



Determinação das perdas suplementares e do rendimento do motor de indução trifásico com base na norma IEC 60034-2-1

CARLOS FRANCISCO OLIVEIRA FERNANDES

novembro de 2016

DETERMINAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES E DO RENDIMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM BASE NA NORMA IEC 60034-2-1.

Carlos Francisco Oliveira Fernandes



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2016

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Carlos Francisco Oliveira Fernandes, Nº 1110556, 1110556@isep.ipp.pt

Orientação científica: Pedro Miguel Azevedo De Sousa Melo, pma@isep.ipp.pt

Empresa:

Supervisão: Pedro Miguel Azevedo De Sousa Melo, pma@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2016

Pai e Mãe,
Obrigado
pela vossa dedicação
para proporcionarem a mim
e aos meus irmãos
uma melhor educação.

Agradecimentos

Um especial obrigado aos meus Pais, Carlos do Vale Fernandes e Ana da Costa Oliveira, ao meu irmão Hélder e à minha irmã Tânia por me proporcionarem o melhor, a nível educacional, emocional e financeiro.

Ao meu orientador Pedro Melo, particularmente, que durante este período de elaboração da dissertação, se disponibilizou, orientando-me de forma a completar esta árdua tarefa. Tenho a agradecer-lhe a sua compreensão pelos meus horários de trabalho, na gestão de tempo de um trabalhador-estudante, tendo em conta o elevado grau de exigência deste trabalho. O resultado deste empenho advém da junção entre alguns traços de amizade, dedicação e tempo, fatores sempre integrados pelo apoio prestado durante o desenvolvimento desta dissertação.

Igualmente, quero deixar um agradecimento ao Engenheiro Armando Herculano, pela exigência técnica, acompanhada da sua enorme experiência profissional, transparecidos no apoio prestado e das ferramentas disponibilizadas no laboratório de máquinas do ISEP.

Aos meus familiares, amigos e colegas, um especial agradecimento, por estarem presentes no meu dia-a-dia, com as conversas, partilhas de sonhos e diversões, que num todo, contribuíram para este resultado.

Muito Obrigado.

Resumo

Atualmente, estima-se que os motores elétricos são responsáveis por 30 % da utilização global de energia elétrica. Atendendo à proliferação dos motores de indução trifásicos (MIT) em todo o mundo, a melhoria do seu rendimento tem um impacto determinante no consumo global. A necessidade de metodologias que permitam determinar, com rigor, o rendimento destas máquinas, assume uma importância fundamental.

A determinação das perdas e do rendimento do MIT na União Europeia (UE) assenta na norma IEC 60034-2-1, cuja segunda edição foi publicada em 2014 (a sigla IEC2 será usado ao longo do trabalho). A norma contém metodologias de determinação das perdas e do rendimento a partir de ensaios (diretos e indiretos), em que são expostos, para cada método, os requisitos, os procedimentos de ensaio e os cálculos das perdas e do rendimento. No que afeta às perdas convencionais, a sua determinação não difere de método para método. A principal diferença entre métodos indiretos de separação das perdas, é provocada pela forma como são determinadas as perdas suplementares.

Neste trabalho, foram implementados quatro métodos de determinação do rendimento em dois motores de indução de 1.1 kW, com diferentes classes de eficiência. Havendo outras metodologias na norma IEC2, a opção pelos quatro métodos referidos é justificada ao longo do trabalho. Foi também elaborada uma análise crítica e comparativa para as diferentes metodologias implementadas na determinação das perdas suplementares, entre elas, o mais recente ensaio *eh-star*. Com efeito, a dificuldade em caracterizar e medir estas perdas é responsável pela ausência de uma metodologia consensual. Como tal, são de prever flutuações no rendimento atribuído a um motor, consoante a metodologia usada.

Palavras-Chave

MIT, perdas suplementares, rendimento, ensaios, métodos normalizados, *eh-star*.

