	71
TABELA 16 – DADOS DE PLACA DOS MOTORES ENSAIADOS.	77
TABELA 17 – INSTRUMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.	77
TABELA 18 – DADOS DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	81
TABELA 19 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	82
TABELA 20 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	82
TABELA 21 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	83
TABELA 22 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	83
TABELA 23 – CORREÇÃO DO FREIO DINAMOMÉTRICO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	84
TABELA 24 – PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1.	84
TABELA 25 – DADOS DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	85
TABELA 26 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	86
TABELA 27 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	87
TABELA 28 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	87
TABELA 29 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	88
TABELA 30 – CORREÇÃO DO FREIO DINAMOMÉTRICO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	88
TABELA 31 – PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2.	88
TABELA 32 – DADOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3.	89
TABELA 33 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3.	90
TABELA 34 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3.	91
TABELA 35 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3.	91
TABELA 36 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3.	92
TABELA 37 – CORREÇÃO DO FREIO DINAMOMÉTRICO ABNT MOTOR 3.	92
TABELA 38 – DADOS DO PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3.	93
TABELA 39 – DADOS DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.	94
TABELA 40 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.	95
TABELA 41 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.	95
TABELA 42 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.	96
TABELA 43 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.	96
TABELA 44 – DADOS DO PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1.	97
TABELA 45 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2.	98
TABELA 46 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2.	98
TABELA 47 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2.	99
TABELA 48 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2.	99
TABELA 49 – PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2.	99
TABELA 50 – DADOS DO ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3.	100
TABELA 51 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3.	101
TABELA 52 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3.	102

TABELA 53 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3. ....	102
TABELA 54 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3. ....	103
TABELA 55 – PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3. ....	103
TABELA 56 – DADOS DE ENTRADA DO ENSAIO EM CARGA. ....	104
TABELA 57 – DADOS DE ENTRADA DO ENSAIO A VAZIO. ....	104
TABELA 58 – DADOS DE PLACA DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA. ....	105
TABELA 59 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 1. ....	108
TABELA 60 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 1. ....	109
TABELA 61 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 1. ....	109
TABELA 62 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 1. ....	110
TABELA 63 – DADOS DO PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 1. ....	110
TABELA 64 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 2. ....	111
TABELA 65 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 2. ....	111
TABELA 66 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 2. ....	112
TABELA 67 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 2. ....	112
TABELA 68 – PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 2. ....	112
TABELA 69 – DADOS DO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 3. ....	113
TABELA 70 – DADOS DO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 3. ....	113
TABELA 71 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 3. ....	114
TABELA 72 – DADOS DO PROCESSAMENTO DAS PERDAS NO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 3. ....	114
TABELA 73 – DADOS DO PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC 60034-2-3:2013 MOTOR 3. ....	115
TABELA 74- PROCESSAMENTO DAS PERDAS DE ATRITO E VENTILAÇÃO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 1. ....	118
TABELA 75 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS DE ATRITO E VENTILAÇÃO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 2. ....	118
TABELA 76 – PROCESSAMENTO DAS PERDAS DE ATRITO E VENTILAÇÃO ABNT 17094-3:2018 MOTOR 3. ....	118
TABELA 77 – PROCESSAMENTO DA PERDA DE ATRITO E VENTILAÇÃO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1, 2 E 3. ....	118
TABELA 78 – PERDA NO FERRO ENSAIO A VAZIO IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1, 2 E 3. ....	119
TABELA 79 – PERDA NO FERRO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 1. ....	119
TABELA 80 – PERDA NO FERRO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 2. ....	119
TABELA 81 – PERDA NO FERRO ENSAIO EM CARGA IEC 60034-2-1:2014 MOTOR 3. ....	120
TABELA 82 – PERDAS HARMÔNICAS EM PORCENTAGEM DAS PERDAS TOTAIS MOTOR 1. ....	126
TABELA 83 – PERDAS HARMÔNICAS EM PORCENTAGEM DAS PERDAS TOTAIS MOTOR 2. ....	131
TABELA 84 – PERDAS HARMÔNICAS EM PORCENTAGEM DAS PERDAS TOTAIS MOTOR 3. ....	135

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A.C.	Antes de Cristo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AS/NZS	<i>Standards Australia / Standards New Zealand</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CGCRE	Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
Ch	Chave
COMPET	Programa Nacional de Racionalização do uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural
CSA	<i>Canadian Standard Association</i>
CV	Cavalo Vapor
DLA	Departamento de Laboratórios de Adrianópolis
ENER	Energética
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GB	Guobião (normas obrigatórias da China)
GB/T	Guobião (normas recomendadas da China)
IEA	International Energy Agency
IE4	Classe de rendimento de motores da linha super premium
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>

IECEE	<i>Conformity Assessment Schemes for Electrotechnical Equipment and Components</i>
IEC/TS	<i>International Electrotechnical Commission/ Standard Test</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical &amp; Electronics Engineers</i>
IEE/USP	Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem Máquina
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INTROGUM	<i>Introduction to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
IR1/IE1	Classe de rendimento de motores da linha padrão
IR2/IE2	Classe de rendimento de motores da linha auto rendimento
IR3/IE3	Classe de rendimento de motores da linha premium
IS	<i>Indian Standard</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KS C	<i>Korean Standards Association</i>
LABELO	Laboratório Especializado em Eletroeletrônica
MIT	Motor de Indução Trifásico
MME	Ministério de Minas Energia
MITRGE	Motores de Indução Trifásicos com Rotor Gaiola de Esquilo
NOM	Norma Oficial Mexicana
ONU	Organização das Nações Unidas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEE	Plano de Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
QE	Qualidade de Energia
RBE	Rede Brasileira de Calibração

RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio
RMS	<i>Root Mean Square</i>
STD	<i>Standard</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>

## Lista de Símbolos

$C_p$	-	Conjugado Rotor Bloqueado
$C_{min}$	-	Conjugado mínimo
$C_{max}$	-	Conjugado máximo
$C$	-	Conjugado
$X_L$	-	Reatância Indutiva
$f$	-	Frequência
$L$	-	Indutância
$I$	-	Corrente
$V$	-	Volts
$R$	-	Resistência ôhmica
$n$	-	Ordem do harmônico
$f_n$	-	Frequência do harmônico de ordem $h$
$f_1$	-	Frequência da ordem do harmônico fundamental
$V_h$	-	Valor eficaz da tensão dos harmônicos de ordem $h$
$V_1$	-	Tensão do harmônico fundamental
$\eta$	-	Rendimento
$p_u$	-	Potência útil
$p_{abs}$	-	Potência absorvida
$\sum$ <i>perdas</i>	-	Somatório das perdas
TWh	-	Terawatt hora
kW	-	Quilowatt
W	-	Watts
$t_2$	-	Temperatura do enrolamento calculada no final do ensaio
$R_1$	-	Resistência do enrolamento medida no início do ensaio

$t_1$	- Temperatura do enrolamento medida no início do ensaio
$R_2$	- Resistência do enrolamento medida no final do ensaio
$k$	- Constante de valor igual a 234,5 quando o enrolamento do motor for de cobre ou 225 quando de alumínio
$P_s$	- Potência de saída
$C_{(corrigido)}$	- Conjugado corrigido
$n_m$	- Velocidade medida do motor
$k_1$	- Constante de valor igual a 9,549
$P_{estv}$	- Perda joule do estator a vazio
$P_{e(vazio)}$	- Potência de entrada medida no ensaio a vazio
$Y$	- Variável dependente
$A$	- Inclinação da reta
$B$	- Ponto de interseção $Y$ com a reta
$N$	- Número de pares das variáveis $X$ e $Y$
$X$	- Variável independente
$\gamma$	- Coeficiente de correlação
$P_{fe}$	- Perda no ferro
$P_{AV}$	- Perda de atrito e ventilação
$P_{estc}$	- Perda do estator em carga
$S$	- Escorregamento
$n_s$	- Velocidade síncrona
$P_{rot}$	- Perda do rotor
$P_{e(carga)}$	- Potência de entrada medida no ensaio em carga
$P_{res}$	- Perda residual
$C^2$	- Conjugado ao quadrado
$P_{sup(corrigida)}$	- Perda suplementar corrigida
$t_a$	- Temperatura de 25°C

$t_3$	- Temperatura ambiente medida no final do ensaio de elevação de temperatura
$R_{2(\text{corrigido})}$	- Resistência corrigida para 25°C
$P_{\text{estc}(\text{corrigida})}$	- Perda do estator corrigida no ensaio em carga
$S_{(\text{corrigido})}$	- Escorregamento corrigido
$P_{\text{rot}(\text{corrigida})}$	- Perda do rotor corrigida
$P_s(\text{corrigida})$	- Potência de saída corrigida
$A_{1(0\% \text{ de carga})}$	- Constante atribuída para o cálculo da correção do freio dinamométrico
$B_{1(100\% \text{ de } V_n)}$	- Constante atribuída para o cálculo da correção do freio dinamométrico
$CFD$	- Correção do freio dinamométrico
$C_{(0\% \text{ de carga})}$	- Conjugado medido para o ponto de zero por cento de carga
$k_2$	- Constante de valor igual a 9549
$n_{m(0\% \text{ de carga})}$	- Velocidade medida para o ponto zero por cento de carga
$C$	- Conjugado medido para cada ponto do ensaio em carga
$\eta$	- Rendimento do motor
$\cos \phi$	- Fator de potência para cada ponto do ensaio em carga
$K_\theta$	- Fator de correção da temperatura para 25°C
$K_3$	- Constante de valor igual a 235 quando o enrolamento do motor for de cobre ou 225 quando de alumínio
$S_{IEC(\text{corrigido})}$	- Escorregamento corrigido conforme a IEC
$P_{\text{rot}(IEC\text{corrigida})}$	- Perda no rotor corrigida conforme a IEC
$P_{fe(\text{carga})}$	- Perda do ferro calculada em cada ponto do ensaio em carga
$P_e(IEC\text{corrigida})$	- Potência de entrada corrigida conforme a IEC
$P_c$	- Perda constante
$P_{AV(IEC)}$	- Perda de atrito e ventilação conforme a IEC
$P_{AV(\text{zero})}$	- Perda de atrito e ventilação zero
$P_{AV(IEC\text{corrigida})}$	- Perda de atrito e ventilação corrigida conforme a IEC

$P_{fe(vazio)}$	- Perda no ferro calculada em cada ponto do ensaio a vazio
$U_{i(vazio)}$	- Queda de tensão no ensaio a vazio
$U_{i(carga)}$	- Queda de tensão no ensaio em carga
$V_3$	- Tensão, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio
$I_3$	- Corrente, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio
$R_3$	- Média da resistência, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio
$P_e$	- Potência de entrada
$P_{res(IEC)}$	- Perda residual conforme a IEC
$P_s(IEC)$	- Potência de saída conforme a IEC
$P_T$	- Perda total do MIT
$P_s(IEC\text{corrigida})$	- Potência de saída corrigida conforme a IEC
$P_{e(carga)(\text{com inversor})}$	- Potência de entrada, medida na alimentação do inversor no ensaio em carga
$P_s(\text{com inversor})$	- Potência de saída utilizando o inversor
$P_{res}(\text{com inversor})$	- Perda residual calculada usando o inversor
$P_{sup}(\text{corrigida com inversor})$	- Perda suplementar corrigida calculada utilizando o inversor
$P_{harmônica(carga)}$	- Perda harmônica no ensaio em carga
$P_C(\text{com inversor})$	- Perda constante utilizando o inversor
$P_{e(vazio)(\text{com inversor})}$	- Potência de entrada medida no ensaio a vazio com o inversor
$P_{estv}(\text{com inversor})$	- Perda do estator a vazio utilizando o inversor
$P_{harmônica(vazio)}$	- Perda harmônica no ensaio a vazio
$P_{harmônica(total)}$	- Somatório das perdas harmônicas
$P_T(\text{com inversor})$	- Perda total com o inversor
$D_{tensão}$	- Desequilíbrio percentual de tensão
$V_{med}$	- Tensão média
$Desvio_{max}$	- Desvio máximo em relação a tensão média

# Capítulo 1 - Introdução

O motor elétrico é considerado o equipamento mais importante dentre os que consomem energia elétrica final do Brasil e possui grande participação no setor industrial. Estima-se que os motores elétricos e os sistemas acionados por eles sejam responsáveis por aproximadamente 70% do consumo de toda a energia do setor industrial [1] [2]. Frisando que as máquinas elétricas são de grande importância para todo o mundo, diminuir suas perdas se torna um desafio relevante para a eficiência energética global. Qualquer iniciativa que seja desenvolvida para assim aumentar o rendimento destes equipamentos, irá trazer benefícios ambientais, energéticos e, principalmente, redução de custos e conseqüente o aumento da competitividade no mercado. Há mais de duas décadas que os pesquisadores da área de motores de indução vêm desenvolvendo estudos e aplicações para assim reduzir as perdas destes equipamentos [3] [4] [5] [6] [7].

As principais economias no mundo possuem mecanismos de regime regulatório ou obrigatório que estabelecem requisitos mínimos e níveis de eficiência para motores vendidos em seus países, e projetos que incentivem a produção de motores de alto rendimento [8]. Existem diversas normas de ensaios de motores elétricos que determinam as características de desempenho do motor de indução, tendo como objetivo final obter o rendimento das máquinas ensaiadas. Como exemplo: no Brasil, o ensaio de motores é regulamentado pela norma ABNT NBR 17097-3:2018 [9] e devem seguir os valores mínimos de rendimento determinados da norma ABNT NBR 17094-1:2018 [10]; na China os métodos de ensaios são determinados pela norma GB/T 1032:2012 [11] seguindo os valores mínimos de rendimento da norma GB 18613-2012 [12]; na Austrália, os métodos de ensaios são estabelecidos pela norma AS/NZS 1359.102.3:2004 [13] e seguem as exigências de eficiência energética da norma AS/NZS 1359.5:2004 [14]; na Europa, os métodos de ensaios são determinados pela norma IEC 60034-2-1:2014 [15] se orientando pelos valores mínimos de rendimento da norma IEC 60034-30-1:2014 [16]. Nos casos da Índia, México e Coréia do Sul, os métodos de ensaios e os valores mínimos de rendimento estão presentes em apenas uma norma de cada país, apresentados, respectivamente, pelas IS 15999-2-1:2011 [17], NOM-016-ENER-2016 [18] e KS C IEC 60034-1:2008 [19]. Essas, entre outras normas, regulamentam os ensaios de motores de indução em todo o mundo.

Estas normas utilizam metodologias diferentes, de modo que se um mesmo motor for ensaiado por normas distintas, serão obtidos diferentes valores de rendimentos. Esta diferença motiva grandes discussões entre os comitês internacionais sobre qual norma e/ou método garante o resultado mais próximo do real para o motor de indução. Nos últimos anos, muitos esforços foram

realizados para harmonizar essas normas de eficiência energética, mas mesmo com as revisões mais recentes ainda existem algumas diferenças. Apesar da divergência dos resultados, é consenso que todas estas normas são derivadas da IEC 60034-2-1, da CSA C390 e da IEEE 112 [20].

A partir da necessidade de se obter resultados confiáveis sobre o rendimento dos motores de indução, esta dissertação apresenta resultados de ensaio de motores com potências distintas utilizando a norma ABNT NBR 17094-3:2018 [9]. A partir dos dados coletados e resultados calculados é possível realizar uma comparação dos procedimentos de ensaio dos resultados obtidos pela norma IEC 60034-2-1:2014 [15]. Uma segunda comparação é realizada, desta vez, entre duas normas internacionais, a IEC 60034-2-1:2014 [15] que determina que o motor de indução trifásico seja alimentado por uma fonte senoidal e a IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] cuja aplicação entrega aos terminais do motor uma alimentação pulsada ocasionada devido ao *Pulse-Width Modulation* (PWM) do inversor de frequência.

A ANBT NBR 17094-3:2018 [9] publicada em 30 de maio de 2018, cancelou e substituiu a ABNT NBR 5383-1:2002 [22] em julho de 2019. Com esta norma, além de se obter as características de desempenho dos motores ensaiados, os resultados de rendimentos apresentados devem atender aos valores mínimos exigidos pela ABNT NBR 17094-1:2018 [10]. Dentre os diversos métodos apresentados pela ABNT NBR 17094-3:2018 [9] será utilizado o método 2, pois é método mais aplicado entre os Laboratórios acreditados no Brasil para obter o rendimento do motor de indução. Ele utiliza o ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator, rotor, núcleo, por atrito e ventilação [9].

A norma IEC 60034-2-1:2014 [15], publicada em 27 de junho de 2014, tem como objetivo estabelecer métodos de ensaio para determinar a eficiência e também obter perdas específicas não só de motores de indução trifásicos, mas também de máquinas de corrente contínua e máquinas síncronas. Os valores mínimos de rendimento encontrados no ensaio devem atender aos requisitos da IEC 60034-30-1:2014 [16]. Dentre os métodos apresentados por esta norma, será utilizado nesta dissertação o método 2-1-1B, somatório das perdas, perdas em carga adicional de acordo com o método das perdas residuais. Esse método é aplicado a dissertação por ser um dos mais utilizados pelos Laboratórios do continente europeu para determinar o rendimento do motor de indução.

A norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21], método 2-3-B também será utilizada nesta dissertação. Apesar de ter sido publicada em novembro de 2013, esta norma ainda é pouco estudada no Brasil e está sendo bastante aprimorada. O comitê internacional europeu está trabalhando para lançar uma nova edição [23]. A norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] visa proporcionar métodos para determinar a eficiência dos motores quando alimentados por inversores de frequência e obter as perdas harmônicas nos motores geradas pelo uso do inversor, sendo os

ensaios baseados na norma IEC 60034-2-1:2014 [15] utilizando o método 2-1-1B. Os valores mínimos de rendimento devem atender a norma IEC 60034-30-1:2014 [21]. O uso do inversor de frequência com máquinas elétricas é um tema bem discutido em aplicações industriais baseadas na IEC/TS 60034-2-3:2013 [21], e será bastante abordado no decorrer deste trabalho. Embora os inversores de frequência possibilitem suavizar a partida do motor, obter o controle de velocidade, entre outras vantagens [24], estes dispositivos geram distorções harmônicas de corrente e tensão, de modo que sua utilização aumenta o aquecimento das máquinas e suas perdas, o que leva a uma redução da eficiência. Neste contexto, é possível dizer que a determinação da eficiência exata dos motores elétricos alimentados por inversores não é de simples análise. Devido a essas dificuldades, a norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] define métodos para determinar o rendimento de motores de indução a fim de obter uma classificação uniforme da eficiência [25].

## 1.1 Motivação

A aplicação dos diferentes procedimentos das normas que determinam a eficiência de uma máquina de indução ocasiona em variações significativas nos cálculos do rendimento. Portanto, uma comparação das normas as qualifica frente a um cenário mundial, apresentando diferentes resultados entre os procedimentos de ensaio. A necessidade de se obter resultados mais precisos das características do motor de indução é de suma importância para mensurar sua eficiência energética mundial.

Os Laboratórios acreditados a realizarem ensaios de tipo em motores de indução precisam sempre estar atualizados frente ao lançamento de diferentes normas e procedimentos. Sabendo da dificuldade mundial de obter o rendimento do conjunto motor e inversor, a IEC desenvolveu a norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21]. A implementação desta norma no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) irá ajudar diversas empresas do setor industrial e comercial a expandir seus índices de eficiência energética no Brasil utilizando inversores de frequência.

Com o crescimento de aplicações com utilização de motores de indução operando em regime de velocidade variável, acionados por inversores nos últimos anos, é de interesse da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolver uma versão de uma norma que aplique procedimentos para determinar a eficiência de um motor de indução quando acionados por um inversor de frequência. Por se tratar de uma aplicação relativamente nova, sua execução vem sendo bastante discutida e aprimorada através de pesquisas, trazendo melhorias e orientações técnicas específicas [26] [27] [28].

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é comparar os ensaios a serem realizados em três amostras de motores de indução trifásicos com diferentes potências. Em cada motor será realizado um ensaio conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 17094-3:2018 [9] aplicando o método 2 e um ensaio utilizando a norma IEC 60034-2-1:2014 [15] aplicando o método 2-1-1B, para a primeira comparação. Já para a segunda comparação serão avaliadas as variações nos resultados do mesmo ensaio da IEC 60034-2-1:2014 [15], método 2-1-1B com a IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] método 2-3B. Desta forma, será possível realizar uma avaliação entre os métodos aplicados, além de determinar as perdas harmônicas causadas pelo inversor. Também será possível obter a influência que o conjunto motor e inversor tem na variação do rendimento da máquina. Os resultados desta dissertação irão permitir a comparação das perdas harmônicas dos diferentes motores de indução de corrente alternada quando alimentados por inversores de frequência.

Considerando que a norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] é relativamente nova e pouco explorada no Brasil, até o momento desta dissertação, é também objetivo deste trabalho desenvolver e implementar uma plataforma de cálculos que realize a interface dos resultados obtidos para que a norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] passe a ser incorporada dentro do escopo do CEPEL.

Os ensaios serão realizados no CEPEL no Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores junto dos seus dispositivos existentes. O método aplicado pela IEC/TS é destinado a motores de indução operando com inversores de frequência variável. No entanto a aplicação a outros tipos de motores não é excluída.

## 1.3 Principais Contribuições

Esta dissertação irá apresentar a metodologia dos diferentes procedimentos de ensaios de motores de indução trifásicos, expandindo o escopo do CEPEL e aderindo ao avanço da tecnologia. Espera-se que, após a conclusão desta dissertação, o Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores torne-se o primeiro Laboratório brasileiro a realizar ensaios acreditados aplicando métodos que determinam as perdas harmônicas e a eficiência de motores de indução trifásicos usando o inversor de frequência. Com a implantação da norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] no CEPEL, será possível obter um melhor entendimento do conjunto inversor e motor de indução aprimorando o Laboratório para pesquisas futuras.

## 1.4 Estrutura do Documento

A dissertação é dividida em 7 capítulos, sendo neste primeiro abordada a parte introdutória do trabalho, assim como as principais motivações e objetivos. Descrevendo a importância dos motores de indução no setor industrial, apresentando as normas e métodos que serão aplicados nos motores de indução trifásicos, em conjunto com suas principais contribuições.

No Capítulo 2, "MOTOR DE INDUÇÃO", é abordado sobre os motores assíncronos e sua composição, as principais categorias estipuladas pela ABNT, as vantagens e desvantagens de obter um motor de indução, acionamento via inversor de frequência e seus métodos de controle.

O Capítulo 3, "QUALIDADE DE ENERGIA", inicialmente é abordado sobre o aumento dos harmônicos no sistema elétrico a partir dos anos 80 com o surgimento dos equipamentos eletrônicos, relata a interação entre a rede elétrica e o inversor pois o mesmo é visto como uma carga não linear pela fonte de alimentação. Também é abordado a interação entre o inversor e motor com considerações em relação ao rendimento da máquina devido aos harmônicos gerados pelo inversor de frequência. E por fim é comentado sobre os desequilíbrios de tensão e os efeitos dos harmônicos nos cabos elétricos.

No Capítulo 4, "EFICIÊNCIA ENERGETICA", aborda-se a importância da eficiência energética, a normalização da eficiência dos motores de indução trifásicos em conjunto com o histórico da geração dos documentos de ensaios brasileiros e internacionais, seguido do histórico da sua regulamentação e finalizando com a apresentação do selo Procel.

No Capítulo 5, "METODOLOGIA" são apresentados os procedimentos de ensaios de todas as normas utilizadas no âmbito desta dissertação, detalhando cada método e expondo as suas devidas equações.

O Capítulo 6, "RESULTADOS", para os motores de indução trifásicos de 1, 3 e 12,5 CV que fazem parte dos 3 grupos de motores mais vendidos no Brasil representando 97% da comercialização no período de 1992 a 2012 são apresentadas as grandezas medidas e calculadas de cada um dos 9 ensaios realizados. Para cada motor foram realizados 3 ensaios, um para a ABNT 17094-3:2018, um para a IEC 60034-2-1:2014 [15] e um para a IEC 60034-2-3:2013 [21], os diferentes procedimentos e resultados obtidos foram comparados entre as normas ABNT 17094-3:2018 e IEC 60034-2-1:2014 [15]. Uma segunda comparação também é realizada entre as normas IEC 60034-2-1:2014 [15] e IEC/TS 60034-2-3:2013 [21], desta vez para obter a influência do uso do inversor de frequência na eficiência dos motores de indução e determinar as perdas harmônicas geradas pelo mesmo para cada máquina.

O capítulo 7 “CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS”, apresenta as conclusões desta dissertação, relatando a importância e a contribuição das análises realizadas. Posteriormente é abordado ideias sobre trabalhos que possam ser realizados em complemento ao tema da dissertação, de forma a incentivar pesquisas que contribuam para o aperfeiçoamento das normas técnicas brasileiras.

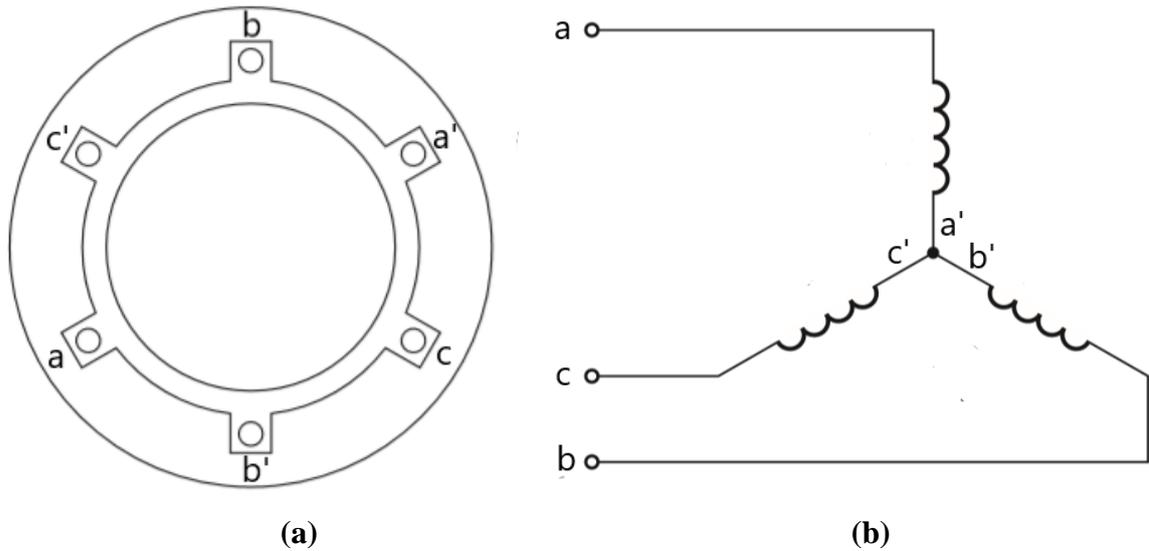
# Capítulo 2 - Motor de Indução e Acionamentos

O surgimento e a evolução dos motores elétricos se caracterizaram mediante a um longo e demorado período, pois eram necessárias aplicações de muitas leis que envolviam eletricidade e magnetismo e os conhecimentos eram limitados para esta área da física [29]. Com o avanço das pesquisas e tecnologias, hoje é possível dizer que o motor elétrico é um dos equipamentos mais importantes do setor industrial, se não o mais importante.

## 2.1 Motores de Indução (Assíncronos)

A maior parte dos motores elétricos utilizados nas indústrias é do tipo assíncrono, também conhecido como Motores de Indução Trifásicos (MIT). Hoje em dia a máquina elétrica é a principal carga conectada nos sistemas elétricos no mundo. No Brasil, ela é responsável por aproximadamente 70% da demanda de energia elétrica industrial [2]. Desde o aumento da produtividade dos motores elétricos na segunda guerra mundial no século XIX, os mesmos vêm sendo comercializados em grande escala por se tratar de uma máquina eficiente, possuindo classes de eficiência IR2 e IR3 conforme ABNT NBR 17094-1:2018 [10], estrutura física bem simplificada e necessitando de poucos cuidados na manutenção, além de possuir vida útil longa segundo estimativa apresentada para motores de 1 a 250 kW conforme [30], uma boa facilidade de manobra e custo baixo, principalmente se comparados com motores de corrente contínua [31] [32].

Quando comparados aos motores síncronos, as máquinas assíncronas se sobressaem. Sua principal vantagem é ser auto independente, ou seja, são acionadas sem depender de componentes elétricos auxiliares, mesmo estando com carga nominal, sendo acionada imediatamente após receber a alimentação de energia elétrica a partir de uma fonte de energia aplicada a seus terminais [31]. Este trabalho busca detalhar pesquisas somente dos motores assíncronos com rotor gaiola de esquilo. O MIT é um dos motores mais robustos do mercado, seu estator é constituído por chapas de aço-silício e sua superfície interna possui ranhuras para que possa acomodar um enrolamento trifásico conforme ilustrado na Figura 1a, sendo o enrolamento representado por três bobinas, onde os eixos são defasados em  $120^\circ$  elétricos conforme ilustrado na Figura 1b.



**Figura 1 - Enrolamento do estator trifásico. Adaptado de [33].**

### 2.1.1 Rotor Gaiola de Esquilo

A construção do rotor gaiola de esquilo é mais simples e econômica quando comparada com a construção do rotor bobinado. Seu enrolamento é composto por um certo número de barras de cobre imersas nas ranhuras do rotor, conectadas nas suas duas extremidades através de dois anéis de cobre. Não possuem escovas de carvão e nem anéis coletores, caracterizando menos manutenções em seu período de vida útil. Detalhes construtivos são ilustrados na Figura 2.



**Figura 2 - Detalhes do rotor gaiola de esquilo [34].**

Quando o motor é acionado sem perturbações que alterem suas características nominais, uma tensão trifásica é inserida no enrolamento do estator nos pontos a, b e c ilustrados na Figura 1a. Desta forma, surgem as correntes de magnetização que circulam em conjunto com cada fase, criando um campo magnético girante. A velocidade do campo pode ser determinada pela

frequência das correntes de magnetização e pelo número de polos do respectivo estator. Supondo que o padrão a-c'-b-a'-c-b' podendo ser interpretado na Figura 1a fosse criado para rotacionar 180° mecânicos, o padrão seria espelhado e repetido outros 180°, impulsionados pelos polos magnéticos, obtendo uma rotação de 360°, resultando em uma distribuição de campo de quatro polos, ou seja, exemplificando para um motor de “p” polos o modelo básico do enrolamento deve ser repetido  $p/2$  vezes ao longo da circunferência da superfície interna do motor.

O campo girante criado pelo enrolamento do estator corta os condutores do rotor, assim, induzindo tensões. Tendo em vista que o enrolamento do rotor está curto-circuitado através dos anéis, as tensões induzidas fazem com que correntes elétricas circulem, reagindo com o campo para formar um torque eletromagnético, resultando na ação motora. Uma das características mais importantes desta máquina é que ela tem excitação única, ou seja, a potência elétrica é aplicada apenas no enrolamento do estator [35] [36].

## 2.1.2 Estator

O estator do MIT é composto por um conjunto de chapas ferromagnéticas de aço-silício. Essas chapas possuem uma forma de coroa circular ranhurada na parte interna do estator, onde é aplicado um verniz isolante. As ranhuras são semifechadas e possuem os condutores do circuito elétrico estatórico. Entre as chapas magnéticas existem canais de ventilação que são de grande importância para a passagem do ar.

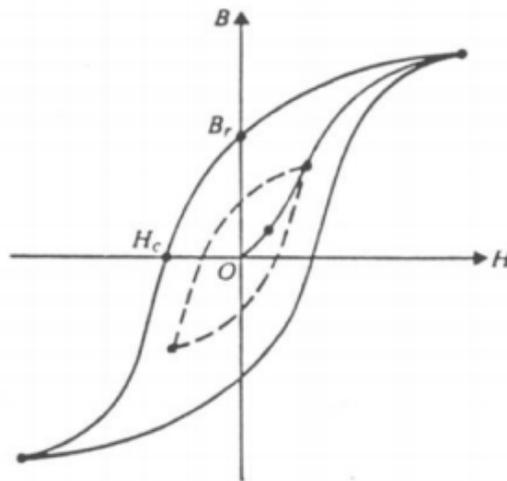
O circuito elétrico do estator é composto por um enrolamento que possui três bobinas afastadas no espaço de  $2\pi/3$  rad-elétricos. Essas bobinas são alimentadas por um sistema trifásico. Os condutores que compõem as espiras das bobinas são isolados com esmalte e estão dispostos a duas camadas na ranhura. Eles estão isolados do material magnético através de um isolante de plástico, responsável por forrar toda a parte inferior da ranhura e estão presos a ranhura por regletes plásticas [35] [36].

## 2.1.3 Perdas do Motor de Indução

Naturalmente, a conversão de energia realizada pela máquina apresenta perdas, sendo as principais: perdas Joule no estator (perdas no cobre), perdas Joule no rotor, perdas no ferro (perdas por correntes parasitas também conhecida como perdas por corrente de Foucault, perdas por

histerese magnética), perdas por dispersão em carga (perdas suplementares) e perdas por atrito e ventilação.

As perdas por efeito Joule no rotor e no estator são resultado da corrente elétrica que passa pelos seus enrolamentos. Perdas no ferro são determinadas pelas perdas por histerese magnética e Foucault. A perda por histerese magnética é o resultado da constante reorientação do campo magnético sobre o pacote de lâminas de aço-silício. A Figura 3 apresenta a curva de magnetização resultante da ação do campo magnético alternado em um núcleo ferromagnético.



**Figura 3 - Ciclo típico de histerese [3].**

A área interna ao laço de histerese é equivalente às perdas inerentes ao processo, as quais são proporcionais à frequência do campo aplicado e a densidade de fluxo magnético.

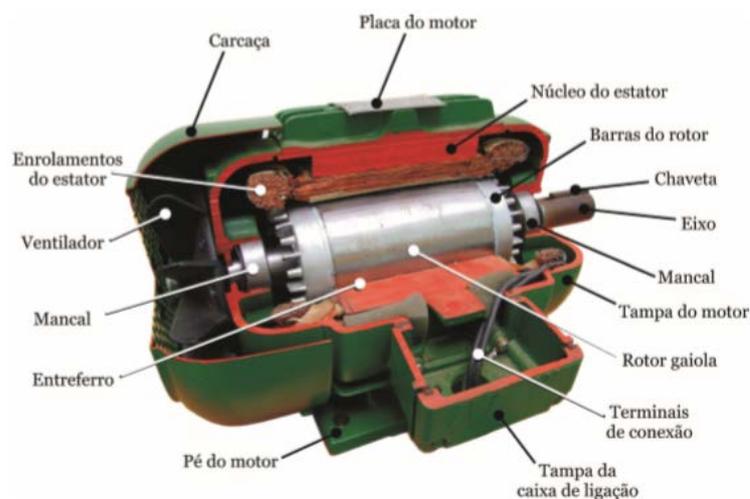
As perdas de Foucault são ocasionadas devido às correntes induzidas no interior do material magnético (laminações do estator). A distribuição destas correntes não são uniformes e tendem a se concentrar nas superfícies das laminações. Como as perdas por efeito Joule são proporcionais ao quadrado da corrente, tem-se que as correntes parasitas resultam em significativas perdas na forma de calor. As perdas por histerese e Foucault ocorrem tanto na parte estacionária como na parte girante do motor.

As perdas por atrito e ventilação são ocasionadas devido ao atrito nos rolamentos da máquina e pelo arrasto aerodinâmico provocado pela geometria irregular do rotor e pela própria paleta de ventilação. Dependem do tipo de mancal, da lubrificação, do sistema de ventilação, da velocidade de rotação e do estado de conservação referente a limpeza do motor. São chamadas também de perdas mecânicas e geralmente em condições normais constituem a menor parcela de perdas em motores.

As perdas suplementares podem ser classificadas de dois tipos, sendo elas perdas suplementares de frequência fundamental e alta frequência. As perdas suplementares de frequência fundamental são ocasionadas devido as correntes induzidas nos condutores do estator correspondente ao fluxo disperso na ranhura do mesmo, acrescentando as perdas em outros elementos metálicos devido ao fluxo disperso nas partes terminais da máquina, como exemplo as perdas produzidas pelas cabeças das bobinas. As perdas suplementares de alta frequência são perdas induzidas no rotor correspondente aos harmônicos de força magnetomotriz ocasionados pela corrente de carga no estator, assim como as perdas induzidas no estator devido aos harmônicos de força magnetomotriz produzidos pela corrente no rotor. De forma geral, as perdas suplementares são compreendidas como sendo o acréscimo das perdas de alta frequência quando acrescentado carga ao motor [3] [37] [38] [39] [40].

## 2.1.4 Composição

Além dos rotores e estatores os motores de indução trifásicos possuem diversos componentes que os caracterizam, conforme ilustrado na Figura 4 levando em consideração que suas características construtivas estão em constantes adaptações a fim de proporcionar maiores eficiências às máquinas, possibilitando o avanço da tecnologia e o surgimento dos motores de alto rendimento.



**Figura 4 - aspecto construtivo do MIT [37].**

O principal aperfeiçoamento das características dos motores elétricos de alto rendimento (cujo, os mesmos possuem a classe de eficiência IR2 no Brasil) é a alteração do projeto do motor *standard*, (cujo o mesmo possui classe de eficiência IR1 no Brasil) acarretando em uma melhoria

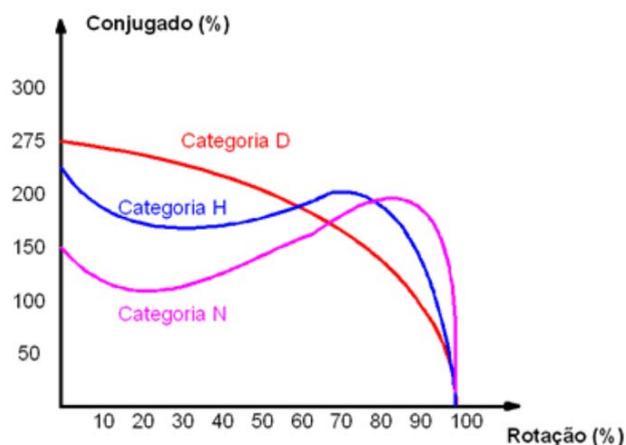
em determinados pontos onde se concentra a maioria das perdas. Sendo eles: o aumento da quantidade de cobre nos enrolamentos do estator, incluindo o projeto otimizado das ranhuras e o superdimensionamento das barras do rotor para diminuir as perdas por efeito Joule; diminuição da intensidade de campo magnético e utilização de chapas magnéticas de melhor qualidade para reduzir as perdas no ferro e a corrente de magnetização; emprego de rolamentos adequados e otimização do projeto dos ventiladores para diminuir as perdas por atrito e ventilação; e, finalmente, regularidade do entreferro, melhoria no isolamento e tratamento térmico das chapas do estator e do rotor para reduzir as perdas adicionais. Estas medidas podem acarretar uma redução de até 30% das perdas em comparação com o motor *standard* [37].

## 2.2 Especificações Técnicas

A maioria das aplicações dos motores de indução são destinadas não só para atender o uso pessoal e o setor comercial, mas principalmente as indústrias. Hoje o MIT é o motor mais utilizado no setor industrial, para atender as diversas necessidades existentes, sendo necessário saber as características nominais e especificações técnicas do motor. Desta forma, seus fabricantes produzem diversas faixas de potências nominais padronizadas, possuindo variações na frequência, tensão e velocidade da máquina em conjunto com as especificações técnicas contidas nos dados de placas.

### 2.2.1 Categoria ABNT

No Brasil, a ABNT NBR 17094-1:2018 [10] (Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos - requisitos) [10] apresenta cinco categorias de motores de indução com rotor gaiola de esquilo. Entretanto, nesta dissertação são apresentadas apenas as categorias N, H e D por se tratar das principais categorias de motores de indução com rotor gaiola de esquilo da ABNT. As curvas de conjugado versus rotação são ilustradas na Figura 5.



**Figura 5 – Curva de conjugado versus velocidade ABNT [41].**

Entre os motores da categoria N fazem parte as máquinas que possuem conjugado de partida normal, previstos para partida direta com 2, 4, 6 e 8 polos para uma faixa de potência de 0,37 a 1600 kW. O conjugado de partida a qualquer rotação entre zero e a rotação correspondente ao conjugado máximo, não pode ser inferior a 1,3 vezes o conjugado resistente de uma carga.

Os motores de categoria H possuem conjugado de partida elevado, previstos para partida direta, podendo possuir 4, 6 ou 8 polos entre a faixa de potência de 0,12 a 160 kW na frequência de 60 Hz. Seu conjugado de partida, representado pelo conjugado com rotor bloqueado ( $C_p$ ), pelo conjugado mínimo de partida ( $C_{min}$ ) e pelo conjugado máximo ( $C_{max}$ ), cada um expresso pela razão para o conjugado nominal ( $C$ ), deve ter seus valores mínimos à tensão nominal, conforme apresentado na tabela 5 da norma ABNT NBR 17094-1:2018 [10].

Os motores de categoria D apresentam conjugado de rotor bloqueado e escorregamento elevado, previstos para partida direta de motores que possuem 4 ou mais polos, na faixa de potência de 0,37 a 110 kW. O escorregamento em carga nominal deve ser igual ou superior a 5 %. São fornecidas três variações diferentes de motores quanto ao valor do escorregamento. Uma com 5 % a 8 %, outra acima de 8 % a 13 %. Para o acionamento de cargas que necessitam de inercia elevada como prensas de perfuração, tesouras entre outras. É desejado utilizar a energia armazenada em um volante sob flutuações severas de carga para diminuir o elevado pico de demanda do sistema. A terceira incluindo motores com escorregamento acima de 13 %, para aplicações geralmente em regimes de tempo limitado, devido às perdas elevadas no rotor, como, por exemplo, pontes rolantes, guinchos, elevadores etc [10].

## 2.2.2 Vantagens da Utilização do Motor de Indução

O motor de indução trifásico é o mais utilizado entre os sistemas motrizes para processos industriais. Suas principais vantagens são a eliminação do atrito de todos contatos elétricos deslizantes, construção simples possibilitando um maior custo benefício, manutenções mais simples e menos frequentes quando comparados aos outros tipos de motores principalmente motores de corrente contínua. O motor elétrico possibilita trabalhar com faixas de potências maiores, menor relação peso/potência, regime de carga diferente da nominal entre outras [42] [43].

### 2.2.3 Desvantagens da Utilização do Motor de Indução

O motor de indução mesmo sendo os mais utilizados nos setores industriais não possuem controle de velocidade a não ser se estiver sendo acionado por um inversor de frequência. No entanto, com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento da eletrônica de potência, sistemas de controle eletrônico modernos têm sido implementados de forma a se obter um melhor controle de velocidade, e o custo destes sistemas tem ficado cada vez mais acessíveis, porém acarretando em distorções harmônicas na forma de onda de tensão e corrente da máquina [44] [45].

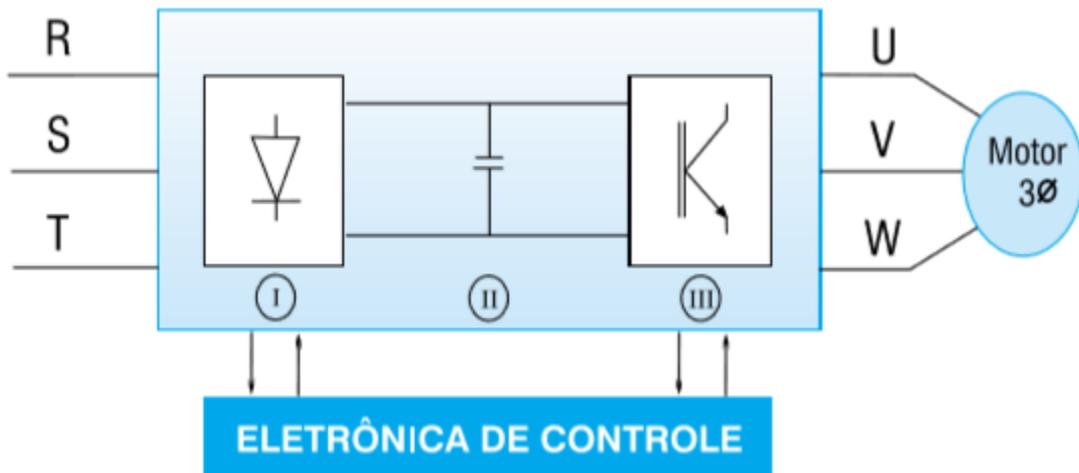
## 2.3 Acionamentos

Os acionamentos dos motores de indução podem ser considerados um dos seus momentos mais críticos, pois neste instante os motores necessitam de uma corrente de partida elevada para sair da inércia, como o caso do acionamento via partida direta que pode elevar a corrente do motor entre 5 a 6 vezes do valor nominal. Além do acionamento via partida direta existem outras formas de acionar um MIT, como por exemplo os acionamentos via estrela triângulo, auto - trafo compensador, *soft-start* e inversores de frequência. Entretanto, apenas o acionamento via inversor de frequência será abordado no decorrer deste trabalho [46].

### 2.3.1 Inversor de Frequência

Os inversores de frequência também conhecidos como conversores de frequência são dispositivos eletrônicos que têm finalidade gerar em sua saída um sinal de tensão senoidal de amplitudes e frequências variáveis a partir de uma fonte de tensão contínua [47] [48]. A Figura 6

ilustra os principais componentes do inversor de frequência e em seguida é detalhado o seu princípio de funcionamento.



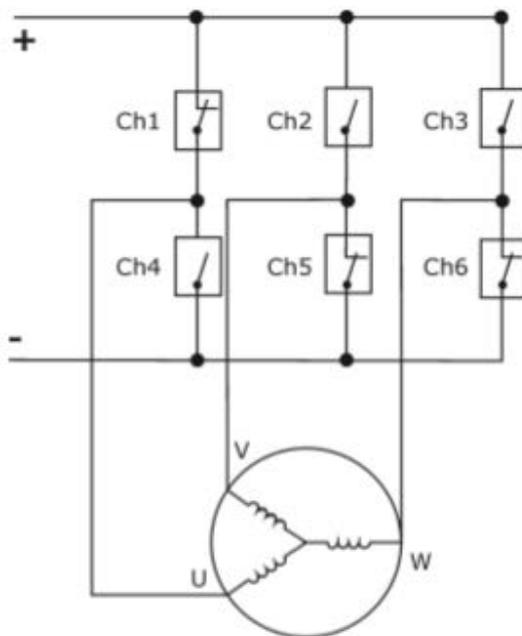
**Figura 6 - Estrutura do inversor de frequência [49].**

- I. Circuito Retificador
- II. Circuito intermediário
- III. Circuito inversor

O circuito retificador que também é conhecido por ponte retificadora a diodos é responsável por transformar a tensão alternada da rede de entrada em tensão contínua, porém com certa ondulação ou “*ripple*”.

O circuito intermediário também conhecido como circuito de filtragem ou barramento CC é composto por capacitores eletrolíticos, cuja principal função é diminuir o *ripple*, eliminando as flutuações na tensão retificada garantindo o fornecimento da tensão contínua para o circuito inversor. Além disto, este circuito tem objetivo de efetuar a troca de potência da rede para a máquina no caso do motor, e da máquina para a rede caso esta esteja trabalhando como um gerador.

No exemplo da Figura 7 é ilustrado um circuito de um inversor composto por seis chaves, podendo possuir mais dependendo da sua configuração. Tem como função fornecer um sistema de corrente alternada de frequência e tensão variável, através da tensão contínua vinda do circuito intermediário [49].