Abstract

Nowadays, electric motors are responsible for about 30 % of global electric energy consumption. Taking into account that three phase induction motors are spreading worldwide, its efficiency has a deep impact on world's electric energy consumption. Therefore, new methodologies for a higher accuracy in the efficiency of these machines are extremely important.

In the European Union (EU) efficiency and losses determination of rotating electrical machines, is based on IEC 60034-2-1 standard, published in 2014. This standard includes different test methodologies, both direct and indirect. For the last ones, conventional losses are calculated in a similar way. However, different approaches are considered for stray load losses: basically, the main differences between indirect methods rely on stray load losses estimation.

In this work, four methods from IEC 60034-2-1 standard were selected in order to compare the efficiency levels of two induction motors of 1.1 kW, with different efficiency classes. Moreover, an analysis of stray load losses estimation is performed and results are compared under a critical perspective. A particular attention is addressed to the eh-star test.

Keywords

MIT, stray load losses, efficiency, tests, standard methods, eh-star.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIV
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	3
1.3.PLANEAMENTO	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
2. O MOTOR ELÉTRICO E O SEU RENDIMENTO	5
2.1.CONSUMOS DO MOTOR ELÉTRICO NO MUNDO	5
2.2.BARREIRAS À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS MOTORES	6
2.3.CLASSES DE EFICIÊNCIA	7
2.4.EVOLUÇÃO LEGISLATIVA NO MERCADO EUROPEU	8
2.5.EVOLUÇÃO DAS NORMAS DE DETERMINAÇÃO DE RENDIMENTO	9
2.6.MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS	11
2.7.ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO NA IEC2 DE MOTORES DE INDUÇÃO	19
3. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO	29
3.1.REQUISITOS DA ALIMENTAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DOS ENSAIOS	29
3.2.REQUISITOS DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	31
3.3.EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DO ISEP	34
3.4.PROCEDIMENTOS E METODOLOGIAS DE CÁLCULO DO RENDIMENTO DO MOTOR A E DO MOTOR B.....	35
4. ANÁLISE CRÍTICA E COMPARATIVA	60
4.1.INCERTeza NO RESULTADO DO RENDIMENTO	61
4.2.PERDAS CONVENCIONAIS DO MOTOR A E DO MOTOR B	62
4.3.PERDAS SUPLEMENTARES	63
4.4.PERDAS TOTAIS	65
4.5.RENDIMENTOS	66

5. CONCLUSÕES.....	67
5.1. TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	69
ANEXO A. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO DO MOTOR A	
71	
ANEXO B. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO DO MOTOR B	
81	
ANEXO C. INCERTEZA DOS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO	91
ANEXO D. EQUIPAMENTOS AUXILIARES.....	93

Índice de Figuras

Figura 1	Idade dos motores numa amostra de 4142 unidades na industria Suíça [6].	6
Figura 2	Evolução das classes de eficiência energética de motores elétricos.	7
Figura 3	Classes de eficiência de motores de 50 Hz e 4 polos [9].	8
Figura 4	Evolução dos requisitos mínimos de motores no mercado europeu [12].	9
Figura 5	Desenho em corte de um motor de indução com rotor em gaiola de esquilo.	13
Figura 6	Diagrama energético do motor de indução trifásico	13
Figura 7	Curva de magnetização e ciclo histerético [18].	14
Figura 8	Número de documentos de trabalho dedicados ao cálculo e medição das perdas suplementares no século XX [19].	16
Figura 9	Fluxograma de determinação do rendimento pelo método A.	20
Figura 10	Fluxograma de determinação do rendimento pelo método B.	22
Figura 11	Perdas suplementares atribuídas pelo método C.	24
Figura 12	Modelo T do circuito equivalente.	27
Figura 13	Fluxograma de determinação do rendimento pelo método H.	28
Figura 14	Limites de tensão e frequência para motores[29].	30
Figura 15	Calibração do termopar no multímetro Fluke 185.	33
Figura 16	Fotografias do motor A (à esquerda) e do motor B (à direita).	34
Figura 17	Fluxograma geral dos ensaios realizados para determinação das perdas e rendimento do motor A e B.	35

Figura 18	Localização do termopar no interior dos enrolamentos da bobinagem do motor A.	36
Figura 19	Localização do termopar encostado à face exterior do estator do motor B.	36
Figura 20	Esquema do ensaio em carga.	37
Figura 21	Fotografia do ensaio em carga.	37
Figura 22	Ensaio de estabilização térmica do motor A.	39
Figura 23	Ensaio de estabilização térmica do motor B.	39
Figura 24	Termografia do motor A.	40
Figura 25	Termografia do motor B.	40
Figura 26	Variação da resistência e da temperatura do enrolamento após desligamento do motor A.	41
Figura 27	Atribuição do valor da resistência no ensaio da curva de carga do motor A.	43
Figura 28	Esquema do ensaio em vazio.	45
Figura 29	Extrapolação das perdas mecânicas através das perdas constantes.	46
Figura 30	Interpolação das perdas no ferro com a tensão interna, U_i .	47
Figura 31	Perdas suplementares corrigidas do motor A.	49
Figura 32	Perdas suplementares corrigidas do motor B.	49
Figura 33	Esquema de ligação dos enrolamentos do motor no ensaio Eh-Star.	51
Figura 34	Esquema do ensaio Eh-Star.	51
Figura 35	Tensões de alimentação do motor A e B no ensaio Eh-Star no ponto 105 % de I_t .	53

Figura 36	Componentes direta e inversa do motor A e B no ensaio Eh-Star no ponto de 105 % de I_t .	56
Figura 37	Perdas suplementares corrigidas pelo método Eh-Star do motor A (resistência R' eh fixa a 62.5 Ω).	58
Figura 38	Perdas suplementares corrigidas pelo ensaio eh-star com o ponto a 125% removido do motor A (resistência R' eh fixa a 62.5 Ω).	59
Figura 39	Ventiladores do motor A e do motor B.	62
Figura 40	Fotografia termografia da tampa e do rolamento dianteiro do motor A.	63
Figura 41	Fotografia termografia da tampa e do rolamento dianteiro do motor A.	63
Figura 42	Perdas suplementares corrigidas pelo ensaio eh-star com o ponto a 75 % removido do motor A (resistência R' eh variável de 20 a 62.5 Ω)	64
Figura 43	Perdas do motor A no ensaio da curva de carga.	65

Índice de Tabelas

Tabela 1	Tolerâncias dos valores declarados no motor de indução[14].	11
Tabela 2	Métodos de ensaio preferenciais de máquinas de indução.	19
Tabela 3	Requisitos dos equipamentos de medição na IEC 60030-2-1 (2ª edição) e IEEE 112.	33
Tabela 4	Características estipuladas com ligação em triângulo do motor A e do motor B.	38
Tabela 5	Intervalo de tempo máximo após corte da alimentação.	41
Tabela 6	Componentes direta e inversa das potências transferidas no entreferro do motor A.	57
Tabela 7	Resumo de resultados, dos valores de perdas e rendimento do motor A e B no ponto de carga a 100 %.	60
Tabela 8	Incerteza do valor do rendimento calculado com base no método A.	61
Tabela 9	Limites mínimos das classes de eficiência de motores de 1,1 kW, 4 polos e 50 Hz.	66

Símbolos e Abreviaturas

$\cos(\varphi)$	– Fator de potência	
f	– Frequência de alimentação	Hz
B	– Densidade de fluxo magnético	T
H	– Intensidade de campo magnético	A.esp/m
I	– Corrente média de linha	A
k_{θ}	– Fator de correção da temperatura	
n	– Velocidade de funcionamento	r.p.m.
p	– Número de pares de polos	
p_c	– Perdas constantes	W
p_e	– Perdas elétricas no estator	W
p_r	– Perdas elétricas no rotor	W
p_{fe}	– Perdas no ferro	W
p_s	– Perdas suplementares	W
p_m	– Perdas mecânicas (atrito e ventilação)	W
p_T	– Perdas totais	W
P_0	– Potência de entrada (absorvida) em vazio	W
P_1	– Potência de entrada (absorvida)	W
P_2	– Potência de saída (fornecida)	W
P_{el}	– Potência elétrica	