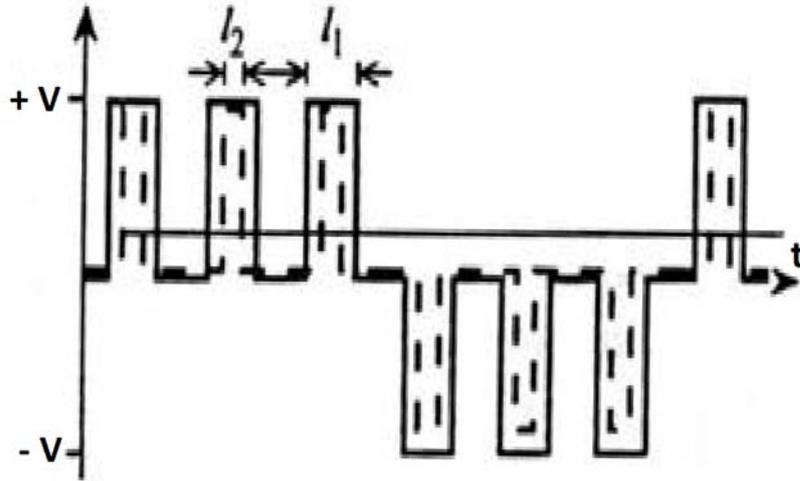


**Figura 7 –Circuito do inversor [50].**

O circuito da Figura 7 utiliza técnicas de modulação por largura de pulso (PWM) variando o valor médio da tensão aplicada a máquina, este processo é monitorado por um microcontrolador, que junto com um módulo de memórias, facilita o desenvolvimento do processo dentro das características desejadas. O inversor em seu funcionamento consiste em comutar a tensão contínua com uma frequência da ordem dos kHz (frequência de comutação) gerando uma saída de três formas de onda compostas por vários pulsos de diferentes larguras. Atuando sobre a amplitude e a frequência da tensão de alimentação do motor, desta forma permitindo controlar a velocidade angular e o conjugado. Dependendo da combinação de chaves abertas ou fechadas na saída do inversor é possível obter diferentes formas de onda. Estas chaves são implementadas nos inversores de frequência com dispositivos semicondutores chamados de transistores de potência. Existem várias tecnologias de fabricação para este tipo de transistores. Os transistores mais utilizados são os IGBTs Transistor bipolar com porta isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

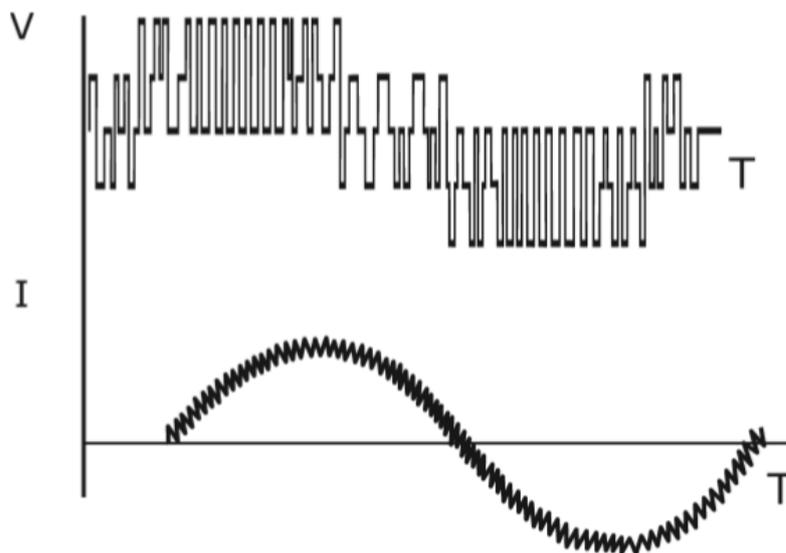
Neste tipo de configuração em cada ramo do inversor [(Ch1-Ch4), (Ch3-Ch6), (Ch2-Ch5)], os IGBTs são comandados de forma complementar e os comandos dos arranjos são desfasados de  $120^\circ$  uns dos outros, na sequência de fase ABC [50].

O inversor de frequência PWM implementa o controle da frequência e da tensão em seu bloco de saída. A tensão de saída (V) aplicada à carga tem uma amplitude constante, formada por uma sucessão de ondas retangulares e através da modulação por largura de pulsos, a tensão média é controlada conforme ilustrado na Figura 8.



**Figura 8 – Modulação por largura de pulso. Adaptado de [50].**

A técnica de PWM se baseia em obter um sinal alternado de baixa frequência através da modulação em alta frequência. De forma analógica, é possível obter este tipo de modulação, comparando a tensão de referência com um sinal triangular simétrico, cuja frequência determina a frequência de comutação do inversor. A frequência da onda triangular, chamada portadora, deve ser no mínimo 10 vezes superior à frequência máxima da onda de referência. A largura dos pulsos de saída do inversor varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora [51]. O padrão de chaveamento da tensão e corrente resultante em uma das fases do motor quando utilizando o PWM para comando dos transistores de potência é ilustrado na Figura 9.



**Figura 9 –Chaveamento da tensão e corrente resultante [50]**

## 2.4 Métodos de Controle

Os inversores de frequência podem ser de dois tipos, caracterizados pela sua forma de controle escalar e controle vetorial. O circuito interno de potência é igual para os dois sistemas. Entretanto, a diferença está na forma que é executado o controle de velocidade do motor.

### 2.4.1 Controle Escalar

O controle escalar é um dos métodos mais antigos para obter o controle de velocidade de um motor de indução e o mais conhecido no setor industrial. Também pode ser chamado de “V/F constante”. É assim classificado o inversor de frequência que opera o motor controlando a sua tensão e frequência. Buscando sempre manter a relação V/F constante para qualquer velocidade do motor. O controle escalar usa a velocidade da máquina como sinal para variar a tensão e a frequência e disparar os transistores [52] [53].

O estator do motor de indução trifásico possui um bobinado no qual os parâmetros da resistência ôhmica ( $R$ ) e a indutância ( $L$ ) definem suas características. A resistência depende do tipo de material e do comprimento do fio com o qual é feito o bobinado. E a indutância depende da forma do bobinado e da interação com o rotor. Simplificando, podem-se dizer que a corrente que circula pelo estator do motor é linearmente proporcional ao valor da resistência  $R$  e ao valor da reatância indutiva  $X_L$  que é dependente da indutância  $L$  e da frequência  $f$  como é possível verificar nas equações (1) e (2) [50].

$$X_L = 2\pi fL \quad (1)$$

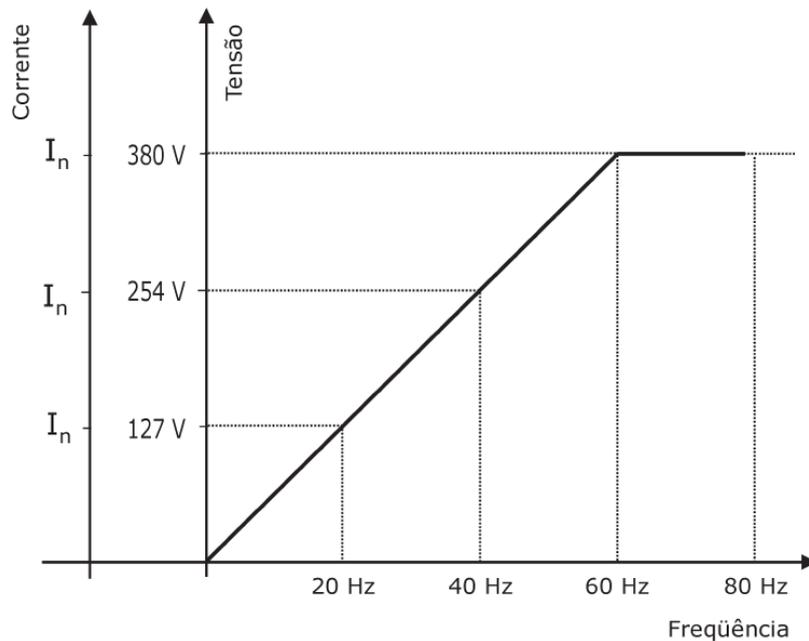
$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (2)$$

Onde  $X_L$  é a reatância indutiva,  $f$  é a frequência,  $L$  a indutância,  $I$  é a corrente,  $V$  é a tensão de alimentação e  $R$  a resistência do estator.

Assim as frequências acima de 30 Hz apresentam valores de resistências muito baixos quando comparado com o valor da reatância indutiva. Desta forma, para o controle escalar simples esse valor é desprezado, de modo que o valor da corrente seja proporcional à tensão de

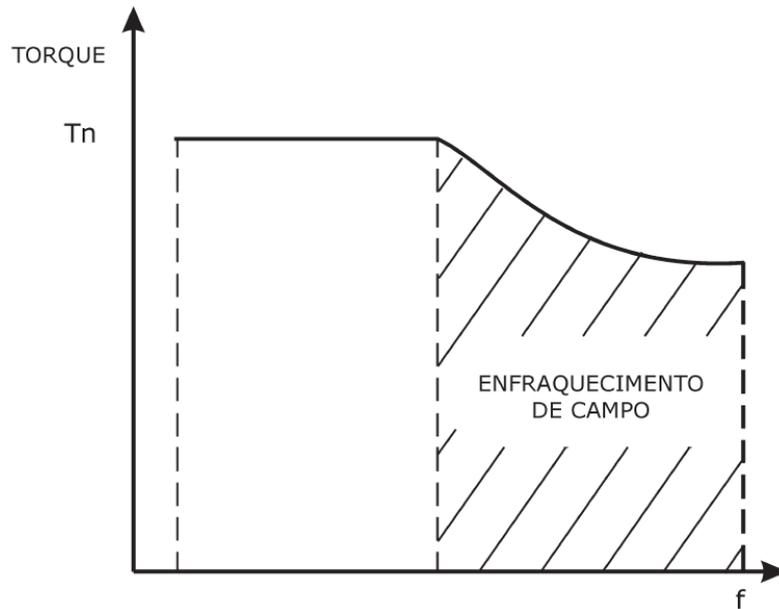
alimentação, a indutância e a frequência. Sendo que o valor da indutância se torna um valor fixo da máquina, mas a tensão e a frequência não, desta forma, se tornando parâmetros que podem ser controlados pelo inversor de frequência [48].

Quando esses valores de frequência e tensão são variados de forma proporcional é possível obter o controle de velocidade do motor de indução e obter no estator uma corrente constante na ordem da corrente nominal do motor, conforme ilustrado na Figura 10.



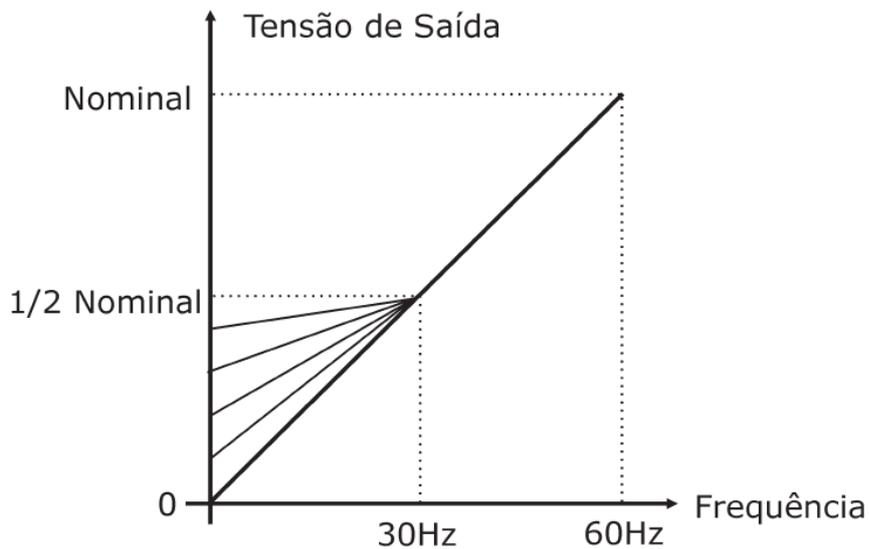
**Figura 10 – Variação de corrente e tensão x Variação de frequência [50].**

Como é possível observar na Figura 10, dada como exemplo, acima de 60 Hz a tensão não pode continuar subindo pois já atingiu a tensão máxima da rede. A partir deste ponto a corrente e consequentemente o torque do motor irá diminuir com o aumento da frequência. Este comportamento é conhecido como região de enfraquecimento de campo e pode ser observada no gráfico da Figura 11.



**Figura 11 – Enfraquecimento de Campo [50].**

Já para frequências inferiores a 30 Hz a resistência do estator que foi desprezada anteriormente começa a ter influência no cálculo da corrente. Se for mantida a proporcionalidade entre a frequência e a tensão, a corrente e conseqüentemente o conjugado tendem a diminuir de forma significativa. Para que isto seja evitado a tensão do estator em baixas frequências deve ser aumentada através de um método chamado de compensação  $I \times R$  conforme ilustrado na Figura 12.



**Figura 12 – Compensação  $I \times R$  [50].**

O controle escalar é utilizado em aplicações que não necessitam de elevadas taxas de aceleração e desaceleração, nem elevada precisão do controle do conjugado. Um inversor que possui este controle pode controlar a velocidade de rotação do motor com precisão de até 0,5 % da velocidade nominal para sistemas sem variação de carga. Este controle é geralmente usado em motores convencionais sem sistemas de realimentação em malha fechada. E a faixa da variação de velocidade é pequena, na ordem de 1:10 (Ex: 6 a 60 Hz).

## 2.4.2 Controle Vetorial

O controle vetorial que também é conhecido como controle de orientação de campo era aplicado em apenas máquinas de corrente contínua. A partir dos anos 70 do século XIX, Blaschke, Hasse e Leonhard introduziram as técnicas desse controle nos motores de indução, facilitando a utilização dos mesmos em aplicações que necessitam de uma elevada precisão [54].

O princípio de funcionamento do controle vetorial é baseado na transformação de variáveis trifásicas para um referencial dinâmico. Decompõe-se a corrente do motor em dois vetores, um que produz o fluxo magnetizante e o outro que produz o conjugado, ajustando separadamente o conjugado e o fluxo. O controle vetorial também pode ser realizado em malha aberta (*sensorless*) ou em malha fechada, possuindo as seguintes vantagens quando comparado com motores de corrente contínua [48]:

- Elevada precisão na regulação de velocidade;
- Elevada performance dinâmica;
- Controle linear do conjugado;
- Ajuste suave para velocidades reduzidas sem oscilação de conjugado mesmo com variação de carga podendo ser realizado em malha aberta (*sensorless*) ou em malha fechada.

O controle vetorial pode ser do tipo *sensorless* (sem sensor) ou com sensor de velocidade, cuja, suas características são apresentadas:

- **Com sensor de velocidade:** Permite maior precisão do controle de velocidade e do conjugado mesmo com velocidades baixas por ser um sistema de malha fechada. Porém necessita da instalação de um sensor de velocidade no motor [48] [53].
- **Sensorless (sem sensor):** Este tipo de controle é mais simples que o com o sensor de velocidade, entretanto, apresenta algumas limitações no controle do conjugado

principalmente se o motor estiver operando com velocidade reduzida. Já para velocidade próximo da nominal é tão bom quanto o controle vetorial com realimentação [48].

Os inversores de frequência operando com controle vetorial podem controlar a velocidade e o conjugado de um motor tendo como referência a corrente do próprio. São mais empregados no controle fino de velocidade. O controle vetorial determina a corrente do estator, a magnetização e a corrente requerida para produzir o conjugado necessário de operação do motor [52].

O controle vetorial por ser mais complexo é mais difícil de implementar. Devido ao fato do conjugado eletromagnético do motor de indução depender, quer do valor do fluxo magnético no entreferro, quer do valor da velocidade de rotação e também devido as relações conjugado-fluxo e conjugado-velocidade não serem lineares [48] [53].

Para que o conjugado eletromagnético de uma máquina CA trifásica seja controlado de forma semelhante a uma máquina de corrente contínua, sempre com um conjugado eletromagnético máximo, os fasores do fluxo estatórico e da corrente rotórica tem que estar em quadratura, já que o conjugado eletromagnético resulta do produto vetorial entre estas duas grandezas.

O motor de corrente contínua possui corrente da armadura e o fluxo de excitação fixos no espaço, desta forma o conjugado eletromagnético pode ser manipulado através do controle do fluxo de excitação ou da corrente de armadura de formas separadas. Ou seja, é sempre produzido o conjugado máximo para um dado par de valores da corrente de excitação e da corrente na armadura [48].

Já na máquina de corrente alternada a situação não é a mesma, pois as grandezas envolvidas no cálculo do conjugado estão dependentes uma da outra e pertencem a referências diferentes, um estacionário com o estator, no caso do fluxo estatórico, e o outro estacionário com o rotor, no caso das correntes rotóricas. Além disso, é levado em conta o fato do fluxo estatórico e da corrente rotórica, dependerem dos valores da frequência e do ângulo de fase das correntes do estator [48]. Desta forma, ao contrário do que se passa com o controle escalar no qual apenas se controla a amplitude do fluxo. No controle vetorial são controlados, em simultâneo, os valores da amplitude e da posição do fluxo, tornando a sua implementação mais exigente do ponto de vista computacional [53].

# Capítulo 3 - Qualidade de Energia em Motores com Inversores de Frequência

Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, tem aumentado o número de dispositivos chaveados instalados a rede elétrica. Com isso os problemas de qualidade de energia (QE), como as distorções na forma de onda de corrente e tensão provocadas pelos harmônicos, entre outros.

É possível definir qualidade de energia de diversas formas. Segundo Dungan [55] QE é definida como qualquer problema manifestado nas grandezas elétricas de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou operação inadequada dos equipamentos. Já o IEEE 1159 [56] define como sendo o resultado de uma interação entre todos os elementos do sistema elétrico, portanto, definida como uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente em um determinado tempo e localização no sistema elétrico.

Independente da definição de qualidade de energia, existindo indicadores ruins os equipamentos instalados na rede sofrerão as consequências, podendo apresentar problemas variados, desde o mau funcionamento do equipamento até a sua deterioração.

## 3.1 Harmônicos

Arrilaga [57] define harmônicos em sistemas elétricos como sendo tensões e correntes senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental. A frequência fundamental no Brasil possui valor de 60 Hz e pode ser definida como “frequência industrial”. E segundo o IEEE Std 519:2014 [58], harmônico é um componente de ordem maior que um da série de Fourier de um sinal periódico.

Na década de 80 do século XX, com a substituição de equipamentos elétricos e eletromecânicos por equipamentos eletrônicos, observou-se o aumento do impacto das perturbações provocadas pelos harmônicos. O inversor de frequência com PWM é um dispositivo eletrônico e não linear, que gera distorções na forma de onda de tensão e corrente do motor de indução. Este dispositivo produz uma forma de onda de tensão com sucessivos pulsos retangulares de curta duração, de modo a inserir conteúdo harmônico na rede. Segundo Nahvi e Edminister a ordem de um harmônico pode ser definida ao número inteiro obtido pelo quociente da frequência do mesmo, pela frequência do componente fundamental [59], conforme equação (3).

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (3)$$

onde  $n$  representa a ordem do harmônico,  $f_n$  a frequência do harmônico de ordem  $n$  e  $f_1$  é a frequência da ordem do harmônico fundamental. A Tabela 1 representa a classificação dos harmônicos segundo a sua ordem frequência.

**Tabela 1 – Ordem e frequência dos harmônicos. Adaptado de [48].**

<i>Ordem</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Frequência (Hz)</i>
<i>1</i>	50	60
<i>2</i>	100	120
<i>3</i>	150	180
<i>4</i>	200	240
<i>5</i>	250	300
<i>6</i>	300	360
<i>n</i>	n.50	n.60

### 3.2 Interação entre a Rede e o Inversor

O arranjo motor e inversor é observado pela fonte de alimentação como uma carga não linear. E de forma geral, considera-se que um retificador possui harmônicos característicos de ordens iguais ao número de pulsos mais ou menos um [24]. Exemplificando, para o caso de um inversor que possua uma ponte retificadora de 6 diodos, são gerados harmônicos principalmente de 5ª e 7ª ordem, e sua amplitude pode variar de 10% a 40% do harmônico fundamental, dependendo da impedância da rede. Já para o caso de o inversor possuir 12 diodos, ou seja, 12 pulsos, os harmônicos mais significativos gerados serão de 11ª e 13ª ordem. Os harmônicos de ordem superior geralmente possuem menor amplitude e são mais fáceis de filtrar [24].

O parâmetro que mostra o quanto os harmônicos distorcem a rede é o *Total Harmonic Distortion* (THD). Segundo o IEEE Std. 519 o THD é definido como a razão entre a raiz quadrada do conteúdo harmônico de valor eficaz, considerando componentes harmônicos até a 50º ordem e especificamente excluindo inter-harmônicas, expressa como uma porcentagem da fundamental e o valor eficaz da componente fundamental. Componentes harmônicos de ordem maior que 50 podem ser incluídos quando necessário [58].

Baseado neste conceito é possível perceber que o THD mede o quanto o sinal de tensão ou corrente está distorcida em relação a uma senóide pura. A equação (4) expressa a forma matemática da distorção harmônica total para tensão [24] [48].

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1}^n V_n^2}}{V_1} \quad (4)$$

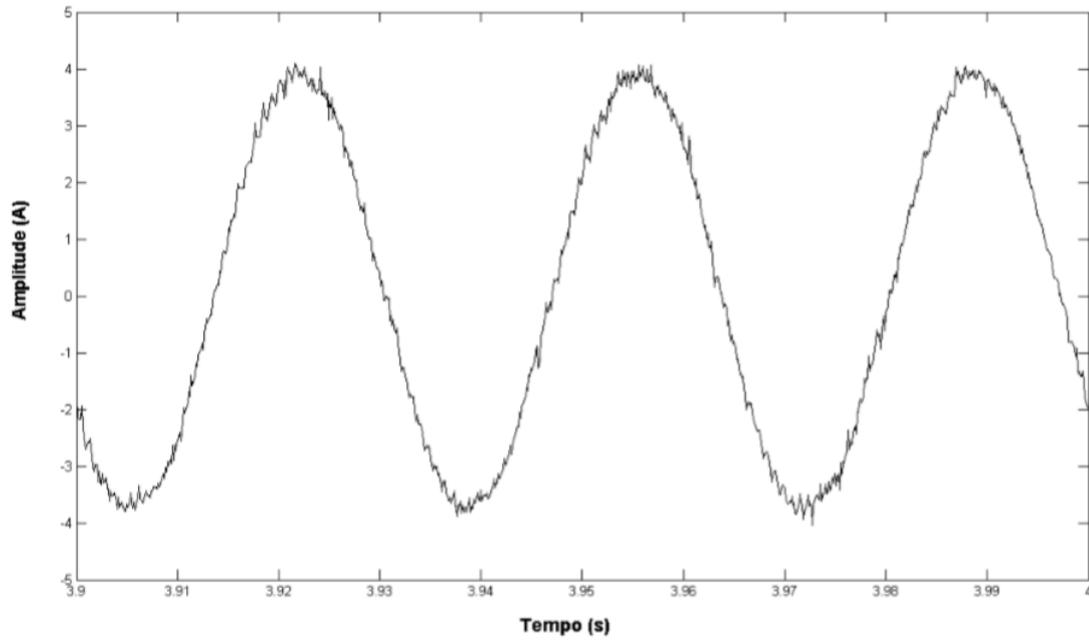
onde  $V_n$  representa o valor eficaz da tensão dos harmônicos de ordem  $n$  e  $V_1$  a tensão do harmônico fundamental. Quando o interesse for calcular o THD de corrente utiliza-se a mesma equação, apenas substituindo os termos da tensão por corrente.

### 3.3 Interação entre o Inversor e o Motor

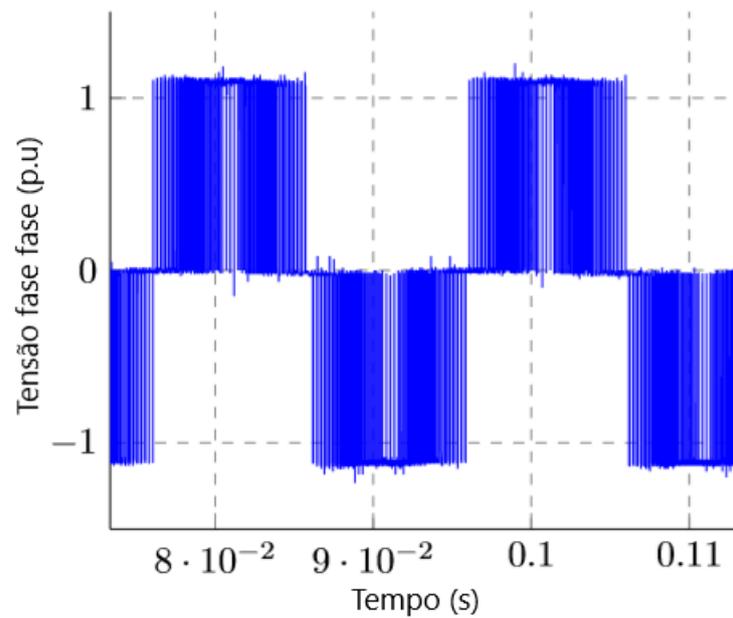
Quando o motor de indução é alimentado por uma tensão produzida pelo inversor de frequência, o mesmo se sujeita a tensões com diferentes ordens harmônicas e, dependendo da modulação PWM utilizada, frequência de chaveamento e outras particularidades de controle, o motor pode ser submetido a perturbações que podem provocar [24]:

- Aumento das perdas;
- Aumento dos níveis de vibração;
- Aumento de ruídos;
- Elevação da temperatura;
- Diminuição do rendimento.

Além das anomalias mencionadas, é possível que apareçam outros efeitos, como o “*stress*” do sistema de isolamento e correntes pelos mancais. É importante mencionar que este fenômeno não é ocasionado especificamente pelos harmônicos. Na Figura 13 e na Figura 14 é possível visualizar uma demonstração da forma de onda da corrente e da tensão, respectivamente, do motor de indução quando alimentado pelo inversor de frequência. É possível observar que a forma de onda de corrente é praticamente senoidal e a forma de onda de tensão se torna pulsante devido ao PWM. Entretanto, as harmônicas de maiores amplitudes são de tensão [24] [48].



**Figura 13 – Forma de onda de corrente do motor de indução [24].**



**Figura 14 – Forma de onda de tensão do motor de indução. Adaptado de [26].**

Para reduzir os harmônicos gerados pelo inversor podem ser utilizados alguns métodos. A Tabela 2 apresenta quatro métodos e suas características segundo manual da WEG [24].

**Tabela 2 – Métodos de redução dos harmônicos e suas características [24].**

<b>Métodos</b>	<b>Características</b>
Instalar filtros passivos na saída (indutiva, indutiva e capacitiva (senoidal),dV/dt)	- Aumenta os custos - Restrição da utilização dos modos vetoriais - Queda da tensão e potência do motor
Utilização de inversores com mais níveis	- Aumenta os custos - Reduz a confiabilidade do inversor - Controle mais complexo
Melhoria da qualidade da modulação PWM através do <i>Space Vector Modulation</i> (SVM)	- Não aumenta os custos - Melhor controle da tensão - Aumenta o rendimento
Aumentar a frequência de comutação	- Aumento das perdas - Aumento das correntes de fuga pela terra

### 3.4 Considerações em Relação ao Rendimento

Até o ano de 2013 não existia nenhuma norma ou procedimento que avaliasse o rendimento do conjunto motor e inversor de frequência, assim permitindo que os motores de indução fossem ensaiados de diferentes formas sem seguir um procedimento específico. O ensaio era realizado mediante acordo entre fabricante e Laboratórios, e os resultados obtidos não influenciavam na aceitação do motor. Para determinar o rendimento da máquina, sabendo que o conjunto motor e inversor deve ser analisado, era levado em consideração que o arranjo gera um aumento das perdas ocasionadas pelos harmônicos, desta forma, sendo necessário analisar as características do conjunto motor e inversor, como:

- Frequência de trabalho;
- Frequência de comutação;
- Condição de Carga;
- Potência do motor;
- Taxa de distorção harmônica do inversor.

Além disso, os instrumentos de medição, que são de grande importância para determinar o rendimento do motor, devem medir o valor eficaz verdadeiro (true RMS) das grandezas elétricas, de modo que seja possível a leitura dos valores corretos da potência de entrada e potência de saída do inversor.

A eficiência do motor é definida como a razão entre a potência útil ( $p_u$ ) e a potência absorvida ( $p_{abs}$ ), na qual, a potência absorvida é igual a soma da potência útil e o somatório de todas as perdas. Conforme apresentado na equação (5).

$$\eta = \frac{p_u}{p_{abs}} = \frac{p_u}{p_u + \sum perdas} \quad (5)$$

Leva-se em consideração que as perdas do motor são devidas principalmente ao efeito Joule e às perdas no ferro, e assume-se que, as perdas joule absorvem a maior componente das perdas. O rendimento do motor diminui para frequências reduzidas em relação a frequência fundamental uma vez que a potência útil do motor também é reduzida, embora as perdas no ferro (que dependem da frequência) diminuam um pouco. As perdas por efeito Joule (que dependem da corrente ao quadrado) mantem-se praticamente constantes para cargas com conjugado constante, desta forma a variação das perdas globais não sofrem uma alteração significativa [24] [48].

### 3.5 Efeito dos Harmônicos nos Cabos Elétricos

Os cabos de energia elétrica são afetados pelo conteúdo harmônico da rede, uma vez que as perdas térmicas são proporcionais ao quadrado da corrente que circula pelos condutores. Os harmônicos são responsáveis por aumentar o efeito pelicular nos cabos elétricos. Pode ser considerado um efeito pelicular a repulsão das linhas de corrente eletromagnética geradas no interior de um cabo elétrico, fazendo com que estas passem a fluir na superfície do condutor. Esse fenômeno acontece apenas em circuitos de CA. Em outras palavras, consiste em uma redução da área condutora, à medida que se eleva a frequência da corrente, fazendo com que a condução da corrente seja na superfície do condutor e não no seu interior. O efeito pelicular resulta em uma maior resistência do cabo elétrico a circulação de corrente, acarretando em um aumento das perdas devido ao efeito joule [60] [61].

O aumento das perdas reflete em uma diminuição da eficiência de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação puramente senoidal e a redução da vida útil da máquina. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede.

Outro fenômeno que afeta a resistência do cabo, análogo ao efeito pelicular, é o efeito de proximidade devido à indutância mútua entre condutores dispostos paralelamente. Este fenômeno

se deve as distorções que os campos magnéticos gerados em um dado condutor causam sobre a corrente elétrica em um condutor paralelo. Esse fato pode se agravar devido à elevação do valor eficaz da corrente elétrica total circulante de um condutor devido à presença dos harmônicos, contribuindo para um aumento do campo magnético e podendo ocasionar um acoplamento indutivo com um condutor paralelo [60] [61].

### 3.6 Desequilíbrios de Tensão

Os desequilíbrios de tensão são caracterizados pelas diferenças entre os valores das tensões presentes em um sistema trifásico. Podem ocorrer devido à abertura de uma fase, afundamento de tensão, cargas monofásicas mal distribuídas entre outros.

A presença de tensões desequilibradas no motor elétrico, dependendo de sua intensidade, pode provocar alterações nas suas características nominais. Segundo Resende e Oliveira, um dos fatores que mais contribuem para o aumento das perdas no motor de indução trifásico é a alimentação com desequilíbrio entre fases, que pode gerar anomalias nos motores elétricos, como destacado em [62]:

- Aumento excessivo de corrente. A mesma possui corrente negativa gerando um campo rotativo contrário ao produzido pela sequência positiva, em que a interação desse campo cria ondulações eletromecânicas pulsante na sua velocidade reduzindo o rendimento [63] [64].
- Elevação de temperatura acima dos limites aceitáveis pelo motor fazendo com que seja reduzida a vida útil do mesmo. Estudos comprovam que uma elevação de temperatura de 10°C na temperatura de isolamento de um motor reduz a sua vida útil pela metade [65].
- Redução do conjugado disponível entregue a carga, também resultado da existência de componentes de campo magnético girando no sentido contrário ao da rotação do motor [65].

Portanto, para a realização de ensaios nos motores de indução trifásicos e determinar as características nominais do equipamento, conforme ABNT NBR 17094-3:2018 [9], as tensões de linha devem ser medidas nos terminais do motor. Se as condições do local não proporcionarem conexões confiáveis, o erro introduzido deve ser avaliado e as leituras devem ser corrigidas. O ensaio de elevação de temperatura somente deve ser realizado quando o desequilíbrio de tensão em

relação à tensão nominal do motor não exceder 0,5%. O desequilíbrio percentual de tensão é igual a 100 vezes o desvio máximo da tensão em relação à tensão média, dividido pela tensão média.

Exemplificando, caso as tensões medidas nas três fases do motor apresentem valores de 226V, 215V e 210V, a tensão média será de 217V, e o desvio máximo em relação à média é de 9V portanto o desequilíbrio percentual de tensão pode ser obtido pela equação, obtendo um valor de 4,15% (6) [9].

$$D_{tensão} = \frac{Desvio_{max}}{V_{med}} \times 100 \quad (6)$$

onde:

$D_{tensão}$  é o desequilíbrio percentual de tensão;

$Desvio_{max}$  é o desvio máximo em relação à média da tensão;

$V_{med}$  é a tensão média.

No âmbito desta dissertação foi publicado o seguinte artigo técnico em periódico internacional, voltado para a qualidade de energia [66].

M.Z.Fortes, L.B.Sousa, G.M.Quintanilha, C.E.Santana, H.O.Henriques; “Analysis the Effects of Voltage Unbalance on Three-Phase Induction Motors” International Journal of energy and Sustainable Development, American Institute of science, Vol. 3, n ° 2, 2018, pp. 29-37.

# Capítulo 4 - Eficiência Energética e Motores Elétricos

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a eficiência energética pode ser definida como a geração da mesma quantidade de energia com menos recursos naturais ou obter o mesmo trabalho com menos energia [67] [68]. No Brasil existem várias instituições e programas que lidam regularmente com o tema de eficiência energética, tais como: Ministério de Minas e Energia (MME), que tem como principal função acompanhar e aferir permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletro energético no Brasil; Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), em que a empresa ELETROBRÁS é a principal responsável pela execução do projeto; Programa Nacional de Racionalização do uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural (CONPET), a responsabilidade principal do programa está sobre a empresa PETROBRAS; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pela execução do Programa de Eficiência Energética (PEE) das Concessionárias Distribuidoras de Energia Elétrica; as próprias concessionárias distribuidoras; Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), responsável pela execução do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE); e algumas grandes empresas industriais, que possuem programas internos de conservação de energia [69].

## 4.1 A importância da Eficiência Energética

Segundo a International Energy Agency (IEA) a eficiência energética é considerada a maior fonte de energia inexplorada do mundo, se tornando o maior “combustível” mesmo somando todas as fontes fósseis e renováveis combinadas [68]. A eficiência energética hoje em dia tem se tornado um dos objetivos principais do desenvolvimento global devido ao aumento da demanda de energia e da necessidade de limitar a emissão de gases com efeito estufa [68].

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o crescimento populacional tem se elevado de forma bem acentuada desde as últimas décadas do século XX. A população mundial atingiu em 2015, 7,349 bilhões de pessoas com previsão de alcançar 11,2 bilhões no ano de 2100 [70]. Sendo que no ano de 1973 a população mundial era de aproximadamente 3,6 bilhões de pessoas [71]. Pode ser observado que no ano de 2015 o crescimento populacional mais que dobrou em relação a 1973 e o consumo de energia também se elevou, porém, bem acima do aumento da população. Segundo IEA entre os anos de 1973 e 2014 o consumo de energia elétrica no mundo

oriundo das diversas fontes primárias aumentou 388%, passando de 6.171 TWh em 1973, para 23.816 TWh em 2014 [72], conforme ilustrado na Figura 15.

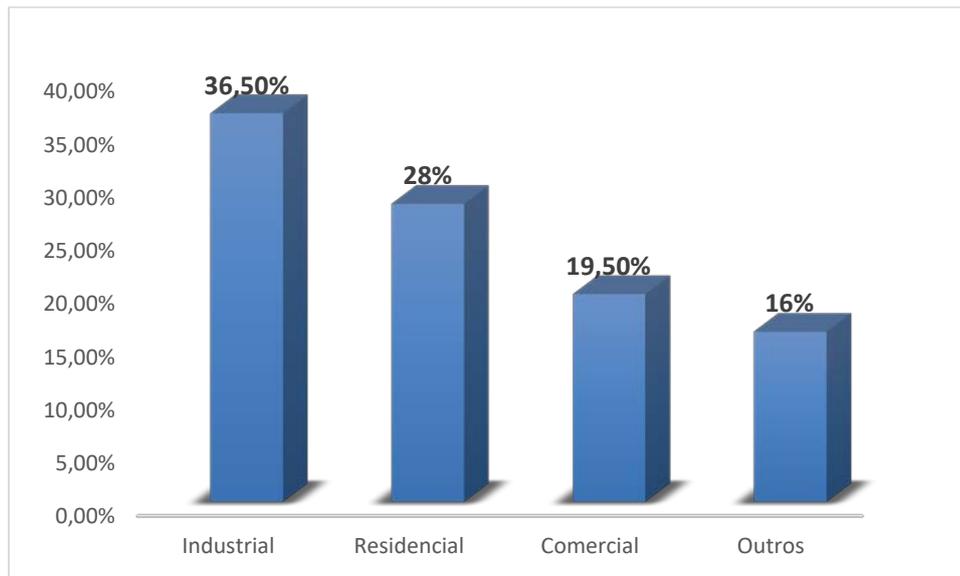


**Figura 15 – Fontes de energia primaria 1973 x 2014 [72].**

Desta forma, o reconhecimento da importância da eficiência energética na obtenção da sustentabilidade global necessita de uma maior atenção refletindo uma alteração de paradigma, tendo em vista que a eficiência energética não é mais “medida e valorizada apenas como a quantidade negativa da energia que não é utilizada” [68].

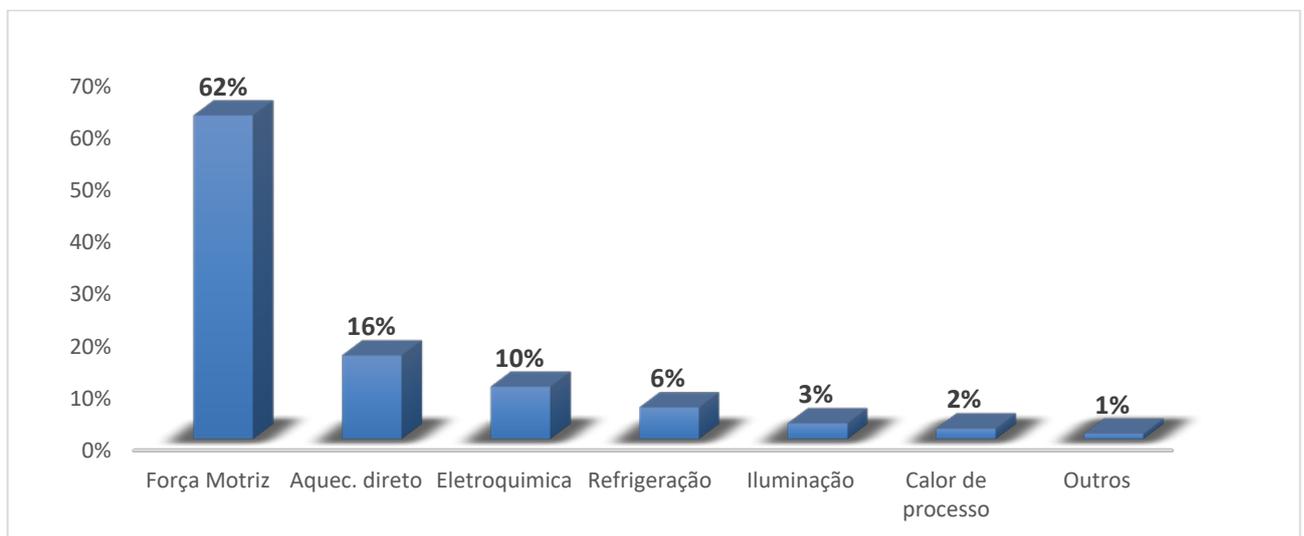
As projeções da agência internacional de energia para 2035 apontam que dois terços do potencial de eficiência energética provavelmente permanecerão inexploradas. O grande problema é que as partes interessadas públicas e privadas nem sempre entendem a importância da eficiência energética e focam seus investimentos apenas na geração de energia, visualizando a eficiência energética apenas como uma energia invisível e não utilizada [68].

A Figura 16 apresenta as participações de diversas áreas voltadas para o consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2015. Nota-se que o setor industrial é responsável pela maior parte da demanda de energia elétrica.



**Figura 16 – Consumo de energia elétrica no Brasil. Adaptado de [2].**

O setor industrial é responsável por 36,5% do consumo de energia elétrica no Brasil se tornando o maior consumidor entre as áreas apresentadas na Figura 16, seguido pelo setor residencial com 28%. O setor industrial é distribuído por sete outras áreas que representam o uso final do consumo de energia elétrica no Brasil, no qual a força motriz ou sistemas motrizes são responsáveis por 62% do consumo do setor industrial, conforme apresentado na Figura 17.



**Figura 17 – Distribuição do consumo de energia elétrica do setor industrial. Adaptado de [2].**

Incluindo-se a área de refrigeração os sistemas motrizes somam aproximadamente 68% do consumo de energia. Isto significa que os sistemas motrizes, utilizados pelo setor industrial, são responsáveis por 25% do consumo de energia elétrica do Brasil [2]. Desta forma se torna

necessário dar uma atenção maior para os sistemas motrizes desenvolvendo políticas de eficiência energética e normas que garantam a sua melhor aplicação.

## 4.2 Normalização

As normas de eficiência energética para motores de indução visam regulamentar e padronizar os valores mínimos de rendimentos para cada potência de motor. No âmbito desta dissertação serão utilizadas as normas ABNT NBR 17094-1:2018 [10] e IEC 60034-30-1 [16] para assim avaliar o resultado dos rendimentos dos motores ensaiados.

Diante do cenário apresentado no tópico 4.1, a norma de eficiência energética NBR 17094-1:2018 [10] se torna de suma importância para a avaliação da eficiência de máquinas elétricas no Brasil. A partir da revisão do ano 2000 foram incluídos os valores de rendimentos mínimos para motores de indução trifásicos conforme NBR 7094 [73]. Em 2008 houve a necessidade de atualizar os mínimos valores de rendimento utilizando a versão da NBR 17094-1:2008 [74], diante de algumas melhorias o mesmo se fez com o lançamento da versão da NBR 17094-1 de 2013 [75]. Normas e portarias voltadas para a eficiência dos MITs têm o intuito de melhorar a eficiência energética no país. A revisão da normalização brasileira para motores elétricos de 2013 (ABNT NBR 17094-1) incluiu, pela primeira vez, a regulamentação de motores que possuem rendimentos superiores aos de alto rendimento (classe IR2), que seriam os motores da classe IR3 ou rendimento Premium. Alguns fabricantes já produziam motores elétricos com esta classe IR3 ou até mesmo superiores a ela, seguindo uma tendência internacional [2]. Em 2018 a ABNT NBR 17094-1 [10] apresentou uma nova versão, foram incluídos valores mínimos de rendimento para motores de indução trifásicos com potências menores que 1CV, expandindo a faixa de potência de 0,16 a 500 CV. As potências dos motores fracionários não tinham valores de rendimento normalizados nem método de ensaio estabelecido. Os ensaios eram realizados mediante acordo entre fabricantes e Laboratórios, cabendo ao fabricante marcar o rendimento na placa de identificação e indicar o método de ensaio.

Em 2008, a Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) elaborou a norma internacional IEC 60034-30:2008 [76] para regulamentar e padronizar a eficiência de motores. Esta norma apresenta classes mínimas de eficiência de IE1, que são responsáveis pelos menores índices de eficiência, até a IE4, que apresentam maiores índices mínimos de rendimento que devem ser seguidos na fabricação de MITs. A norma IEC 60034-30:2008 [76] foi substituída pela IEC 60034-30-1:2014 [16], ampliando o seu escopo, passando a cobrir motores com uma faixa de potência de

0,12 a 1000 kW [77]. As normas da IEC classificam os motores conforme as suas classes de eficiência energética, e possui um sistema para os *Conformity Assessment Schemes for Electrotechnical Equipment and Components* (Esquemas de Avaliação da Conformidade para Equipamentos e Componentes Eletrotécnicos) (IECEE) que busca realizar a Avaliação da Conformidade da IEC. Esse sistema coloca em operação um programa global de ensaios de motores elétricos, verificando se os índices de eficiência prometidos pelos fabricantes estão de acordo com os valores estipulados pela norma IEC 60034-30-1:2014 [68].