P_m	– Potência mecânica	W
R_{ll}	– Resistência média entre pares de terminais de fase	Ω
R	– Resistência média de fase	Ω
s	– Deslizamento, em valor relativo da velocidade síncrona	
T	– Binário da máquina	N m
U	– Tensão média nos terminais	V
U_0	– Tensão média nos terminais em vazio	V
U_N	– Tensão estipulada nos terminais	V
$\underline{Z}=\underline{R}+j\underline{X}$	– Indicativo de uma grandeza complexa (exemplo: impedância)	
$Z= \underline{Z} $	– Modulo de uma grandeza complexa (exemplo: impedância)	
Z'	– Indicativo de número real	
Z''	– Indicativo de uma grandeza imaginária	
η	– Rendimento	
θ_0	– Temperatura inicial dos enrolamentos	$^{\circ}\text{C}$
θ_a	– Temperatura ambiente	$^{\circ}\text{C}$
θ_c	– Temperatura de entrada do fluido de arrefecimento primário	$^{\circ}\text{C}$
θ_e	– Temperatura dos enrolamentos	$^{\circ}\text{C}$
U, V, W	– Designação das fases	

Acrónimos

- CEMEP – Comité Europeu de Fabricantes de Máquina Eléctricas
- UE – União Europeia
- IE – Índice de Eficiência
- AEI – Agência de Energia Internacional
- IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (*Internacional Electrotechnical Commission*)
- IEEE – Instituto de Engenheiros Eléctricos e Electrónicos
- ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto
- MIT – Motor de Indução Trifásico

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente competitividade nas economias e prosperidade das comunidades, à semelhança da evolução tecnológica e social, tornaram a humanidade dependente da energia elétrica. Nos últimos anos, verificou-se um aumento de produção de energia elétrica com recurso a energias renováveis. Apesar disso, continua a ser evidente a necessidade acentuada de recorrer à produção de energia elétrica com recurso a combustíveis fósseis, para garantir a continuidade e qualidade de serviço da rede elétrica. Porém, o planeta não apresenta recursos inesgotáveis, e é de salientar que 40 % da emissão de gases de efeito de estufa é originada pela produção de energia elétrica, que cada vez mais, contribui para o agravamento do efeito de estufa que afeta o planeta Terra [1]. Para combater o uso excessivo de recursos e poluição atmosférica do nosso planeta, foram traçadas metas na União Europeia (UE), que se regem pela utilização racional de energia e redução de consumos, resultando no fortalecimento do conceito de eficiência energética em produtos, edifícios e transportes [2].

Numa análise à escala global, é estimado pela Agência Internacional de Energia (AEI) que os sistemas acionados por motores elétricos são responsáveis por 46 % da utilização de energia elétrica, duplicando o segundo maior consumidor, a iluminação [3]. A grande maioria das aplicações industriais de força-motriz assenta em Motores de Indução Trifásicos

(MIT), pelo que o seu rendimento tem um impacto determinante no consumo global de energia [3]. Considerando todo o ciclo-de vida do motor, os valores típicos de consumos de energia elétrica rondam os 95 % do total de custos, ou seja o valor de consumo de energia elétrica superioriza em 20 vezes o custo de investimento, e por esse motivo, é providencial implementar uma estratégia para encorajar o aproveitamento do potencial de redução de consumo dos motores elétricos [3]. A publicação da norma IEC 60034-30 em 2014 é disso exemplo, onde é definido um sistema universal de classificação do rendimento nominal, com a atribuição do Índice de Eficiência (IE) [4]. Esta classificação está diretamente associada ao rendimento estipulado da máquina, o qual pode ser determinado por um dos métodos expostos na também recente norma IEC2, também publicada no ano de 2014, fazendo retificações à 1ª edição de 2007. Com efeito, a determinação do rendimento não está submetida a uma única metodologia, e este é um assunto onde a reunião de consensos não tem sido fácil. Deve-se muito à dificuldade histórica da classificação e quantificação das perdas suplementares, que tem influência direta na determinação do rendimento dos MIT, a máquina de conversão eletromecânica rotativa mais utilizada na indústria, à escala global.