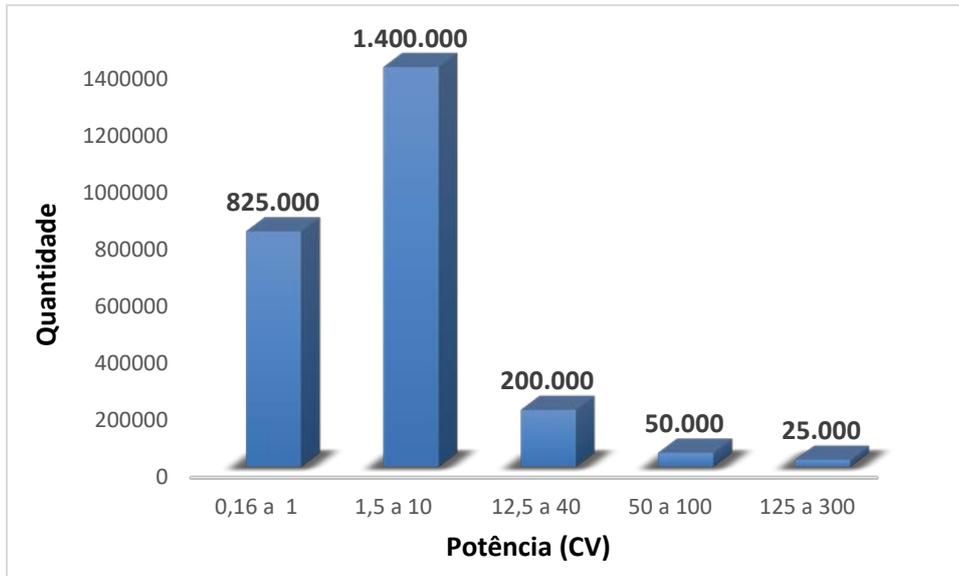
As normas de eficiência energética em vigor, NBR 17094-1:2018 [10] e IEC 60034-30-1:2014 possuem exigências mínimas de rendimentos diferentes. Quando comparados os índices mínimos de rendimento exigidos para os motores das classes mais eficientes das respectivas normas, é observada uma considerável divergência dos valores mínimos de rendimento exigidos. A IEC define classes de rendimento com valores mínimos superiores que a ABNT, principalmente para os motores de 0,16 a 10 CV. Isto impacta em uma diferença nos índices de eficiência energética de regiões que utilizam normas diferentes, como o Brasil e o continente europeu. Os motores fracionários que recentemente foram adicionados a norma NBR 17094-1 [10] da versão de 2018 são os mais impactados, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Diferença de valores mínimos de rendimento exigido pela IEC e NBR.**

Potência		Diferença (%)			
kW	CV	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0,12	0,16	4	4	4	4,5
0,18	0,25	4,4	4,5	4,5	4
0,25	0,33	4,5	3,6	6,5	4
0,37	0,5	3,6	3,3	3,2	3,5
0,55	0,75	3,2	5	3	3
0,75	1	2	2	1,5	3
1,1	1,5	1,5	1	1	3
1,5	2	1	2	1	1,5
2,2	3	2	1,5	0,7	2
3,7	5	1	1,5	0,7	2
5,5	7,5	0,7	0,7	0,7	2
7,5	10	1,5	0,7	1,4	1,5

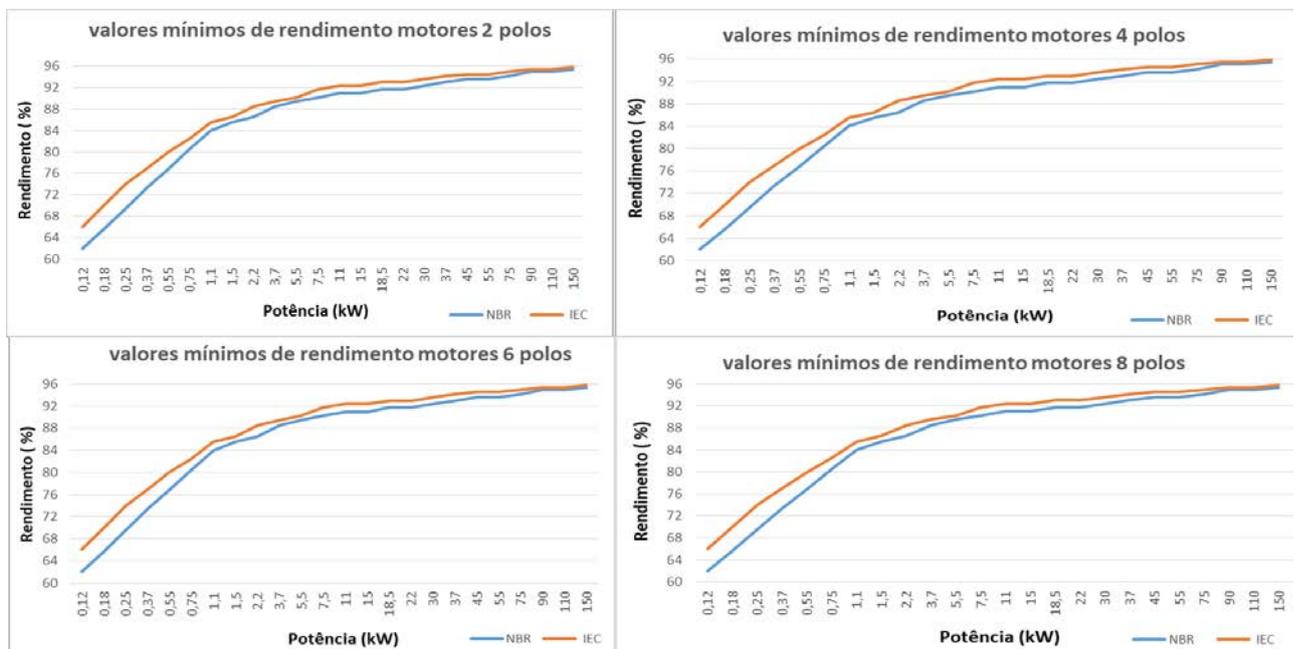
Conforme mencionado, os motores regidos pela NBR apresentam valores de rendimentos menores do que a IEC, principalmente para os motores de menores potências. Entretanto, os motores de 0,16 a 10 CV são os mais vendidos no mercado brasileiro, desta forma, apresentam

impactos negativos quando se trata da eficiência energética [69]. A Figura 18 quantifica a venda de motores de indução trifásicos no período de 1992 a 2012 [37] [78].



**Figura 18 – Venda de motores de indução trifásicos. Adaptado de [37].**

Na Figura 19 são apresentadas comparações entre os valores mínimos de rendimento para todas as potências semelhantes entre as normas NBR 17094-1:2018 [10] para motores de classe IR3 e IEC 60034-30-1:2014 para motores de classe IE4, para máquinas de 2 a 8 polos.



**Figura 19 – valores mínimos de rendimento.**

#### 4.2.1 A normativa brasileira

A história da normativa brasileira para o rendimento dos Motores de Indução Trifásicos com Rotor Gaiola de Esquilo (MITRGE) teve início nos anos 80, junto com a crise mundial do petróleo. Nesse período, o governo brasileiro demonstrou as primeiras preocupações com o uso final da energia elétrica, criando em 1985 o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) sua primeira versão, se preocupava basicamente em instruções domésticas para utilizar de forma racional da energia elétrica, evitando desperdícios [79].

Somente em 1992 as discussões sobre etiquetagem de equipamentos elétricos foram iniciadas. O selo PROCEL foi elaborado no ano de 1993. O cadastro para MITRGE teve início em 1997, os fabricantes de motores elétricos voluntariamente se cadastravam na Secretaria do Programa, que está vinculada à ELETROBRAS.

No ano de 2001, o Brasil sofreu com o racionamento da energia elétrica e em paralelo iniciou-se as discussões mundiais sobre o quão importante seria a redução dos gases de efeito estufa para a eficiência energética brasileira. Baseado neste cenário foi elaborada a Lei nº 10.295 de outubro de 2001, que recebe o nome de Lei da Eficiência Energética. A lei determina que devem ser criadas regulamentações específicas de rendimento mínimo para equipamentos destinados ao uso final da energia elétrica, visando reduzir o consumo energético e preservar o meio ambiente [80].

E finalmente em 11 de dezembro de 2002, foi publicado o Decreto de nº 4.508. Sendo o primeiro decreto a estabelecer níveis mínimos de rendimento para os MITs, desta forma normalizando a comercialização no território brasileiro [81]. O decreto foi desenvolvido priorizando os motores elétricos mais comercializados no mercado, ou seja: motores elétricos de indução trifásicos; operando na frequência de 60 Hz ou 50 Hz para trabalhar em 60 Hz; rotor do tipo gaiola de esquilo; alimentados com tensão de até 600 V; de 2, 4, 6 e 8 polos; produzidos para o regime contínuo nas potências entre 1 a 250 CV [82]. O Decreto nº 4.508/2002 desenvolveu duas categorias distintas de MITs, separadas pelos níveis de rendimento. Levando o nome de motores *standard* e motores de alto rendimento. Os motores *standard* equivalem à categoria IE1 e os motores de alto rendimento a categoria IE2 internacionalmente, sendo representados no Brasil por IR1 e IR2 respectivamente. A Tabela 4 apresenta os índices mínimos de rendimento para motores *standard*, também conhecido como motor padrão. Estes índices determinam os valores mínimos para que os motores possam ser comercializados no Brasil. Na Tabela 4 são apresentados os valores mínimos de rendimento para que o motor possa ser caracterizado como um motor de alto rendimento. Os dados são apresentados conforme o decreto nº 4508/2002.

**Tabela 4 – Índices mínimos de rendimento para motores elétricos decreto nº 4508/2002 [81].**

CV	PADRÃO				ALTO RENDIMENTO			
	Polos				Polos			
	2	4	6	8	2	4	6	8
1,0	77,0	78,0	73,0	66,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	78,5	79,0	75,0	73,5	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	81,0	81,5	77,0	77,0	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	81,5	83,0	78,5	78,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	82,5	83,0	81,0	79,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	84,5	85,0	83,5	80,0	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	85,0	85,5	84,0	82,0	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	86,0	87,0	85,0	84,0	88,5	89,5	88,0	85,5
10	87,5	87,5	86,0	85,0	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	87,5	87,5	87,5	86,0	89,5	90,0	88,5	88,5
15	87,5	88,5	89,0	87,5	90,2	91,0	90,2	88,5
20	88,5	89,5	89,5	88,5	90,2	91,0	90,2	89,5
25	89,5	90,5	90,2	88,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	89,5	91,0	91,0	90,2	91,0	92,4	91,7	91,0
40	90,2	91,7	91,7	90,2	91,7	93,0	93,0	91,0
50	91,5	92,4	91,7	91,0	92,4	93,0	93,0	91,7
60	91,7	93,0	91,7	91,0	93,0	93,6	93,6	91,7
75	92,4	93,0	92,1	91,5	93,0	94,1	93,6	93,0
100	93,0	93,2	93,0	92,0	93,6	94,5	94,1	93,0
125	93,0	93,2	93,0	92,5	94,5	94,5	94,1	93,6
150	93,0	93,5	94,1	92,5	94,5	95,0	95,0	93,6
175	93,5	94,1	94,1		94,7	95,0	95,0	
200	94,1	94,5	94,1		95,0	95,0	95,0	
250	94,1	94,5			95,4	95,0		

Segundo Sauer [83], o Decreto 4.508/2002 cobria mais de 80% do mercado brasileiro de motores elétricos. A data de 30 de dezembro de 2003 foi estipulada como data limite para comercialização dos motores que não atendem os índices propostos na Tabela 4. Em 8 de dezembro de 2005, o governo federal do Brasil publicou a portaria nº 553 regulamentando os índices mínimos de rendimento sem a distinção entre as linhas padrão e alto rendimento, apresentando os mesmos valores de rendimento da coluna de alto rendimento da Tabela 4. Desta forma, a partir de junho de 2010, os motores da linha *standard* não podiam mais ser comercializados no Brasil.

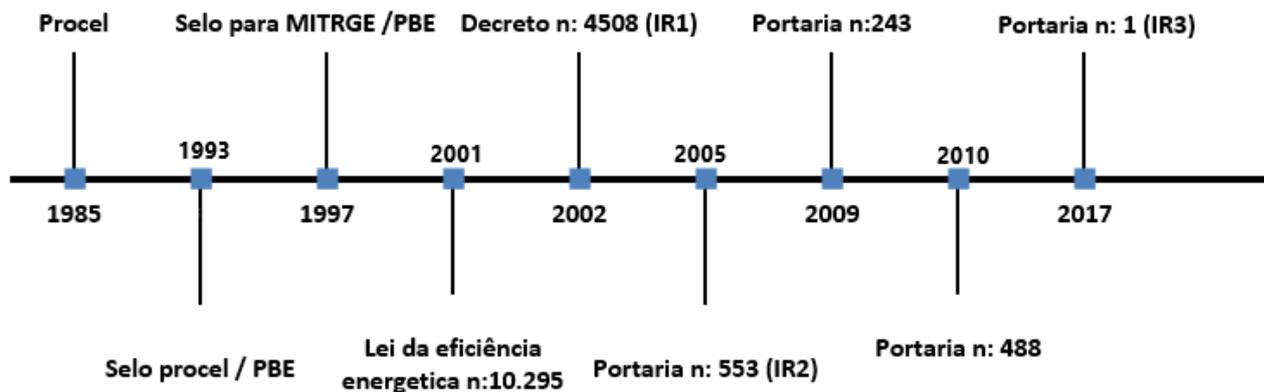
O INMETRO publicou no dia 04 de setembro de 2009 a portaria de nº 243. Nessa portaria são apresentadas as condições obrigatórias para a avaliação de conformidade dos MITs, padronizando desta forma a metodologia nacional de avaliação de rendimento [84]. A portaria nº 243 foi substituída em 08 de dezembro de 2010 pela nova versão do INMETRO de nº 488, se tornando obrigatória a etiquetagem dos motores de indução trifásicos [82]. A última portaria publicada voltada para o rendimento de motores de indução trifásicos foi a portaria interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017, publicada no dia 08 de agosto de 2017 [82]. Essa portaria proíbe a

partir de 30 de agosto de 2019 a fabricação e importação de motores de alto rendimento (IR2) que apresentem rendimentos conforme a portaria nº 553/2005. E a partir de 2 de março de 2020 será proibida a comercialização destes motores de classe IR2 em solo nacional. A Tabela 5 apresenta os índices mínimos de rendimento para a classe IR3.

**Tabela 5 – valores de rendimentos mínimos para motores conforme portaria nº 1/2017 [10].**

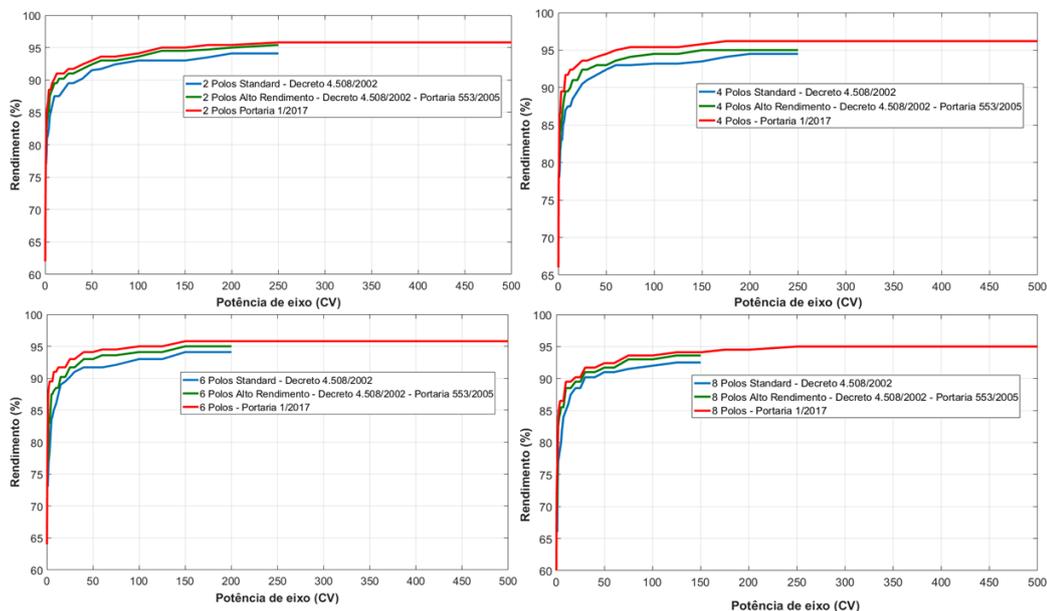
CV	ALTO RENDIMENTO				RENDIMENTO PREMIUM			
	Polos				Polos			
	2	4	6	8	2	4	6	8
0,16	59,5	64,0	50,5	40,0	62,0	66,0	64,0	59,5
0,25	64,0	68,0	55,0	46,0	65,6	69,5	67,5	64,0
0,33	68,0	70,0	59,5	52,0	69,5	73,4	69,0	68,0
0,5	72,0	72,0	64,0	58,0	73,4	78,2	75,3	72,0
0,75	74,0	75,5	68,0	62,0	76,8	79,0	79,5	74,0
1	80,0	80,5	80,0	70,0	80,5	83,5	82,5	75,5
1,5	82,5	81,5	77,0	77,0	84,0	86,5	87,5	78,5
2	83,5	84,0	83,0	82,5	85,5	86,5	88,5	84,0
3	85,0	85,0	83,0	84,0	86,5	89,5	89,5	85,5
4	85,0	86,0	85,0	84,5	88,5	89,5	89,5	86,5
5	87,5	87,5	87,5	85,5	88,5	89,5	89,5	86,5
6	88,0	88,5	87,5	85,5	88,5	89,5	89,5	86,5
7,5	88,5	89,5	88,0	85,5	89,5	91,7	91,0	86,5
10	89,5	89,5	88,5	88,5	90,2	91,7	91,0	89,5
12,5	89,5	90,0	88,5	88,5	91,0	92,4	91,7	89,5
15	90,2	91,0	90,2	88,5	91,0	92,4	91,7	89,5
20	90,2	91,0	90,2	89,5	91,0	93,0	91,7	90,2
25	91,0	92,4	91,7	89,5	91,7	93,6	93,0	90,2
30	91,0	92,4	91,7	91,0	91,7	93,6	93,0	91,7
40	91,7	93,0	93,0	91,0	92,4	94,1	94,1	91,7
50	92,4	93,0	93,0	91,7	93,0	94,5	94,1	92,4
60	93,0	93,6	93,6	91,7	93,6	95,0	94,5	92,4
75	93,0	94,1	93,6	93,0	93,6	95,4	94,5	93,6
100	93,6	94,5	94,1	93,0	94,1	95,4	95,0	93,6
125	94,5	94,5	94,1	93,6	95,0	95,4	95,0	94,1
150	94,5	95,0	95,0	93,6	95,0	95,8	95,8	94,1
180	94,7	95,0	95,0	94,5	95,4	96,2	95,8	94,5
200	95,0	95,0	95,0	94,5	95,4	96,2	95,8	94,5
250	95,4	95,0	95,0	95,0	95,8	96,2	95,8	95,0
300	94,5	95,5	95,0	95,0	95,8	96,2	95,8	95,0
350	95,0	95,5	95,4	95,0	95,8	96,2	95,8	95,0
400	–	95,5	95,4	–	95,8	96,2	95,8	95,0
450	–	95,8	95,4	–	95,8	96,2	95,8	95,0
500	–	95,8	–	–	95,8	96,2	95,8	95,0

Na Figura 20 é apresentada uma linha histórica com o nome de programas, leis e documentos que contribuíram para melhorias do rendimento dos motores de indução trifásicos desde 1985 a 2019.



**Figura 20 - Linha do tempo dos documentos de EE dos MITs. Adaptado de [82].**

Uma comparação entre as diferenças de rendimento durante a evolução do desenvolvimento dos decretos e portarias é apresentado na Figura 21. Esta comparação envolve o Decreto nº 4.508/2002, a Portaria nº 553/2005 e a Portaria nº 1/2017 para máquinas de 2 a 8 polos. Na Figura 21 é possível observar a evolução dos índices de eficiência dos motores de indução trifásicos entre as legislações aplicadas, bem como a expansão da faixa de potência de eixo que abrange a Portaria 1/2017. A portaria interministerial 1/2017 é a normativa mais atualizada implantada no território nacional até o momento [82].



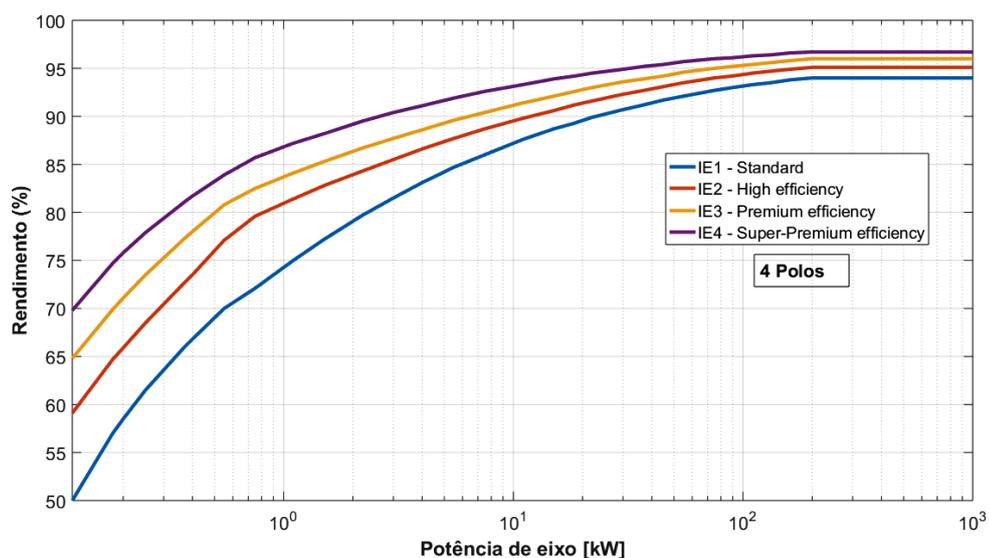
**Figura 21 – Comparação do decreto 4508/2002, portaria 553/2005 e portaria 1/2017 [82].**

## 4.2.2 A normativa internacional

A partir do ano de 1990, com a necessidade de obter melhores resultados voltados para a eficiência energética de motores de indução trifásicos, alguns países começaram a determinar o rendimento mínimo das máquinas e implementar selos com o objetivo de diferenciar de forma visual através de placas de identificação, os motores que possuem maiores rendimentos e menor consumo de energia, facilitando os consumidores na hora de escolher o produto final. Os selos fornecem informações das máquinas de forma transparente e flexibiliza a comparações dos rendimentos de motores elétricos, contribuindo assim, teoricamente, com a evolução do mercado de motores e com a conservação da energia elétrica.

Antes da implementação dos selos, os motores foram separados em várias classes de rendimento. Essa separação foi elaborada de diferentes formas e em vários países, resultando em diversos padrões nacionais. Entretanto, por efeito de barreiras comerciais, dadas pelos diferentes níveis de classe de rendimento, surgiu a necessidade de equivalência internacional da eficiência das máquinas classificadas. Neste contexto surgiu a proposta da *International Electrotechnical Commission – IEC*, que desenvolveu uma classificação internacional de rendimento possuindo padrões de teste e etiquetas para motores elétricos [85]. A IEC classifica a eficiência dos motores elétricos em quatro níveis, utilizando a nomenclatura “IE1” para motores menos eficientes até o “IE4” para motores de maior eficiência. Essas classes são utilizadas em diversos países que expressam preocupações com o rendimento dos equipamentos de uso final de energia.

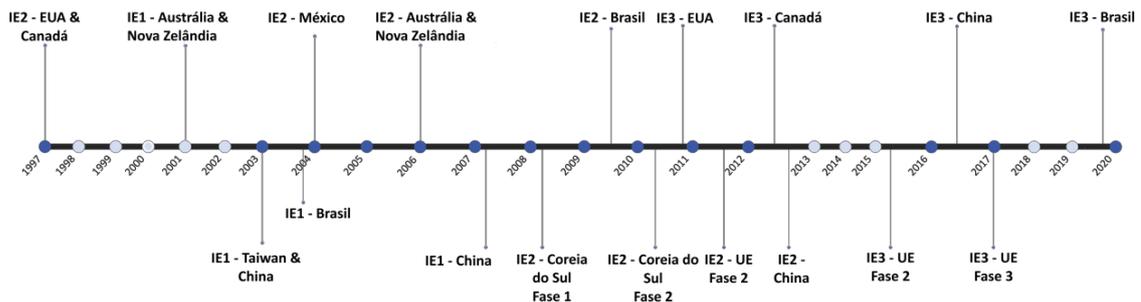
É apresentado na Figura 22 as classes de eficiência IE1, IE2, IE3 e IE4 para MITRGE com 4 polos operando em 50 Hz. A classe IE4 foi implementada na norma da IEC 60034-30-1 [16] em 2014, entretanto, dificilmente são encontrados motores que atendam este índice [16].



**Figura 22- valores mínimos para as distintas classes de eficiência definidos na IEC 60034-30-1 [82].**

Atualmente diversos países possuem regulamentações para o rendimento de motores elétricos ou datas para elas entrarem em vigor. Sendo os EUA o primeiro país a implementar regulamentações para motores elétricos no mundo, sua regulamentação foi aprovada no ano de 1992, como voluntária, e em 1997 a legislação fez-se obrigatória para os MITRGE comercializados nos EUA, estipulando aos fabricantes desses motores um período de cinco anos para se adequarem aos novos padrões, implementando melhorias aos projetos dos seus equipamentos.

O nome da primeira legislação para o rendimento de motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo ficou conhecida como EAct-92 e pode ser comparada à classe IE2 da IEC. No ano de 2007 foi publicada a legislação equivalente a classe IE3 para os EUA e o Canadá, entrando em vigor a partir em 2010. A Figura 23 apresenta o panorama geral das datas de aplicação da legislação de índices mínimos de rendimento para MITRGE em alguns países [82].



**Figura 23 – Período de implementação de classes de rendimento para MITRGE [82].**

Hoje em dia, além das normas de eficiência energética, existem outras normas que especificam métodos de ensaios a serem seguidos para determinar a eficiência de um motor elétrico. A Tabela 6 apresenta algumas dessas normas em vigor em seus respectivos países, sendo que uma coluna especifica os procedimentos a serem utilizados e a outra os mínimos valores de rendimento para comercialização dos motores elétricos nos países especificados.

**Tabela 6 – Normas de métodos de ensaios e normas de valores mínimos de rendimento.**

<b>País</b>	<b>Norma de métodos de ensaio</b>	<b>Norma de valores mínimos de rendimento</b>
<b>Brasil</b>	ANBT NBR 17094-3 [9]	ABNT NBR 17094-1 [10]
<b>China</b>	GB/T 1032:2012 [11]	GB 18613-2012 [12]
<b>Índia</b>	IS 15999-2-1:2011 [17]	IS 15999-2-1:2011 [17]
<b>México</b>	NOM-016-ENER-2016 [18]	NOM-016-ENER-2016 [18]
<b>Coréia do Sul</b>	KS C IEC 60034-1:2008 [19]	KS C IEC 60034-1:2008 [19]
<b>Austrália</b>	AS/NZS 1359.102.3:2004 [13]	AS/NZS 1359.5:2004 [14]
<b>União Europeia</b>	IEC 60034-30-1:2014 [16]	IEC 60034-2-1:2014 [15]

### 4.3 Regulamentação

Os motores de indução trifásicos estão sujeitos a regulamentações por meio de normas e portarias voltadas a implementar maiores valores mínimos de eficiência aos mesmos. Nessas portarias são especificadas leis que asseguram a sua aplicação, cabendo ao poder executivo especificar os níveis mínimos de eficiência energética dos aparelhos e máquinas consumidoras de energia. O Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) é responsável por desenvolver regulamentos específicos para cada tipo de máquina e aparelho consumidor de energia e o programa de metas indica a evolução dos níveis a serem alcançados para cada equipamento regulamentado. Cada portaria de motores elétricos lançada determina características específicas dos motores de indução trifásicos. Para a portaria de número 488/2010 os motores devem possuir as seguintes características [84]:

- Tensão nominal até 1000 V;
- Frequência nominal de 60 Hz;
- Potência nominal de 0,16 a 500 CV em dois, quatro, seis e oito polos;
- Regime de operação S1 ou S3 [10];
- Desempenho de partida conforme as características das categorias N, H, NY e HY apresentadas na ABNT NBR 17094-1:2018 [10].

Para as regulamentações internacionais, segundo a IEC, os Programas de etiquetagem de energia, como o “*Energy Star*” da *Environmental Protection Agency* (EPA) levam em consideração

que os fabricantes seguem severamente as Normas Internacionais da IEC quando fabricam os seus produtos. A IEC estima que 71% das normas europeias que falam sobre eletricidade e eletrônica são idênticas as normas da IEC e estão incorporadas nos regulamentos europeus, no qual o objetivo é obter uma harmonização de 90% das normas europeias [68].

A atual regulamentação da IEC abrange os MITs, entre 120 W e 1000 kW. Os motores menores chamados de “fracionários”, estão excluídos da referida regulamentação.

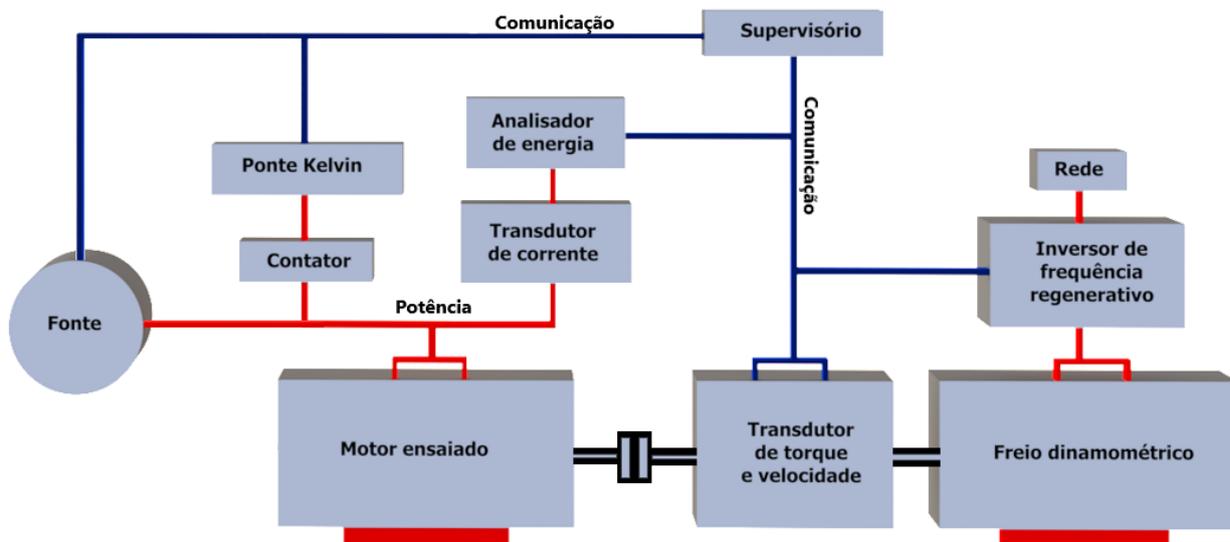
## 4.4 Selo Procel

O Selo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) tem como objetivo ser uma ferramenta simples e eficaz que permite ao consumidor distinguir, entre os equipamentos e eletrodomésticos existentes no mercado, os mais eficientes e que consomem menos energia. O Procel é um programa do Governo Federal executado pela Eletrobrás, cujo Selo foi desenvolvido através do decreto presidencial em 8 de dezembro de 1993.

Após a sua elaboração, foram criadas parcerias junto ao Inmetro, a agentes como associações de fabricantes, pesquisadores de universidades e Laboratórios, com o único objetivo de estimular o mercado brasileiro, a ter equipamentos cada vez mais eficientes. Para isso, são definidos índices de consumo e desempenho para cada categoria de equipamento. Cada equipamento candidato a receber o Selo deve ser submetido a ensaios em Laboratórios indicados pela Eletrobrás. Apenas os equipamentos que atingirem os índices estipulados poderão ser contemplados com o Selo Procel. [2] [86].

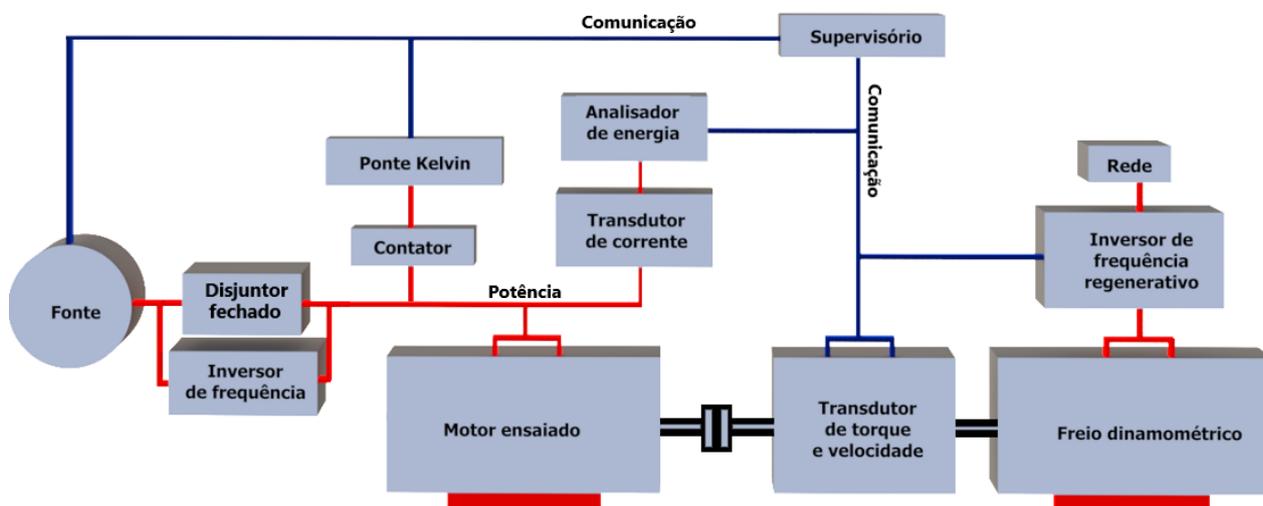
## Capítulo 5 - Materiais e Métodos

Este trabalho possui o objetivo de apresentar diferentes resultados de ensaio de três MITs com potências de 1, 3 e 12,5 CV. Os métodos de ensaio são baseados em normas vigentes conforme a ABNT NBR 17094-3:2018 [9], a IEC 60034-2-1:2014 [15] e a IEC/TS 60034-2-3:2013 [21]. Os motores primeiramente foram ensaiados utilizando a norma ABNT NBR 17094-3:2018 [9] e a IEC 60034-2-1:2014 [15]. Os resultados de rendimentos dos motores ensaiados pela ABNT NBR 17094-3:2018 [9] devem atender aos valores mínimos exigidos pela ABNT NBR 17094-1:2018 [10] e dentre os diversos métodos apresentados pela ABNT NBR 17094-3:2018 [9], será utilizado o método 2, que utiliza o ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator, rotor, núcleo, por atrito e ventilação [9]. Já para a IEC 60034-2-1:2014 [15] os valores mínimos de rendimento encontrados no ensaio devem atender aos requisitos da IEC 60034-30-1:2014 [16]. Dentre os métodos apresentados pela norma IEC 60034-2-1:2014 [15], será utilizado o método 2-1-1B, somatório das perdas, perdas em carga adicional de acordo com o método das perdas residuais. Ao finalizar os ensaios a partir dos dados coletados será possível realizar uma comparação dos procedimentos de ensaio e resultados obtidos. Para uma segunda comparação os motores são submetidos a um novo ensaio com a norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21], este ensaio também foi comparado com o ensaio da IEC 60034-2-1:2014 [15]. A fim de obter uma análise dos resultados quando o MIT é alimentado com uma fonte senoidal e quando é alimentado com o PWM gerado através de um inversor de frequência. O ensaio efetuado pela norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] possibilita determinar a eficiência dos motores quando alimentados por inversores de frequência e obter as perdas harmônicas do MIT. Dentre os métodos existentes na norma, será usado o método 2-3-B, somatório das perdas com o fornecimento do conversor específico para aplicação final. O arranjo da bancada experimental implementando a norma ABNT NBR 17094-3:2018 [9] é ilustrado conforme Figura 24. A parte de potência interligada pela linha vermelha é composta por uma fonte que aciona o motor de ensaio e uma rede que alimenta um inversor de frequência regenerativo responsável por acionar o freio dinamométrico. A resistência, corrente, tensão e potência do motor de ensaio são medidas utilizando de uma ponte Kelvin e um analisador de energia. Já o torque e a velocidade utilizam de um transdutor. A parte de comunicação é representada pela linha azul e interliga todos os instrumentos de medição e o inversor regenerativo ao supervisor.



**Figura 24 – Arranjo do ensaio para a norma ABNT 17094-3:2018.**

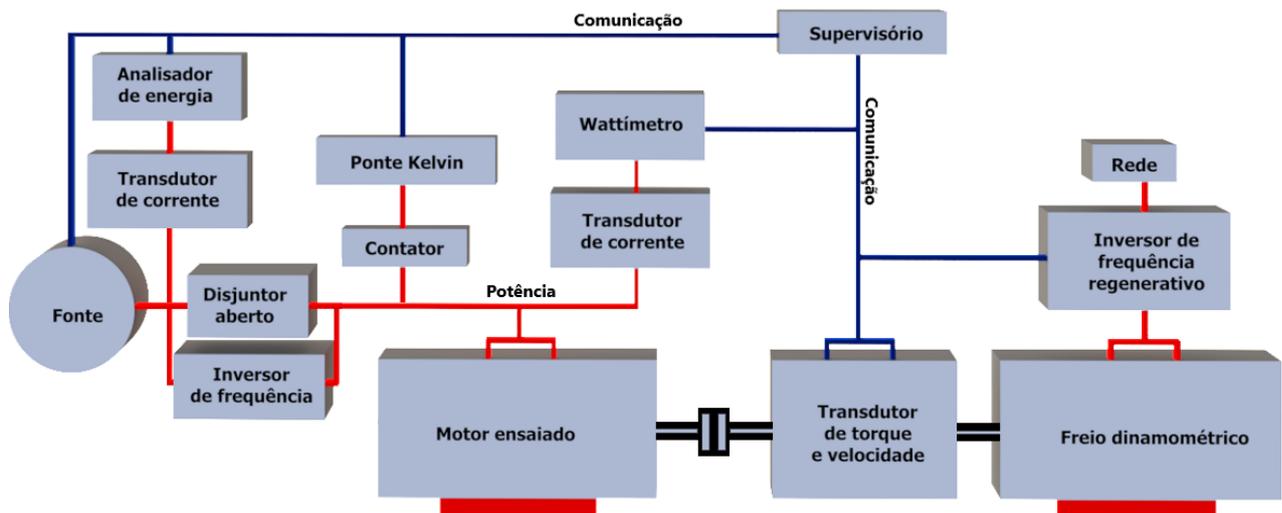
O arranjo do ensaio realizado com a norma IEC 60034-2-1:2014 [15] é ilustrado conforme Figura 25. Este arranjo possui um disjuntor que irá facilitar a comutação do ensaio da IEC 60034-2-1:2014 [15] para o ensaio da IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] com o inversor de frequência, pois esses ensaios serão realizados de forma sequencial. Neste arranjo o disjuntor encontra-se no estado fechado possibilitando a alimentação do MIT direto pela fonte senoidal e o inversor de frequência encontra-se parametrizado e pronto para ser utilizado.



**Figura 25 – Arranjo do ensaio para a norma IEC 60034-2-1:2014.**

O arranjo do ensaio realizado com a norma IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] ilustra algumas diferenças quando comparado com o arranjo da IEC 60034-2-1:2014 [15], o disjuntor está em estado aberto e a fonte de alimentação agora está energizando o inversor de frequência. Foi inserido

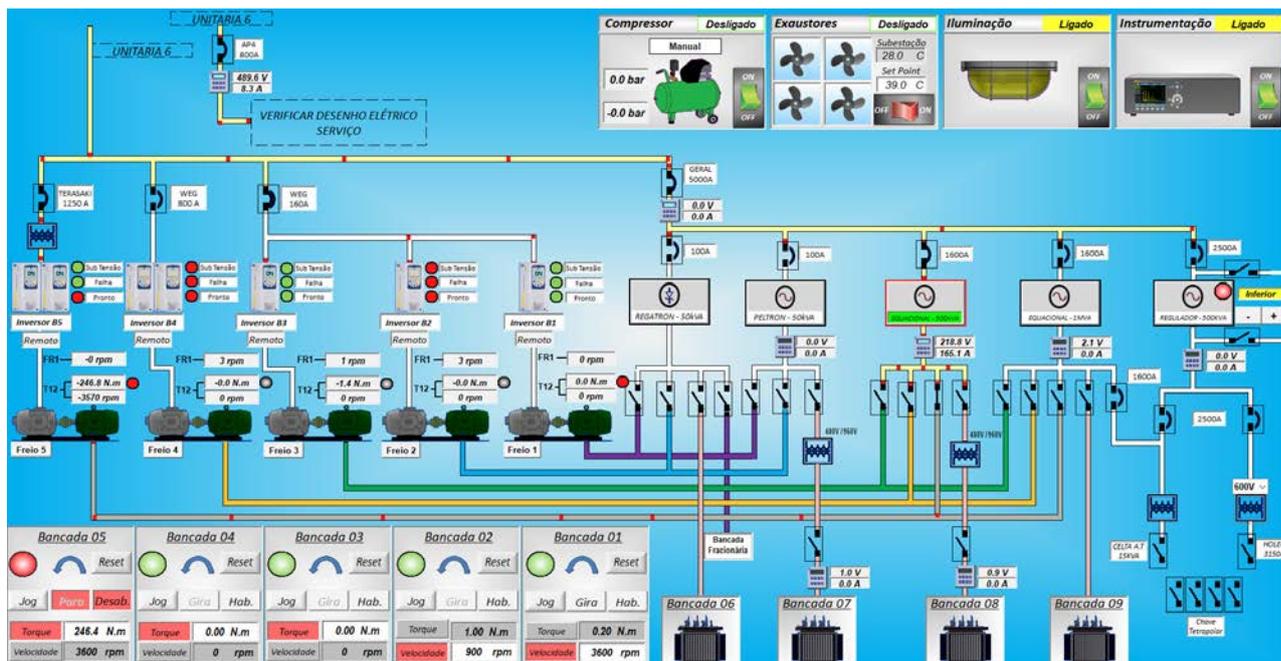
ao arranjo um wattímetro que passa a medir as grandezas de entrada nos terminais do motor. Essas grandezas são filtradas por um filtro passa baixa de frequência de corte de 500 Hz, atendendo as exigências da IEC/TS 60034-2-3:2013 [21]. O analisador de energia passa a ler os dados de entrada medidos na alimentação do inversor, inserindo mais um transdutor de corrente ao circuito, conforme ilustrado na Figura 26.



**Figura 26 – Arranjo do ensaio da norma IEC/TS 60034-2-3:2013.**

Os ensaios dos MITs foram realizados no Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores. Este Laboratório faz parte do departamento de Laboratórios de Adrianópolis (DLA) do CEPTEL, localizado na cidade de Nova Iguaçu no Rio de Janeiro, e realiza ensaios em transformadores e motores de indução monofásicos e trifásicos, com a finalidade de avaliar a eficiência energética destes equipamentos.

O Laboratório faz parte da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE). E está capacitado conforme as normas da NBR, IEC, ANSI e regulamentos do INMETRO para realizar ensaios em transformadores e motores de indução seguindo o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). A atuação do Laboratório inclui análises que determinam o rendimento e o fator de potência dos motores de indução através dos ensaios de elevação de temperatura, em carga e a vazio. Todos os ensaios efetuados no Laboratório são realizados de forma automatizada, utilizando uma programação desenvolvida no software LABVIEW. Ele é composto de cinco bancadas de motores de indução trifásicos atendendo potências de 1 a 250 CV, quatro bancadas de transformadores atendendo potências até 300 kVA e uma bancada fracionária que realiza ensaios em motores monofásicos e trifásicos com potências de 0,16 a 0,75 CV. A Figura 27 ilustra o panorama do Laboratório através de seu supervisor.



**Figura 27 – Supervisório do Laboratório.**

Os principais ensaios realizados em motores elétricos de indução trifásicos no Laboratório são:

- Medição de resistência elétrica dos enrolamentos;
- Elevação de temperatura;
- Ensaio em carga;
- Ensaio em vazio;
- Ensaio com rotor bloqueado;
- Determinação de características de rendimento.

O Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores é acreditado pelo CGCRE/INMETRO conforme a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 sob o N° CRL – 0024 e também pelo INMETRO. Ele está sujeito periodicamente a auditorias visando garantir a qualidade no resultado das medições. Todos os instrumentos utilizados nas medições são calibrados e aferidos com rastreabilidade à Rede Brasileira de Calibração - RBC, pertencente ao INMETRO.

Nos ensaios realizados as incertezas de medição são calculadas conforme padrões internacionais estabelecidos nos documentos INTROGUM (2014) e EA-4/02 (*Expression of the uncertainty of measurement in calibration*, 1999). Essas normativas são discutidas em comitês mundiais como uma tentativa de uniformizar o cálculo da incerteza de medição em diversas áreas

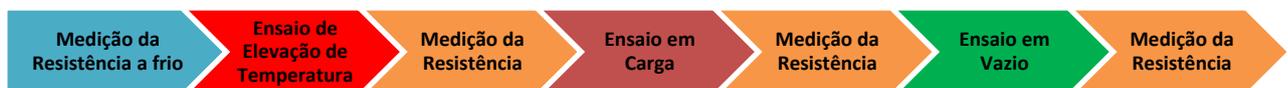
de conhecimento [82]. No território brasileiro existem apenas três Laboratórios acreditados pelo INMETRO para elaborar o ensaio de eficiência energética dos motores elétricos. O próprio Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPTEL/Eletrôbrás, fundado em 1974, atuando com uma faixa de potência de 0,16 a 250 CV; o Laboratório de Máquinas Elétricas da Pontifícia Universidade Católica – PUC/RS, também conhecido como LABELO, em funcionamento desde 1968 com capacidade de ensaio de motores elétricos de até 15 CV; e o Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, conhecido como IEE/USP fundado no ano de 1902.

## 5.1 Métodos de ensaio

Neste tópico são descritos os procedimentos de ensaios da ABNT NBR 17094-3:2018 [9], IEC 60034-2-1:2014 [15] e IEC/TS 60034-2-3:2013 [21], explicando detalhadamente os métodos aplicados com o auxílio das devidas equações.

### 5.1.1 ABNT NBR 17094-3:2018

Os procedimentos para determinar a eficiência e o fator de potência do MIT são baseados no método 2, da ABNT NBR 17094-3:2018 [9]. Para obter o resultado final é necessário realizar quatro tipos de ensaios, sendo eles: medição da resistência, ensaio de elevação de temperatura, ensaio em carga e ensaio a vazio no MIT, conforme sequência apresentada no fluxograma da Figura 28.



**Figura 28 – Fluxograma dos procedimentos de ensaios da ABNT NBR 17094-3:2018.**

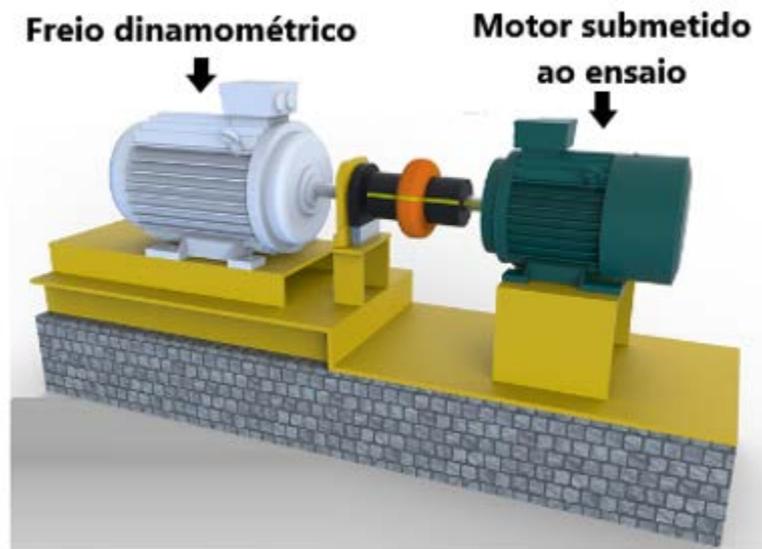
- Medição da resistência a frio

Inicialmente com o MIT desligado e posicionado no setor de ensaio o mesmo deve ficar exposto a temperatura ambiente local até o momento que a diferença entre a temperatura ambiente

e a temperatura da carcaça do motor não seja maior que 1K, devendo estar localizado distante de fontes externas de calor para não haver alterações nas grandezas medidas. O K representa a variação entre a temperatura ambiente e a carcaça do motor. É necessário fixar os terminais do medidor junto com os terminais do motor para efetuar a medição da resistência por fase. Quando a carcaça do motor estiver em equilíbrio térmico é medida a resistência média de linha e a própria temperatura ambiente utilizando uma ponte de Kelvin e termopares.

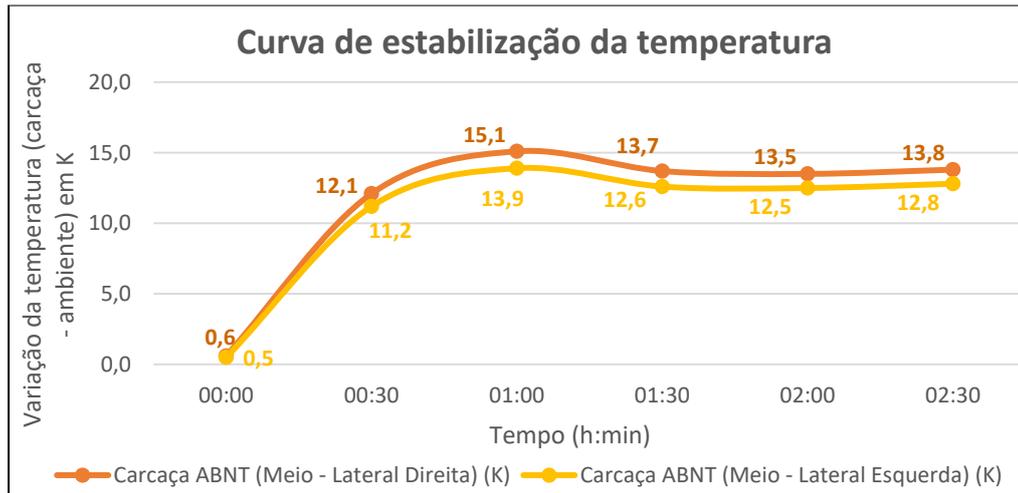
- Ensaio de elevação de temperatura

Após o ensaio para determinar a resistência do estator com o motor frio é iniciado o ensaio de elevação de temperatura. O motor é acionado com carga nominal em regime contínuo até que o motor atinja a estabilidade térmica, conforme ilustrado na Figura 29. Sabendo que o motor branco é o freio dinamométrico e o motor verde o motor a ser ensaiado.