Neste contexto, esta dissertação avalia os principais métodos de determinação das perdas e do rendimento do MIT expostos na norma IEC2, com ênfase nas diferentes metodologias de determinação das perdas suplementares. Após análise dos valores das perdas e dos rendimentos obtidos dos ensaios de dois motores de 1.1 kW, com classes de eficiência distintas, observa-se que com a aplicação de diferentes métodos, obtêm-se diferentes resultados no rendimento. Das três metodologias implementadas, de determinação do rendimento através de ensaios indiretos, a diferença que os distingue é a forma como são determinadas as perdas suplementares. Para além destas três metodologias, foi também realizado o ensaio direto de determinação do rendimento.

A classificação do rendimento do motor elétrico depende do rendimento determinado pelo fabricante. Contudo, a simples diferença de uma unidade percentual entre métodos poderá ditar a atribuição de uma classe de eficiência superior ou inferior.

1.2. OBJETIVOS

Os principais objetivos da dissertação são os seguintes:

- Identificação e implementação de métodos normalizados para a determinação das perdas e do rendimento de MIT;
- Caracterização das componentes de perdas, e influência das perdas suplementares no resultado final do rendimento;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo e tratamentos de resultados, para a implementação das metodologias de determinação do rendimento, (*Microsoft Excel*);
- Análise crítica e comparativa dos resultados de rendimento e perdas obtidas tendo em conta as metodologias consideradas.

1.3. PLANEAMENTO

O planeamento de todo o trabalho foi dividido em três fases principais, a fase preparatória à realização dos ensaios, a fase experimental de elaboração dos mesmos e a fase de análise dos resultados e elaboração do relatório final. Nas três seguintes subsecções, são expostas as principais tarefas de cada fase.

1.3.1. FASE PREPARATÓRIA:

Previamente à realização dos ensaios, foram colocadas em prática as seguintes tarefas:

- Estudo aprofundado do conteúdo da norma IEC 60034-2-1 (2ª edição), e o conjunto de normas que auxiliam a sua análise:
 - IEC 60034-2-1: Máquinas elétricas rotativas parte 2, edição 2: Métodos normalizados para determinação de perdas e de rendimento a partir de ensaios;
 - IEC 60034-1: Máquinas elétricas rotativas parte 1, edição 11: Características estipuladas e características de funcionamento;
 - IEC 60034-30: Máquinas elétricas rotativas parte 30, edição 1: Classes de rendimento de motores AC (Código IE).
- Estudo e seleção dos métodos a implementar e identificação dos requisitos de ensaio;
- Levantamento e análise dos equipamentos e motores disponíveis no laboratório de máquinas elétricas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP);
- Verificação e validação dos equipamentos e aparelhos de medição a utilizar no desenvolvimento dos ensaios, de acordo com os requisitos dos ensaios identificados.

1.3.2. FASE EXPERIMENTAL:

Posteriormente ao trabalho prévio de preparação dos ensaios, reuniram-se as condições para proceder à fase experimental da dissertação, compreendendo as seguintes tarefas:

- Desenvolvimento da ferramenta computacional, com vista à execução dos métodos expostos na norma IEC2.
- Execução dos ensaios para determinação das perdas e rendimento do MIT;

1.3.3. FASE DE ANÁLISE DE RESULTADOS E ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO FINAL

A dar seguimento aos ensaios e resultados obtidos, foram executadas as seguintes tarefas:

- Pesquisa e análise bibliográfica de informação, estatísticas, factos da atualidade do motor elétrico, e outros com vista ao auxílio da elaboração do relatório final;
- Procura de conteúdo informativo e científico de fabricantes de motores, de artigos, estudos experimentais, trabalhos de investigação, livros, e outros, tendo em vista o enquadramento e justificação dos resultados experimentais obtidos;
- Análise crítica e comparativa dos resultados das perdas convencionais, perdas suplementares e do rendimento dos MIT estudados;
- Redação do relatório final.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No que diz respeito à organização do relatório, no capítulo 2, é contextualizada o propósito da dissertação, fazendo referência aos consumos de energia elétrica do motor elétrico e a relevância do seu rendimento. A par disso, é ilustrada a evolução legislativa na UE no âmbito dos métodos normalizados para a determinação do rendimento. São também classificadas as componentes de perdas do motor de indução trifásico, e os métodos expostos na norma IEC2. No capítulo seguinte, 3, são descritos os requisitos para a elaboração dos ensaios, os procedimentos dos ensaios realizados experimentalmente, e as metodologias de cálculo de determinação das perdas e do rendimento. No capítulo 4, é elaborada uma análise crítica e comparativa aos resultados dos métodos experimentalmente implementados. Por fim, no capítulo 5, são expostas as principais conclusões do trabalho. Em anexo, são exibidos os resultados dos cálculos efetuados, e ainda a análise à classe de precisão dos equipamentos de metrologia.

2. O MOTOR ELÉTRICO E O SEU RENDIMENTO

2.1. CONSUMOS DO MOTOR ELÉTRICO NO MUNDO

Num documento de trabalho elaborado pela AEI em 2011, com a colaboração dos então 28 países membros e da comissão europeia, é estimado que os sistemas acionados por motores elétricos são responsáveis por 46 % da utilização global de energia elétrica [3]. Os sistemas de acionamentos eletromecânicos podem ser compostos por variadores de velocidade, transmissões, cintas, travões, compressores, bombas, ventiladores, entre muitos outros componentes auxiliares, mas tipicamente, o motor é responsável pelo consumo de 2/3 da energia elétrica, o que permite apurar, que o motor elétrico é responsável por cerca de 30 % do consumo de energia elétrica mundial [5], [6].

Em muitos países, os motores atualmente em uso são motores envelhecidos, que ultrapassam em muitos anos o seu tempo de vida útil expectável, implicando uma deterioração mais ou menos acentuada das suas características. A sua deterioração provoca também ineficiência no sistema, agravado por existir a possibilidade de substituição pela tecnologia atual, mais madura e eficiente face à anterior. Uma análise efetuada na Suíça, de mais de 4000 sistemas acionados por motores, é reveladora que existe uma grande fração desta amostra que está antiquada e ineficiente, ultrapassando em décadas o seu tempo de vida útil expectável, tal como é possível verificar a partir da figura 1 [6].