**Figura 29 – Ensaio de elevação de temperatura.**

Para o motor atingir o equilíbrio térmico é necessário que no período de uma hora a variação da temperatura na carcaça lateral direita e lateral esquerda seja menor que 1K, conforme exemplo ilustrado na Figura 30, sabendo que a medição da temperatura é coletada através de termopares.



**Figura 30 – Estabilização da temperatura do MIT.**

Depois desta etapa realizada, a fonte de alimentação do MIT é desligada, o motor é parado através do freio dinâmico e é medida a resistência de linha do estator com o motor quente dentro do intervalo estipulado na Tabela 7 para cada faixa de potência.

**Tabela 7 – Intervalo para medição da resistência por faixa de potência [9].**

Potência (kW)	Potência (CV)	Intervalo de tempo (s)
$\leq 37,5$	$\leq 50$	0 - 30
$37,5 < P \leq 150$	$50 < P \leq 200$	0 - 90
$> 150$	$> 200$	0 - 120

Sendo assim se torna possível determinar a temperatura  $t_2$  para a qual serão corrigidas as perdas do estator e do rotor da máquina, conforme equação (7), utilizando o método da variação de resistência. Este método consiste em determinar a temperatura final do enrolamento do estator através da comparação da resistência  $R_1$  medida no início do ensaio para uma temperatura conhecida  $t_1$  com a resistência  $R_2$  medida no final do ensaio.

$$t_2 = \frac{R_2 \cdot (t_1 + k)}{R_1} - k \quad (7)$$

onde:

$t_2$  é a temperatura do enrolamento calculada no final do ensaio (°C);

$t_1$  é a temperatura do enrolamento medida no início do ensaio em (°C);

$R_2$  é a resistência do enrolamento medida no final do ensaio ( $\Omega$ );

$R_1$  é a resistência do enrolamento medida no início do ensaio ( $\Omega$ ).

$k$  é uma constante de valor igual a 234,5 quando o enrolamento do estator for de cobre ou 225 quando for de alumínio.

- Ensaio em carga

O ensaio em carga consiste em aplicar ao motor, diferentes níveis de carga correspondente a um percentual da carga nominal. Aplica-se seis pontos percentuais do conjugado do motor de forma decrescente, sendo eles, 150, 125, 100, 75, 50, 25%. Para realizar este ensaio o motor deve ser alimentado com tensão e frequência nominal. As grandezas medidas são:

- Conjugado de saída (Nm);
- Potência de entrada (kW);
- Corrente média de linha (A);
- Velocidade do motor (rpm);
- Tensão de linha média (V).

É necessário mensurar no ensaio em carga as grandezas listadas em um ponto em que o dinamômetro esteja desligado, ou seja, o ponto de 0% de carga, para que seja possível determinar a correção do freio dinamométrico. No ensaio em carga também é calculada a potência de saída do MIT em cada ponto do ensaio, conforme a equações (8).

$$P_s = \frac{C_{(corrigido)} \cdot n_m}{k_1} \quad (8)$$

onde:

$P_s$  é a potência de saída (W);

$C_{(corrigido)}$  é o conjugado corrigido da máquina (N.m);

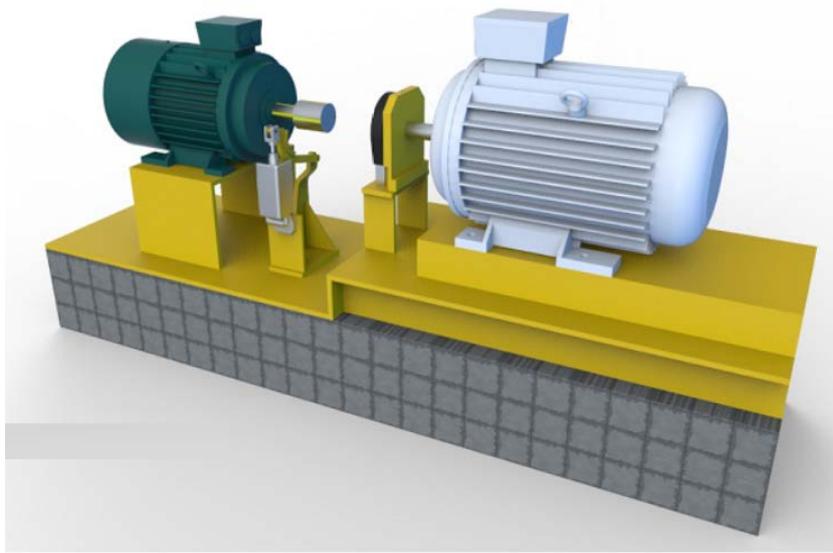
$n_m$  é a velocidade medida do motor (Rpm);

$k_1$  é uma constante de valor igual a 9,549.

Antes do primeiro e depois do último ponto é necessário medir a temperatura ambiente e a resistência do enrolamento. Para que o ensaio seja validado a relação da resistência do enrolamento deve ter valor de até 3,5% para motores até 15 kW e 3% para motores com potências acima de 15kW.

- Ensaio a vazio

Este ensaio deve ser iniciado após o ensaio em carga, desacoplando o motor que está sendo ensaiado do freio dinamométrico, conforme Figura 31. É necessário medir a resistência do enrolamento do estator antes e após o término do ensaio de forma que a relação desta resistência obedeça ao mesmo critério do ensaio em carga para a sua validação.



**Figura 31 – Ensaio a vazio.**

O motor é acionado com tensão e frequência nominal. Logo após, aplicam-se seis valores de tensões na máquina de forma decrescente, sendo eles 110, 100, 80, 60, 40, e 20% da tensão nominal. Para cada valor são mensuradas as seguintes grandezas:

- Tensão de linha (V);
- Corrente de linha (A);
- Potência de entrada (W).

É necessário que este ensaio seja realizado o mais rápido possível para minimizar os erros de medição de resistência. Após os ensaios realizados são iniciados os procedimentos para determinar as perdas do MIT. Para facilitar o entendimento nos cálculos das perdas, será apresentado como exemplo um MIT com os dados de placa indicados na Tabela 8. Sabe-se que o enrolamento do motor é composto de fios de cobre.

**Tabela 8 – Dados de placa de um MIT que será utilizado como exemplo.**

Carcaça	80	Potência (CV)	1,5
Rotação (rpm)	1710	Tensão (V)	220
Frequência (Hz)	60	Relação IP/IN	6
Corrente (A)	4,9	Fator de potência	0,72
Número de fases	3	Fator de serviço	1,15
Número de polos	4	Rendimento (%)	81,5

- Perda de atrito e ventilação

As perdas por atrito e ventilação são consideradas independente da carga, e os seus valores calculados para a condição em que o MIT está desacoplado, podendo ser usadas nos outros seis pontos de carga ensaiados. Para determinar a perda por atrito e ventilação, primeiramente é calculada a perda joule no estator, conforme equação (9) [9], para cada ponto de tensão do ensaio a vazio.

$$P_{estv} = 1,5 \cdot R \cdot I^2 \quad (9)$$

onde:

$P_{estv}$  é a perda joule do estator a vazio (W);

$R$  é a resistência média do ensaio ( $\Omega$ );

$I$  é a corrente média em cada ponto do ensaio (A).

Subtraindo a perda joule do estator do valor da potência de entrada medida no ensaio a vazio, obtém-se o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro, conforme equação (10).

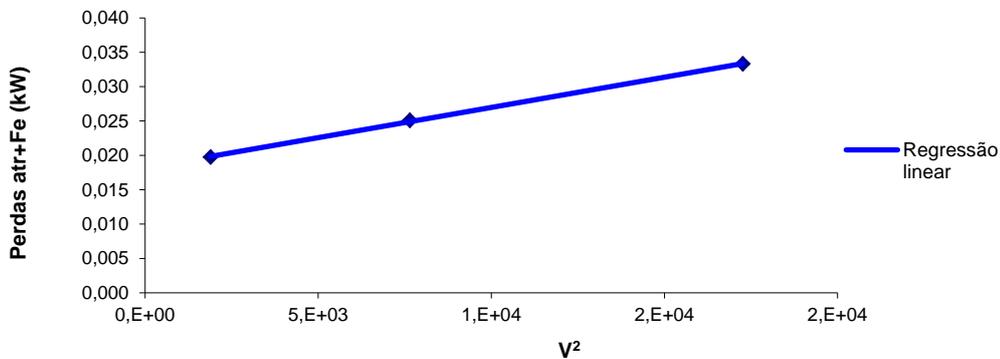
$$\sum (P_{AV} + P_{fe}) = P_{e(vazio)} - P_{estv} \quad (10)$$

onde:

$\sum (P_{AV} + P_{fe})$  é igual ao somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro (W);

$P_{e(vazio)}$  é igual a potência de entrada medida em cada ponto do ensaio a vazio (W).

É traçado um gráfico utilizando o método de regressão linear para os valores de tensão ao quadrado para os pontos de 60 a 20% da nominal no ensaio a vazio versus o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro, extrapolando linearmente a curva para a tensão zero, conforme Figura 32.



**Figura 32 – Separação das perdas de atrito e ventilação.**

A análise da regressão linear tem um propósito de achar uma relação matemática entre dois conjuntos de variáveis. Portanto o valor de uma variável pode ser utilizado para prever a outra. Assumindo que as duas variáveis são linearmente relacionadas, quando os pares de valores de duas variáveis ( $x_i$ ,  $y_i$ ) forem plotados, os pontos são distribuídos apresentando um comportamento próximo ao de uma reta. Melhores aproximações ocorrem quando o valor do coeficiente de correlação ( $\gamma$ ) se torna próximo de 1 [9]. A relação linear dada por uma reta é expressa conforme equação (11), onde a inclinação da reta é dada pela constante ( $A$ ) e ( $B$ ) é o valor de  $Y$  quando  $X=0$ . O coeficiente de correlação é calculado pela equação de regressão linear, utilizando método dos mínimos quadrados, conforme equações (12), (13) e (14). O método dos mínimos quadrados consiste em uma técnica de otimização matemática que procura obter informações de sistemas inconsistentes de forma aproximada. Essa técnica é aplicada para determinar os parâmetros de uma relação funcional entre duas ou mais grandezas de um fenômeno ou o valor mais provável de uma grandeza medida várias vezes [87].

$$Y = A.X + B \quad (11)$$

$$A = \frac{N.\sum X.Y - (\sum X).(\sum Y)}{N.\sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (12)$$

$$B = \frac{\sum Y}{N} - \frac{A \cdot (\sum X)}{N} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum X \cdot Y - (\sum X) \cdot (\sum Y)}{(N \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2) \cdot (N \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2)} \quad (14)$$

onde:

$Y$  é uma variável dependente;

$A$  é a inclinação da reta;

$B$  é o ponto de interseção do eixo  $Y$  com a reta;

$N$  é o número de pares das variáveis  $X$  e  $Y$ ;

$X$  é uma variável independente;

$\gamma$  é o coeficiente de correlação.

Na tabela 9 é possível visualizar o valor real da tensão do motor no ensaio a vazio, as perdas de atrito e ventilação mais as perdas do ferro nos pontos de 20, 40 e 60% da tensão nominal e por fim, as perdas por atrito e ventilação sendo representada pela letra  $B$  que é o ponto de interseção do eixo  $Y$  com a reta. Esse valor é único e pode usado para todos os pontos do ensaio a vazio.

**Tabela 9 – Resultado da separação das perdas de atrito e ventilação.**

Tensão (%)	Tensão medida (V)	X (Tensão <sup>2</sup> )	$Y = \sum P_{AV} + P_{fe}$ (kW)	$X^2$	$Y^2$	X*Y	A	$B = P_{AV}$ (kW)
60	131,40	17265,96	0,033	2,98E+08	0,0011	575,06	2,99E-06	-0,01018
40	87,46	7649,25	0,025	5,85E+07	0,0006	191,89		
20	43,51	1893,12	0,020	3,58E+06	0,0004	37,38		
	Somatório	26808,33	0,078	3,60E+08	0,0021	804,34		

- Perda no ferro

As perdas no ferro, assim como as perdas por atrito e ventilação são consideradas independentes da carga, e o seu valor é calculado no ensaio a vazio quando a máquina está com tensão nominal. A perda no ferro pode ser calculada de acordo com a equação (15).

$$P_{fe} = \sum_{100\% \text{ ensaio a vazio}} (P_{AV} + P_{fe}) - P_{AV} \quad (15)$$

onde:

$P_{fe}$  é a perda no ferro do MIT (W);

$\sum(P_{AV}+P_{fe})_{100\% \text{ ensaio a vazio}}$  é o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro no ponto da tensão nominal do ensaio a vazio (W);

$P_{AV}$  é a perda de atrito e ventilação (W).

- Perda do estator ensaio em carga

Para obter as perdas no enrolamento do estator em cada ponto do ensaio em carga é necessário utilizar a equação (16), o valor da resistência  $R$  é expresso através da média aritmética da medição da resistência antes de iniciar e depois de terminar o ensaio em carga.

$$P_{estc} = 1,5. R. I^2 \quad (16)$$

onde:

$P_{estc}$  é a perda do estator calculada no ensaio em carga (W);

- Perdas do rotor ensaio em carga

Para calcular as perdas rotóricas do MIT em cada ponto de carga é preciso obter o valor do escorregamento, conforme equação (17). Quando obtido o valor do escorregamento calcula-se as perdas do rotor no ensaio em carga, conforme equação (18).

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (17)$$

$$P_{rot} = (P_{e(carga)} - P_{estc} - P_{fe}). S \quad (18)$$

onde:

$S$  é o escorregamento do motor (p.u);

$n_s$  é a velocidade síncrona do motor (rpm);

$P_{rot}$  é a perda do rotor em cada ponto do ensaio em carga (W);

$P_{e(carga)}$  é a potência de entrada, medida em cada ponto do ensaio em carga (W).

- Perda suplementar corrigida

A perda suplementar corrigida é calculada aplicando a regressão linear as perdas residuais calculadas para os pontos de 150 a 25% do conjugado nominal no ensaio em carga. Primeiramente são calculadas as perdas residuais conforme a equação (19).

$$P_{res} = P_{e(carga)} - P_s - P_{estc} - \sum (P_{AV} + P_{fe}) - P_{rot} \quad (19)$$

onde:

$P_{res}$  é a perda residual (W).

Obtendo a perda residual aplica-se o método de regressão linear, conforme a equação (20). Utilizando a inclinação da reta ( $A$ ) e a interseção de  $Y$  com a reta ( $B$ ) calculadas pelas equações de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, conforme equações (12) e (13). O coeficiente de correlação  $\gamma$  para este caso é dado pela equação (21), e quanto mais próximo ele for do número 1, melhor será a relação entre a potência de saída, em kW, e o quadrado do conjugado de saída [9].

$$Y = A \cdot X^2 + B \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum X \cdot Y - (\sum X) \cdot (\sum Y)}{\sqrt{(N \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2) \cdot (N \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (21)$$

Finalizando a análise de regressão linear é possível calcular o valor corrigido da perda suplementar em cada ponto de carga, dado pela equação (22). Para facilitar a compreensão, a Tabela 10 e Tabela 11 apresentam estes resultados considerando o motor exemplo, cujos dados de placa foram descritos na Tabela 8.

$$P_{sup(corrigida)} = A \cdot X^2 \quad (22)$$

onde:

$P_{sup(corrigida)}$  é a perda suplementar corrigida (W).

**Tabela 10 – Análise da regressão linear ABNT.**

Conjugado (%)	Conjugado (Nm)	X (Conjugado <sup>2</sup> )	Y Perda residual (kW.)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	Perdas suplementares corrigidas (kW)
150	9,271	85,94	0,092	7,4E+03	8,5E-03	7,939	0,0826
125	7,761	60,23	0,068	3,6E+03	4,7E-03	4,123	0,0579
100	6,161	37,95	0,047	1,4E+03	2,2E-03	1,792	0,0365
75	4,661	21,72	0,031	4,7E+02	9,3E-04	0,663	0,0209
50	3,061	9,37	0,019	8,8E+01	3,6E-04	0,179	0,0090
25	1,511	2,28	0,012	5,2E+00	1,5E-04	0,028	0,0022
	Somatório	217,50	0,270	1,3E+04	1,7E-02	14,725	

**Tabela 11 – Resultados da análise da regressão linear ABNT.**

A	B	$\gamma$	OBSERVAÇÃO
0,00096	0,010	1,0	<b>Não foi desconsiderado nenhum o ponto na regressão</b>

Segundo NBR 17094-3:2018 [9], caso o fator de correlação apresente valor menor que 0,95 ou se a inclinação for negativa, o pior ponto é excluído e em seguida calcula-se (A) e (B) novamente. Se o novo coeficiente de correlação aumentar para um valor igual ou superior a 0,95 e a inclinação for positiva, o ensaio é validado. Caso contrário é possível que haja erros de leitura das grandezas elétricas ou erros na instrumentação, sendo recomendado que se refaça o ensaio completo.

- Correção das perdas do enrolamento do estator

Para realizar o cálculo do rendimento do MIT se torna necessário que algumas grandezas já calculadas tenham que ser corrigidas, tais como as perdas do enrolamento do estator, do rotor, o escorregamento e a potência de saída.

Para obter as perdas corrigidas no enrolamento do estator em cada ponto do ensaio em carga é necessário corrigir a resistência  $R_2$ , medida no final do ensaio de elevação de temperatura, conforme equação (23), para a temperatura final do enrolamento do estator  $t_2$ , calculada na equação (7). Em seguida, a perda no enrolamento do estator corrigida é calculada, conforme equação (24), utilizando a corrente medida em cada ponto de carga.

$$R_{2(\text{corrigida})} = \frac{R_1(t_2 - t_3 + t_a + k)}{(t_1 + k)} \quad (23)$$

$$P_{\text{estc}(\text{corrigida})} = 1,5 \cdot R_{2(\text{corrigida})} \cdot I^2 \quad (24)$$

onde:

$R_{2(\text{corrigida})}$  é a resistência corrigida no ensaio de elevação de temperatura ( $\Omega$ );

$t_3$  é a temperatura ambiente medida no final do ensaio de elevação de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_a$  é a temperatura para a correção, determinada em  $25^{\circ}\text{C}$ ;

$P_{\text{estc}(\text{corrigida})}$  é a perda do estator corrigida (W).

- Correção das perdas do rotor

Para calcular a perda do rotor corrigida em cada ponto de carga é preciso corrigir o escorregamento do motor, desta forma o cálculo da correção do escorregamento é expresso conforme, equação (25). Após obter o valor do escorregamento corrigido, calcula-se a perda corrigida do rotor no ensaio em carga, conforme equação (26).

$$S_{(\text{corrigido})} = S \cdot \frac{t_2 - t_3 + t_a + k}{t_2 + k} \quad (25)$$

$$P_{\text{rot}(\text{corrigida})} = (P_{e(\text{carga})} - P_{\text{estc}(\text{corrigida})} - P_{fe}) \cdot S_{(\text{corrigido})} \quad (26)$$

onde:

$S_{(\text{corrigido})}$  é o escorregamento corrigido (p.u);

$P_{\text{rot}(\text{corrigida})}$  é a perda do rotor corrigida para o escorregamento  $S_{(\text{corrigido})}$  em cada ponto do ensaio em carga (W).

- Potência de saída corrigida

A potência de saída corrigida em cada ponto do ensaio em carga é expressa pela equação (27).

$$P_{s(\text{corrigida})} = P_{e(\text{carga})} - P_{fe} - P_{AV} - P_{estc(\text{corrigida})} - P_{rot(\text{corrigida})} - P_{sup(\text{corrigida})} \quad (27)$$

onde:

$P_{s(\text{corrigida})}$  é a potência de saída corrigida (W).

- Correção do freio dinamométrico

Para efetuar o cálculo da correção do freio dinamométrico utiliza-se a equação (30), aplicando o valor do conjugado medido para o ponto de 0% de carga, sendo necessário calcular a constante (A) também para o ponto de 0% de carga, conforme equação (28) e a constante (B) obtendo dados do ensaio a vazio no ponto de 100% da tensão nominal, conforme equação (29).

$$A_{1(0\% \text{ de carga})} = (P_{e(\text{carga})} - P_{estc} - P_{fe}) \cdot (1 - S) \quad (28)$$

$$B_{1(100\% \text{ de } v_n)} = (P_{e(\text{vazio})} - P_{estv} - P_{fe}) \quad (29)$$

$$CFD = \frac{k_2 \cdot (A_{1(0\% \text{ de carga})} - B_{1(100\% \text{ de } v_n)})}{n_{m(0\% \text{ de carga})}} - C_{(0\% \text{ de carga})} \quad (30)$$

onde:

$A_{1(0\% \text{ de carga})}$  é uma constante atribuída para o cálculo da correção do freio dinamométrico;

$B_{1(100\% \text{ de } v_n)}$  é uma constante atribuída para o cálculo da correção do freio dinamométrico;

$CFD$  é o valor da correção do freio dinamométrico (N.m);

$C_{(0\% \text{ de carga})}$  é o conjugado medido para o ponto de zero por cento de carga (N.m);

$k_2$  é uma constante de valor igual a 9549;

$n_{m(0\% \text{ de carga})}$  é a velocidade medida para o ponto de 0% de carga (rpm).

Obtendo o valor da correção do freio dinamométrico se torna possível determinar o conjugado corrigido conforme equação (31).

$$C_{(\text{corrigido})} = C + CFD \quad (31)$$

onde:

$C_{(corrigido)}$  é o conjugado corrigido em cada ponto do ensaio em carga (N.m);

$C$  é o conjugado medido em cada ponto do ensaio em carga (N.m).

- Fator de potência

O fator de potência também pode ser determinado para cada ponto de carga, conforme a equação (32).

$$\cos \phi = \frac{P_{e(carga)}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I} \quad (32)$$

onde:

$\cos \phi$  é o fator de potência de cada ponto do ensaio em carga;

$V$  é a tensão medida em cada ponto do ensaio em carga (V).

- Rendimento

Por fim o rendimento do motor em cada ponto de carga pode ser determinado conforme a equação (33) utilizando a potência de saída corrigida.

$$\eta = \frac{P_{s(corrigida)}}{P_{e(carga)}} \cdot 100 \quad (33)$$

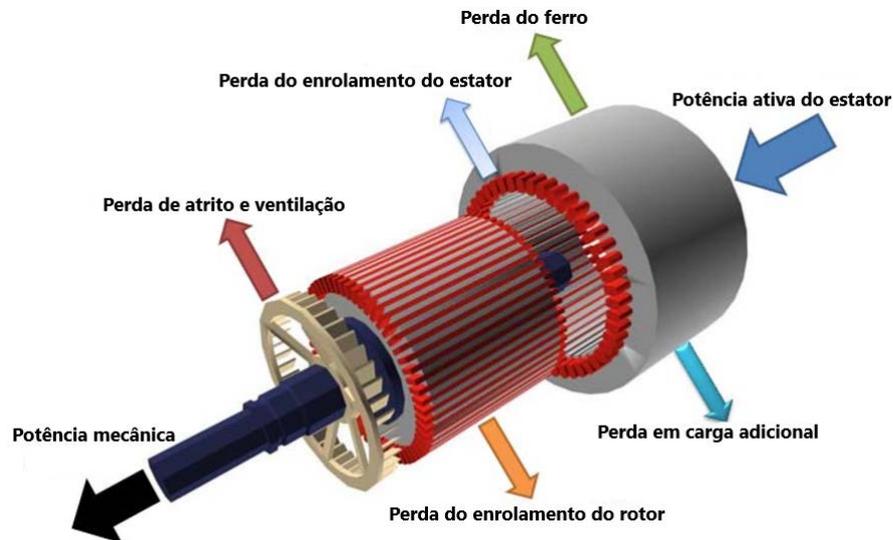
onde:

$\eta$  é o rendimento do motor calculado para cada ponto de carga (%).

### 5.1.2 IEC 60034-2-1:2014

Os procedimentos para determinar a eficiência e o fator de potência do MIT conforme a IEC 60034-2-1:2014 [15] se baseiam no método 2-1-1B conhecido como somatório das perdas, perdas adicionais em carga de acordo com o método das perdas residuais. Este é um método no qual a eficiência é determinada através do somatório das perdas no ferro, perdas de atrito e

ventilação, perdas do enrolamento do estator, perdas do enrolamento do rotor e perdas em carga adicional. Essas perdas são encontradas em partes distintas do MIT, conforme ilustrado na Figura 33.



**Figura 33 – Separação das perdas do MIT. Adaptado de [88].**

Para obter o rendimento do MIT, este método necessita submeter a máquina a quatro ensaios, alguns procedimentos são semelhantes aos ensaios da ABNT NBR 17094-3:2018 [9], conforme apresentado no fluxograma da Figura 34.



**Figura 34 - Fluxograma dos procedimentos de ensaio da IEC 60034-2-1:2014.**

- Medição da resistência a frio

No ensaio para determinar a resistência entre fases do motor é medida a resistência do enrolamento do MIT com o auxílio de uma ponte Kelvin e a temperatura ambiente através de termopares, aplicando procedimentos iguais ao ensaio da ABNT NBR 17094-3:2018 [9].

- Ensaio de elevação de temperatura.

Após a medição da resistência do estator é dado início ao ensaio de elevação de temperatura. O motor é acionado com as suas características nominais até atingir o equilíbrio térmico. A diferença deste ensaio para o ensaio de elevação de temperatura da ABNT é o período de estabilização da máquina. Nesse caso para o MIT atingir sua estabilidade térmica é necessário que a temperatura em cada lado da carcaça do motor tenha variação no máximo de 1K em relação a temperatura ambiente, durante um intervalo de 30 minutos. Neste ensaio também é necessário medir as grandezas de potência de entrada, conjugado, corrente média, tensão média, velocidade e frequência.

Após o motor atingir a estabilidade sua alimentação é desligada e o mesmo é parado com auxílio de um freio dinamométrico. Em seguida, é medida a resistência final do ensaio com o motor quente. Com as grandezas medidas neste ensaio se torna possível calcular  $t_2$  utilizando do método da variação da resistência, conforme equação (7).

- Ensaio em carga

Este ensaio deve ser realizado o mais rápido possível após o ensaio de elevação de temperatura, evitando a elevada variação da temperatura do enrolamento. A máquina deve ser ensaiada em seis condições distintas, aplicando de forma decrescente pontos de 125, 115, 100, 75, 50 e 25% do conjugado nominal. Este ensaio tem objetivo determinar as perdas do enrolamento do estator e do rotor para cada uma destas cargas, o que facilita a separação das perdas para efetuar o cálculo do rendimento da máquina. É necessário medir a resistência do enrolamento do estator antes e após o ensaio. Para cada ponto de carga são medidas as grandezas de tensão média, corrente média, potência de entrada, velocidade, frequência e conjugado.

- Perda do enrolamento do estator

As perdas do enrolamento do estator são calculadas para cada ponto do ensaio em carga, utilizando da média da resistência ( $\Omega$ ) medida antes e após o ensaio em carga e da corrente média ( $I$ ) medida em cada ponto do ensaio, conforme equação (16).

- Perda do enrolamento do estator corrigida

Obtendo o valor da perda do estator é possível efetuar a sua correção conforme equação (34) utilizando ( $K_\theta$ ) que é um fator de correção da temperatura do estator para 25°C que pode ser encontrado conforme equação (35).

$$P_{estc(IECcorrigida)} = P_{estc} \cdot K_\theta \quad (34)$$

$$K_\theta = \frac{k_3 + t_2 + 25 - t_1}{k_3 + t_2} \quad (35)$$

onde:

$P_{estc(IECcorrigida)}$  é a perda do estator corrigida para cada ponto do ensaio em carga (W);

$K_\theta$  é o fator de correção da temperatura para 25°C;

$k_3$  é uma constante de valor igual a 235 quando o enrolamento do motor for de cobre ou 225 quando o enrolamento do motor for de alumínio.

- Perda do enrolamento do rotor

As perdas do enrolamento do rotor utiliza da potência de entrada medida no ensaio em carga ( $P_{e(carga)}$ ), potência do estator ( $P_{estc}$ ), escorregamento ( $S$ ) e perda do ferro ( $P_{fe(carga)}$ ), também em cada ponto do ensaio em carga, cujo a perda do ferro é calculada conforme Tabela 13. A perda do enrolamento do rotor pode ser calculada utilizando a equação (18) e o escorregamento, conforme equação (17).

- Perda do enrolamento do rotor corrigida

Obtendo o escorregamento e a perda do rotor se torna possível efetuar a correção de ambos. A correção do escorregamento pode ser realizada conforme a equação (36) e a correção da perda do rotor através da equação (37).

$$S_{(IECcorrigido)} = S \cdot K_\theta \quad (36)$$

$$P_{rot(IECcorrigida)} = (P_{e(carga)} - P_{estc(IECcorrigida)} - P_{fe(carga)}) \cdot S_{(IECcorrigido)} \quad (37)$$

onde:

$P_{rot(IECcorrigida)}$  é a perda do rotor corrigida para cada ponto do ensaio em carga (W);

$S_{(IECcorrigido)}$  é o escorregamento corrigido (p.u);

$P_{fe(carga)}$  é a perda do ferro calculada em cada ponto do ensaio em carga (W).

- Potência de entrada corrigida

A potência de entrada medida também é corrigida utilizando as perdas do estator e do rotor já corrigidas, o seu valor é encontrado aplicando a equação (38).

$$P_{e(IECcorrigida)} = P_{e(carga)} - (P_{estc} - P_{estc(IECcorrigida)} + P_{rot} - P_{rot(IECcorrigida)}) \quad (38)$$

onde:

$P_{e(IECcorrigida)}$  é a potência de entrada corrigida em cada ponto do ensaio em carga (W).

- Ensaio a vazio

No ensaio a vazio é necessário desacoplar a máquina a ser ensaiada do freio dinamométrico e acioná-la no primeiro instante com tensão e frequência nominais. Em seguida, são aplicados oito valores percentuais da tensão nominal, de forma decrescente, para os pontos de 110, 100, 95, 90, 60, 50, 40 e 30% da tensão nominal. Os valores percentuais entre 110 a 90% da tensão nominal são utilizados para determinar a perda do ferro em carga. Os valores percentuais entre 60 e 30% da tensão nominal são utilizados para determinar a perda de atrito e ventilação zero da máquina. Para cada ponto de tensão são registradas as grandezas de potência elétrica, tensão média e corrente média.

- Perda constante

A perda constante é calculada utilizando a equação (39) e a potência do estator a vazio conforme a equação (9). Também pode ser calculada utilizando da perda de atrito e ventilação e da perda do ferro obtida no ensaio a vazio.

$$P_C = P_{e(vazio)} - P_{estv} = P_{AV(IEC)} + P_{fe(vazio)} \quad (39)$$

onde:

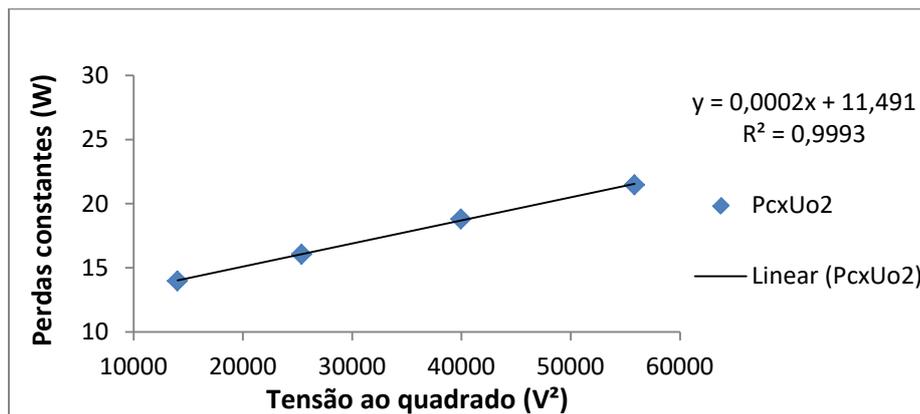
$P_C$  é a perda constante para cada ponto do ensaio a vazio (W);

$P_{fe(vazio)}$  é a perda do ferro calculada em cada ponto do ensaio a vazio (W);

$P_{AV(IEC)}$  é a perda de atrito e ventilação calculada para cada ponto do ensaio em carga (W).

- Perda de atrito e ventilação zero, ensaio a vazio

Após determinar a perda constante ( $P_C$ ) do MIT, utiliza-se da regressão linear para obter a perda de atrito e ventilação zero ( $P_{AV(zero)}$ ), podendo ser encontrada quando o motor está operando próximo da velocidade síncrona. É traçando um gráfico, utilizando as próprias perdas constantes ( $P_C$ ) e a tensão ao quadrado ( $V^2$ ) encontrada no ensaio a vazio para os pontos de 60 a 30% da tensão nominal, conforme o exemplo da Figura 35.



**Figura 35 – Perdas constantes x Tensão ao quadrado.**

Este procedimento é semelhante ao exemplo da ABNT NBR 17094-3:2018 [9], apresentado na Tabela 9. Porém, alterando os pontos percentuais da tensão nominal e substituindo o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas do ferro pelas perdas constantes. Neste caso,  $B$  corresponde a perda de atrito e ventilação zero, podendo ser encontrada através da equação (13). A Tabela 12 exibe um exemplo de como de como determinar a perda de atrito e ventilação zero. Essa perda possui apenas um valor e pode ser usada para questões de cálculos para todos os pontos do ensaio a vazio.

**Tabela 12 – Análise da regressão linear para determinar a perda de atrito e ventilação zero IEC.**

Tensão (%)	Tensão (V)	X (Tensão <sup>2</sup> )	Y=Perdas constantes (kW)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	A	B= Perda de atrito e ventilação zero (kW)
60	236,30	55837,69	0,021	3,12E+09	0,0005	1198,94	1,80E-07	0,01149
50	199,90	39960,01	0,019	1,60E+09	0,0004	751,67		
40	159,30	25376,49	0,016	6,44E+08	0,0003	407,25		
30	118,40	14018,56	0,014	1,97E+08	0,0002	195,93		
	Somatório	135192,75	0,070	5,56E+09	0,0013	2553,79		

- Perda de atrito e ventilação

Como a perda de atrito e ventilação zero já foi calculada e o escorregamento corrigido para cada ponto do ensaio em carga é calculado a perda de atrito e ventilação, conforme equação (40), e a perda de atrito e ventilação corrigida, conforme equação (41).

$$P_{AV(IEC)} = P_{AV(zero)} \cdot (1 - S)^{2,5} \quad (40)$$

$$P_{AV(IECcorrigida)} = P_{AV(zero)} \cdot (1 - S_{(IECcorrigido)})^{2,5} \quad (41)$$

onde:

$P_{AV(IECcorrigida)}$  é a perda de atrito e ventilação corrigida em cada ponto do ensaio em carga (W);

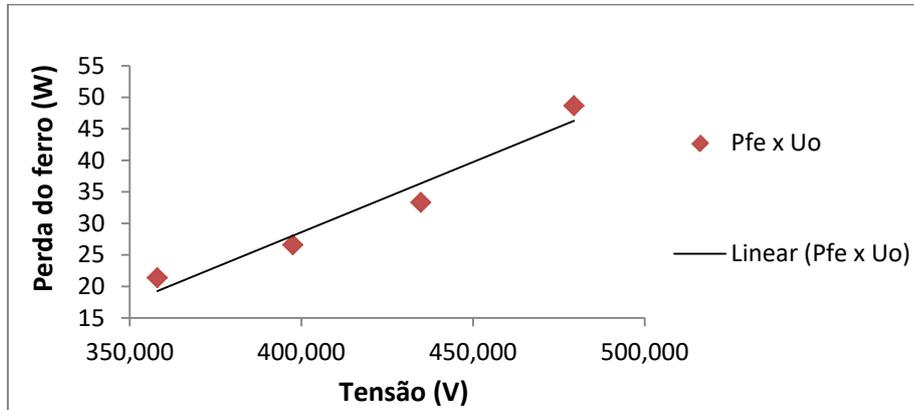
$P_{AV(zero)}$  é a perda de atrito e ventilação zero calculada no ensaio a vazio (W).

- Perda do ferro

Para obter as perdas do ferro interpoladas para os pontos do ensaio em carga é necessário utilizar os dados de tensão e perda do ferro em cada ponto do ensaio a vazio. Para encontrar as perdas do ferro no ensaio a vazio utiliza-se a equação (42).

$$P_{fe(vazio)} = P_C - P_{AV(zero)} \quad (42)$$

Segundo a norma IEC 60034-2-1:2014 [15], primeiramente deve-se traçar um gráfico da perda no ferro para o ensaio a vazio versus a tensão  $U_0$  medida também no ensaio a vazio, ambos para os pontos de 110 a 90% da tensão nominal, conforme o exemplo da Figura 36.



**Figura 36 – Perda no ferro x tensão do ensaio a vazio.**

Em seguida é calculada a queda de tensão do enrolamento primário para o ensaio a vazio e para o ensaio em carga, se atentando para os diferentes valores de tensão e potência de entrada medidos em cada ensaio, conforme a equação (43), utilizando as equações (44) e (45). O resultado da equação (44) corresponde ao fator de potência da máquina, calculado em cada ponto do ensaio em carga. Obtidos os valores de  $U_{i(vazio)}$  e  $U_{i(carga)}$  deve-se realizar uma interpolação do  $U_{i(vazio)}$  e a  $P_{fe(vazio)}$ , utilizando o  $U_{i(carga)}$  para determinar a perda do ferro para cada ponto do ensaio em carga.

$$U_{i(vazio)} = U_{i(carga)} = \sqrt{\left(V_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_3 \cdot R_3 \cdot \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_3 \cdot R_3 \cdot \sin \phi\right)^2} \quad (43)$$

$$\cos \phi = \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I} \quad (44)$$

$$\sin \phi = \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \quad (45)$$

onde:

$U_{i(vazio)}$  é a queda de tensão do enrolamento primário no ponto de 110 e 90% da tensão nominal no ensaio a vazio (V);

$U_{i(carga)}$  é a queda de tensão do enrolamento primário em cada ponto do ensaio em carga (V);

$V_3$  é a tensão medida, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio (V);

$I_3$  é a corrente medida, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio (A);

$R_3$  é a média da resistência medida no início e final do ensaio, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio ( $\Omega$ );

$P_e$  é a potência de entrada medida, hora no ensaio em carga e hora no ensaio a vazio (W).

A Tabela 13 apresenta um exemplo dos cálculos utilizados a uma interpolação linear.

**Tabela 13 – Exemplo de interpolação linear.**

Conjugado (%)	Tensão (%)	Ui (vazio)	Pfe (Vazio)	Ui (carga)	Pfe (carga) interpolada
125	110	476,5	48,7	374,4	23,8
115	100	432,6	33,3	376,3	24,0
100	95	395,5	26,6	379,6	24,5
75	90	356,1	21,4	385,4	25,3
50				390,0	25,9
25				394,4	26,5

- Perda suplementar corrigida

A perda suplementar do MIT também é encontrada utilizando a análise de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, semelhante a ABNT NBR 17094-3:2018 [9] método 2, utilizando da perda residual em cada ponto do ensaio em carga, calculada, conforme equação (46). A potência de saída é calculada, conforme equação (47) e a perda de atrito e ventilação, conforme equação (40).

$$P_{res(IEC)} = P_{e(carga)} - P_{s(IEC)} - P_{estc} - P_{rot} - P_{fe(carga)} - P_{AV(IEC)} \quad (46)$$

$$P_{s(IEC)} = \frac{2\pi \cdot C \cdot n_m}{60} \quad (47)$$

onde:

$P_{res(IEC)}$  é a perda residual em cada ponto do ensaio em carga (W);

$P_{s(IEC)}$  é a potência de saída em cada ponto do ensaio em carga (W).

Após determinar as perdas residuais em cada ponto do ensaio em carga, as mesmas são suavizadas utilizando a análise de regressão linear conforme a equação (20). Utilizando a inclinação da reta ( $A$ ) e a interseção de  $Y$  com a reta ( $B$ ) calculadas pelo método dos mínimos quadrados, conforme equações (12) e (13). O coeficiente de correlação ( $\gamma$ ) pode ser calculado utilizando a equação (21). Caso o coeficiente de correlação seja menor que 0,95 é necessário eliminar o pior ponto e repetir a regressão. Se mesmo assim o coeficiente de correlação permanecer menor que 0,95, o ensaio se torna inválido em função de possíveis erros de leitura ou de instrumentação. Desta forma utiliza-se a constante de inclinação da reta ( $A$ ) para calcular as perdas suplementares corrigidas conforme equação (22). A Tabela 14 e Tabela 15 apresentam um exemplo de como determinar as perdas suplementares corrigidas e o valor do fator de correlação. Para este caso não foi necessário desconsiderar nenhum ponto da regressão linear, pois o fator de correlação para esse exemplo ficou próximo de 1 descartando possíveis erros de medição.

**Tabela 14 – Análise da regressão linear IEC.**

Conjugado (%)	Conjugado (Nm)	X (Conjugado <sup>2</sup> )	Y (Perdas residuais)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	Perdas suplementares corrigidas (W)
125	1,56	2,43	13,400	5,9E+00	1,8E+02	32,610	15,4268
115	1,43	2,04	9,500	4,2E+00	9,0E+01	19,427	12,9628
100	1,240	1,54	5,900	2,4E+00	3,5E+01	9,072	9,7470
75	0,900	0,81	3,900	6,6E-01	1,5E+01	3,159	5,1347
50	0,610	0,37	-0,800	1,4E-01	6,4E-01	-0,298	2,3588
25	0,320	0,10	-2,400	1,0E-02	5,8E+00	-0,246	0,6491
Somatório	6,06	7,30	29,500	1,3E+01	3,3E+02	63,724	

**Tabela 15 - Resultados da análise da regressão linear IEC.**

A	B	$\gamma$	OBSERVAÇÃO
6,33909	-2,797	0,98700	<b>Não foi desconsiderado nenhum ponto na regressão</b>

- Somatório das perdas

As perdas totais em cada ponto do ensaio em carga são calculadas a fim de determinar a eficiência da máquina, sendo o somatório das perdas do ferro, perdas de atrito e ventilação corrigidas, as perdas do estator e rotor corrigidas e as perdas suplementares corrigidas. As perdas totais podem ser obtidas conforme, equação (48).

$$P_T = P_{fe(carga)} + P_{AV(IECcorrigida)} + P_{est(IECcorrigida)} + P_{rot(IECcorrigida)} + P_{sup(corrigida)} \quad (48)$$

onde:

$P_T$  é a perda total do MIT (W).

- Rendimento

Para determinar o rendimento do MIT é necessário corrigir a potência de saída conforme a equação (49). E por fim, após determinar todas as variáveis que auxiliam a obter o valor da eficiência do motor de indução trifásico a mesma pode ser encontrada em cada ponto do ensaio em carga, conforme, equação (50).

$$P_{s(IECcorrigida)} = P_{e(carga)} - P_T \quad (49)$$

$$\eta = \frac{P_{s(IECcorrigida)} - P_T}{P_{s(IECcorrigida)}} \cdot 100 \quad (50)$$

onde:

$P_{s(IECcorrigida)}$  é a potência de saída corrigida para cada ponto do ensaio em carga (W).

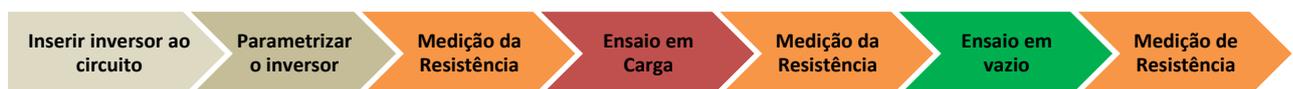
### 5.1.3 IEC/TS 60034-2-3:2013 (*Technical Specification*)

O método para determinar a eficiência do conjunto motor + inversor quando o MIT é acionado por um inversor de frequência utiliza dos procedimentos da IEC/TS 60034-2-3:2013[20], método 2-3-B, tendo como base para aplicação dos ensaios a IEC 60034-2-1:2014 [15], utilizando o método 2-1-1B. Uns dos objetivos da IEC/TS 60034-2-3:2013[20] é definir as perdas harmônicas dos MITs quando alimentados por um inversor de frequência, o seu resultado permite a comparação das perdas harmônicas geradas por motores de diversas potências.

Quando iniciada a sequência dos procedimentos de ensaios, o MIT deve ser ensaiado primeiramente com alimentação senoidal, aplicando os mesmos procedimentos de testes apresentados na IEC 60034-2-1:2014 [15], seguindo o descrito nos ensaios do item 5.1.2. Finalizando estes ensaios um inversor de frequência é dimensionado especificamente para o MIT que está sendo ensaiado. Sendo necessário que o inversor de frequência seja parametrizado seguindo as especificações da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20], sendo elas:

- O inversor de frequência deve conter dois níveis de tensão;
- Nenhum controle de realimentação de corrente deve ser ativado;
- Compensação do escorregamento não deve ser aplicada;
- Nenhum componente adicional que influencie a tensão de saída ou a corrente de saída deve ser instalado entre o inversor de frequência e o motor, exceto os instrumentos de medição;
- A tensão fundamental deve ser igual a tensão nominal do motor;
- Se necessário a tensão de entrada do inversor deve ser ajustada para um valor que permita que a tensão nominal do motor seja aplicada;
- A frequência fundamental do motor deve ser igual a frequência nominal do motor;
- A frequência de chaveamento deve ser igual a 4 kHz para motores com potências nominais até 90kW.
- Um cabo blindado deve conectar o inversor de frequência ao motor.

Após realizar a parametrização do inversor de frequência é iniciada a nova sequência dos procedimentos de ensaios. O MIT é novamente ensaiado, desta vez sendo alimentado pelo inversor de frequência seguindo os mesmos procedimentos de ensaios da IEC 60034-2-1:2014 [15] método 2-1-1B para o ensaio que determina a resistência do estator, ensaio em carga e ensaio a vazio, conforme apresentado no fluxograma da Figura 37.



**Figura 37 – Fluxograma dos procedimentos de ensaio da IEC/TS 60034-2-3:2013.**

Como algumas equações já foram deduzidas no ensaio da IEC 60034-2-1;2014 [15] e a sequência de ensaios para a norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20] começa no ensaio em carga, serão demonstradas as equações a partir das perdas residuais para a IEC/TS 60034-2-3:2013[20], as equações anteriores a ela seguem o mesmo princípio da norma IEC 60034-2-1:2014 [15].

- Perdas residuais

Com base nos ensaios mencionados as perdas residuais devem ser determinadas de acordo com a equação (46) para o grupo de ensaios realizados com alimentação senoidal, e conforme a equação (51) para os ensaios realizados com a utilização do inversor de frequência. As perdas

residuais devem ser determinadas para cada condição de carga subtraindo da potência de entrada a potência de saída, as perdas de enrolamento do estator não corrigidas, as perdas de ferro, as perdas por atrito e ventilação e as perdas de enrolamento do rotor não corrigidas, correspondentes para um determinado valor de escorregamento.

$$P_{res(com\ inversor)} = P_{e(carga)(com\ inversor)} - P_{s(com\ inversor)} - P_{est} - P_{rot} - P_{fe(carga)} - P_{AV(IEC)} \quad (51)$$

onde:

$P_{res(com\ inversor)}$  é a perda residual em cada ponto do ensaio em carga (W);

$P_{e(carga)(com\ inversor)}$  é a potência de entrada medida na alimentação do inversor em cada ponto do ensaio em carga (W);

$P_{s(com\ inversor)}$  é a potência de saída em cada ponto do ensaio em carga (W).

- Perda suplementar corrigida

Para ambos os casos, os dados de perda residual devem ser suavizados usando a análise de regressão linear. As perdas residuais quando o MIT é alimentado com tensão senoidal é obtido conforme equação (20), e a perda suplementar corrigida, de acordo com a equação (22). Para o grupo de ensaios realizados utilizando o inversor de frequência, a perda residual do MIT pode ser determinada conforme a equação (52) e a perda suplementar corrigida conforme a equação (53). O exemplo utilizado para determinar as perdas suplementares corrigidas, conforme a IEC 60034-2-1:2014 [15] apresentados na Tabela 14 e Tabela 15 também pode ser utilizado para este caso.

$$P_{res(com\ inversor)} = A \cdot X_{(com\ inversor)}^2 + B \quad (52)$$

$$P_{sup(corrigida\ com\ inversor)} = A \cdot X_{(com\ inversor)}^2 \quad (53)$$

onde:

$P_{sup(corrigida\ com\ inversor)}$  é a perda suplementar corrigida calculada utilizando o inversor (W);

$X_{(com\ inversor)}^2$  é variável independente, conjugado em cada ponto de carga (N.m).

- Perdas harmônicas no ensaio em carga

A diferença entre as perdas suplementares corrigidas quando o motor opera com o inversor de frequência das perdas suplementares corrigidas quando o motor opera sem o inversor de frequência são as perdas harmônicas dependentes de cada ponto do ensaio em carga, conforme equação (54).

$$P_{harmônica(carga)} = P_{sup(corrigida\ com\ inversor)} - P_{sup(corrigida)} \quad (54)$$

onde:

$P_{harmônicas(carga)}$  é a perda harmônica em cada ponto do ensaio em carga (W).

- Perdas harmônicas no ensaio a vazio

E a diferença entre as perdas constantes, quando o motor está operando a vazio utilizando o inversor de frequência, conforme equação (55), das perdas constantes quando o motor recebe alimentação senoidal, conforme equação (39) são as perdas harmônicas no ensaio a vazio, expressa, conforme a equação (56).

$$P_{C\ (com\ inversor)} = P_{e(vazio)\ (com\ inversor)} - P_{estv\ (com\ inversor)} \quad (55)$$

$$P_{harmônica(vazio)} = P_{C\ (com\ inversor)} - P_C \quad (56)$$

onde:

$P_{C\ (com\ inversor)}$  é a perda constante calculada para cada ponto do ensaio a vazio (W);

$P_{e\ vazio\ (com\ inversor)}$  é a potência de entrada medida na alimentação do inversor em cada ponto do ensaio a vazio (W);

$P_{estv\ (com\ inversor)}$  é a perda do estator calculada em cada ponto do ensaio a vazio (W);

$P_{harmônica(vazio)}$  é a perda harmônica a vazio calculada em cada ponto do ensaio (W).

- Perda total

Após estes cálculos se torna possível determinar a perda total do MIT operando com o inversor de frequência, sendo o somatório das perdas totais encontradas quando o motor realiza os ensaios com tensão senoidal, conforme equação (48) mais o somatório das perdas harmônicas totais

conforme, equação (57). O cálculo da perda total do MIT utilizando o inversor é expresso, conforme, equação (58).

$$P_{harmônica(total)} = P_{harmônica(carga)} + P_{harmônica(vazio)} \quad (57)$$

$$P_{T(com\ inversor)} = P_T + P_{harmônica(total)} \quad (58)$$

onde:

$P_{T(com\ inversor)}$  é a perda total do motor utilizando o inversor de frequência (W);

$P_{harmônica(total)}$  é o somatório das perdas harmônicas em carga e a vazio utilizando o inversor de frequência (W).

- **Rendimento**

Para determinar o rendimento do motor é necessário utilizar a potência de saída corrigida no ensaio da IEC 60034-2-1:2014 [15], calculada conforme equação (49). Desta forma o rendimento do MIT utilizando o inversor de frequência é calculado conforme equação (59).

$$\eta = \frac{P_{s(IEC\ corrigida)}}{P_{s(IEC\ corrigida)} + P_{T(com\ inversor)}} \cdot 100 \quad (59)$$

## Capítulo 6 - Resultados

Para fins de comparação das diferenças dos procedimentos de ensaios das normas ABNT NBR 17094-3:2018 [9] e IEC 60034-2-1:2014 [15] e uma análise das características de desempenho de motores de indução trifásicos utilizando as normas IEC 60034-2-1:2014 [15] e IEC/TS 60034-2-3:2013[20] foram realizados 9 ensaios em três motores, sendo um ensaio em cada motor para cada norma. Os motores utilizados nesta dissertação possuem potências de 1, 3 e 12,5 CV e seus dados de placa estão expressos conforme Tabela 16. Para cada ensaio realizado um grupo de instrumentos são utilizados, suas características estão expressas, conforme Tabela 17.

**Tabela 16 – Dados de placa dos motores ensaiados.**

<b>Características</b>	<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>	<b>Motor 3</b>
<b>Potência (CV)</b>	1	3	12,5
<b>Corrente (A)</b>	2,95	7,82	17,7
<b>Tensão (V)</b>	220	220	380
<b>Velocidade (Rpm)</b>	1735	3470	1760
<b>Frequência (Hz)</b>	60	60	60
<b>Fator de potência</b>	0,79	0,85	0,85
<b>Fator de serviço</b>	1,25	1,25	1,25
<b>Categoria</b>	N	N	N
<b>Relação Ip/In</b>	7	7,8	7,8
<b>Regime</b>	S1	S1	S1
<b>Classe de isolamento</b>	F	F	F
<b>Ano de fabricação</b>	2019	2011	2019
<b>Rendimento (%)</b>	83	86,5	92,4

**Tabela 17 – Instrumentos utilizados nos ensaios.**

<b>Instrumento</b>	<b>Fator de abrangência</b>	<b>Incerteza (%)</b>	<b>Desvio (%)</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante</b>
Ponte kelvin	2,00	0,33	0,00	MGR10	Sefelec
Multímetro digital	2,01	0,01	0,03	34410A	Agilent
Transdutor de torque	2,00	0,28	0,25	T12-100Nm (Torque)	HBM
Eixo de torção	2,00	0,12	-0,01	T12-100Nm (Velocidade)	HBM
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	-0,04	NORMA 5000 (Tensão)	Fluke
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,8	0,00	NORMA 5000 (Corrente)	Fluke
Wattímetro digital trifásico	3,31	0,19	0,46	NORMA 5000 (Potência)	Fluke
Transdutor de corrente	2,01	0,12	0,06	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,00	0,12	0,16	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,52	0,23	0,20	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,00	0,32	0,34	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,03	0,32	0,14	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,02	0,32	0,14	ITZ600-SPR	LEM
Termômetro digital	2,01	0,0043	-0,16	QUANTUM MX 1609	HBM
Termômetro digital	2,01	0,0043	-0,23	QUANTUM MX 1609	HBM
Termômetro digital	2,01	0,0043	-0,20	QUANTUM MX 1609	HBM

Wattímetro digital trifásico	2,00	0,8	0,00	WT330	Yokogawa
Transdutor de torque	4,53	0,69	0,40	T12-200Nm (Torque)	HBM
Eixo de torção	2,00	0,12	0,03	T12-200Nm (Velocidade)	HBM
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,81	0,00	NORMA 5000 (Tensão)	Fluke
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,80	0,00	NORMA 5000 (Corrente)	Fluke
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	-0,21	NORMA 5000 (Potência)	Fluke
Transdutor de corrente	2,01	0,12	0,06	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,37	0,24	0,14	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,00	0,12	0,16	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,37	0,25	0,18	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,15	0,15	0,12	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,43	0,23	0,02	ITZ600-SPR	LEM
Termômetro digital	2,00	0,0043	-0,13	QUANTUM MX 1609	HBM
Termômetro digital	2,00	0,0043	-0,15	QUANTUM MX 1609	HBM
Termômetro digital	2,00	0,0043	-0,15	QUANTUM MX 1609	HBM
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	-0,07	WT331	Yokogawa
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	0,07	WT332	Yokogawa
Transdutor de torque	3,31	0,65	0,31	T12-1kNm (Torque)	HBM
Eixo de torção	2,00	0,12	0,00	T12-1kNm (Velocidade)	HBM
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	-0,04	NORMA 5000 (Tensão)	Fluke
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,08	0,10	NORMA 5000 (Corrente)	Fluke
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	0,07	NORMA 5000 (Potência)	Fluke
Transdutor de corrente	2,87	0,3	0,20	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,87	0,21	0,36	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	4,53	0,34	0,10	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,65	0,16	-0,05	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,28	0,12	0,22	ITZ600-SPR	LEM
Transdutor de corrente	2,87	0,28	0,00	ITZ600-SPR	LEM
Termômetro digital	2,01	0,0043	-0,22	QUANTUM MX 1609	HBM
Termômetro digital	2,01	0,0043	-0,21	QUANTUM MX 1609	HBM
Termômetro digital	2,01	0,0043	-0,21	QUANTUM MX 1609	HBM

Antes de iniciar os testes, os motores foram alinhados e acoplados a um freio dinamométrico responsável por gerar a carga necessária para atender o motor que está sendo ensaiado. Os freios são controlados por inversores de frequência regenerativos, de forma que, quando o freio está trabalhando como gerador, a energia gerada é retornada para o inversor, podendo ser retornada a rede ou dissipada em um banco de carga. Os resultados dos alinhamentos podem ser visualizados conforme Figura 38, Figura 39 e Figura 40, para o motor 1, 2 e 3 respectivamente. Os valores demonstrados possuem unidade de vibração em (mm/s).



**Figura 38 – Motor 1.**



**Figura 39 – Motor 2.**



**Figura 40 – Motor 3.**

Após o alinhamento, testes são realizados nos equipamentos de medição para saber se estes estão enquadrados dentro das exigências da norma ABNT NBR 17094-3:2018 [9]. A fonte de alimentação utilizada deve apresentar tensões de linha praticamente equilibradas e possuir um fator harmônico de tensão igual ou inferior a 2%, exceto para motores de categoria N, que neste caso deve possuir fator harmônico menor ou igual a 3%. O desequilíbrio da tensão medida nos terminais do motor deve ser inferior a 0,5% e a frequência medida deve ser mantida dentro de 0,5% do valor especificado para o ensaio, 60 Hz. Tendo em vista que qualquer variação na frequência afeta diretamente o resultado do rendimento, ao aplicar o método 2 da ABNT 17094-3:2018 [9] a média da frequência não pode ser maior de 2% da frequência especificada de 60 Hz. Por fim, todos os instrumentos indicadores devem ter sido calibrados conforme estabelecido na ABNT NBR ISO/IEC 17025, não podendo apresentar limites de desvios superiores a  $\pm 0,5$  % do fundo de escala. Para mais detalhes consultar o tópico 5 da ABNT NBR 17094-3:2018 [9].

## 6.1 Resultado ABNT 17094-3:2018

Quando é dado início aos ensaios a aquisição de dados também é iniciada, os dados de entrada passam a ser coletados para os ensaios de elevação de temperatura, ensaio em carga e a vazio respectivamente.

### 6.1.1 Motor 1

O motor 1 está incluso no segundo grupo de motores mais vendidos no Brasil no período de 1992 a 2012, se enquadrando na faixa de motores de 0,16 a 1 CV com cerca de 825.000 unidades comercializadas [69]. Estes motores são muito utilizados em setores residenciais e meios acadêmicos, se tornando de grande importância a sua avaliação. Os procedimentos, dados coletados e resultados de ensaios realizados para este motor serão relatados de forma mais detalhada. Sendo assim, os procedimentos tratados podem ser considerados para os motores 2 e 3.

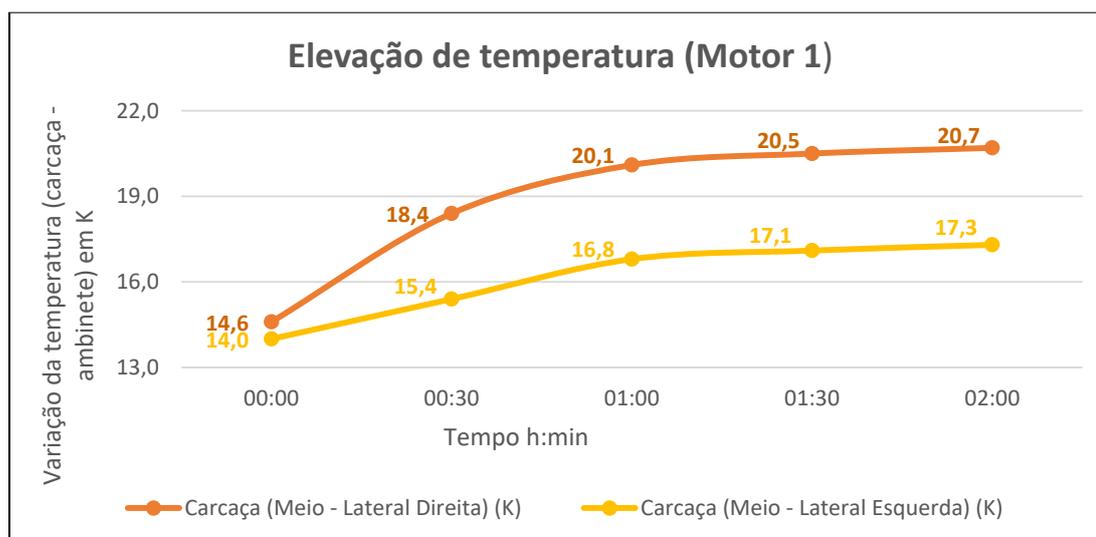
- **Ensaio de elevação de temperatura**

Ao iniciar o ensaio de elevação foram coletadas grandezas de temperatura, conjugado, potência de entrada, corrente média, tensão média, velocidade e frequência do MIT durante intervalos seguidos de trinta minutos. O motor recebeu uma sobrecarga de 20% durante o período de 29 minutos entrando em estabilidade térmica duas horas depois do início do ensaio, as temperaturas da carcaça da lateral direita e esquerda apresentaram variações menores que 1K em um intervalo de 1 hora. Na Tabela 18 são apresentados todos os dados coletados no ensaio.

**Tabela 18 – Dados do ensaio de elevação de temperatura ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

1- ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA					
Medição de Resistência	Antes do ensaio		Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )	4,8570	Resistência ( $\Omega$ )		5,1330
	Temperatura ambiente (°C)	22,5	Temperatura ambiente (°C)		23,0
			Tempo de leitura (s)		20,3
Horário da medição	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00
Carcaça (Meio - Lateral Direita) (K)	14,6	18,4	20,1	20,5	20,7
Carcaça (Meio - Lateral Esquerda) (K)	14,0	15,4	16,8	17,1	17,3
Temperatura ambiente (°C)	22,5	22,6	22,8	23,0	23,0
Torque (N.m)	0,0	4,20	4,20	4,20	4,20
Potência de entrada (W)	0,0	904,14	905,51	903,81	904,05
Corrente média (A)	0,0	2,95	2,95	2,94	2,94
Tensão média (V)	0,3	220,02	220,13	220,18	220,23
Velocidade (rpm)	0,1	1.733,60	1.733,60	1.732,90	1.733,20
Frequência (Hz)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

A variação da temperatura do motor é expressa em K sendo imposta pela diferença da temperatura da carcaça e a temperatura ambiente. A Figura 41 ilustra a curva de elevação de temperatura do motor 1. No instante da estabilização a carcaça lateral direita apresentou uma variação de 0,6 K e a carcaça lateral esquerda de 0,5 K.



**Figura 41 – Curva de elevação de temperatura ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

- **Ensaio em carga**

No ensaio em carga foram coletados dados de conjugado, potência de entrada, corrente média, velocidade e tensão média para os pontos de 150 a 0% do conjugado nominal e o valor da resistência antes e após o ensaio conforme Tabela 19. A relação da resistência medida antes e após o ensaio é calculada e está dentro do limite permitido de 3,5%, apresentando um valor de 0,77%.

**Tabela 19 – Dados do ensaio em carga ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

2- ENSAIO EM CARGA							
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		5,064	Resistência ( $\Omega$ )		5,025	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		23,0	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		23,1	
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25	0
Conjugado (N.m)	6,30	5,30	4,20	3,10	2,11	1,00	0,50
Potência de entrada (W)	1.392,72	1.163,78	919,23	685,87	483,58	266,31	160,40
Corrente média (A)	4,15	3,56	2,98	2,48	2,13	1,87	1,80
Velocidade (rpm)	1.691,70	1.712,60	1.732,60	1.752,00	1.767,70	1.783,10	1.790,30
Tensão média (V)	219,26	219,86	220,03	220,26	220,45	220,37	220,05

- **Ensaio em vazio**

Neste ensaio foram coletadas grandezas de tensão média, corrente média e potência de entrada para os pontos de 110 a 20% da tensão nominal, conforme Tabela 20. A relação da resistência está dentro do limite permitido, apresentando valor de 2,98%.

**Tabela 20 – Dados do ensaio a vazio ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

3- ENSAIO EM VAZIO						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		4,961	Resistência ( $\Omega$ )		4,813
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		23,1	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		23,0
Tensão nominal (%)	110	100	80	60	40	20
Tensão média (V)	242,21	219,95	175,72	132,59	88,19	44,21
Corrente média (A)	2,32	1,78	1,17	0,78	0,48	0,24
Potência de entrada (W)	92,34	66,36	39,23	24,28	14,20	8,13

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

Iniciando a determinação das perdas através do ensaio a vazio são obtidas as perdas joule do estator, o somatório da perda de atrito e ventilação mais as perdas no ferro, a perda de atrito e ventilação determinada através da regressão linear e a perda no ferro. As perdas de atrito e ventilação e as perdas no ferro são calculadas obtendo um único valor que é considerado igual para questão de cálculos para todos os pontos do ensaio a vazio. Para este caso a perda de atrito e ventilação é de -0,00352 kW e da perda no ferro de 0,047 kW. As outras grandezas estão expressas conforme Tabela 21 para os pontos de 110 a 20% da tensão nominal.

**Tabela 21 – Processamento das perdas no ensaio a vazio ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

Tensão nominal (%)	110	100	80	60	40	20
Perda Joule do estator (kW)	0,039	0,023	0,010	0,004	0,002	0,0004
Somatório da perda de atrito e ventilação + ferro (kW)	0,053	0,043	0,029	0,020	0,013	0,008

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

As perdas processadas através do ensaio em carga são as perdas joule do estator, perdas joule do rotor, perdas residuais e as perdas suplementares corrigidas através da regressão linear. Além destas perdas são calculadas as perdas totais aparente do MIT, sendo esta a diferença da potência de entrada e a potência de saída. O fator de correlação para este ensaio apresentou um valor igual a 1, desta forma descartando possíveis erros de medição. Os dados colhidos no ensaio são expressos para os pontos de 150 a 25% da carga nominal do motor conforme Tabela 22.

**Tabela 22 – Processamento das perdas no ensaio em carga ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Perda Joule do estator (kW)	0,130	0,096	0,067	0,047	0,034	0,026
Escorregamento (p.u)	0,060	0,049	0,037	0,027	0,018	0,009
Perda Joule do rotor (kW)	0,073	0,050	0,030	0,016	0,007	0,002
Potência de saída (kW)	1,122	0,956	0,768	0,575	0,397	0,193
Perda residual (kW)	0,024	0,019	0,011	0,006	0,002	0,002
Perda suplementar corrigida (kW)	0,024	0,017	0,011	0,006	0,003	0,001
Perdas totais aparente (W)	271,294	207,847	151,729	111,595	87,430	73,981
Fator de correlação	1,00	<b>Não foi desconsiderado nenhum ponto na regressão</b>				

- **Correção do freio dinamométrico**

Na Tabela 23 é apresentada a correção do freio dinamométrico, (*A*) é calculado no ensaio em carga para o ponto de 0% de carga e (*B*) no ensaio a vazio para o ponto de 100% da tensão nominal. Para aplicar a correção do freio dinamométrico no conjugado medido é necessário que a diferença entre (*A*) e (*B*) tenha um valor menor que 15% da potência de saída do motor ensaiado para o ponto de 100% da carga nominal, caso contrário o freio estará superdimensionado para o devido motor de ensaio. A diferença entre *A* e *B* para o motor 1 obteve um valor de 13,22% em relação a potência de saída, desta forma o freio dinamométrico atende aos requisitos solicitados.

**Tabela 23 – Correção do freio dinamométrico ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

<b>A</b>	Potência útil com carga zero (kW)	0,089
<b>B</b>	Potência útil a vazio (kW)	-0,00352
<b>CFD</b>	Correção do freio dinamométrico (N.m)	0,033

- **Processamento do rendimento**

Para determinar o rendimento do MIT é corrigida a resistência do estator para a temperatura de 25°C e assim são recalculadas todas as outras variáveis que dependem direta ou indiretamente da resistência como as perdas do estator, escorregamento, perdas do rotor e potência de saída. Seus valores são demonstrados conforme Tabela 24 para os pontos de 150 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 24 – Processamento do rendimento ABNT17094-3:2018 motor 1.**

Resistência do estator corrigida para 25 °C ( $\Omega$ )						5,1708
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Conjugado corrigido (N.m)	6,33	5,33	4,23	3,13	2,14	1,03
Perda estator corrigida (kW)	0,134	0,098	0,069	0,048	0,035	0,027
Escorregamento corrigido (pu)	0,062	0,050	0,038	0,027	0,018	0,010
Perda do rotor corrigida (kW)	0,075	0,051	0,031	0,016	0,007	0,002
Potência de saída corrigida (kW)	1,117	0,954	0,765	0,573	0,395	0,194
Perdas totais corrigidas (W)	274,266	208,323	153,073	112,647	88,351	72,675
Rendimento (%)	80,2	82,0	83,3	83,5	81,7	72,7
Fator de potência	0,88	0,86	0,81	0,72	0,59	0,37

## 6.1.2 Motor 2

O motor 2 está incluso no grupo de motores mais vendidos no Brasil no período de 1992 a 2012, se enquadrando na faixa de motores de 1,5 a 10 CV com cerca de 1.400.000 unidades comercializadas [69].

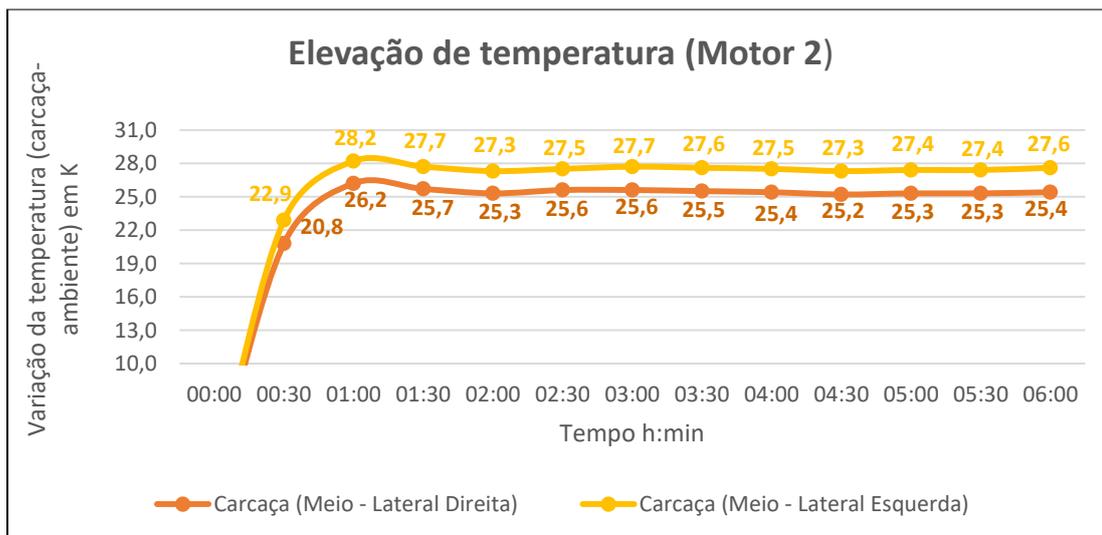
- **Elevação de temperatura**

Para este ensaio foram medidas as mesmas grandezas que o ensaio anterior. O motor recebeu uma sobrecarga de 20% durante o período de 35 minutos. Desta forma o mesmo entrou em estabilidade térmica duas horas depois do início do ensaio, as temperaturas da carcaça lateral direita e esquerda do motor apresentaram variações menores que 1K em relação a temperatura ambiente em um intervalo de 1 hora. Os dados coletados estão conforme Tabela 25.

**Tabela 25 – Dados do ensaio de elevação de temperatura ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

1- ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA													
Medição de Resistência	Antes do ensaio						Depois do ensaio						
	Resistência ( $\Omega$ )						Resistência ( $\Omega$ )						
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )						Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )						
							Tempo de leitura (s)						
Horário da medição	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00
Carcaça (Meio - Lateral Direita) (K)	0,0	20,8	26,2	25,7	25,3	25,6	25,6	25,5	25,4	25,2	25,3	25,3	25,4
Carcaça (Meio - Lateral Esquerda) (K)	-0,1	22,9	28,2	27,7	27,3	27,5	27,7	27,6	27,5	27,3	27,4	27,4	27,6
Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )	23,2	23,6	24,0	24,1	24,2	24,3	24,5	24,7	24,8	25,0	25,0	25,2	25,3
Torque (N.m)	0,12	7,87	6,23	6,22	6,32	6,30	6,36	6,08	6,39	5,95	6,41	5,96	5,97
Potência de entrada (W)	0,00	3.414	2.681	2.673	2.729	2.755	2.768	2.597	2.791	2.573	2.803	2.558	2.560
Corrente média (A)	0,00	10,35	8,34	8,31	8,47	8,55	8,57	8,12	8,63	8,06	8,67	8,01	8,01
Tensão média (V)	0,06	219,0	220,3	220,0	220,0	219,7	219,8	220,5	220,2	220,4	219,5	220,3	220,1
Velocidade (rpm)	0,1	3.404	3.448	3.448	3.444	3.443	3.445	3.450	3.444	3.455	3.440	3.453	3.454
Frequência (Hz)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

Na Figura 42 é ilustrada a curva de elevação de temperatura, no instante da estabilização a carcaça lateral direita e a carcaça lateral esquerda apresentaram a mesma variação de 0,9 K.



**Figura 42 – Curva de elevação de temperatura 17094-3:2018 motor 2.**

- **Ensaio em carga**

Para o ensaio em carga foi aplicado o mesmo procedimento do ensaio do motor 1 e medidas as mesmas grandezas. Os dados coletados estão conforme Tabela 26. Para este caso a relação do valor da resistência medida antes e após o ensaio é de 0,52%.

**Tabela 26 – Dados do ensaio em carga ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

2- ENSAIO EM CARGA							
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		1,3470	Resistência ( $\Omega$ )			1,3540
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,3	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )			25,3
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25	0
Conjugado (N.m)	9,17	7,67	6,05	4,61	3,13	1,51	0,60
Potência de entrada (W)	3.914,60	3.240,21	2.560,04	1.960,65	1.356,23	725,69	384,80
Corrente média (A)	11,69	9,86	8,01	6,50	5,10	3,89	3,36
Velocidade (rpm)	3.371,20	3.410,20	3.457,60	3.492,30	3.528,30	3.564,30	3.582,50
Tensão média (V)	220,19	219,68	220,49	220,37	219,77	219,94	220,63

- **Ensaio a vazio**

Neste ensaio foram coletadas as mesmas grandezas que no motor 1 para os pontos de 110 a 20% da tensão nominal, conforme Tabela 27. A relação da resistência para este caso é de 2,4%.

**Tabela 27 – Dados do ensaio a vazio ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

3- ENSAIO EM VAZIO						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		1,3040	Resistência ( $\Omega$ )		1,2730
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,2	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,1
Tensão nominal (%)	110	100	80	60	40	20
Tensão média (V)	242,11	220,45	176,37	132,41	88,01	44,33
Corrente média (A)	4,29	3,31	2,25	1,62	1,13	1,03
Potência de entrada (W)	170,50	133,82	100,47	80,91	68,22	52,75

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

As grandezas calculadas para este ensaio são as mesmas que o motor 1 para o processamento das perdas no ensaio a vazio. Para este caso é obtido um valor da perda de atrito e ventilação de -0,028 kW e perda no ferro de 0,140 kW. As outras grandezas estão expressas conforme Tabela 28 para os pontos de 110 a 20% da tensão nominal.

**Tabela 28 – Processamento das perdas no ensaio a vazio ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

Tensão nominal (%)	110	100	80	60	40	20
Perda Joule do estator (kW)	0,036	0,021	0,010	0,005	0,002	0,002
Somatório da perda de atrito e ventilação + ferro (kW)	0,135	0,113	0,091	0,076	0,066	0,051

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

As grandezas calculadas para o processamento das perdas no ensaio em carga são as mesmas que o motor 1. Os dados calculados no ensaio são expressos para os pontos de 150 a 25% da carga nominal do motor 2 conforme Tabela 29.

**Tabela 29 – Processamento das perdas no ensaio em carga ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Perda Joule do estator (kW)	0,277	0,197	0,130	0,086	0,053	0,031
Escorregamento (p.u)	0,0635	0,0527	0,0396	0,0299	0,0199	0,0099
Perda Joule do rotor (kW)	0,222	0,153	0,091	0,052	0,023	0,005
Potência de saída (kW)	3,249	2,750	2,202	1,697	1,168	0,575
Perda residual (kW)	0,054	0,027	0,025	0,013	-0,0004	0,002
Perda suplementar corrigida (kW)	0,053	0,037	0,023	0,014	0,006	0,001
Perdas totais aparente (W)	666,607	490,335	358,530	263,691	188,627	150,863
Fator de correlação	0,97	<b>Não foi desconsiderado nenhum ponto na regressão</b>				

- **Correção do freio dinamométrico**

Na Tabela 30 é apresentada a correção do freio dinamométrico, (*A*) é calculado no ensaio em carga para o ponto de 0% de carga e (*B*) no ensaio a vazio para o ponto de 100% da tensão nominal. A diferença entre *A* e *B* para o motor 2 é de 11,25% em relação a potência de saída.

**Tabela 30 – Correção do freio dinamométrico ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

<b>A</b>	Potência útil com carga zero (kW)	0,220
<b>B</b>	Potência útil a vazio (kW)	-0,028
<b>CFD</b>	Correção do freio dinamométrico (N.m)	0,031

- **Processamento do rendimento**

Seus valores são demonstrados conforme Tabela 31 para os pontos de 150 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 31 – Processamento do rendimento ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

Resistência do estator corrigida para 25 °C ( $\Omega$ )						1,3837
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Conjugado corrigido (N.m)	9,200	7,700	6,080	4,640	3,160	1,540
Perda estator corrigida (kW)	0,284	0,202	0,133	0,088	0,054	0,031
Escorregamento corrigido (pu)	0,065	0,054	0,041	0,031	0,020	0,010
Perda do rotor corrigida (kW)	0,227	0,157	0,093	0,053	0,024	0,006
Potência de saída corrigida (kW)	3,238	2,732	2,198	1,694	1,160	0,575
Perdas totais corrigidas (W)	671,754	504,770	359,577	265,729	196,092	151,050
Rendimento (%)	82,7	84,3	85,9	86,4	85,5	79,2
Fator de potência	0,88	0,86	0,84	0,79	0,70	0,49

### 6.1.3 Motor 3

O motor 3 está incluso no terceiro grupo de motores mais vendidos no Brasil no período de 1992 a 2012, se enquadrando na faixa de motores de 12,5 a 40 CV com cerca de 200.000 unidades comercializadas [69]. Estes motores são muito utilizados em setores comerciais e industriais, desta forma também se tornando de grande importância a sua avaliação.

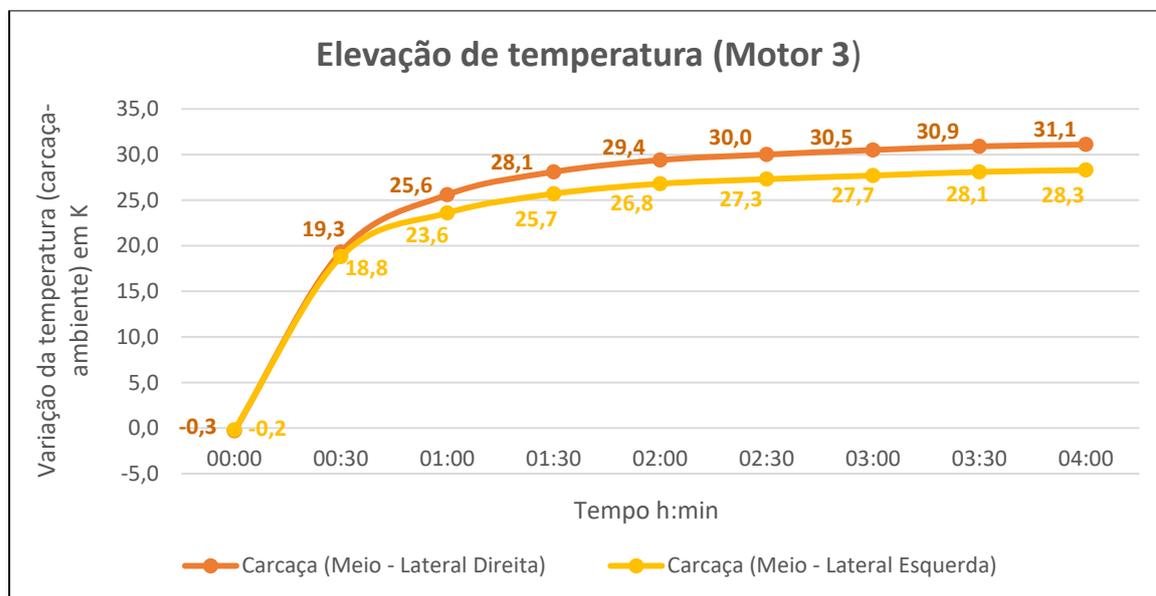
- **Elevação de temperatura**

No ensaio de elevação foram coletados dados de temperatura, conjugado, potência de entrada, corrente média, tensão média, velocidade e frequência do MIT durante intervalos seguidos de trinta minutos. O motor recebeu uma sobrecarga de 20% durante o período de 31 minutos a fim de reduzir o período para a estabilização térmica. Desta forma o mesmo entrou em estabilidade térmica quatro horas depois do início do ensaio. Os dados coletados estão conforme Tabela 32.

**Tabela 32 – Dados de elevação de temperatura ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

1- ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA									
Medição de Resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio				
	Resistência ( $\Omega$ )		0,6370		Resistência ( $\Omega$ )			0,7960	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		23,7		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )			27,8	
					Tempo de leitura (s)			20,0	
Horário da medição	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00
Carcaça (Meio - Lateral Direita) (K)	-0,3	19,3	25,6	28,1	29,4	30,0	30,5	30,9	31,1
Carcaça (Meio - Lateral Esquerda) (K)	-0,2	18,8	23,6	25,7	26,8	27,3	27,7	28,1	28,3
Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )	23,7	24,7	25,5	26,0	26,4	26,8	27,3	27,5	27,7
Torque (N.m)	1,22	60,35	50,13	50,24	50,24	50,17	50,11	50,15	50,11
Potência de entrada (W)	0,0	12.338,1	10.211,4	10.089,4	10.033,2	10.021,3	10.002,1	9.992,0	10.006,7
Corrente média (A)	0,0	21,45	18,16	17,99	18,00	17,98	17,94	17,92	17,92
Tensão média (V)	0,3	379,90	380,00	380,21	380,19	379,80	379,60	380,06	380,36
Velocidade (rpm)	0,1	1.750,8	1.758,0	1757,8	1.757,5	1.758,7	1.757,7	1.757,2	1.757,6
Frequência (Hz)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

Na Figura 43 é ilustrada a curva de elevação de temperatura para o motor 3. No instante da estabilização a carcaça lateral direita e a carcaça lateral esquerda apresentaram a mesma variação de 0,6 K.



**Figura 43 – Curva de elevação de temperatura ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

- **Ensaio em carga**

Para o ensaio em carga foi aplicado o mesmo procedimento do ensaio do motor 1 e 2, coletando as características da máquina de conjugado, potência de entrada, corrente média, velocidade e tensão média para os pontos de 150 a 0% do conjugado nominal. Os dados coletados estão conforme Tabela 33. Para este caso não houve variação no valor da resistência medida antes e após o ensaio.

**Tabela 33 – Dados do ensaio em carga ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

2- ENSAIO EM CARGA							
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		0,777	Resistência ( $\Omega$ )		0,777	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,8	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,8	
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25	0
Conjugado (N.m)	75,06	62,57	49,93	37,63	25,11	12,60	0,8
Potência de entrada (W)	15.395,63	12.565,15	10.130,56	7.550,33	5.114,70	2.636,51	414,50

Corrente média (A)	26,45	21,88	18,17	14,36	11,20	8,67	7,49
Velocidade (rpm)	1.731,9	1.745,1	1.758,1	1.769,1	1.780,2	1.789,8	1.799,9
Tensão média (V)	379,30	380,49	380,30	380,56	380,52	379,95	380,42

- **Ensaio a vazio**

Os dados de entrada medidos no ensaio a vazio estão conforme Tabela 34. E a relação da resistência medida antes e após o ensaio é de 0,27% estando dentro da tolerância permitida pela norma.

**Tabela 34 – Dados do ensaio a vazio ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

3- ENSAIO EM VAZIO						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		0,753	Resistência ( $\Omega$ )		0,751
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,7	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,7
Tensão nominal (%)	110	100	80	60	40	20
Tensão média (V)	418,34	379,50	303,45	227,48	151,51	75,35
Corrente média (A)	9,40	7,48	5,19	3,63	2,30	1,33
Potência de entrada (W)	372,68	271,82	185,91	136,69	105,90	80,26

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

A perda de atrito e ventilação para este caso é de – 0,042 kW e a perda no ferro de 0,251 kW. As outras grandezas calculadas estão expressas conforme Tabela 35 para os pontos de 110 a 20% da tensão nominal.

**Tabela 35 – Dados do processamento das perdas no ensaio a vazio ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

Tensão nominal (%)	110	100	80	60	40	20
Perda Joule do estator (kW)	0,100	0,063	0,030	0,015	0,006	0,002
Somatório da perda de atrito e ventilação + ferro (kW)	0,273	0,209	0,156	0,122	0,100	0,078

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

As perdas processadas através do ensaio em carga são determinadas para o ponto de 150 a 25% do conjugado nominal. Além das perdas o fator de correlação também é calculado, sendo necessário desconsiderar o ponto 2 da regressão linear no cálculo das perdas suplementares. Desta forma, o fator de correlação recalculado é de 0,96 descartando possíveis erros de medição. Os valores das perdas processadas no ensaio em carga estão conforme Tabela 36.

**Tabela 36 – Dados do processamento das perdas no ensaio em carga ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Perda Joule do estator (kW)	0,815	0,558	0,385	0,240	0,146	0,088
Escorregamento (p.u)	0,0378	0,0305	0,0233	0,0172	0,0110	0,0057
Perda Joule do rotor (kW)	0,542	0,359	0,221	0,121	0,052	0,013
Potência de saída (kW)	13,611	11,432	9,190	6,969	4,678	2,359
Perda residual (kW)	0,219	0,008	0,126	0,011	0,030	-0,032
Perda suplementar corrigida (kW)	0,250	0,174	0,111	0,063	0,028	0,007
Perdas totais aparente (W)	1.783,82	1.132,18	939,61	580,65	435,36	276,73
Fator de correlação	0,96	<b>Foi necessário desconsiderar o ponto 2 na regressão</b>				

- **Correção do freio dinamométrico**

Na Tabela 37 é apresentada a correção do freio dinamométrico, a diferença entre (A) e (B) para o motor 3 é de 1,52% em relação a potência de saída, desta forma o freio dinamométrico atende aos requisitos solicitados.

**Tabela 37 – Correção do freio dinamométrico ABNT motor 3.**

<b>A</b>	Potência útil com carga zero (kW)	0,098
<b>B</b>	Potência útil a vazio (kW)	-0,042
<b>CFD</b>	Correção do freio dinamométrico (N.m)	-0,015

- **Processamento do rendimento**

Um dos objetivos principais da dissertação é obter o rendimento do MIT, sendo necessário corrigir a resistência do estator para a temperatura de 25°C e todas as outras variáveis que dependem direta ou indiretamente da resistência. O fator de potência para o motor 3 também é obtido. As grandezas calculadas estão expressas conforme Tabela 38 para os pontos de 150 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 38 – Dados do processamento do rendimento ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

Resistência do estator corrigida para 25 °C ( $\Omega$ )						0,7891
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Conjugado corrigido (N.m)	75,04	62,55	49,91	37,61	25,09	12,58
Perda estator corrigida (kW)	0,828	0,567	0,391	0,244	0,148	0,089
Escorregamento corrigido (pu)	0,038	0,031	0,024	0,017	0,011	0,006
Perda do rotor corrigida (kW)	0,550	0,364	0,224	0,123	0,053	0,013
Potência de saída corrigida (kW)	13,559	11,252	9,196	6,912	4,677	2,319
Perdas totais corrigidas (W)	1.828,72	1.307,53	931,01	636,77	436,98	317,71
Rendimento (%)	88,1	89,6	90,8	91,5	91,4	87,9
Fator de potência	0,89	0,87	0,85	0,80	0,69	0,46

## 6.2 Resultado IEC 60034-2-1:2014

Para este tópico mais três ensaios foram realizados atendendo os requisitos exigidos conforme a IEC 60034-2-1:2014 [15]. Os dados colhidos e os resultados calculados estão expressos para os motores 1, 2 e 3 respectivamente.

### 6.2.1 Motor 1

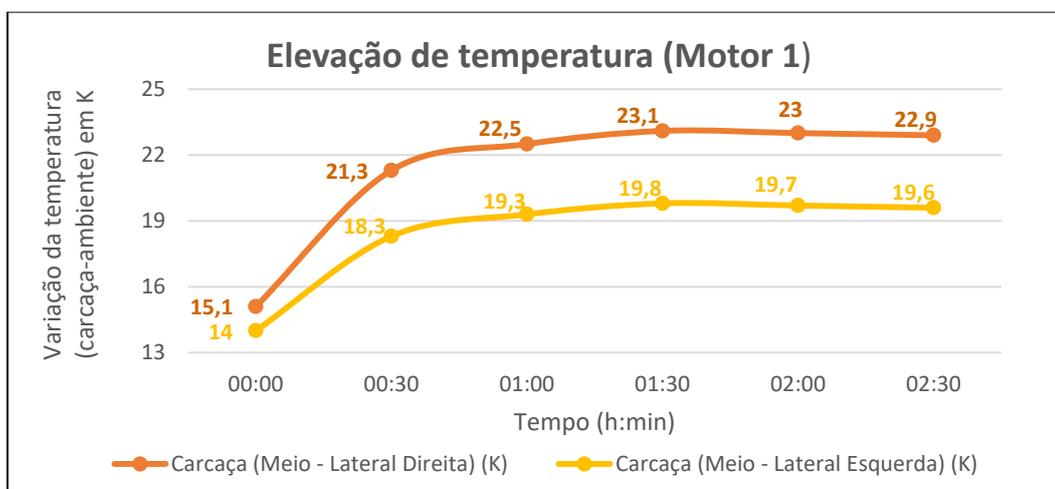
- **Elevação de temperatura**

Ao iniciar o ensaio de elevação foram coletadas as mesmas grandezas de entrada que a ABNT NBR 17094-3:2018 [9] durante intervalos seguidos de trinta minutos. O motor entrou em estabilidade térmica uma hora e meia depois do início do ensaio não aplicando nenhuma sobrecarga ao mesmo. Na Tabela 39 são apresentados todos os dados coletados no ensaio, sendo importante frisar que na IEC 60034-2-1:2014 [15] não foi encontrado nenhuma especificação que determine o tempo de leitura da resistência depois de finalizado o ensaio de elevação, diferentemente da ABNT NBR 17094-3:2018 [9]. O motor já havia sido acionado anteriormente, desta forma obteve-se valores altos para as temperaturas da carcaça lateral direita e esquerda para o primeiro ponto colhido no ensaio.

**Tabela 39 – Dados do ensaio de elevação de temperatura IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

1- ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA						
Medição de Resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )	5,043	Resistência ( $\Omega$ )	5,135		
	Temperatura ambiente (°C)	25,8	Temperatura ambiente (°C)	27,5		
			Tempo de leitura (s)	30		
Horário da medição	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30
Carcaça (Meio - Lateral Direita) (K)	15,1	21,30	22,50	23,10	23,00	22,90
Carcaça (Meio - Lateral Esquerda) (K)	14	18,30	19,30	19,80	19,70	19,60
Temperatura ambiente (°C)	25,80	25,90	26,00	26,30	26,90	27,50
Torque (N.m)	0,0	4,20	4,20	4,21	4,21	4,20
Potência de entrada (W)	0,0	912,89	913,86	915,79	915,31	918,01
Corrente média (A)	0,0	2,96	2,96	2,97	2,96	2,97
Tensão média (V)	0,3	219,82	219,73	219,92	220,05	220,43
Velocidade (rpm)	0,1	1731,30	1730,80	1731,30	1731,00	1730,20
Frequência (Hz)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

A Figura 44 ilustra a curva de elevação de temperatura do motor 1. No instante da estabilização a carcaça lateral direita apresentou uma variação de 0,6 K e a carcaça lateral esquerda de 0,5 K.



**Figura 44 – Curva de elevação de temperatura IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

- **Ensaio em carga**

No ensaio em carga além de medir as mesmas grandezas de entrada da ABNT também é medido a frequência para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. Diferente da ABNT que estipula limites máximos para a relação da resistência medida antes e após o ensaio. A IEC 60034-2-1:2014 [15] não relata nada a respeito, não limitando a relação da resistência, entretanto mesmo assim essa relação é calculada, apresentando um valor de 0,58%. Os dados do ensaio são apresentados conforme Tabela 40.

**Tabela 40 – Dados do ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		5,1640	Resistência ( $\Omega$ )		5,194
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,5	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,4
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Conjugado (N.m)	5,31	4,80	4,21	3,21	2,11	1,11
Potência de entrada (W)	1.167,46	1.055,85	924,21	711,27	485,33	287,98
Corrente média (A)	3,56	3,29	2,99	2,54	2,12	1,88
Velocidade (rpm)	1.710,50	1.720,70	1.732,20	1.748,00	1.766,60	1.781,70
Tensão média (V)	220,40	220,50	220,65	220,63	219,89	220,03
Frequência	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

- **Ensaio a vazio**

Neste ensaio foram coletadas grandezas de tensão, corrente e potência de entrada para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal, conforme Tabela 41. A relação da resistência para este ensaio também é medida, obtendo um valor de 0,77%.