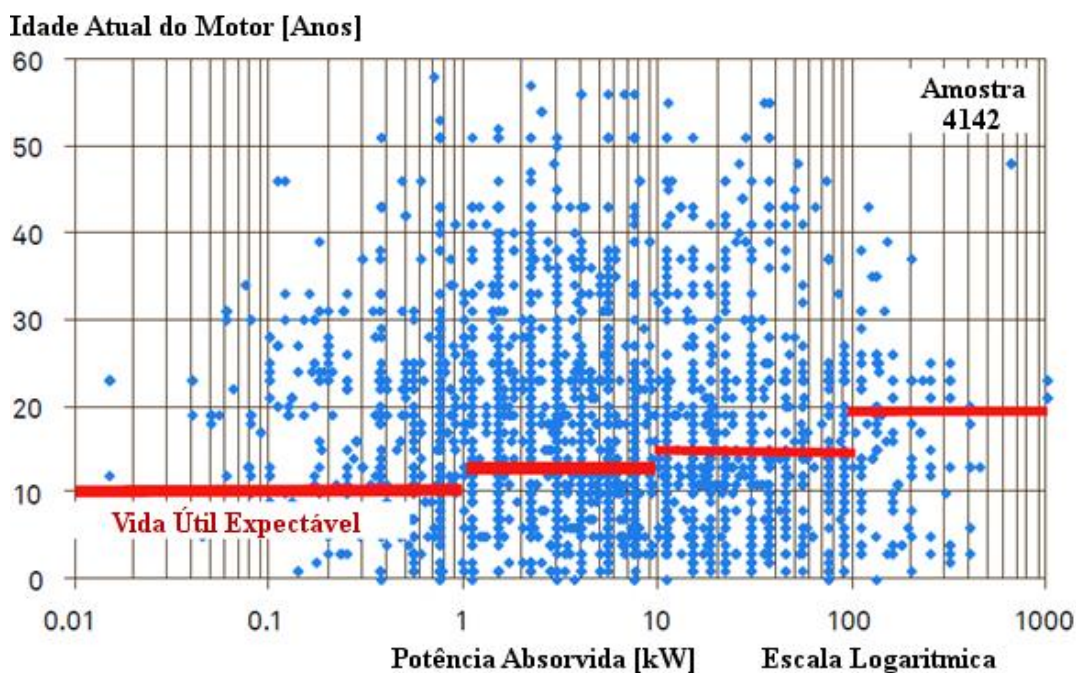


Figura 1 Idade dos motores numa amostra de 4142 unidades na industria Suíça [6].

De realçar o facto que 56 % dos motores analisados ultrapassam o tempo de vida útil expectável. Este é apenas um exemplo pontual, que poderá ser extensível a muitos outros países, contudo, poderão verificar-se diferenças significativas. De acordo com a AEI, se não forem colocadas em prática políticas e medidas de redução de consumo, é avaliado que em 2030 o consumo de energia elétrica aumente consideravelmente. No entanto, é previsto, que com a implementação das medidas de redução de consumo, seja atingida uma poupança total até 2030 de 24 000 TWh de energia elétrica, evitados 16 Gt de emissões de CO₂ para a atmosfera e uma redução de custos de 1.5 triliões de euros [7].

2.2. BARREIRAS À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS MOTORES

A União Europeia identificou a necessidade de implementar políticas que consideram a melhoria da eficiência dos sistemas acionados por motores. No entanto, estas medidas poderiam e deveriam ser implementadas por iniciativa do próprio utilizador, pois é um investimento que demonstra grande viabilidade económica [5]. Existem vários motivos identificados para a resistência dos utilizadores neste investimento, entre os quais, e mais significativos, a dificuldade de adoção da análise de custos numa perspetiva ampla a todo o ciclo de vida, e não apenas focado no investimento. Também é notória a falta de renovação de aplicações, que continuam em funcionamento após o seu tempo de vida útil. De acordo

com estimativas da AEI, o potencial de redução de consumo motivado pela troca dos motores de indução em funcionamento pela atual tecnologia disponível, é cerca de 70 % do potencial total de redução do consumo de sistemas acionados por motores. Esta renovação, traduziria uma redução do consumo de energia elétrica em motores de 14 % [6].

2.3. CLASSES DE EFICIÊNCIA

Numa retrospectiva da evolução da classificação da eficiência energética de MIT, denota-se um aumento gradual da capacidade dos fabricantes em fornecer motores com maior rendimento, sustentada pelo acordo voluntário do Comité Europeu de Fabricantes de Máquinas Elétricas (CEMEP) estabelecido em 1999, o qual definiu três classe de eficiência, EFF3, EFF2 e EFF1 [8]. Posteriormente, em 2007, a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) publicou uma norma internacional comum, a IEC 60034-30, com o objetivo de uniformizar a classificação do MIT, a partir das classes IE (Índice de Eficiência) 1, 2 e 3. Com o amadurecimento da tecnologia proporcionado pela melhoria das técnicas de fabrico dos motores elétricos, bem como a utilização de materiais de melhor condutividade elétrica, térmica e ferromagnética, designs melhorados, entre outras melhorias, a classe IE4 surgiu na recente norma, IEC 60034-30-1, publicada em 2014. Uma novidade importante é o facto de a classificação apresentada abranger motores elétricos de corrente alternada, não somente MIT. É até colocada a hipótese, de numa posterior edição, incorporar a classe de eficiência IE5. Na figura 2, são ilustradas as classes de eficiência atribuídas pelas antigas e pelas recentes normas da IEC.