**Tabela 41 – Dados do ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Medição de resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		5,0560		Resistência ( $\Omega$ )		5,0170	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,2		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,2	
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Tensão média (V)	242,42	220,18	209,56	197,93	132,22	110,18	87,93	66,75
Corrente média (A)	2,33	1,80	1,61	1,44	0,79	0,63	0,48	0,36
Potência de entrada (W)	95,10	68,59	59,84	52,42	25,52	19,79	15,14	11,86

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

Seus valores estão conforme Tabela 42 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. A equação (39) que determina as perdas constantes na IEC 60034-2-1:2014 [15] pode ser considerada a mesma que a equação (10) do somatório das perdas de atrito e ventilação mais perdas no ferro da ABNT 17094-3:2018 [9]. Além da perda joule do estator, perda constante e a perda no ferro a vazio é calculado a perda de atrito e ventilação zero. Seu valor é de 7,5 W e é considerada igual para todos os pontos do ensaio.

**Tabela 42 – Dados do processamento das perdas no ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda Joule do estator (W)	41,01	24,48	19,58	15,67	4,71	3,00	1,74	0,98
Perda constante (W)	54,09	44,11	40,26	36,75	20,81	16,79	13,40	10,88
Perda no ferro (vazio) (W)	46,59	36,61	32,75	29,25	13,30	9,29	5,89	3,38

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

Para o processamento das perdas no ensaio em carga são calculados o escorregamento, perda de atrito e ventilação, perda joule do estator e rotor, potência de saída, perda residual, perda suplementar, perda no ferro para o ensaio em carga e o fator de correlação. A principal diferença é que as perdas de atrito e ventilação na ABNT que são calculadas através da regressão linear no ensaio a vazio para os pontos de 60 a 20% da tensão nominal e a perda de atrito e ventilação da IEC depende do escorregamento e da perda de atrito e ventilação zero, desta forma apresentando variações em seus valores. Importante frisar que a IEC 60034-2-1:2014 [15] não utiliza a correção do freio dinamométrico para corrigir o conjugado. Desta forma, o fator de correlação pode apresentar variações significativas para a mesma máquina. Os dados processados estão conforme Tabela 43.

**Tabela 43 - Dados do processamento das perdas no ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Escorregamento (p.u)	0,050	0,044	0,038	0,029	0,019	0,010
Perda de atrito e ventilação (W)	6,60	6,70	6,82	6,97	7,16	7,31
Perda Joule do estator (W)	98,45	84,09	69,45	50,12	34,91	27,46
Perda Joule do rotor (W)	51,56	41,38	30,95	18,12	7,72	2,29
Potência de saída (W)	951,14	864,92	763,68	587,59	390,35	207,10
Perda residual (W)	27,6	26,2	20,2	14,5	10,6	8,3
Perda suplementar (W)	21,32	17,42	13,40	7,79	3,37	0,93
Perda no ferro (carga) (W)	32,07	32,54	33,09	33,94	34,62	35,54
Fator de correlação	0,99	<b>Não foi desconsiderado nenhum ponto na regressão</b>				

- **Processamento do rendimento**

Para o processamento do rendimento são calculadas as perdas corrigidas do estator e rotor, o escorregamento, potência de saída corrigida e as perdas totais. Determinando assim o próprio rendimento da máquina. A principal diferença para este caso é que a IEC corrige as perdas

utilizando um fator de correção da temperatura do enrolamento ( $K_{\theta}$ ) e a ABNT utiliza a correção da resistência do estator para a temperatura de 25°C, desta forma apresentando algumas diferenças em seus valores. O fator de potência é calculado utilizando os próprios dados de entrada do ensaio em carga. Os dados processados estão conforme Tabela 44.

**Tabela 44 – Dados do processamento do rendimento IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

Fator de correção da temperatura para enrolamentos de cobre ( $K_{\theta}$ )						0,9970
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perda estator corrigida (W)	98,16	83,83	69,24	49,97	34,81	27,37
Escorregamento corrigido (pu)	0,050	0,044	0,038	0,029	0,018	0,010
Perda do rotor corrigida (W)	51,42	41,26	30,86	18,07	7,69	2,28
Potência de saída corrigida (W)	957,89	874,09	770,80	594,53	397,69	214,55
Perdas totais (W)	209,57	181,76	153,42	116,74	87,65	73,44
Fator de potência	0,86	0,84	0,81	0,73	0,60	0,40
Rendimento (%)	82,0	82,8	83,4	83,6	81,9	74,5

## 6.2.2 Motor 2

- **Elevação de temperatura**

Este ensaio foi realizado junto com o ensaio da ABNT para o mesmo motor, aplicando os procedimentos de forma automatizada simultaneamente, conforme os procedimentos da ABNT 17094-3:2018 e IEC 60034-2-1:2014 [15], portanto os dados do ensaio de elevação de temperatura são os mesmo que o da ABNT mudando somente o período de estabilização conforme Tabela 25 e Figura 42. Para este caso o motor entrou em estabilidade térmica uma hora e trinta minutos depois do início do ensaio com uma variação da temperatura da carcaça lateral direita de 0,5 K e carcaça lateral esquerda de 0,5 K entre um período de trinta minutos.

- **Ensaio em carga**

As grandezas medidas no ensaio em carga estão conforme Tabela 45 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. A relação da resistência medida antes e após o ensaio para este caso é de 0,52%.

**Tabela 45 – Dados do ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		1,3470	Resistência ( $\Omega$ )		1,3540
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,3	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,3
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Conjugado (N.m)	7,67	7,08	6,05	4,61	3,13	1,51
Potência de entrada (W)	3.240,21	2.985,93	2.560,04	1.960,65	1.356,23	725,69
Corrente média (A)	9,86	9,17	8,01	6,50	5,10	3,89
Velocidade (rpm)	3.410,20	3.428,30	3.457,60	3.492,30	3.528,30	3.564,30
Tensão média (V)	219,68	220,00	220,49	220,37	219,77	219,94
Frequência	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

- **Ensaio a vazio**

As grandezas medidas no ensaio a vazio estão conforme Tabela 46 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. A relação da resistência medida antes e após o ensaio para este caso é de 2,5%.

**Tabela 46 –Dados do ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Medição de resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )			1,3040	Resistência ( $\Omega$ )			1,273
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )			25,2	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )			25,1
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Tensão média (V)	242,11	220,45	209,57	198,74	132,41	109,58	88,01	66,70
Corrente média (A)	4,29	3,31	2,98	2,69	1,62	1,34	1,13	1,00
Potência de entrada (W)	170,51	133,82	122,90	113,86	80,91	73,68	68,22	64,33

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

As grandezas calculadas para o processamento das perdas no ensaio a vazio estão conforme Tabela 47 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. A perda de atrito e ventilação zero também é calculada, possuindo um valor de 57,81 W.

**Tabela 47 – Processamento das perdas no ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda Joule do estator (W)	35,57	21,18	17,16	13,99	5,07	3,47	2,47	1,93
Perda constante (W)	134,93	112,64	105,73	99,87	75,84	70,21	65,75	62,40
Perda no ferro (vazio) (W)	77,12	54,83	47,92	42,06	18,03	12,40	7,94	4,59

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

As grandezas calculadas para o processamento das perdas no ensaio em carga estão conforme Tabela 48 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal.

**Tabela 48 – Processamento das perdas no ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Escorregamento (p.u)	0,0527	0,0477	0,0396	0,0299	0,0199	0,0099
Perda de atrito e ventilação (W)	50,49	51,16	52,26	53,58	54,98	56,39
Perda Joule do estator (W)	196,94	170,34	129,97	85,59	52,69	30,65
Perda Joule do rotor (W)	157,90	131,96	94,15	54,57	24,93	6,37
Potência de saída (W)	2.739,07	2.541,80	2.190,58	1.685,94	1.156,48	563,61
Perda residual (W)	47,55	41,79	43,16	30,03	15,44	15,55
Perda suplementar (W)	35,47	30,22	22,07	12,81	5,91	1,37
Perda no ferro (carga) (W)	48,25	48,88	49,92	50,94	51,71	53,12
Fator de correlação	0,95	<b>Não foi desconsiderado nenhum ponto na regressão</b>				

- **Processamento do rendimento**

As grandezas calculadas para o processamento do rendimento e o fator de potência estão conforme Tabela 49 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 49 – Processamento do rendimento IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

Fator de correção da temperatura para enrolamentos de cobre (K $\theta$ )						1,0062
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perda estator corrigida (W)	198,16	171,40	130,78	86,12	53,02	30,84
Escorregamento corrigido (pu)	0,0530	0,0480	0,0398	0,0301	0,0200	0,0100
Perda do rotor corrigida (W)	158,82	132,72	94,70	54,89	25,08	6,40
Potência de saída corrigida (W)	2.749,06	2.551,58	2.210,34	1.702,32	1.165,55	577,57
Perdas totais (W)	491,15	434,35	349,70	258,33	190,68	148,12
Fator de potência	0,86	0,85	0,84	0,79	0,70	0,49
Rendimento (%)	84,8	85,5	86,3	86,8	85,9	79,6

## 6.2.3 Motor 3

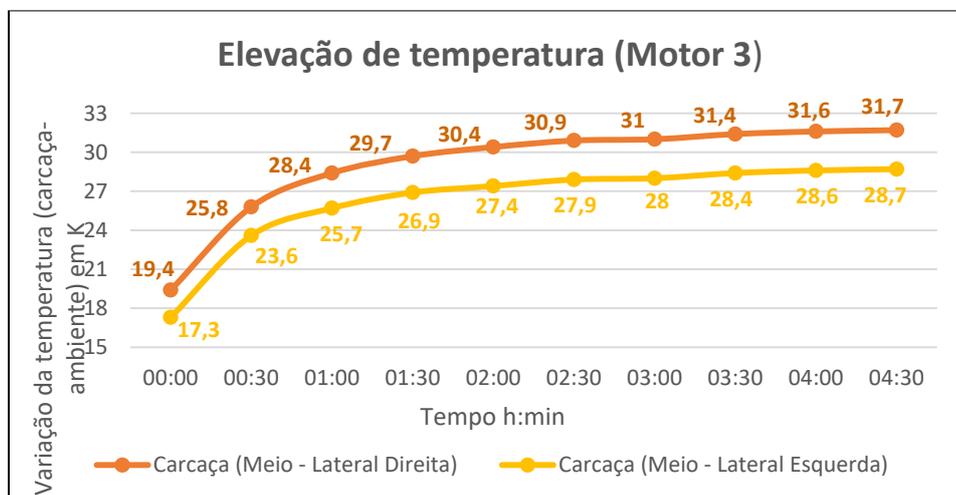
- **Elevação de temperatura**

Como de costume para o ensaio de elevação de temperatura coletou-se dados durante intervalos seguidos de trinta minutos até o momento em que o motor entrou em equilíbrio térmico. As configurações e procedimentos são os mesmos que os ensaios anteriores da IEC 60034-2-1:2014 [15]. O motor entrou em estabilidade térmica duas horas depois do início do ensaio não aplicado nenhuma sobrecarga, as temperaturas da carcaça da lateral direita e esquerda apresentaram variações menores que 1K em um intervalo de 30 minutos. Importante destacar que o motor já havia sido acionado anteriormente, desta forma o mesmo obteve elevados valores da temperatura da carcaça lateral direita e esquerda para o primeiro ponto. Na Tabela 50 estão expressos os dados do ensaio.

**Tabela 50 – Dados do ensaio de elevação de temperatura IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

1- ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA										
Medição de Resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio					
	Resistência ( $\Omega$ )		0,741		Resistência ( $\Omega$ )		0,794			
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,2		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		27,2			
					Tempo de leitura (s)			20,3		
Horário da medição	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30
Carcaça (Meio - Lateral Direita) (K)	19,40	25,80	28,40	29,70	30,40	30,90	31,00	31,40	31,60	31,70
Carcaça (Meio - Lateral Esquerda) (K)	17,30	23,60	25,70	26,90	27,40	27,90	28,00	28,40	28,60	28,70
Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )	27,20	27,50	27,70	27,80	28,00	28,10	28,30	28,30	28,50	28,60
Torque (N.m)	0,4	50,20	50,11	50,18	50,23	50,09	50,23	50,22	50,16	50,09
Potência de entrada (W)	0,0	10.134,07	9.937,93	9.982,27	10.068,86	9.934,54	10.032,17	10.062,93	9.804,47	9.865,56
Corrente média (A)	0,0	18,13	17,91	18,00	17,96	17,91	17,91	17,99	17,73	17,76
Tensão média (V)	0,2	380,08	380,02	379,69	380,07	379,81	380,02	379,94	380,03	379,98
Velocidade (rpm)	0,1	1.758,40	1.757,40	1.757,30	1.756,80	1.757,10	1.757,30	1.757,00	1.756,90	1.756,10
Frequência (Hz)	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

A Figura 45 ilustra a curva de elevação de temperatura do motor 3. No instante da estabilização a carcaça lateral direita apresentou uma variação de 0,7 K e a carcaça lateral esquerda de 0,5 K.



**Figura 45 – Elevação de temperatura IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

- **Ensaio em carga**

Na Tabela 51 estão todos os dados coletados no ensaio em carga para o motor 3 conforme a norma IEC 60034-2-1:2014 [15] para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. A relação da resistência também é calculada para este ensaio, obtendo um valor de 0,77%.

**Tabela 51 – Dados do ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		0,7780	Resistência ( $\Omega$ )		0,772
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		28,7	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		28,7
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Conjugado (N.m)	62,4	57,6	50,2	37,6	25,0	12,5
Potência de entrada (W)	12.623,07	11.633,58	10.149,65	7.483,85	5.075,37	2.647,81
Corrente média (A)	22,00	20,46	18,13	14,32	11,16	8,65
Velocidade (rpm)	1.745,10	1.750,00	1.757,10	1.768,20	1.779,60	1.789,70
Tensão média (V)	380,27	380,41	380,57	380,57	380,46	379,96
Frequência	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

- **Ensaio a vazio**

Todos os dados coletados estão conforme Tabela 52. A relação da resistência para este ensaio é de 0,27%.

**Tabela 52 – Dados do ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Medição de resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		0,7380		Resistência ( $\Omega$ )		0,7360	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		28,8		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		28,9	
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Tensão média (V)	418,32	379,39	360,78	341,72	227,53	189,57	151,56	113,47
Corrente média (A)	9,41	7,49	6,81	6,22	3,62	2,92	2,31	1,75
Potência de entrada (W)	367,46	272,90	238,09	216,94	132,34	116,86	102,09	86,43

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

Seus valores estão conforme Tabela 53 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. O valor da perda de atrito e ventilação zero para este caso é de 73,98 W e pode ser considerado igual para todos os pontos do ensaio a vazio.

**Tabela 53 – Processamento das perdas no ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda Joule do estator (W)	97,89	62,02	51,27	42,77	14,49	9,43	5,90	3,39
Perda constante (W)	269,57	210,88	186,83	174,17	117,86	107,44	96,20	83,04
Perda no ferro (vazio) (W)	195,59	136,90	112,85	100,19	43,88	33,46	22,22	9,06

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

Seus valores estão conforme Tabela 54 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. O fator de correlação calculado neste ensaio apresentou-se menor que 0,95 quando calculado utilizando todos os pontos das perdas suplementares. Tornando necessário desconsiderar o pior ponto calculado na regressão linear das perdas suplementares, que neste caso é o ponto de 75% do conjugado nominal, obtendo um novo fator de correlação de valor igual a 0,95.

**Tabela 54 – Processamento das perdas no ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Escorregamento (p.u)	0,031	0,028	0,024	0,018	0,011	0,006
Perda de atrito e ventilação (W)	68,47	68,95	69,65	70,76	71,90	72,93
Perda Joule do estator (W)	562,65	486,64	382,11	238,39	144,78	86,98
Perda Joule do rotor (W)	364,16	306,25	229,83	125,74	54,39	13,89
Potência de saída (W)	11.403,38	10.557,58	9.236,95	6.964,07	4.658,98	2.346,46
Perda residual (W)	103,76	92,11	106,85	-43,08	14,00	-6,61
Perda suplementar (W)	136,95	116,73	88,63	49,75	21,98	5,51
Perda no ferro (carga) (W)	120,65	122,06	124,26	127,98	131,31	134,16
Fator de correlação	0,95	<b>Foi desconsiderado o ponto 4 na regressão</b>				

- **Processamento do rendimento**

Seus valores estão conforme Tabela 55 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 55 - Processamento do rendimento IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

Fator de correção da temperatura para enrolamentos de cobre (K $\theta$ )						0,9919
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perda estator corrigida (W)	558,09	482,69	379,01	236,45	143,61	86,28
Escorregamento corrigido (pu)	0,0303	0,0276	0,0236	0,0175	0,0112	0,0057
Perda do rotor corrigida (W)	361,35	303,87	228,04	124,76	53,96	13,78
Potência de saída corrigida (W)	11.377,51	10.539,23	9.260,01	6.874,13	4.652,58	2.335,14
Perdas totais (W)	1.245,56	1.094,35	889,64	609,72	422,78	312,66
Fator de potência	0,87	0,86	0,85	0,79	0,69	0,47
Rendimento (%)	90,1	90,6	91,2	91,9	91,7	88,2

### 6.3 Resultados da IEC/TS 60034-2-3:2013

Dando início aos resultados da IEC/TS 60034-2-3:2013[20], foi desenvolvido uma plataforma de cálculos que aplica uma interface entre os dados de entrada medidos com os resultados calculados. Desta forma, os ensaios foram realizados e seus dados de entrada coletados a fim de obter uma síntese de resultados de forma automática. Os dados de entrada do ensaio em carga e a vazio são coletados conforme Tabela 56 e Tabela 57 respectivamente.

**Tabela 56 – Dados de entrada do ensaio em carga.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Resistência antes do ensaio em carga	Resistência ( $\Omega$ )		Após o ensaio		Resistência ( $\Omega$ )	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )				Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	Horário da medição				Horário da medição	
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Horário da medição						
Conjugado (N.m)						
Velocidade (rpm)						
Potência de entrada (W)						
Tensão média (V)						
Corrente média (A)						
Frequência (Hz)						

**Tabela 57 – Dados de entrada do ensaio a vazio.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Resistência antes do ensaio em vazio	Resistência ( $\Omega$ )			Após o ensaio		Resistência ( $\Omega$ )		
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )					Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	Horário da medição					Horário da medição		
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Horário da medição								
Potência (W)								
Tensão linha média (V)								
Corrente linha média (A)								

Os ensaios da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20] tiveram início logo após o término do ensaio da norma IEC 60034-2-1:2014 [15]. Segundo a IEC/TS 60034-2-3:2013[20] não é necessário realizar um novo ensaio de elevação de temperatura. Desta forma, os dados dos mesmos foram reaproveitados da IEC 60034-2-1:2014 [15] conforme Tabela 39 e Figura 44 para o motor 1, Tabela 25 e Figura 42 para o motor 2 e Tabela 50 e Figura 45 para o motor 3.

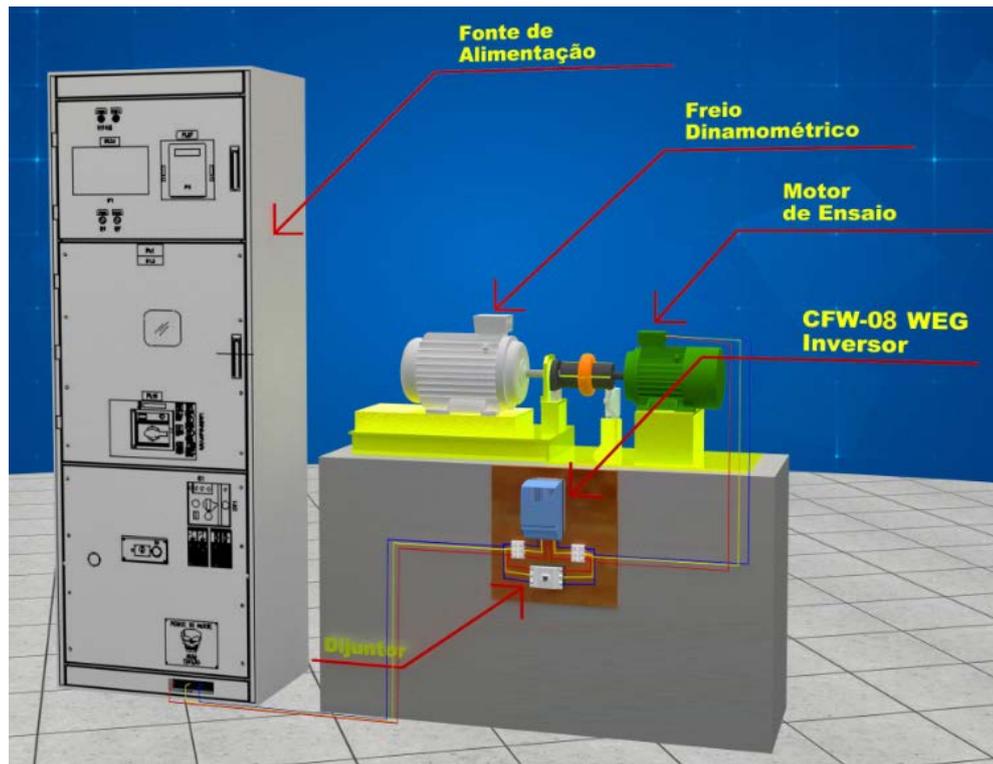
Os motores foram rapidamente acoplados e o disjuntor do arranjo desligado, conforme já ilustrado na Figura 26. Para acionar novamente os motores as configurações dos ensaios foram ajustadas para operação manual de forma que o motor a ser ensaiado passe a ser acionado pelo inversor de frequência. Foi instalado ao circuito um wattímetro que se torna responsável em efetuar a leitura dos dados de entrada do motor. Ele possui um filtro passa baixa com frequência de corte de 500 Hz atendendo as especificações da norma. Para este arranjo o analisador de energia

utilizado nos ensaios da IEC 60034-2-1:2014 [15] passa a ler somente os dados de entrada do inversor. Antes de iniciar os testes os inversores utilizados já se encontram parametrizados e prontos para atender o motor de ensaio. Foi aplicando o controle escalar, sem nenhum tipo de realimentação para ambos os casos. O inversor de frequência utilizado para o motor 1 foi o CFW-08 *vector inverter plus*, para o motor 2 o Micromaster 440 e para o motor 3 é o CFW-09 *vector inverter*. Os dados de placa dos inversores estão conforme Tabela 58 e as parametrizações realizadas podem ser consultadas em seus respectivos manuais [89] [90] [91].

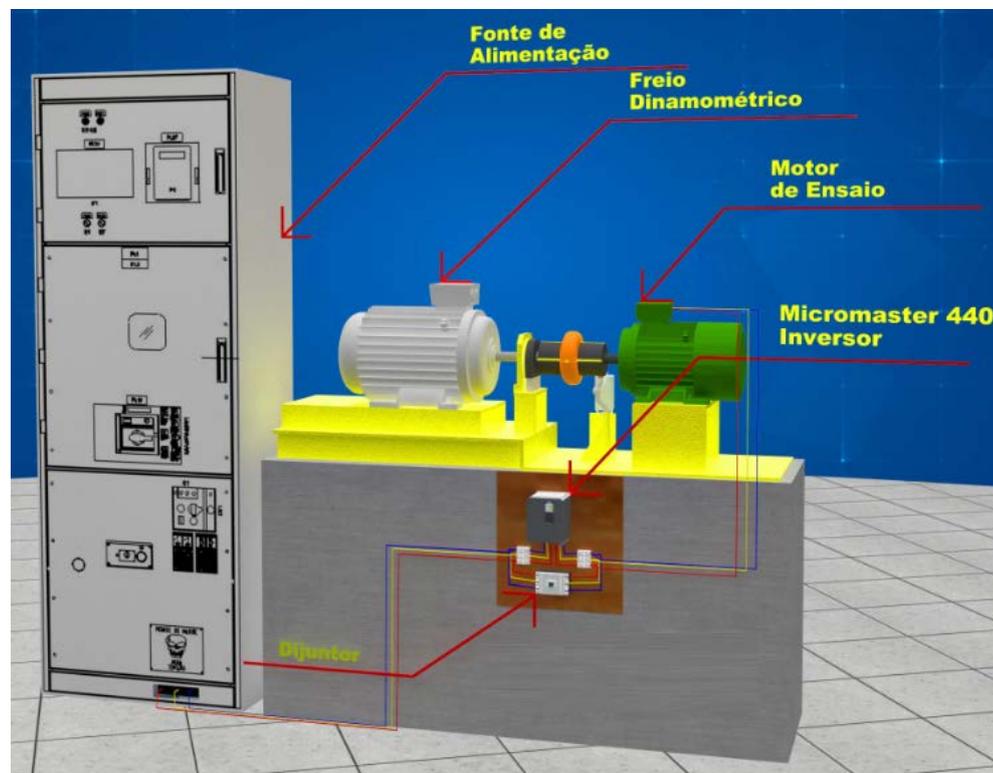
**Tabela 58 – Dados de placa dos inversores de frequência.**

<b>Dados de Placa</b>			
Características	Inversor CFW-08	Inversor micromaster 440	Inversor CFW-09
Potência (kVA)	1,5	4,6	18,3
Corrente nominal de saída (A)	4,0	10,4	24
Corrente de saída máxima (A)	6,0	15,6	36
Corrente nominal de entrada	4,8	11,3	28,8
Tensão de alimentação (V)	200 -240	200-240	380-480
Frequência de chaveamento (kHz)	5	5	5
Motor máximo (CV)	1	3	15
Potência dissipada nominal (W)	50	-	403

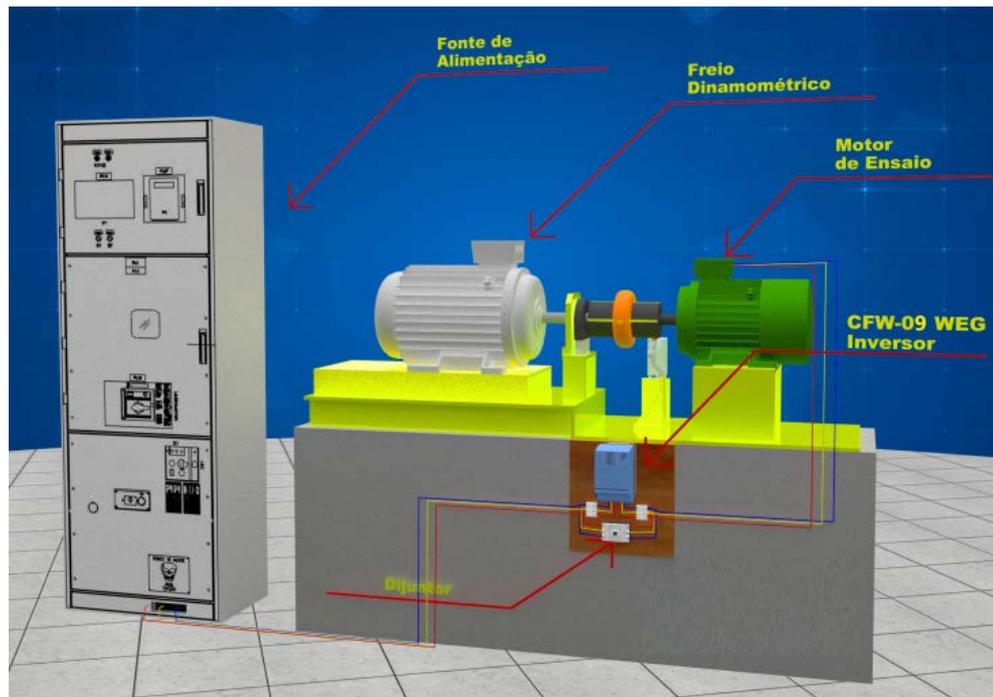
A IEC/TS 60034-2-3:2013[20] determina que seja aplicado uma frequência de chaveamento para os inversores de frequência de 4 kHz utilizando motores com potência nominal de até 125 CV, porém dois dos inversores utilizados não possuem o ajuste específico para este parâmetro, desta forma foi utilizada a frequência de chaveamento mais próxima, que é a de 5 kHz para todos os ensaios da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20]. Os dados dos ensaios da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20] serão apresentados para os ensaios em carga e a vazio, os três arranjos práticos podem ser observados conforme Figura 46, Figura 47 e Figura 48 para os motores 1, 2 e 3, respectivamente.



**Figura 46 – Arranjo prático IEC/TS 60034-2-3:2013 motor 1.**



**Figura 47 – Arranjo prático IEC/TS 60034-2-3:2013 motor 2.**



**Figura 48 – Arranjo prático IEC/TS 60034-2-3:2013 motor 3.**

### 6.3.1 Motor 1

- **Ensaio em carga**

No ensaio em carga é utilizado um inversor de frequência, gerando um sinal PWM nos terminais do MIT. Para este ensaio foram coletadas as grandezas de conjugado, potência de entrada medida na alimentação do inversor, corrente média e tensão média medida na saída do inversor, velocidade e frequência da máquina, para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. O valor da resistência antes e após o ensaio também é medida. Todas as grandezas estão conforme Tabela 59. A relação da resistência para este ensaio é calculada, obtendo um valor de 0,88%.

**Tabela 59 – Dados do ensaio em carga IEC 60034-2-3:2013 motor 1.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		5,0730	Resistência ( $\Omega$ )		5,1180
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,96	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,96
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Conjugado (N.m)	5,20	4,80	4,20	3,09	2,10	1,10
Potência de entrada inversor (W)	1.174,00	1.082,00	948,05	709,68	501,64	299,98
Corrente média (A)	3,48	3,27	2,97	2,47	2,12	1,88
Velocidade (rpm)	1.714,82	1.721,26	1.731,95	1.751,30	1.767,37	1.782,50
Tensão média (V)	220,51	220,37	219,73	219,87	219,95	220,47
Frequência	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

- **Ensaio a vazio**

No ensaio a vazio, para atender os requisitos da norma é necessário que a tensão de alimentação do MIT seja variada de 110 a 30% da tensão nominal mantendo a frequência fundamental da máquina de 60 Hz. Entretanto o inversor de frequência possui um range de tensão de mais ou menos 10% da tensão de entrada, desta forma não é possível variar a tensão de saída abaixo do ponto de 90% da tensão nominal sem desarmar o inversor por sub tensão. Fica entendido que a especificação técnica determina excitar o link CC do inversor de frequência para uma possível variação na tensão de saída do MIT [26] [27]. Entretanto foi constatado no decorrer desta dissertação que nem todos os inversores de frequência possuem acesso aos terminais do link CC. O inversor CFW-08 é um deles, por não possuir acesso aos terminais do link CC. Houve a necessidade de aplicar uma metodologia diferente no ensaio a vazio da IEC/TS 60034-2-3:2013[20]. O procedimento é realizado de tal forma que a tensão de entrada do inversor é ajustada para que a tensão de saída atenda os pontos de 110 a 90% da tensão nominal de forma continua. Após isto, a tensão de saída do inversor é ajustada através dos parâmetros do inversor, obtendo interrupções rápidas no funcionamento do MIT para cada ajuste de tensão entre os pontos de 60 e 30% da tensão nominal. Este procedimento foi replicado para os motores 2 e 3. Os dados do ensaio a vazio do motor 1 estão expressos conforme Tabela 60. A relação da resistência para este caso é de 4,3%.

**Tabela 60 – Dados do ensaio a vazio IEC 60034-2-3:2013 motor 1.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Medição de resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		5,1100		Resistência ( $\Omega$ )		4,9000	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		26,0		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		26,1	
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Tensão (V)	242,05	219,92	208,73	198,20	132,09	110,18	88,04	66,13
Corrente (A)	2,32	1,79	1,60	1,44	0,79	0,62	0,48	0,35
Potência de entrada inversor (W)	120,18	86,89	75,35	66,21	36,62	31,75	26,43	21,51

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

Para o processamento das perdas através do ensaio a vazio, além de obter a perda joule do estator, perda constante, perda de atrito e ventilação zero com o valor de 17,46 W e as perdas no ferro a vazio, também são calculadas as perdas harmônicas para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. Seus valores são expressos conforme Tabela 61.

**Tabela 61 – Dados do processamento das perdas no ensaio a vazio IEC 60034-2-3:2013 motor 1.**

Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda Joule do estator (W)	40,55	24,00	19,12	15,63	4,64	2,93	1,76	0,95
Perda constante (W)	79,63	62,88	56,23	50,58	31,98	28,82	24,67	20,56
Perda no ferro (vazio) (W)	62,17	45,42	38,76	33,12	14,52	11,36	7,21	3,10
Perda harmônica a vazio (W)	25,54	18,77	15,97	13,83	11,17	12,03	11,28	9,68

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

Para o processamento das perdas no ensaio em carga, além de obter o escorregamento, perda de atrito e ventilação, potência de saída, perda residual, perda suplementar e o fator de correlação, também são calculadas as perdas harmônicas no ensaio em carga para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. Seus valores são expressos conforme Tabela 62.

**Tabela 62 – Dados do processamento das perdas no ensaio em carga IEC 60034-2-3:2013 motor 1.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Escorregamento (p.u)	0,0473	0,0438	0,0378	0,0275	0,0180	0,0101
Perda de atrito e ventilação (W)	15,47	15,62	15,86	16,29	16,69	17,03
Potência de saída (W)	934,22	864,73	761,75	567,44	389,22	205,42
Perda residual (W)	51,08	52,57	45,99	33,08	28,02	21,96
Perda suplementar (W)	32,82	27,91	21,39	11,61	5,36	1,47
Perda harmônica em carga (W)	11,50	10,49	7,99	3,82	2,00	0,54
Fator de correlação	0,98	<b>Não foi desconsiderado nenhum ponto na regressão</b>				

- **Processamento do rendimento**

Para o processamento do rendimento são calculadas as perdas totais harmônicas e as perdas totais com o uso do inversor. O fator de potência também é calculado. Todas as grandezas estão expressas conforme Tabela 63.

**Tabela 63 – Dados do processamento do rendimento IEC 60034-2-3:2013 motor 1.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perdas totais harmônicas (W)	37,04	29,26	23,96	17,65	13,17	12,57
Perdas totais (W)	246,61	211,01	177,38	134,39	100,82	86,01
Fator de potência	0,88	0,87	0,84	0,75	0,62	0,42
Rendimento (%)	79,5	80,6	81,3	81,6	79,8	71,4

### 6.3.2 Motor 2

Para o motor 2 foram realizados os mesmos procedimentos do motor 1, a fim atender as exigências da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20].

- **Ensaio em carga**

As grandezas medidas no ensaio em carga estão expressas conforme Tabela 64 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. A relação da resistência para este caso é de 2,2%.

**Tabela 64 – Dados do ensaio em carga IEC 60034-2-3:2013 motor 2.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		1,2411	Resistência ( $\Omega$ )		1,2690
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,1	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,3
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Conjugado (N.m)	7,80	7,10	6,20	4,70	3,20	1,60
Potência de entrada inversor (W)	3.425,30	2.961,60	2.678,50	2.069,90	1.401,50	755,75
Corrente média (A)	9,92	9,07	7,97	6,49	4,97	3,86
Velocidade (rpm)	3.430,50	3.434,30	3.466,00	3.505,50	3.534,60	3.562,70
Tensão média (V)	220,18	220,11	220,30	220,20	220,11	220,14
Frequência	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

- **Ensaio a vazio**

As grandezas medidas no ensaio a vazio estão expressas conforme Tabela 65 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. A relação da resistência medida antes e após o ensaio a vazio foi de 4,72%.

**Tabela 65 – Dados do ensaio a vazio IEC 60034-2-3:2013 motor 2.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Medição de resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		1,2472		Resistência ( $\Omega$ )		1,1910	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,2		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		25,2	
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Tensão média (V)	241,86	219,90	208,82	198,01	131,96	110,05	88,06	66,11
Corrente média (A)	4,35	3,26	2,95	2,65	1,62	1,36	1,12	0,96
Potência de entrada inversor (W)	245,49	178,99	150,66	138,41	125,35	110,62	100,98	92,40

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

As grandezas calculadas para o processamento das perdas através do ensaio a vazio estão expressas conforme Tabela 66 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. A perda de atrito e ventilação zero calculada foi de 80,76 W.

**Tabela 66 – Processamento das perdas no ensaio a vazio IEC 60034-2-3:2013 motor 2.**

Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda Joule do estator (W)	34,60	19,40	15,88	12,84	4,78	3,37	2,29	1,68
Perda constante (W)	210,89	159,59	134,78	125,57	120,57	107,25	98,69	90,72
Perda no ferro (vazio) (W)	130,13	78,83	54,02	44,81	39,81	26,48	17,92	9,96
Perda harmônica a vazio (W)	75,96	46,95	29,05	25,70	44,73	37,04	32,94	28,32

- Processamento das perdas no ensaio em carga

As grandezas calculadas para o processamento das perdas no ensaio em carga estão expressas conforme Tabela 67 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 67 – Processamento das perdas no ensaio em carga IEC 60034-2-3:2013 motor 2.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Escorregamento (p.u)	0,0471	0,0460	0,0372	0,0263	0,0182	0,0104
Perda de atrito e ventilação (W)	71,59	71,79	73,46	75,57	77,15	78,69
Potência de saída (W)	2.802,08	2.553,44	2.250,34	1.725,35	1.184,46	596,94
Perda residual (W)	169,64	5,82	101,85	99,87	32,73	12,29
Perda suplementar (W)	94,75	78,51	59,87	34,40	15,95	3,99
Perda harmônica em carga (W)	59,28	48,28	37,80	21,59	10,04	2,61
Fator de correlação	0,97	<b>Foi necessário desconsiderar o ponto 2 na regressão</b>				

- Processamento do rendimento

As grandezas calculadas para o processamento do rendimento para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal estão expressas conforme Tabela 68.

**Tabela 68 – Processamento do rendimento IEC 60034-2-3:2013 motor 2.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perdas totais harmônicas (W)	135,24	95,24	66,84	47,28	54,77	39,65
Perdas totais (W)	626,38	529,59	416,54	305,61	245,45	187,77
Fator de potência	0,91	0,86	0,88	0,84	0,74	0,51
Rendimento (%)	81,4	82,8	84,1	84,8	82,6	75,5

### 6.3.3 Motor 3

Para o motor 3 foram realizados os mesmos procedimentos dos motores 1 e 2, a fim atender as exigências da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20].

- **Ensaio em carga**

As grandezas medidas no ensaio em carga estão expressas conforme Tabela 69 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. A relação da resistência para este caso é de 2,55%.

**Tabela 69 – Dados do ensaio em carga IEC 60034-2-3:2013 motor 3.**

2- ENSAIO EM CARGA						
Medição de resistência	Antes do ensaio			Depois do ensaio		
	Resistência ( $\Omega$ )		0,7216	Resistência ( $\Omega$ )		0,7400
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		29,6	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		29,6
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Conjugado (N.m)	62,80	57,80	50,40	37,90	24,90	12,50
Potência de entrada inversor (W)	12.997,00	11.867,00	10.338,00	7.898,90	5.173,70	2.766,40
Corrente média (A)	21,86	20,39	18,04	14,39	11,13	8,67
Velocidade (rpm)	1.747,80	1.752,20	1.758,70	1.769,80	1.779,70	1.789,80
Tensão média (V)	380,17	379,89	380,17	380,24	380,05	380,20
Frequência	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

- **Ensaio a vazio**

As grandezas medidas no ensaio a vazio estão expressas conforme Tabela 70 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal. A relação da resistência para este caso é de 1,86%.

**Tabela 70 – Dados do ensaio a vazio IEC 60034-2-3:2013 motor 3.**

3- ENSAIO EM VAZIO								
Medição de resistência	Antes do ensaio				Depois do ensaio			
	Resistência ( $\Omega$ )		0,7324		Resistência ( $\Omega$ )		0,7190	
	Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		29,5		Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )		29,5	
Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Tensão média (V)	418,46	379,89	360,68	342,10	228,08	190,09	152,00	114,02
Corrente média (A)	9,42	7,52	6,81	6,27	3,67	2,93	2,31	1,73
Potência de entrada inversor (W)	499,99	375,25	319,49	311,59	228,38	200,02	172,14	152,26

- **Processamento das perdas no ensaio a vazio**

A perda de atrito e ventilação zero calculada para este motor possui um valor de 127,96 W. As outras grandezas obtidas para o processamento das perdas no ensaio a vazio estão expressas conforme Tabela 71 para os pontos de 110 a 30% da tensão nominal.

**Tabela 71 – Dados do processamento das perdas no ensaio a vazio IEC 60034-2-3:2013 motor 3.**

Tensão nominal (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda Joule do estator (W)	96,56	61,54	50,47	42,78	14,66	9,34	5,81	3,26
Perda constante (W)	403,43	313,71	269,02	268,81	213,72	190,68	166,33	149,00
Perda no ferro (vazio) (W)	275,47	185,75	141,06	140,85	85,76	62,72	38,37	21,04
Perda harmônica a vazio (W)	133,86	102,84	82,20	94,64	95,87	83,24	70,14	65,96

- **Processamento das perdas no ensaio em carga**

As grandezas calculadas para o processamento das perdas no ensaio em carga estão expressas conforme Tabela 72 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 72 – Dados do processamento das perdas no ensaio em carga IEC 60034-2-3:2013 motor 3.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Escorregamento (p.u)	0,0290	0,0266	0,0229	0,0168	0,0113	0,0057
Perda de atrito e ventilação (W)	118,89	119,64	120,75	122,66	124,38	126,16
Potência de saída (W)	11.494,23	10.605,72	9.282,20	7.024,12	4.640,61	2.342,84
Perda residual (W)	386,84	277,39	249,95	311,92	130,71	115,60
Perda suplementar (W)	233,65	197,92	150,49	85,099	37,03	9,29
Perda harmônica em carga (W)	96,70	81,19	61,85	35,35	15,04	3,77
Fator de correlação	0,96	<b>Foi necessário desconsiderar o ponto 4 na regressão</b>				

- **Processamento do rendimento**

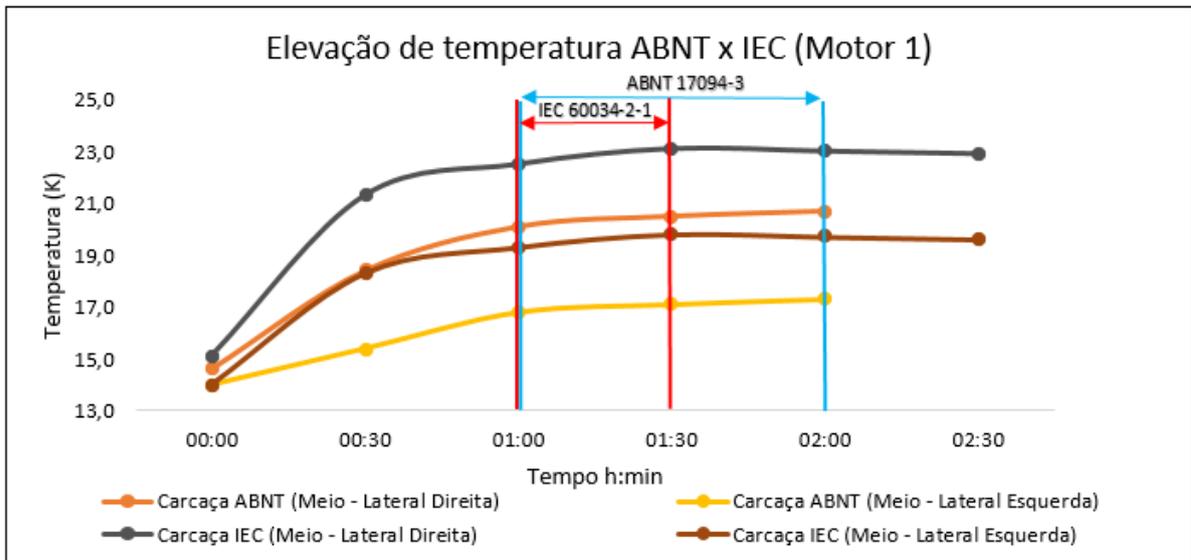
As grandezas calculadas para o processamento do rendimento para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal estão expressas conforme Tabela 73.

**Tabela 73 – Dados do processamento do rendimento IEC 60034-2-3:2013 motor 3.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perdas totais harmônicas (W)	230,56	184,03	144,05	129,99	110,91	87,01
Perdas totais (W)	1.476,11	1.278,37	1.033,69	739,72	533,69	399,68
Fator de potência	0,90	0,88	0,87	0,83	0,71	0,48
Rendimento (%)	88,5	89,2	90,0	90,3	89,7	85,4

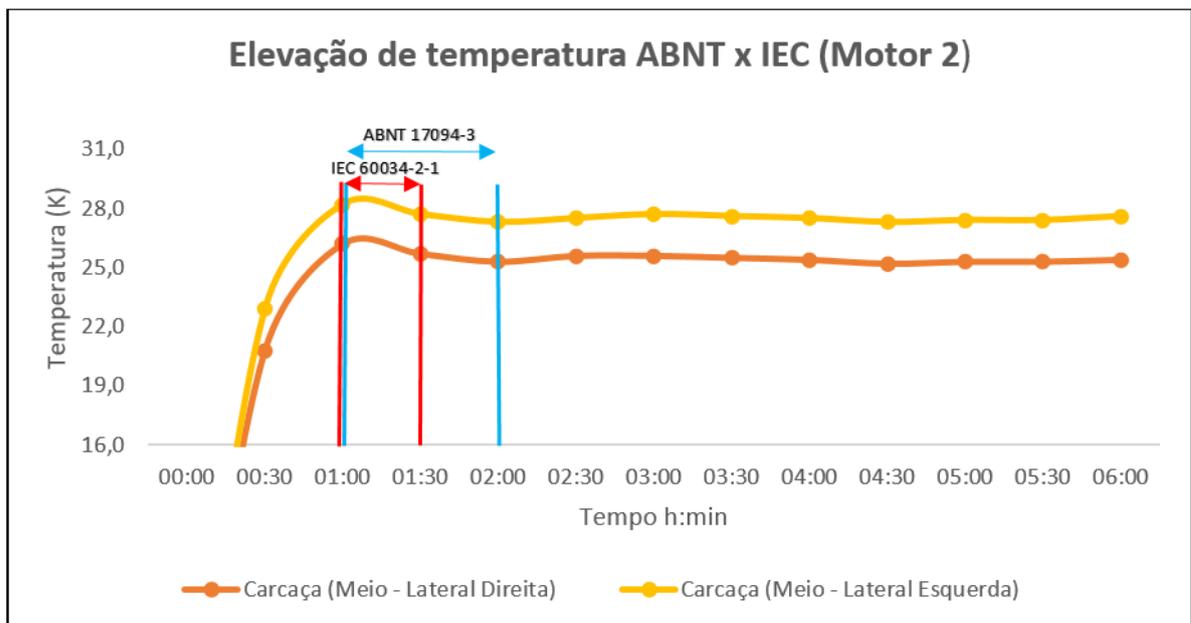
## 6.4 Comparação das principais diferenças nos procedimentos da ABNT 17094-3:2018 e IEC 60034-2-1:2014

Para o ensaio de elevação de temperatura, a ABNT 17094-3:2018 [9] determina que para o MIT entrar em equilíbrio térmico é necessário que a temperatura das laterais da carcaça do motor tenha uma diferença menor ou igual a 1K no período de 1 hora em relação a temperatura ambiente. A IEC 60034-2-1:2014 [15] é menos conservadora, considerando a estabilização térmica do MIT quando em um período de 30 minutos a temperatura da carcaça lateral direita e esquerda tenha variação menor ou igual a 1K em relação a temperatura ambiente. A comparação da curva de elevação de temperatura é ilustrada conforme Figura 49 e Figura 51 para os motores 1 e 3. Para o motor 2 a curva de elevação de temperatura é a mesma para as duas normas, mudando apenas o período de estabilização, conforme ilustrado na Figura 50. Pode ser observado que para os ensaios de elevação de temperatura da IEC o motor 1 entrou em estabilidade térmica com uma hora e trinta minutos de ensaio sem aplicar sobrecarga, enquanto na ABNT o motor 1 entrou em estabilidade térmica duas horas após o seu acionamento aplicando uma sobrecarga de 20% durante um período de 29 minutos.



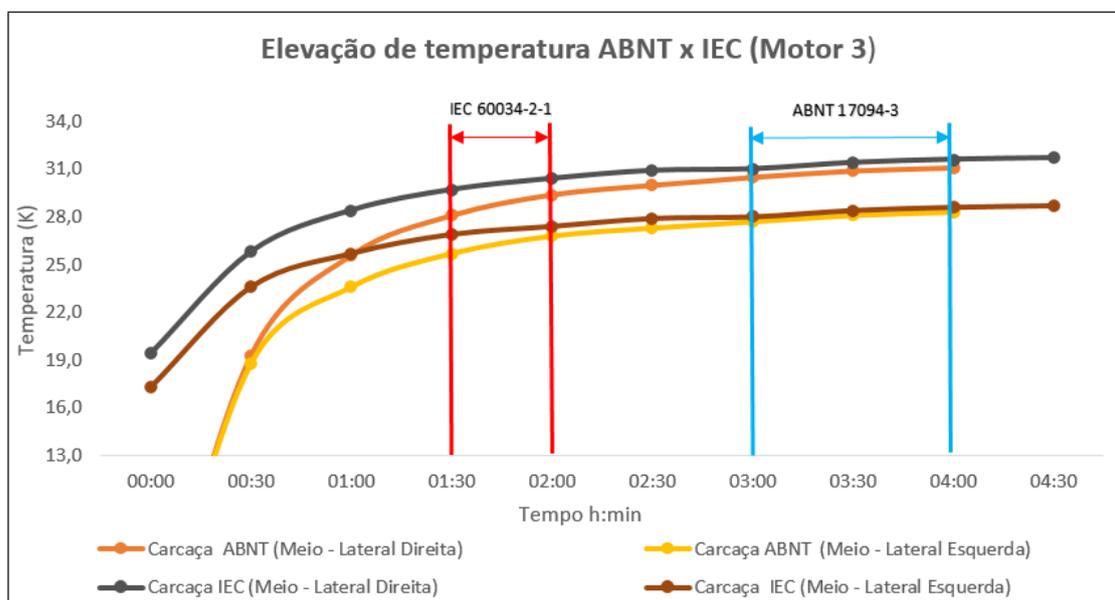
**Figura 49 – Comparação da estabilidade térmica ABNT 17094-3:2018 x IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

O motor 2 foi acionado de forma que curva de elevação de temperatura atendesse aos procedimentos das duas normas. A estabilidade térmica do MIT conforme a IEC 60034-2-1:2014 [15] é obtida após uma hora e trinta minutos de ensaio, e para a ABNT 17094-3:2018 [9] após duas horas de ensaio, conforme ilustrado na Figura 50. Estes resultados são obtidos para um único ensaio aplicando uma sobrecarga ao MIT de 20% acima do conjugado nominal durante os primeiros trinta e cinco minutos.



**Figura 50 – Comparação da estabilidade térmica ABNT 17094-3:2018 x IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

O motor 3 entrou em estabilidade térmica duas horas depois do início do ensaio da IEC sem aplicar nenhuma sobrecarga e quatro horas após o início do ensaio da ABNT aplicando uma sobrecarga de 20% durante um período de 31 minutos, conforme ilustrado na Figura 51.



**Figura 51 - Comparação da estabilidade térmica ABNT 17094-3:2018 x IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

No ensaio em carga alguns pontos adquiridos em porcentagem do conjugado nominal possuem diferenças entre as normas. A ABNT NBR 17094-3:2018 [9] usa os pontos de carga de 150, 125, 100, 75, 50, 25 e 0% do conjugado nominal, a IEC 60034-2-1:2014 [15] é mais conservadora para este caso forçando um pouco menos o motor, aplicando os pontos de 125, 115, 100, 75, 50 e 25% do conjugado nominal.

Para o ensaio a vazio a ABNT usa apenas 6 pontos em porcentagem da tensão nominal sendo eles: 110, 100, 80, 60, 40 e 20% e a IEC utiliza 8 pontos sendo eles: 110, 100, 95, 90, 60, 50, 40 e 30. Para os ensaios em carga e a vazio essas variações nos pontos do ensaio não são relevantes quando o objetivo é avaliar a eficiência da máquina para o ponto de 100%, conforme um dos objetivos desta dissertação. Porém descarta-se a possibilidade de comparar todos os pontos das duas normas.

As perdas de atrito e ventilação quando utilizando os procedimentos da ABNT são determinadas através de uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. O valor encontrado pode ser considerado o mesmo para todos os pontos de carga. Seus valores são expressos conforme Tabela 74, Tabela 75 e Tabela 76 para os motores 1, 2 e 3 respectivamente.

**Tabela 74- Processamento das perdas de atrito e ventilação ABNT 17094-3:2018 motor 1.**

Tensão (%)	Tensão (V)	X (Tensão <sup>2</sup> )	Y=Somatório das perdas de atrito e ventilação + ferro (kW)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	A	B= Pav (kW)
60	132,59	17.580,11	0,020	3,09E+08	0,0004	348,46	1,49E-06	-0,00352
40	88,19	7.777,48	0,013	6,05E+07	0,0002	97,33		
20	44,21	1.954,52	0,008	3,82E+06	0,0001	15,06		
	Somatório	27.312,11	0,040	3,73E+08	0,0006	460,85		

**Tabela 75 – Processamento das perdas de atrito e ventilação ABNT 17094-3:2018 motor 2.**

Tensão (%)	Tensão (V)	X (Tensão <sup>2</sup> )	Y=Somatório das perdas de atrito e ventilação + ferro (kW)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	A	B= Pav (kW)
60	132,41	17532,41	0,076	3,07E+08	0,0058	1329,65	7,26E-06	-0,028
40	88,01	7745,76	0,066	6,00E+07	0,0043	509,28		
20	44,33	1965,15	0,051	3,86E+06	0,0026	99,62		
	Somatório	27243,32	0,192	3,71E+08	0,0126	1938,56		

**Tabela 76 – Processamento das perdas de atrito e ventilação ABNT 17094-3:2018 motor 3.**

Tensão (%)	Tensão (V)	X (Tensão <sup>2</sup> )	Y=Somatório das perdas de atrito e ventilação + ferro (kW)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	A	B= Pav (kW)
60	227,48	51.747,15	0,122	2,68E+09	0,0148	6.304,17	3,84E-06	-0,042
40	151,51	22.955,28	0,100	5,27E+08	0,0100	2.293,92		
20	75,35	5.677,62	0,078	3,22E+07	0,0061	444,33		
	Somatório	80.380,05	0,300	3,24E+09	0,0310	9.042,42		

Já para a IEC as perdas de atrito e ventilação são calculadas para todos os pontos de carga utilizando das perdas de atrito e ventilação zero e do escorregamento. Seus valores estão expressos conforme Tabela 77 para os motores 1, 2 e 3.

**Tabela 77 - Processamento da perda de atrito e ventilação IEC 60034-2-1:2014 motor 1, 2 e 3.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perda de atrito e ventilação motor 1 (W)	6,60	6,70	6,82	6,97	7,16	7,31
Perda de atrito e ventilação motor 2 (W)	50,49	51,16	52,26	53,58	54,98	56,39
Perda de atrito e ventilação motor 3 (W)	68,47	68,95	69,65	70,76	71,90	72,93

A perda do ferro na ABNT é calculada utilizando do somatório da perda de atrito e ventilação mais perda no ferro para o ponto de 100% no ensaio a vazio e a própria perda de atrito e

ventilação. A perda no ferro é considerada a mesma para todos os pontos de carga. Para o motor 1 o valor calculado é de 0,047 kW, para o motor 2 de 0,140 kW e para o motor 3 de 0,251 kW.

Na IEC a perda no ferro é calculada para todos os pontos no ensaio a vazio utilizando da perda constante e da perda de atrito e ventilação zero. Seus valores estão expressos na Tabela 78 para o motor 1, 2 e 3. A perda no ferro em carga também é obtida para todos os pontos do ensaio utilizando de uma interpolação. Os resultados obtidos estão expressos conforme Tabela 79, Tabela 80 e Tabela 81 para os motores 1, 2 e 3 respectivamente.

**Tabela 78 – Perda no ferro ensaio a vazio IEC 60034-2-1:2014 motor 1, 2 e 3.**

Tensão (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
Perda no ferro motor 1 (W)	46,59	36,61	32,75	29,25	13,30	9,29	5,89	3,38
Perda no ferro motor 2 (W)	77,12	54,83	47,92	42,06	18,03	12,40	7,94	4,59
Perda no ferro motor 3 (W).	195,59	136,9	112,85	100,19	43,88	33,46	22,22	9,06

**Tabela 79 – Perda no ferro ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 1.**

Conjugado (%)	Tensão a vazio (%)	$U_i$ (vazio) (V)	$P_{ferro}$ (vazio) (W)	$U_i$ (carga) (V)	$P_{ferro}$ (carga) Interpolada método spline
125	110	241,64	46,59	206,84	32,07
115	100	219,53	36,61	208,29	32,54
100	95	208,96	32,75	209,98	33,09
75	90	197,36	29,25	212,45	33,94
50				214,33	34,62
25				216,79	35,54

**Tabela 80 – Perda no ferro ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 2.**

Conjugado (%)	Tensão a vazio (%)	$U_i$ (vazio) (V)	$P_{ferro}$ (vazio) (W)	$U_i$ (carga) (V)	$P_{ferro}$ (carga) Interpolada método spline
125	110	241,70	77,12	209,80	48,25
115	100	220,09	54,83	210,93	48,88
100	95	209,22	47,92	212,73	49,92
75	90	198,39	42,06	214,43	50,94
50				215,66	51,71
25				217,75	53,12

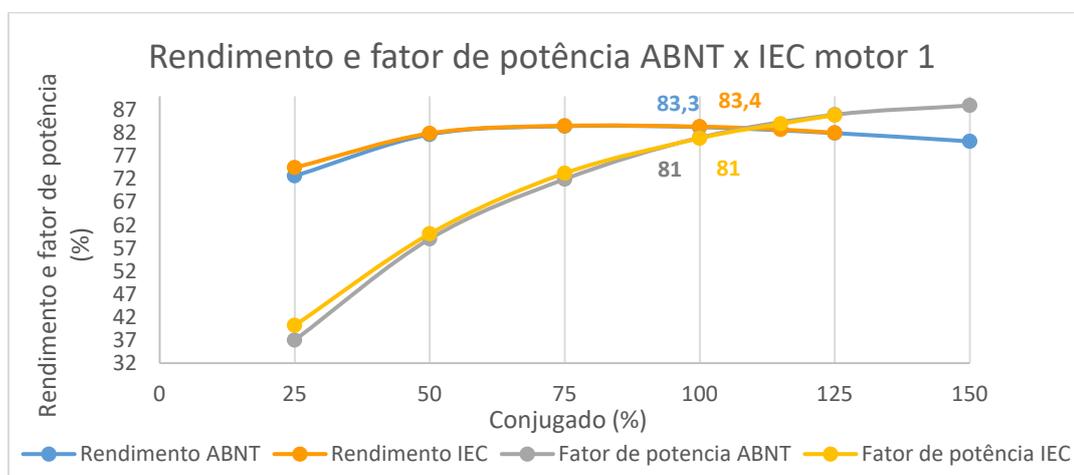
**Tabela 81 - Perda no ferro ensaio em carga IEC 60034-2-1:2014 motor 3.**

Conjugado (%)	Tensão a vazio (%)	$U_i$ (vazio) (V)	$P_{ferro}$ (vazio) (W)	$U_i$ (carga) (V)	$P_{ferro}$ (carga) Interpolada método spline
125	110	418,04	195,59	367,48	120,65
115	100	379,15	136,90	368,58	122,06
100	95	360,56	112,85	370,25	124,26
75	90	341,51	100,19	372,97	127,98
50				375,31	131,31
25				377,28	134,16

Diferente da ABNT a IEC não aplica a correção do freio dinamométrico. Desta forma, o conjugado medido não é corrigido para determinar as perdas suplementares do MIT, podendo acarretar em diferenças significativas nos resultados do fator de correlação.

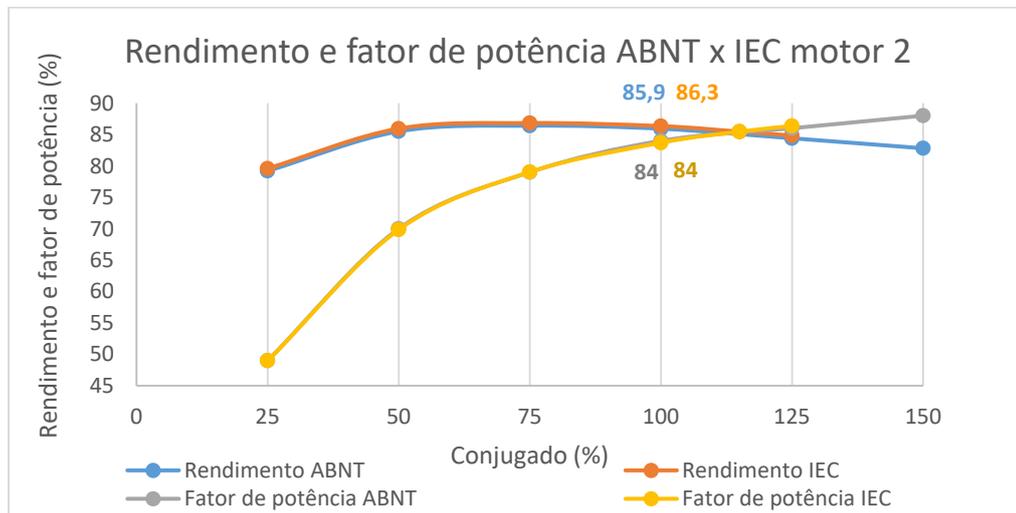
A última observação e não menos importante é no processamento do rendimento do motor. Para a ABNT as perdas são corrigidas utilizando diretamente da correção de  $R_2$  para uma temperatura de 25°C. Já a IEC utiliza um fator de correção da temperatura do enrolamento  $K_\theta$  para corrigir todas as perdas no processamento do rendimento.

Essas diferenças resultam em variações na eficiência do MIT entre as duas normas. Para os motores ensaiados nesta dissertação o método da IEC 60034-2-1:2014 [15] obteve valores de rendimentos maiores do que a ABNT 17094-3:2018 [9] para os 3 motores. A eficiência calculada para o motor 1 no ponto de 100% do conjugado nominal utilizando o método da IEC 60034-2-1:2014 [15] é de 83,4% com um fator de potência de 81%. E a eficiência calculada pelos métodos da ABNT 17094-3:2018 [9] é de 83,3% com um fator de potência de 81%. A Figura 52 ilustra a curva do rendimento e fator de potência para o motor 1.



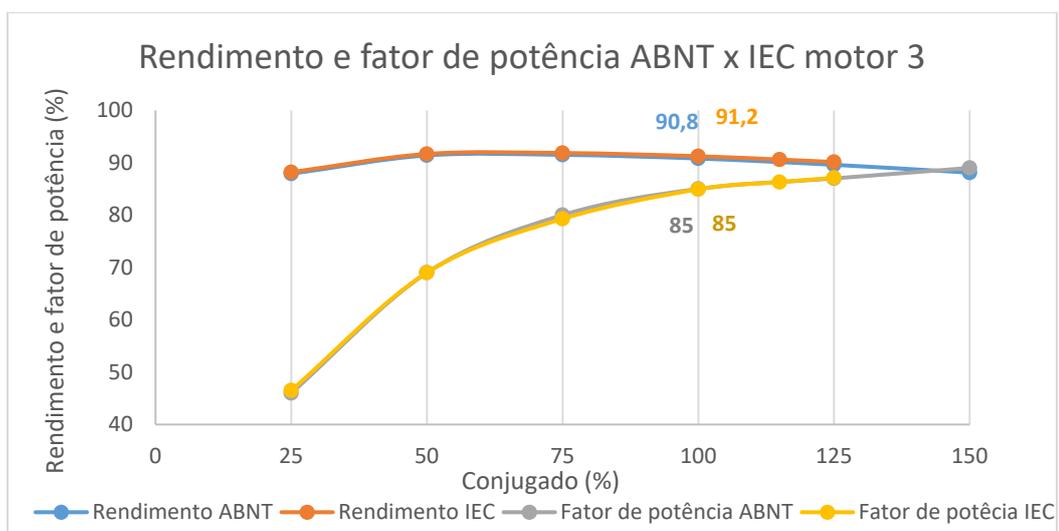
**Figura 52 – Curva de rendimento e fator de potência motor 1.**

A eficiência calculada para o motor 2 utilizando o método da IEC 60034-2-1:2014 [15] é de 86,3% com um fator de potência de 84% e para a ABNT 17094-3:2018 [9] a eficiência calculada é de 85,9% também com um fator de potência de 84%. A Figura 53 ilustra a curva do rendimento e fator de potência para o motor 2.



**Figura 53 – Curva de rendimento e fator de potência motor 2.**

Para o motor 3 a eficiência calculada utilizando os procedimentos da IEC 60034-2-1:2014 [15] é de 91,2% com um fator de potência de 85% e a eficiência obtida utilizando dos procedimentos da ABNT 17094-3:2018 [9] é de 90,8% também com um fator de potência de 85%. A Figura 54 ilustra a curva do rendimento e fator de potência para o motor 3.



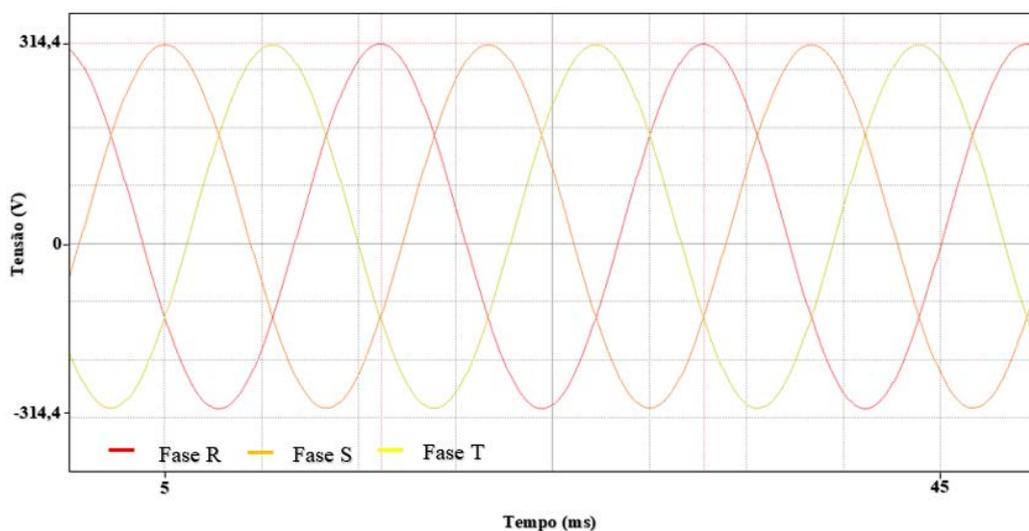
**Figura 54 – Curva de rendimento e fator de potência motor 3.**

## 6.5 Avaliação dos resultados da IEC 60034-2-1:2014 e IEC/TS 60034-2-3:2013

Para realizar os ensaios da norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20] implementou-se uma plataforma de cálculos que realiza uma interface dos dados de entrada com os resultados obtidos, a fim de obter-se uma síntese das grandezas calculadas de forma automática. Os ensaios foram efetuados e seus dados de entrada coletados para os ensaios de elevação de temperatura, ensaio em carga e ensaio a vazio. O método aplicado para as duas normas é semelhante. A principal diferença é a inserção do inversor de frequência para a norma IEC/TS 60034-2-3:2013[20] acarretando variações nos resultados.

### 6.5.1 Motor 1

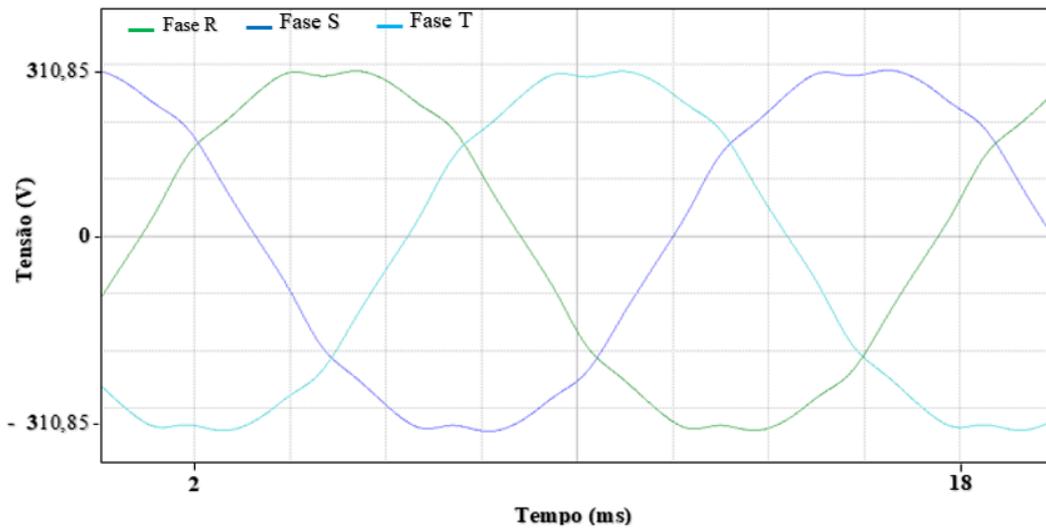
Para um sinal senoidal a forma de onda da tensão de saída no motor 1 é adquirida para o ponto de 100% do conjugado nominal quando aplicado o ensaio da norma IEC 60034-2-1:2014 [15], obtendo um valor de pico a pico de 314,4 V para um ciclo, com uma base de tempo de 5 milissegundos por divisão, conforme Figura 55.



**Figura 55 – Forma de onda de tensão senoidal aplicada ao motor 1.**

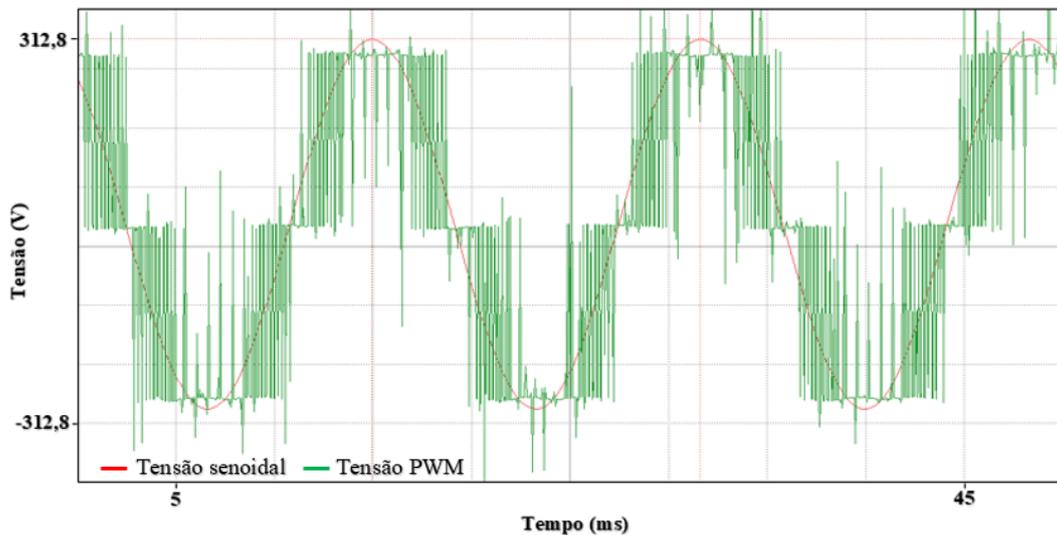
Para um sinal chaveado através dos IGBTs do inversor de frequência a forma de onda da tensão de saída também é obtida, utilizando de um analisador de potência LMG671 cedido pelo fabricante ZES ZIMMER, configurado para medir com o auxílio de um filtro passa baixa de segunda ordem, com uma frequência de corte de 500 Hz, atendendo aos critérios da norma IEC/TS

60034-2-3:2013[20]. A forma de onda da tensão de saída para o motor 1 está ilustrada conforme Figura 56.



**Figura 56 – Forma de onda da tensão de saída do inversor filtrada.**

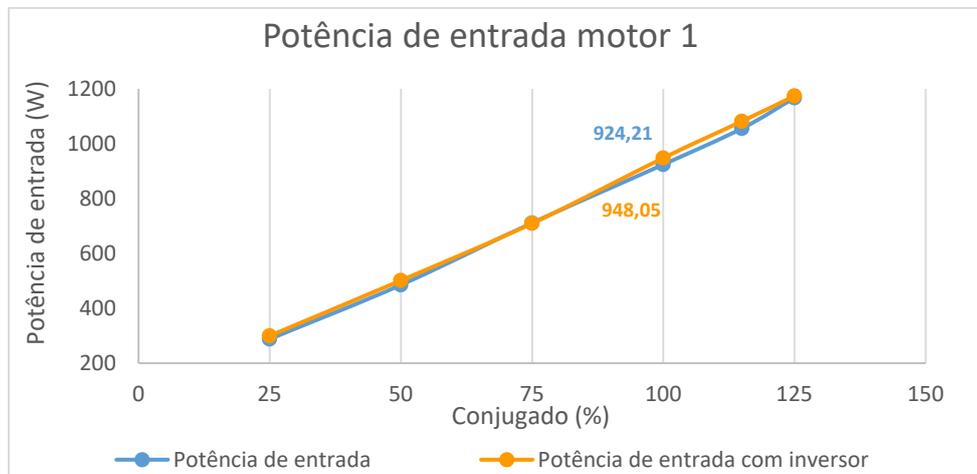
A forma de onda PWM da tensão de saída de uma fase do motor também é obtida. A mesma pode ser comparada com a forma de onda senoidal da tensão de saída para a mesma fase, conforme Figura 57.



**Figura 57 - Representação genérica da tensão de saída PWM do inversor motor 1.**

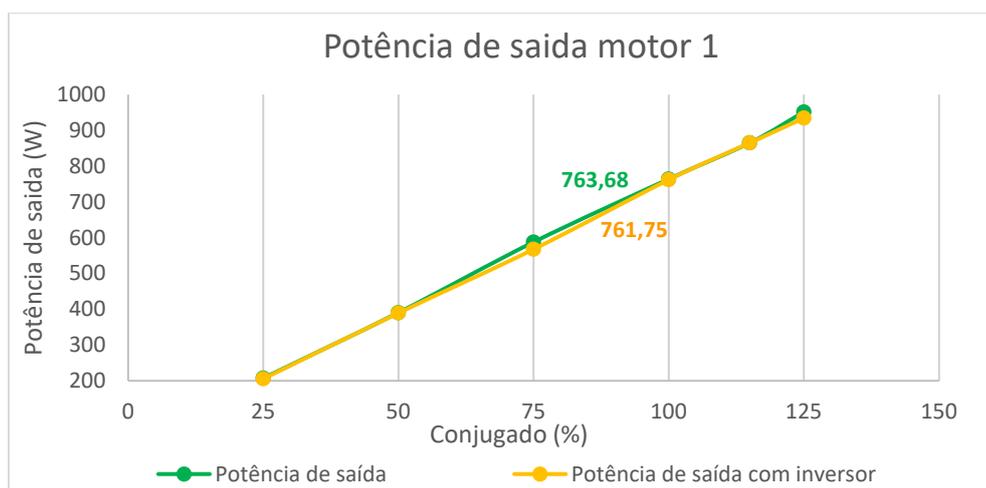
A potência de entrada do motor 1 é medida para uma fonte senoidal e uma fonte PWM no ensaio em carga para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal, conforme Figura 58. A potência de entrada com alimentação PWM é medida na alimentação do inversor conforme especifica a IEC/TS 60034-2-3:2013[20] e a potência de entrada com alimentação senoidal

conforme IEC 60034-2-1:2014 [15] é medida diretamente nos terminais do motor. A variação da potência de entrada para o conjugado nominal é calculada, obtendo um valor de 23,84 W.



**Figura 58 – Comparação da potência de entrada motor 1.**

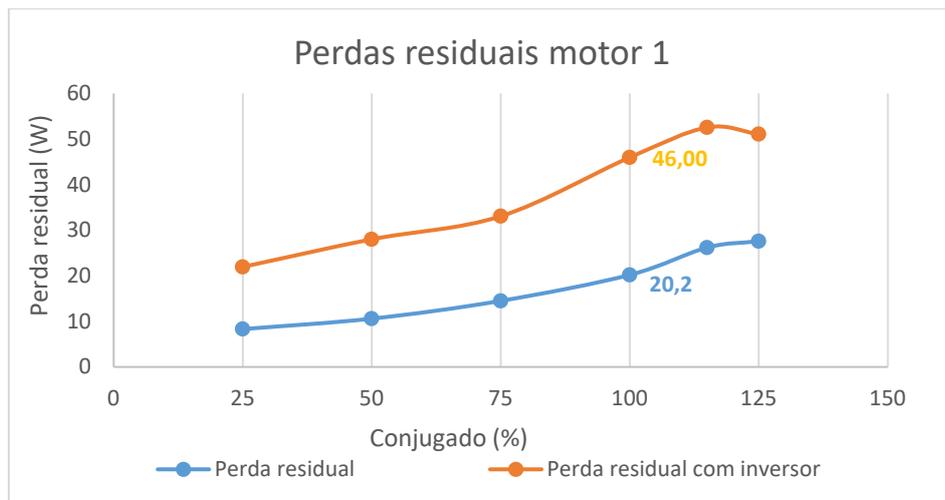
A potência de entrada e a potência de saída são usadas diretamente nos cálculos da IEC/TS 60034-2-3:2013 [20] para determinar as perdas residuais do MIT. Na Figura 59 é possível observar pequenas variações na potência de saída calculada sem o inversor e com o inversor para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal. No ponto de 100%, a potência de saída calculada quando o MIT é acionado por uma fonte senoidal e por uma fonte PWM obteve uma variação de 1,93 W.



**Figura 59 – Comparação da potência de saída motor 1.**

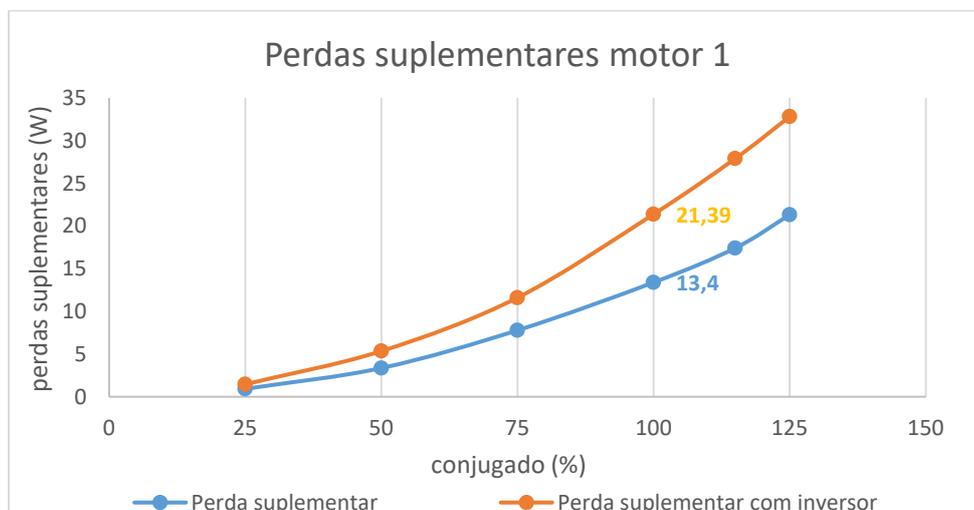
As perdas residuais calculadas para o motor 1 são maiores quando o MIT é acionado pelo inversor de frequência, possuindo uma variação de 25,79 W para o ponto de 100% quando comparado com as perdas residuais calculadas quando o MIT é acionado com uma fonte senoidal.

Essas variações seguem para todos os outros pontos de carga, conforme pode ser observado na Figura 60. Para este caso, deduzindo a equação das perdas residuais é possível observar que essas variações são devido a potência de entrada medida, conforme IEC/TS 60034-2-3:2013[20] ser maior do que a potência de entrada medida conforme IEC 60034-2-1:2014 [15] e a potência de saída calculada nos ensaios com inversor, conforme IEC/TS 60034-2-3:2013[20] possuir valores menores do que a potência de saída quando o MIT é alimentado por uma fonte senoidal, conforme IEC 60034-2-1:2014 [15].



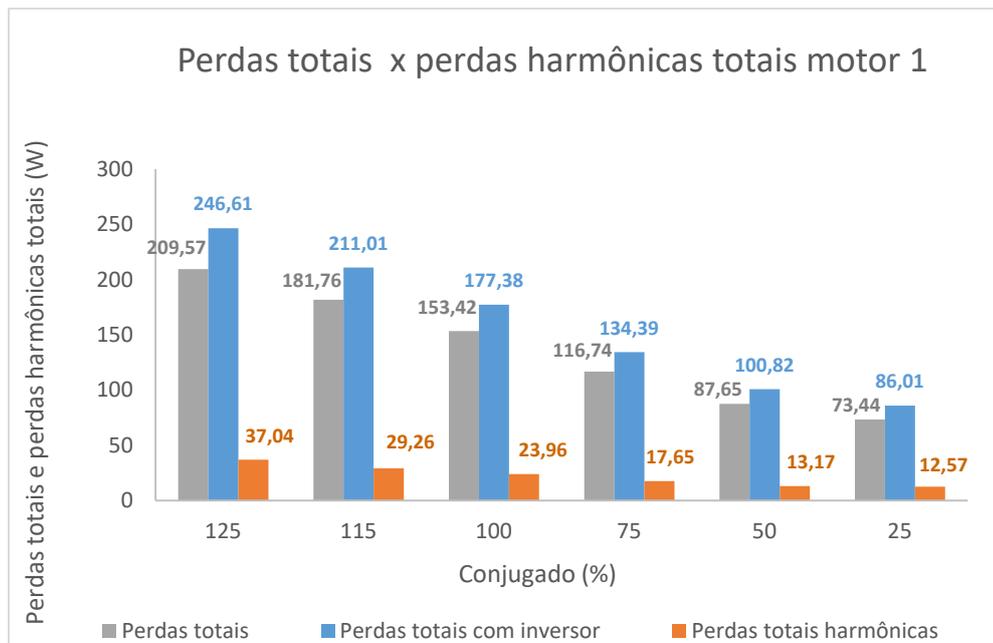
**Figura 60 – Comparação das perdas residuais do motor 1.**

As perdas residuais foram suavizadas através da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados e as perdas suplementares foram determinadas para cada ponto de carga, conforme Figura 61.



**Figura 61 – Comparação das perdas suplementares motor 1.**

As perdas totais foram determinadas para as normas IEC 60034-2-1:2014 [15] e IEC/TS 60034-2-3:2013[20]. É possível observar na Figura 62 que as perdas totais utilizando o inversor de frequência são maiores do que as perdas totais quando o MIT é alimentado por uma fonte senoidal, pois há um incremento das perdas totais harmônicas no cálculo das perdas totais da IEC/TS 60034-2-3:2013 [20].



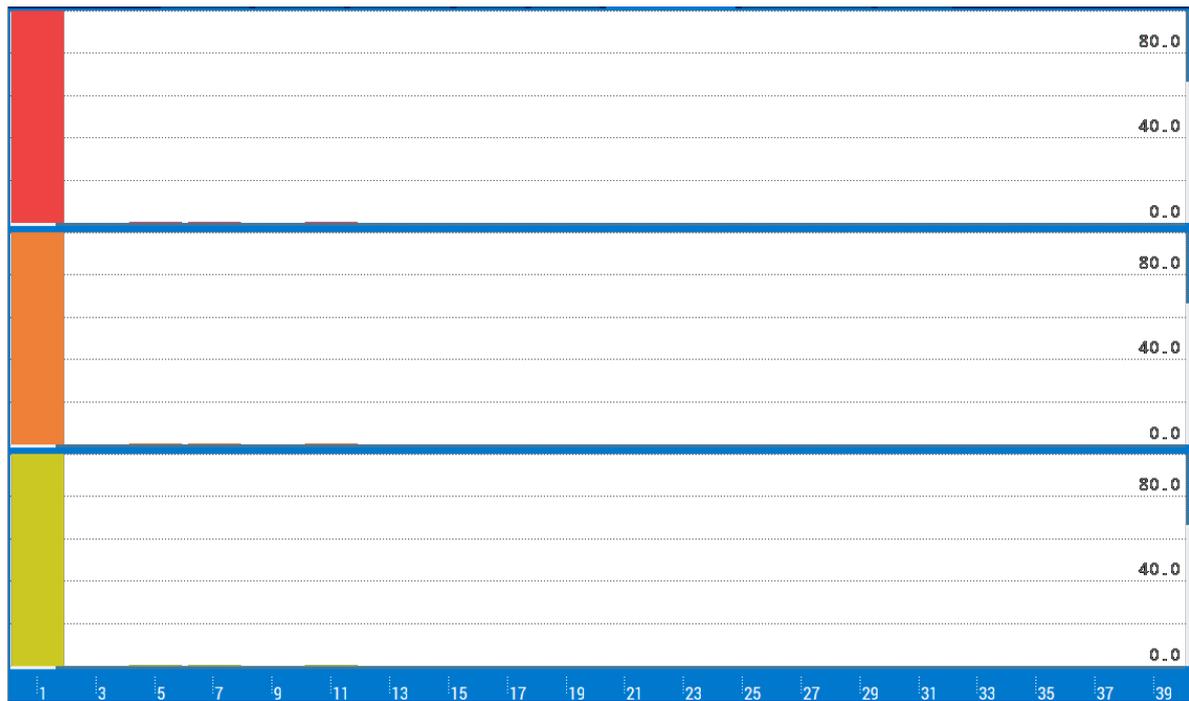
**Figura 62 – Perdas totais e perdas harmônicas motor 1.**

As perdas totais harmônicas em porcentagem das perdas totais para o motor 1 são calculadas e estão expressas conforme Tabela 82 para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal.

**Tabela 82 – Perdas harmônicas em porcentagem das perdas totais motor 1.**

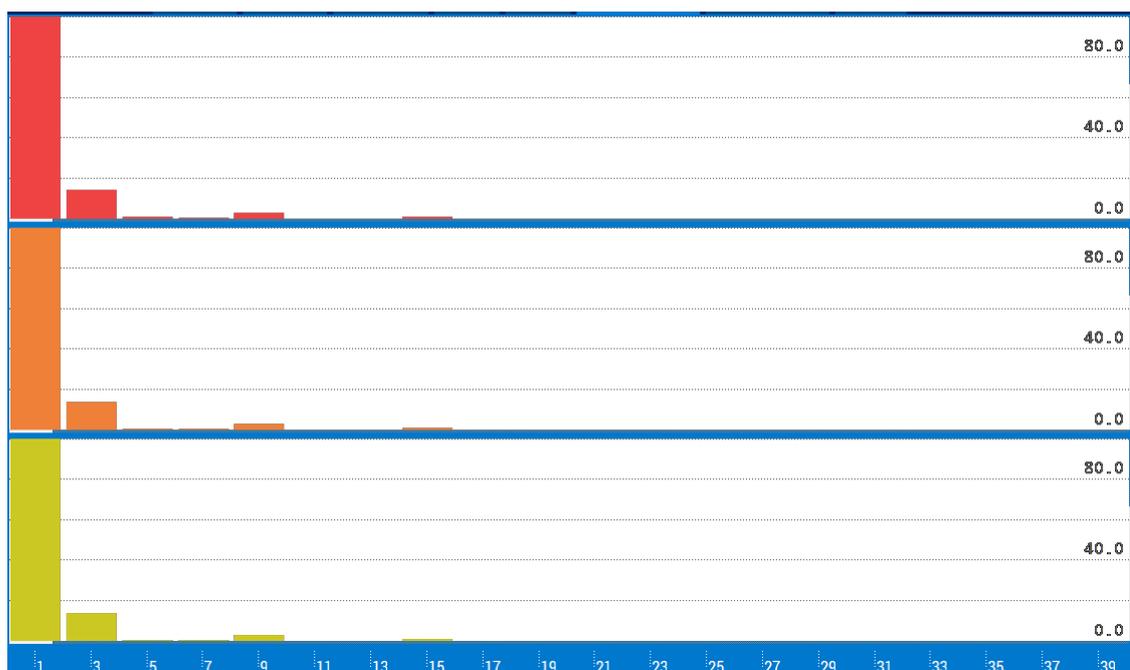
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perdas harmônicas (%)	15,02	13,87	13,51	13,13	13,06	14,61

As ordens harmônicas de tensão são medidas para uma alimentação senoidal para o ponto de 100% do conjugado nominal. É possível observar na Figura 63 que os valores das ordens harmônicas de tensão são praticamente zero para uma frequência fundamental de 60Hz.



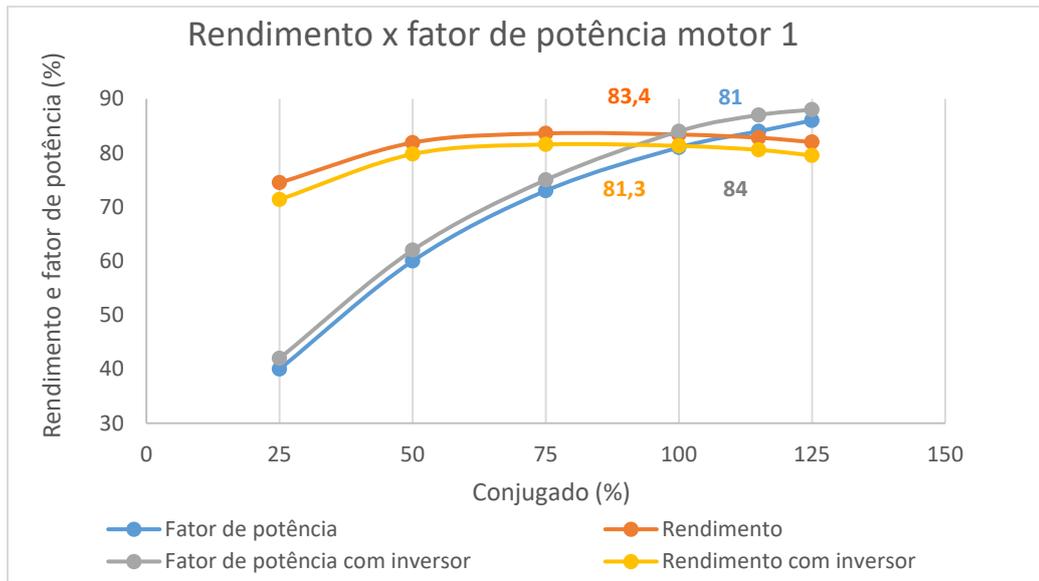
**Figura 63 – Ordens harmônicas alimentação senoidal.**

Já na Figura 64 é possível observar as ordens harmônicas de tensão medidas na saída do inversor para o motor 1, também para o ponto de 100% do conjugado nominal. Para este caso são geradas ordens harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 15<sup>a</sup> ordem, sendo as mais significativas a 3<sup>a</sup> e 9<sup>a</sup> ordem.



**Figura 64 – Ordens harmônicas alimentação PWM.**

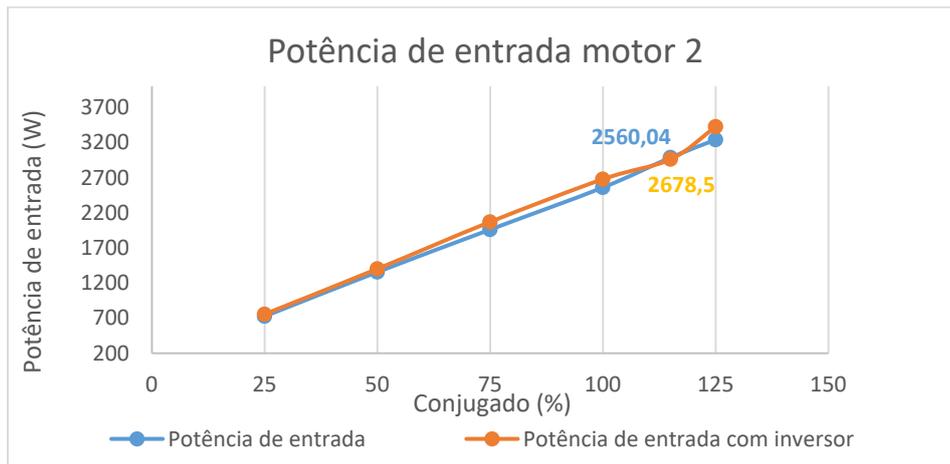
Por fim na Figura 65 é ilustrada a curva do rendimento e fator de potência para as normas IEC 60034-2-1:2014 [15] e a IEC/TS 60034-2-3:2013[20]. É possível observar que para este caso, quando o MIT é acionado por um inversor de frequência sua eficiência é reduzida 2,1 pontos percentuais e seu fator de potência aumentado 3 pontos percentuais para o ponto de 100% do conjugado nominal.



**Figura 65 – Rendimento e fator de potência motor 1.**

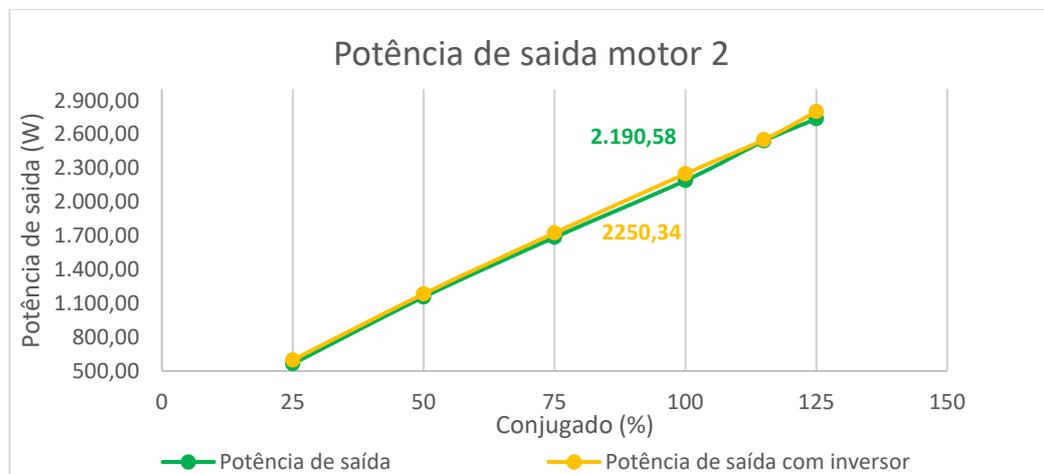
## 6.5.2 Motor 2

A potência de entrada do motor 2 também foi medida para uma fonte senoidal e uma fonte PWM no ensaio em carga para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal, conforme Figura 66. É possível observar que a potência de entrada medida conforme os procedimentos da IEC/TS 60034-2-3:2013[20] é maior para quase todos os pontos medidos conforme a IEC 60034-2-1:2014 [15]. A variação da potência de entrada para o conjugado nominal é calculada, obtendo um valor de 118,46 W.



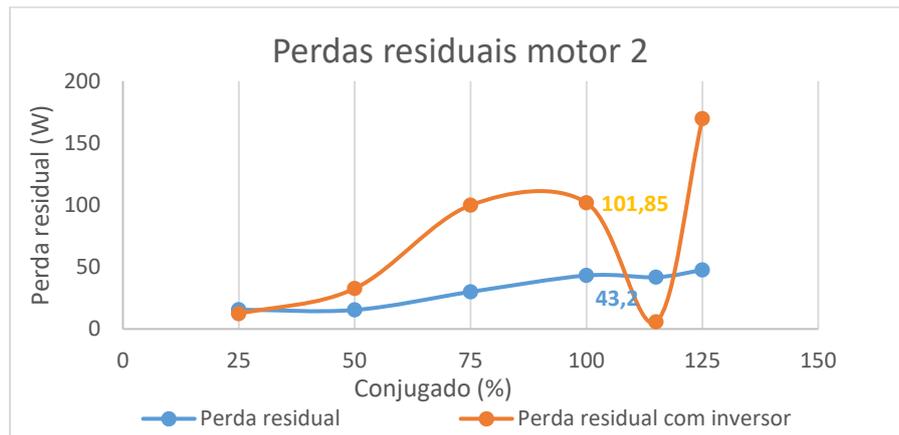
**Figura 66 – Comparação da potência de entrada motor 2.**

Na Figura 67 é possível observar que a potência de saída calculada sem o inversor é menor para todos os pontos de carga quando comparada com a potência de saída com o inversor. No ponto de 100% do conjugado nominal, a potência de saída calculada quando o MIT é acionado por uma fonte senoidal e por uma fonte PWM obteve uma variação de 59,76 W.



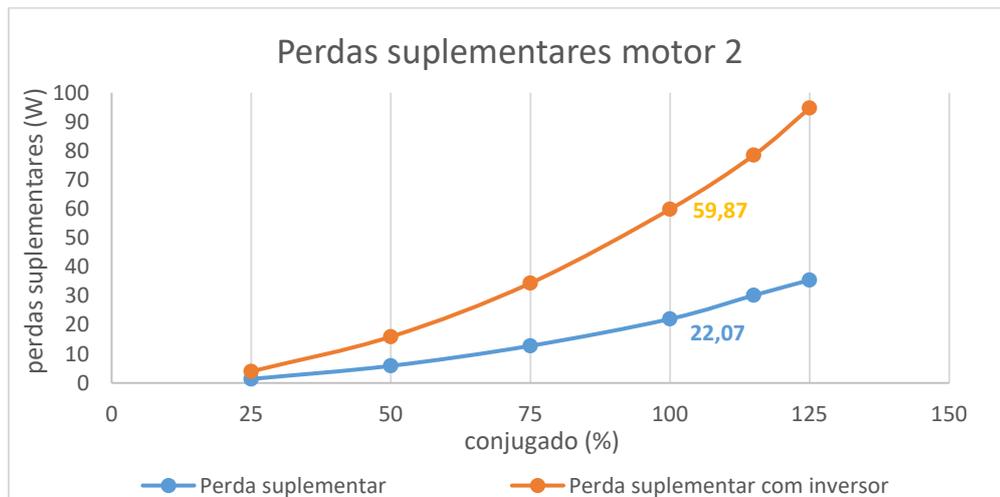
**Figura 67 – Comparação da potência de saída motor 2.**

As perdas residuais calculadas para o motor 2 apresentaram algumas oscilações quando o MIT é acionado pelo inversor de frequência principalmente para o ponto de 115% do conjugado nominal, conforme pode ser observado na Figura 68. A variação das perdas residuais para o conjugado nominal é calculada, obtendo um valor de 58,65 W.



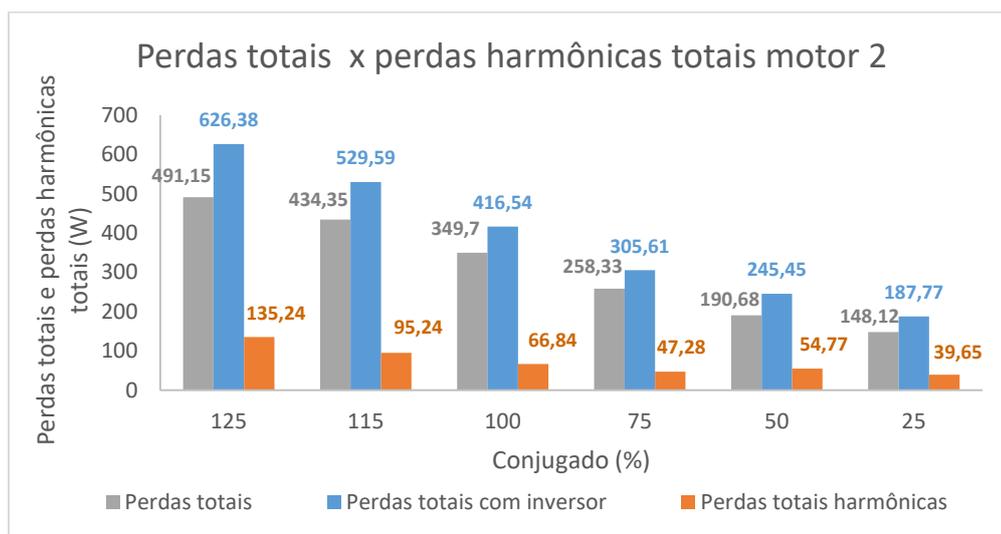
**Figura 68 – Comparação das perdas residuais motor 2.**

Na Figura 69 é expressa a curva das perdas suplementares. É possível observar que as variações existentes nas perdas residuais foram minimizadas nas perdas suplementares. Para o ponto de 100% do conjugado nominal a variação de quando o MIT é acionado com fonte senoidal e fonte PWM é de 37,8 W.



**Figura 69 – Comparação das perdas suplementares motor 2.**

Na Figura 70 são comparadas as perdas totais quando o MIT é alimentado por uma fonte PWM e quando é alimentado por uma fonte senoidal. A diferença delas são as perdas harmônicas totais.



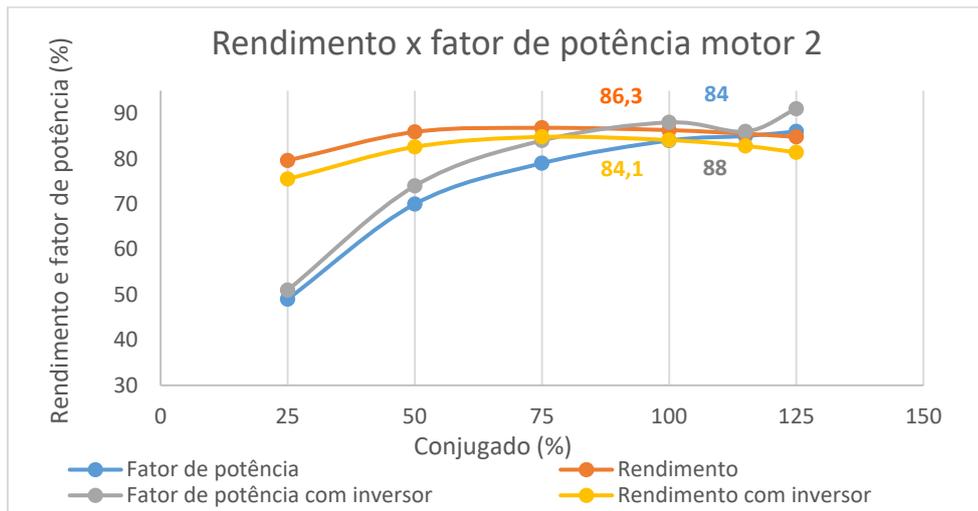
**Figura 70 – Perdas totais e perdas harmônicas motor 2.**

Que também foram calculadas em porcentagem das perdas totais para o motor 2. Considerando os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal, conforme Tabela 83.

**Tabela 83 – Perdas harmônicas em porcentagem das perdas totais motor 2.**

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perdas harmônicas (%)	21,59	17,98	16,05	15,47	22,31	21,12

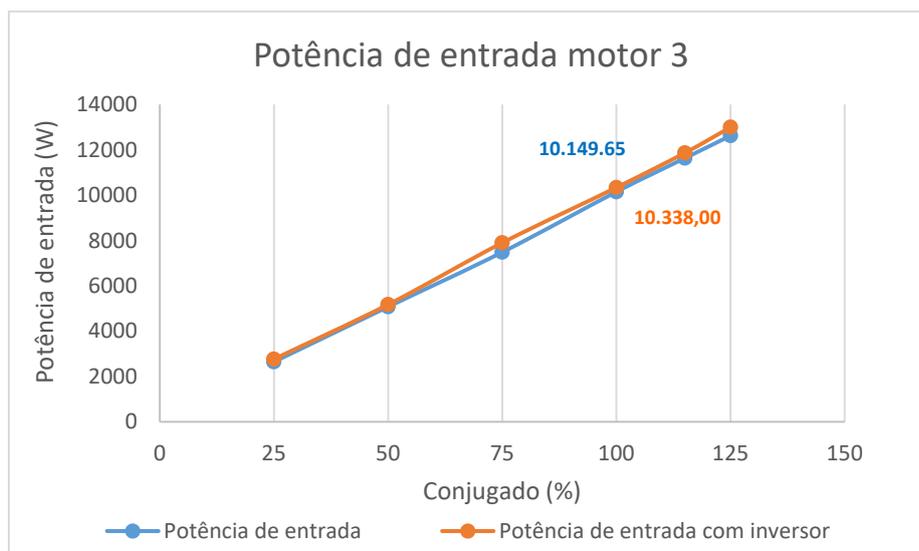
Na Figura 71 são ilustradas as curvas de rendimento e fator de potência para o motor 2 quando o MIT é alimentado por uma fonte PWM e quando é alimentado por uma fonte senoidal, conforme IEC/TS 60034-2-3:2013[20] e IEC 60034-2-1:2014 [15] respectivamente. É possível observar que para este caso, quando o MIT é acionado por um inversor de frequência sua eficiência é reduzida 2,2 pontos percentuais e seu fator de potência aumentado 4 pontos percentuais para o ponto de 100% do conjugado nominal.



**Figura 71 – Comparação do rendimento e fator de potência motor 2.**

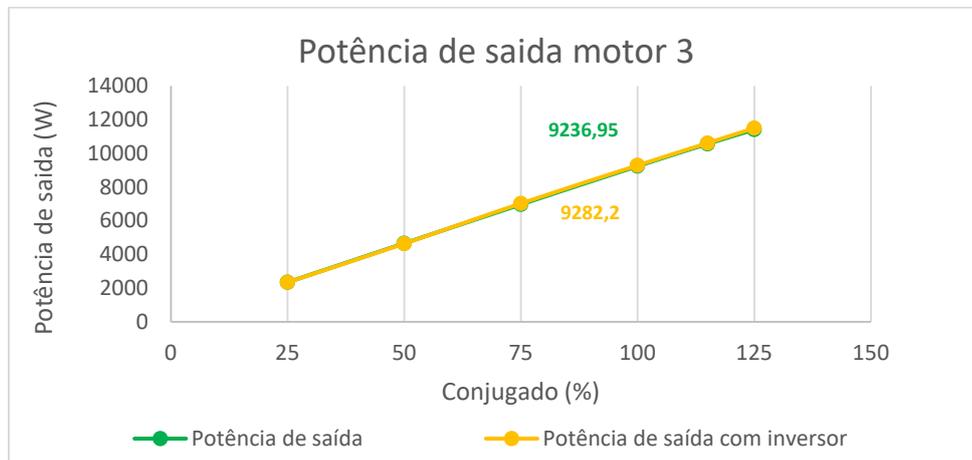
### 6.5.3 Motor 3

É possível observar na Figura 72 que a potência de entrada medida conforme os procedimentos da IEC/TS 60034-2-3:2013[20] possui um valor um pouco maior do que a potência de entrada medida na IEC 60034-2-1:2014 [15] e a maior variação está presente nos pontos de 75 e 125% do conjugado nominal. A variação da potência de entrada para este caso é de 188,35 W quando o MIT está operando com carga nominal.



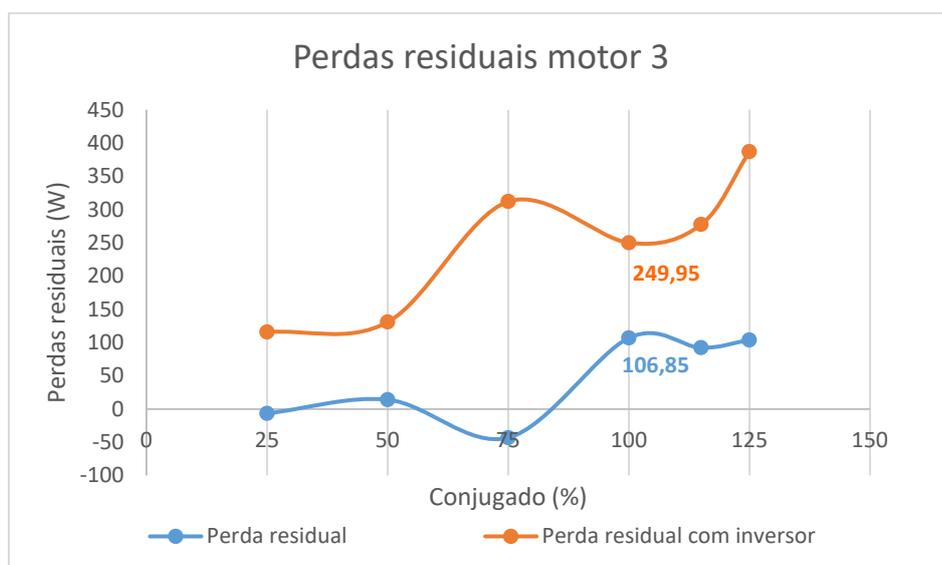
**Figura 72 – Comparação da potência de entrada motor 3.**

Na Figura 73 é possível comparar os valores da potência de saída quando o MIT é alimentado com sinal senoidal e quando o MIT é alimentado com sinal PWM. Para o ponto de 100% a variação da potência de saída quando o MIT é alimentado com fonte senoidal e PWM é de 45,25W.



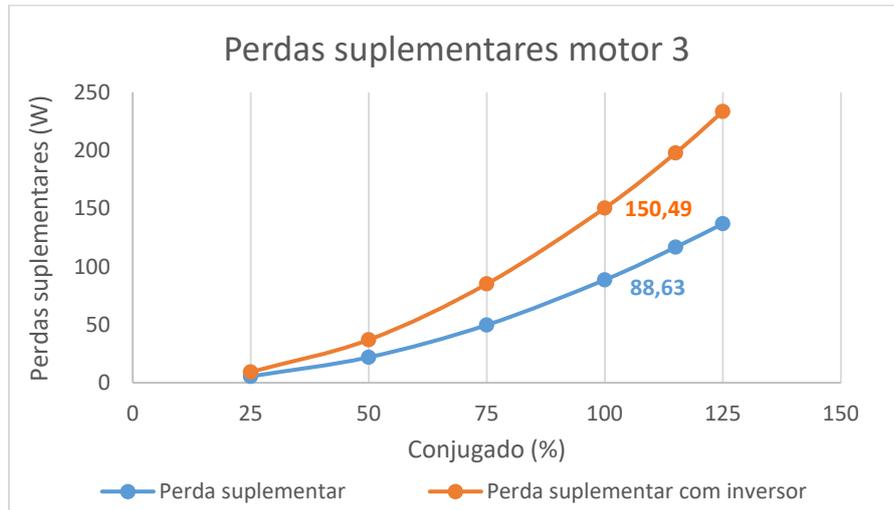
**Figura 73 – Comparação da potência de saída motor 3.**

As perdas residuais calculadas para o motor 3 também são maiores quando o MIT é acionado pelo inversor de frequência, possuindo uma variação de 143,1 W para o ponto de 100% quando comparado com as perdas residuais calculadas quando o MIT é acionado com uma fonte senoidal. Essas variações seguem para todos os outros pontos de carga, conforme pode ser observado na Figura 74.



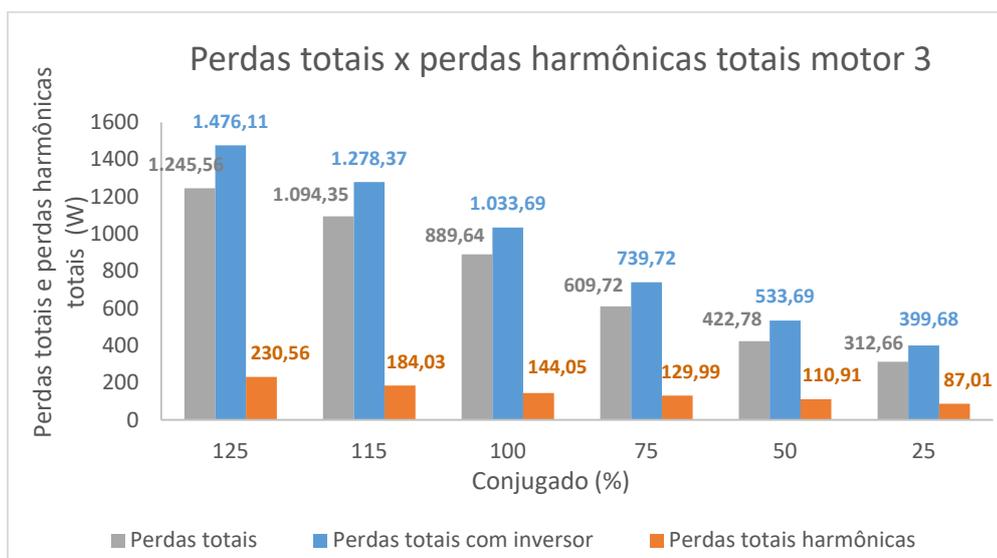
**Figura 74 – Comparação das perdas residuais motor 3.**

As perdas suplementares são calculadas através da regressão linear suavizando as perdas residuais encontradas na Figura 74. Na Figura 75 são ilustradas as curvas das perdas suplementares, sendo possível observar que as variações existentes nas perdas residuais foram minimizadas nas perdas suplementares. Para o ponto de 100% do conjugado nominal a variação de quando o MIT é acionado com fonte senoidal e fonte PWM é de 61,86 W.



**Figura 75 – Comparação das perdas suplementares motor 3.**

Na Figura 76 é possível observar que as perdas totais utilizando o inversor de frequência para o motor 3 também são maiores do que as perdas totais quando o MIT é alimentado por uma fonte senoidal. Isto ocorre devido ao incremento das perdas harmônicas no cálculo das perdas totais conforme a IEC/TS 60034-2-3:2013 [20].



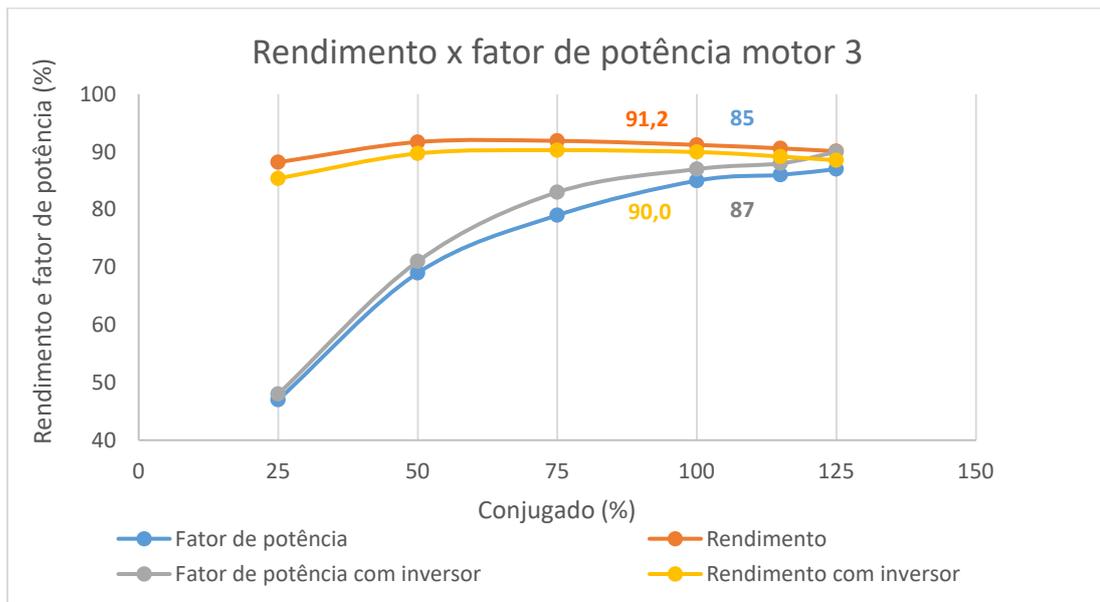
**Figura 76 – Perdas totais e perdas harmônicas totais para o motor 3.**

Para os pontos de 125 a 25% do conjugado nominal são calculadas as perdas harmônicas em porcentagem das perdas totais, conforme Tabela 84.

**Tabela 84 – Perdas harmônicas em porcentagem das perdas totais motor 3.**

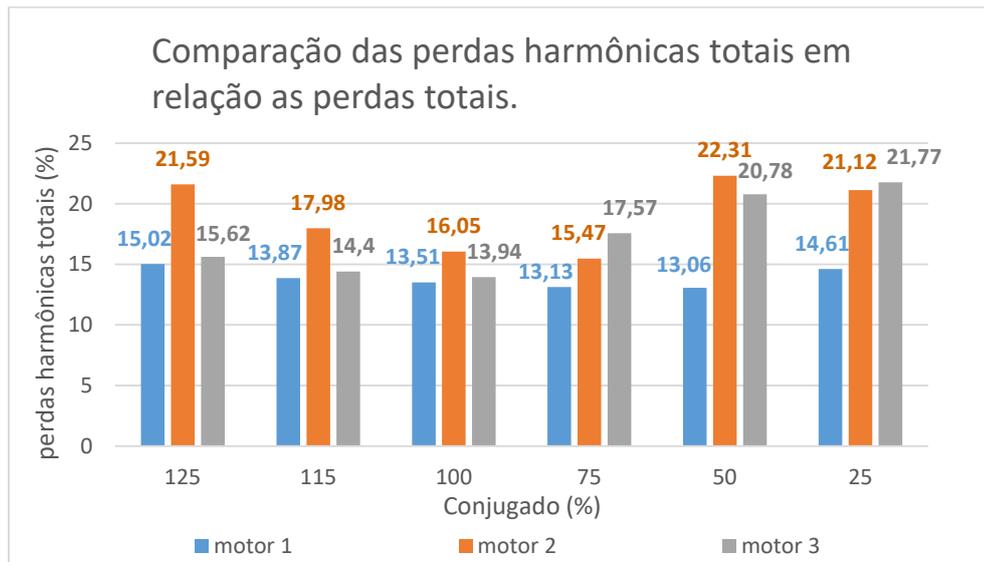
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
Perdas harmônicas (%)	15,62	14,40	13,94	17,57	20,78	21,77

A Figura 77 ilustra as curvas de rendimento e de fator de potência do MIT para os ensaios conforme a IEC 60034-2-1:2014 [15] e a IEC/TS 60034-2-3:2013 [20]. É possível observar que quando este MIT é acionado por um inversor de frequência sua eficiência é reduzida 1,2 pontos percentuais e seu fator de potência aumentado 2 pontos percentuais para o ponto de 100% do conjugado nominal.



**Figura 77 – Rendimento e fator de potência motor 3.**

E por fim, na Figura 78 é ilustrada uma comparação das perdas harmônicas em relação as perdas totais de cada motor, é possível observar que para os pontos de 125, 115 e 100% do conjugado nominal os motores de quatro polos apresentaram valores próximos em porcentagem das perdas harmônicas em relação as perdas totais para cada motor, já o motor de dois polos obteve valores mais elevados. Entretanto, o mesmo não se repetiu para os pontos de 75, 50 e 25% do conjugado nominal.



**Figura 78 – Comparação das perdas harmônicas.**

# Capítulo 7 - Conclusões e Trabalhos Futuros

## 7.1 Conclusões

Para esta dissertação foram realizados nove ensaios em três motores de indução trifásicos, com potências de 1, 3 e 12,5 CV. Estes motores fazem parte dos três grupos de motores de indução trifásicos mais vendidos no Brasil, representando 97% da comercialização no período de 1992 a 2012. Em cada motor foi realizado um ensaio, conforme ABNT NBR 17094-3:2018 [9] aplicando o método 2, um ensaio utilizando a IEC 60034-2-1:2014 [15] aplicando o método 2-1-1B e um ensaio utilizando a IEC/TS 60034-2-3:2013 [20] aplicando o método 2-3B.

Após a conclusão dos ensaios da ABNT 17094-3:2018 [9] e da IEC 60034-2-1:2014 [15], foi possível comparar os procedimentos e os resultados obtidos de cada norma. Os procedimentos para calcular as perdas de atrito e ventilação e as perdas no ferro são os que mais chamaram a atenção. A ABNT aplica uma regressão linear extrapolando linearmente para a tensão zero a curva entre o somatório das perdas de atrito e ventilação mais perdas no ferro versus a tensão ao quadrado medida no ensaio a vazio. Já a IEC, além de utilizar uma regressão linear para calcular a perda de atrito e ventilação zero, também utiliza do escorregamento da máquina para determinar as perdas de atrito e ventilação para cada ponto do ensaio em carga.

A ABNT calcula as perdas no ferro apenas uma vez, utilizando o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro para o ponto de 100% da tensão nominal, calculado no ensaio a vazio e das perdas de atrito e ventilação. A IEC, além de calcular a perda no ferro para o ensaio a vazio, também calcula a perda no ferro para o ensaio em carga através de uma interpolação linear. Essas e outras diferenças nos procedimentos resultam em diferenças ao se calcular as perdas e as características de desempenho dos motores de indução trifásicos. Foi observado que ao se aplicar os métodos de ensaio, utilizando a IEC 60034-2-1:2014 [15], as eficiências dos três motores foram ligeiramente maiores do que quando aplicando os métodos de ensaios da ABNT NBR 17094-3:2018 [9]. As maiores variações calculadas entre o rendimento dos motores ensaiados são de 0,4 pontos percentuais, obtida para os motores 2 e 3. Assim, conclui-se que mesmo com as diferenças nos procedimentos e algumas variações nos valores das perdas calculadas entre as normas, o valor obtido da eficiência dos motores ensaiados apresentou-se próximos quando comparados os resultados. Porém para questões de eficiência energética, sabe-se que a IEC 60034-30-1:2014 [16] possui classes de rendimentos maiores que a ABNT 17094-1:2018 [10]. Desta forma, não se pode desconsiderar o fato que o mesmo motor pode apresentar resultados de

rendimentos diferentes quando submetidos a ensaios com a ABNT 17094-3:2018 [9] e com a IEC 60034-2-1:2014 [15]. As diferenças nos valores dos rendimentos poderiam resultar em variações ainda maiores caso fossem utilizados diferentes instrumentos nos ensaios.

Os resultados dos ensaios da IEC 60034-2-1:2014 [15] também foram comparados com os resultados dos ensaios da IEC/TS 60034-2-3:2013[20], tornando possível calcular a influência que o inversor de frequência tem na variação do rendimento da máquina e determinar as perdas harmônicas geradas pelo mesmo. Para estes motores foi comprovado que a eficiência da máquina pode ser reduzida até 2,2 pontos percentuais quando os mesmos são alimentados pelo PWM do inversor de frequência, podendo até mesmo reduzir a classe de eficiência do MIT. As perdas harmônicas apresentaram um comportamento semelhante para os dois motores de quatro polos ensaiados para os pontos de 125, 115 e 100% do conjugado nominal. Já para o motor de dois polos, as perdas harmônicas se mostraram maiores para os mesmos pontos. Para os pontos de 75 a 25% do conjugado nominal não foi possível identificar um padrão, pois as perdas harmônicas para os motores ensaiados apresentaram comportamentos variados. Podendo ser ocasionados devido as alterações necessárias nos procedimentos do ensaio a vazio para obter a variação da tensão de saída desejada.

Essa dissertação está alinhada com o grupo de pesquisa da UFF nos aspectos de eficiência energética e se tornou de grande importância para o CEPEL, especialmente para o Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores, que além de aderir ao avanço da pesquisa em regime internacional, expandiu os métodos de ensaios realizados. Com a conclusão desta dissertação o Laboratório pode se tornar o primeiro Laboratório brasileiro a realizar ensaios acreditados aplicando métodos que determinam as perdas harmônicas e a eficiência de motores de indução trifásicos utilizando o inversor de frequência, tornando possível entender o comportamento do MIT quando acionado por um inversor aplicando o controle escalar.

Como as aplicações de acionamento de motores de indução vem ganhando cada dia mais espaço no Brasil, a possibilidade da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolver uma norma que aplique procedimentos para determinar a eficiência de um motor de indução quando acionados por um inversor de frequência não é descartada. Desta forma, esta dissertação também poderá contribuir para o avanço das pesquisas relacionadas a execução desta norma.

Vale ressaltar algumas observações sobre a IEC/TS 60034-2-3:2013[20], entre elas destaca-se que foi possível observar que as exigências da IEC/TS 60034-2-3:2013[20] não abrangem todos os tipos de inversores, como o caso do CFW-08 e CFW-09, utilizados nesta dissertação. Ressalta-se que estes inversores são comercializados em grande escala para o setor industrial brasileiro, mas

não possuem uma frequência de chaveamento específica de 4 kHz como é solicitada pela norma para ensaios em motores de indução de até 90 kW, comprometendo a realização dos procedimentos de ensaio especificados pela IEC/TS 60034-2-3:2013 [21].

Para o ensaio a vazio fica entendido que a especificação técnica sugere que a variação da tensão de saída nos terminais do MIT seja realizada através de uma alimentação nos terminais do link CC do inversor. Entretanto, esta aplicação não é simples de ser implementada, por exemplo, devido à complexidade e a demora para determinar o ajuste de tensão ideal do barramento CC. Para obter a tensão de saída desejada resulta em variações da temperatura da máquina, gerando desvios na medição da resistência no ensaio a vazio e interferindo diretamente no cálculo das perdas joule do estator. Entretanto, mesmo se essas observações fossem desprezadas, mais uma vez a especificação técnica não conseguiria atingir todos os inversores existentes no mercado, como novamente é dado como exemplo o caso do CFW-08. Em seu projeto ele não possui terminais que facilitam o acesso ao barramento CC. Desta forma, não foi possível aplicar esta exigência.

Uma última observação é destacada, a especificação técnica se baseia na IEC 60034-2-1:2007 que já foi cancelada e substituída pela IEC 60034-2-1:2014 [15] para realizar os procedimentos de ensaio do método 2-3B. Desta forma, nesta dissertação a IEC/TS 60034-2-3:2013 [21] seguiu os procedimentos de ensaio da norma que se encontra em vigor, que é a IEC 60034-2-1:2014 [15].

## 7.2 Trabalhos Futuros

Tendo em vista que a utilização de diferentes métodos resulta em variações nos cálculos do rendimento para um mesmo motor, e essas diferenças geram grandes discussões entre os comitês internacionais sobre qual norma e/ou método garante o resultado mais próximo do real, faz-se necessário desenvolver pesquisas e melhorias para as normas de ensaios.

Uma sugestão de trabalhos futuros é desenvolver pesquisas que gerem uma nova regulamentação ou uma adaptação nos métodos de ensaios utilizando motores de indução trifásicos, conforme ABNT 17094-3:2018 [9], de forma que ao medir a resistência da máquina seja aplicado o método do torque do entreferro, por exemplo. Assim, essa medição poderá ser efetuada com o motor em movimento, evitando a variação da temperatura da máquina. Essa medição pode ser comparada com o atual procedimento da ABNT 17094-3:2018 [9], verificando as possíveis variações nos resultados.

Nesta dissertação foi relatado que a ABNT 17094-3:2018 [9] considera a estabilização térmica da máquina quando em um período de uma hora as temperaturas das laterais direita e esquerda da carcaça do motor apresentem variações menores ou iguais a 1K. A IEC 60034-2-1:2014 [15] considera a estabilização térmica para a mesma variação de temperatura, porém entre um período de 30 minutos. É de grande relevância investigar os resultados da estabilização térmica do motor para um período de 30 min e para um período de 1 h aplicando os procedimentos da ABNT e observar se há alguma variação no rendimento da máquina. Caso esta influência possa ser desprezada, poderá ser sugerido à ABNT inserir este procedimento a NBR 17094-3:2018 [9] a fim de realizar ensaios no Brasil durante um menor período, reduzindo o consumo de energia dos Laboratórios e conseqüentemente o custo dos ensaios.

Como nem todos os inversores possuem alterações nos seus parâmetros para operar com uma frequência de 4 kHz com motores de até 90 kW, conforme especificado pela IEC/TS 60034-2-3:2013[20], é sugerido um trabalho que possa explorar se há influência nos dados de entrada e nos resultados calculados quando o MIT for acionado por um inversor operando, hora com uma frequência de chaveamento de 5 kHz, hora com uma frequência de chaveamento de 4 kHz. E caso haja alguma influência determinar um fator de correção para esta operação, ou desenvolver uma metodologia que apresente uma função de correção para os dados obtidos em ensaios, quando avaliados com inversores com diferentes frequências de chaveamento.

Outra sugestão é elaborar pesquisas a fim de desenvolver uma norma brasileira que trata do ensaio de motores de indução usando o inversor de frequência, que aborde não só apenas a utilização do controle escalar, mas também o controle vetorial, pois o mesmo é muito utilizado nos setores industriais. Desta forma, seria de grande interesse determinar o comportamento do motor e obter a eficiência da máquina quando operando com este tipo de controle.

Extrapolam-se também a proposição de uma normatização específica que avalie o conjunto inversor + motor para diferentes condições de carregamento, apresentando à sociedade tabelas de referenciais mínimos, como exemplo, os valores de rendimento dos MITs, para uma possível qualificação destes conjuntos, podendo até ser criada uma etiqueta PB

# Referências Bibliográficas

- [1] EMSA, Policy Guidelines for Electric Motor Systems - Part 2: Toolkit for Policy Makers, Canada: 4E Energy efficient End-use Equipment, 2014.
- [2] C. A. Ferreira, Motor Elétrico Premium, Rio de Janeiro : Eletrobras; International Copper Association Brazil, 2016.
- [3] R. A. Yamachita, Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2013.
- [4] R. T. Richard Phillips, Improvement of Electric Motor Systems in Industry (IEMSI), Ispra: Swiss Federal Office of Energy, SFOE ;Impact Energy, Switzerland EEMODS, 2017.
- [5] M. Jibrán, S. Zuberi and K. P. Martin, The importance of additionality in evaluating the economic viability of motor-related energy efficiency measures, Geneva: EEMODS, 2017.
- [6] U. B. Conrad, R. Werle, M. V. Werkhoven, J. Fong and A. T. d. Almeida, New technology needs new policy - From component to systems, Coimbra: EEMODS, 2017.
- [7] R. R. Jacques, S. L. Nau and A. Nied, Performance evaluation of induction motors fed by PWM voltage with magnetic equivalent circuits., Santa Catarina: EEMODS, 2017.
- [8] A. T. d. Almeida, J. Fong, H. Falkner and P. Bertoldi, “Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1275–1286, Janeiro 2017.
- [9] ABNT, NBR 17094-3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio, Rio de Janeiro: associação brasileira de normas técnicas , 2018.
- [10] ABNT, NBR 17094-1 Máquinas Elétricas Girantes Parte 1 Motores de indução trifásicos - Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.
- [11] GB/T, 1032 Test procedures for three-phase induction motors (IEC 60034-2-1:2007, Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), NEQ), 2012.
- [12] GB, 18613 - National Standard of the People’s Republic of China Minimum Allowable Values of Energy Efficiency and Energy Efficiency Grades for Small and Medium Three-Phase Asynchronous Motors, 2012.
- [13] AS/NZS, 1359.102.3, Rotating Electrical Machines - General requirements - Methods for determining losses and efficiency, 2004.
- [14] AS/NZS, 1359.5 - Rotating Electrical Machines -General requirements Part 5: Three-phase cage induction motors-High efficiency and minimum energy performance standards requirements, 2004.
- [15] IEC, 60034-2-1 Rotating Electrical Machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), Geneva, Switzerland, 2014.
- [16] IEC, 60034-30-1 Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code), Geneva, Switzerland, 2014.
- [17] IS, 15999-2-1: Índia Standard – Rotating Electrical Machines part 2 - method of test section 1 standard methods for determining losses e efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles ), 2011.
- [18] NOM, -016-ENER- Eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásicos de

- indução tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW a 373 kW Límites método de prueba y marcado, 2016.
- [19] C. I. KS, 60034-1 – Máquinas electricas rotativas parte 2-1 metodos padrão para determinar as perdas e a eficiência dos ensaios (excluindo maquinas para veículos de tracção ), 2008.
- [20] P. Angers, “Review of Energy Efficiency Measurement Standards for,” *European Commission*, no. 10, pp. 610-615, 2018.
- [21] IEC, 60034-2-3 Rotating Electrical Machines - Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors., 1.0 ed., Geneva, Switzerland, 2013.
- [22] ABNT, NBR 5383-1 - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos - Ensaios, Rio de Janeiro, 2002.
- [23] IEC, Internacional Eletrotécnica Comissão, 07 07 2016. [Online]. Available: [https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:23:0:::fsp\\_org\\_id:1221](https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:23:0:::fsp_org_id:1221). [Accessed 04 02 2019].
- [24] WEG, “Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência PWM,” *Guia Técnico*, pp. 4-5, 2016.
- [25] S. Strauss, J. Bacher and A. Muetze., “Efficiency Determination of Inverter-Fed Induction Machines and the Impacts of the Inverter Supply,” *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 901-906, 2018.
- [26] R. Antonello, F. Tinazzi and M. Zigliotto, Energy Efficiency Measurements in IM: the Non-Trivial Application of the Norm IEC 60034-2-3:2013, University of Padova, Italy: IEEE, 2015.
- [27] F. Tinazzi, M.Zigliotto, A. Boglietti, A. Cavagnino and M. Cossale, Energy Efficiency Assessment For Inverter-Fed Induction Motors, University of Padova, Vicenza, Italy , 2015.
- [28] Y. H. Kim, H. D. Jun, J. W. Moon and S. Y. Jung, Comparison on the IM efficiency measurement results according to IEC standards, IEEE, 2018.
- [29] L. B. d. Aguiar e L. C. R. Silva, “Alguns Aspectos Sobre a Evolução Historica das Máquinas Elétricas,” *Revista Científico*, pp. 137-168, 2017.
- [30] M. A. d. Silva, Avaliação de Parâmetros Técnicos e Econômicos na Substituição de Motores de Indução Trifásicos de 1CV A 10 CV, Minas Gerais, 2009.
- [31] M. F. Praxedes, A Evolução dos Sistemas de Partida dos Motores Elétricos Trifásicos- MIT, itatiba: Universidade São Francisco, 2011.
- [32] D. F. d. Souza, A. G. Kanashiro and F. A. M. Salotti., “Historical evaluation of performance of induction motors sold in Brazil between 1980 and 2016,” *EEMODS - Proceedings of the 10th international conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, pp. 148-162, 2017.
- [33] V. D. Toro, Fundamentos de Máquinas Elétricas, Rio de janeiro: Livros tecnicos e científicos editora, 1999.
- [34] Mashinbaz, “Grabcad Community,” 17 janeiro 2013. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/three-phase-induction-motor>. [Accessed 23 setembro 2018].
- [35] PEA, O motor de indução – Partes 1 e 2 - Introdução à Eletromecânica e à Automação, Sao Paulo, 2006.
- [36] M. V. Guedes, O Motor de Indução Trifásico - Modelização, Porto: Universidade do Porto, 1994.
- [37] A. N. C. Viana, E. d. C. Bortoni, F. J. H. Nogueira, J. Haddad, L. A. H. Nogueira, O. J. Venturini and R. A. Yamachita., Eficiência Energética, fundamentos e aplicações, São Paulo:

Programa de eficiência energética - ANEEL, 2012.

- [38] E. C. Bortoni, J. Haddad, R. A. Yamachita and E. Alli, Conservação de Energia - Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações, Procel/Eletrobras, 2006.
- [39] D. G. Werneck, Determinação das Perdas e Rendimento do Motor de Indução Trifásico Atraves do Estudo da Norma IEC 60034-2, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [40] A. C. and Machado., Determinação das Perdas Suplementares em Motores de Indução Trifásicos pelo Método Eh-Star, Florianopolis, 2008.
- [41] Dielectric, “Grupo Dielectric,” 20 10 2011. [Online]. Available: [http://www.dielectric.com.br/materia\\_completa.php?cd=010](http://www.dielectric.com.br/materia_completa.php?cd=010). [Accessed 19 02 2019].
- [42] M. M. Cad, Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico., São Carlos: Universidade de São Paulo, 2000.
- [43] F. G. Dantas, Controle Vetorial para Velocidade de um Motor de Indução Trifásico Utilizando Estimador Filtro de Kalman, Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.
- [44] A. J. Rezek, Fundamentos Básicos de Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaios, Rio de Janeiro: Synergia, 2011.
- [45] C. P. Salomon, Estimação da Eficiência de Motores de Indução Considerando apenas as Grandezas Elétricas, Itajuba: Universidade Federal de Itajubá, 2014.
- [46] C. M. Franchi, Acionamentos Elétricos, São Paulo: Érica Ltda, 2008.
- [47] C. Rossi, Inversor de Frequência Modulação Senoidal PWM Unipolar, Londrina, 2011.
- [48] P. D. N. Agostinho and S. J. P. S. Mariano, A Automação como Suporte ao Arranque e Controlo de Velocidade do Motor de Indução, Universidade da Beira Interior, 2009.
- [49] WEG, Motores Elétricos, Linhas de Produtos, Características, Especificações, Instalações e Manutenções, Jaragua do Sul - SC, 2005.
- [50] WEG, Guia de Aplicação Inversores de Frequência, Jaraguá do Sul: 3ª edição , 2005.
- [51] R. Camargo and J. Rezek, Desempenho de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência, Poços de Caldas -MG: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008.
- [52] D. M. Côrtes, Aplicação de Inversores de Frequência em Motores Elétricos de CA, Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica , 2010.
- [53] A. M. S. Mendes, Análise do Desempenho do Motor de Indução Trifásico Quando Alimentado Através de um Inversor de Fonte de Tensão com Tolerância a Falhas, Coimbra - Portugal: Universidade de Coimbra, 2005.
- [54] L.Harnekfors, Desing and Analysis of General Rotor Flux Oriented Control Systems, IEEE Transactions on Industrial Eletronics; Vol 48; No.2, 2001.
- [55] D. R.C., Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill Education, 2002.
- [56] IEEE, Standard 1159, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, Institute of Electrical and Electronic Engineers , 2009.
- [57] N. W. J. Arrilaga, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 2003.
- [58] IEEE, Standard 519, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2014.
- [59] M. Nahvi and J. A. Edminister, Electric Circuits, McGraw Hill, USA: Fourth Editions, 2003.
- [60] K. T. Portela and J. D. S. Rosa, Estudo dos Efeitos dos Harmônicos Gerados por Residências na Rede de Distribuição Secundária, Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná,

2016.

- [61] M. Isoni, A moderna eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas, Engenparc engenharia, 2010.
- [62] P.H.O.Rezende and M.I.Samesima, Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução Trifásico, Uberlândia: Universidade federal de Uberlândia, 2008.
- [63] P. Krause, Analysis of Electric Machinery, New York: McGraw- Hill, 1986.
- [64] J. Alwash e S. Ikhwan, Generalised Approach to the Analysis of Asymmetrical Three-Phase Induction Motors”, IEE Proceedings Electric Power Applications., 1995.
- [65] P. C. F. Freitas, Comparação dos Rendimentos dos Motores da Linha Padrão e de Alto Rendimento Obtidos de Forma Indireta., Uberlândia: Universidade federal de Uberlândia, 2007.
- [66] M.Z.Fortes, L.B.Sousa, G.M.Quintanilha, C.E.Santana and H.O.Henriques., Analysis the Effects of Voltage Unbalance on Three-Phase Induction Motors, Niteroi: American Institute of science, International Journal of energy and Sustainable Development, 2018.
- [67] Brasil, “EPE,” Ministerio de Minas Energia , [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>. [Accessed 05 05 2019].
- [68] IEC, Ações da IEC para a Eficiência Energética, Geneva, Switzerland, 2018.
- [69] ANEEL, Eficiência Energética, Fundamentos e Aplicações, São Paulo: Elektro, Universidade Federal de Itajubá, 2012.
- [70] ONU, United Nations. World population prospects the 2015 revision, New York, 2015.
- [71] T. Mayo and N. Nohria, Da crise do petróleo a internet, Campus: S.I, 2008.
- [72] IEA, International Energy Agency, Key world energy statistics., Paris, 2016.
- [73] ABNT, NBR 7094 Máquinas elétricas girantes - Motores de indução -Especificação, Rio de Janeiro, 2002.
- [74] ABNT, NBR 17094-1:2008 Máquinas Elétricas Girantes - Motores de indução - Especificação, Rio de Janeiro, 2008.
- [75] ABNT, NBR 17094-1:2013 Máquinas Elétricas Girantes - Motores de indução - Especificação, Rio de Janeiro, 2013.
- [76] IEC, 60034-30:2008 Rotating Electrical Machines - Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code), França, 2008.
- [77] EC, European Commission, Guidelines accompanying: Commission Regulations No 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC with regard to ecodesign requirements for electric motors and No 4/2014 of 6 January 2014 amending Regulation, Energy, 2014.
- [78] R. S. Vieira, Avaliação das Perdas Energéticas e Caracterização do Mercado de Revenda e de Manutenção de Motores Elétricos e Recondicionados no Brasil, Rio de Janeiro: PUC, 2018.
- [79] PROCEL, Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo. ELETROBRAS, Rio de Janeiro p. 187, 2009.
- [80] BRASIL, Lei nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da União, Seção 1., Brasília, 2001.
- [81] BRASIL, Decreto nº 4.508. de 11 de dezembro de 2002., Brasília, 2002.
- [82] D. F. d. Souza, Uma avaliação do desempenho de motores elétricos de indução trifásicos comercializados no Brasil entre 1945-2016 e o impacto da legislação brasileira, São Paulo:

Universidade de São Paulo, 2018.

- [83] I. L. Sauer, A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards p. 38-318, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [84] INMETRO, Portaria 488, 08 de dezembro de 2010, Rio de Janeiro, 2010.
- [85] A. T. Almeida, *Electric motor MEPS guide*. Zurich: 4E Electric Motor Systems EMSA. p. 16., Europa, 2009.
- [86] Procel, “Procel info,” centro brasileiro de informações de eficiência energética, 2 10 2006. [Online]. Available: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B88A19AD9-04C6-43FC-BA2E-99B27EF54632%7D>. [Accessed 06 04 2019].
- [87] R. N. d. Almeida, *O método dos mínimos quadrados: estudo e aplicação para o ensino médio*, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2015.
- [88] 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, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016.
- [89] WEG, “Manual do inversor de frequência CFW-08,” 02 08 2013. [Online]. Available: [http://www.fisica.alegre.ufes.br/sites/fisica.alegre.ufes.br/files/field/anexo/frequency\\_inverter.pdf](http://www.fisica.alegre.ufes.br/sites/fisica.alegre.ufes.br/files/field/anexo/frequency_inverter.pdf). [Accessed 24 10 2019].
- [90] Siemens, *Inversor de frequência Micromaster 440*, Federal Republic of Germany : Siemens AG, 2001.
- [91] WEG, “Manual do inversor de frequência CFW - 09,” 03 02 2006. [Online]. Available: <http://www.ergmotoreseltricos.com.br/pdf/inversor-de-frequencia-weg-cfw09.pdf>. [Accessed 22 10 2019].
- [92] M. Sens, “Avanços Tecnológicos nos Motores Elétricos,” *Weg em Revista*, pp. 11-13, 2001.