São definidos na norma IEC 60034-30-1 os valores mínimos de rendimento para atribuição de cada classe de eficiência, de acordo com o número de pares de polos, frequência e potência útil da máquina. A versão da norma atualmente em vigor, aumentou a sua abrangência de motores de indução para motores de corrente alternada, que resultam num maior número de tipologias de motores, bem como no aumento da gama de potências e a inclusão da classe IE4.



Figura 2 Evolução das classes de eficiência energética de motores elétricos.

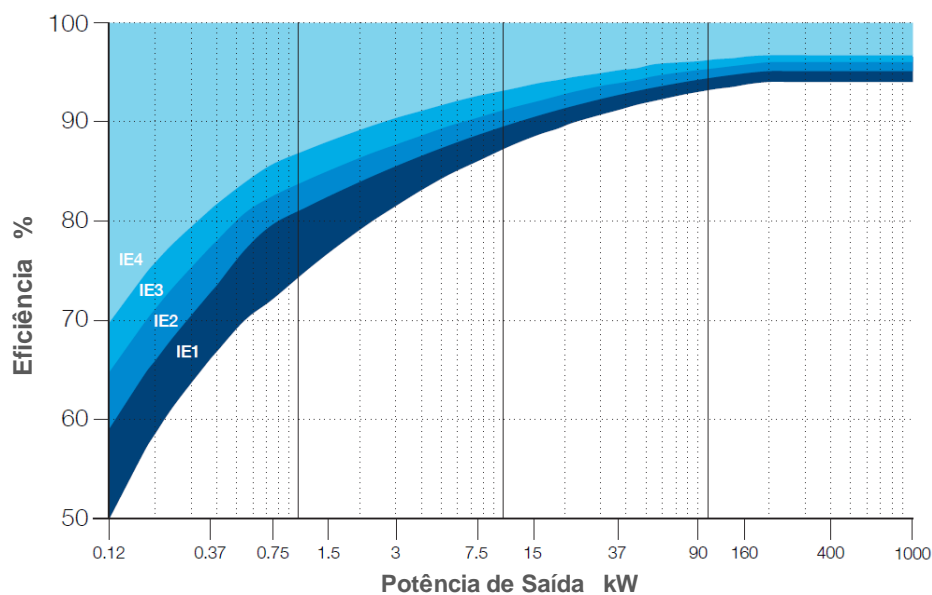


Figura 3 Classes de eficiência de motores de 50 Hz e 4 polos [9].

A exemplo da classificação energética atualmente em vigor, são ilustrados no gráfico da figura 3, na gama de potências de 0.12 kW até 1000 kW, os requisitos mínimos para a classes de eficiência de um motor de indução de 4 polos e frequência estipulada de 50 Hz. A atribuição do valor de rendimento na UE é determinada por métodos de ensaio expostos na norma IEC2, no entanto, atualmente não é apresentado um método que reúna consensos quanto à determinação das perdas suplementares. Este é assunto em que são evidentes as dificuldades, mesmo considerando que existiu uma evolução da norma, sustentada pelo conhecimento dos fabricantes, pela investigação e pelo amadurecimento da tecnologia. A revisão da norma IEC 60034-30-1, reforça o esforço feito na implementação de meios normativos de apoio às políticas de redução de consumos e eficiência energética.

2.4. EVOLUÇÃO LEGISLATIVA NO MERCADO EUROPEU

Para combater a estagnação e a visão a curto prazo, a União Europeia, através da implementação da diretiva 2005/32/CE, definiu requisitos ecológicos aos produtos consumidores de energia, com o objetivo de garantir a livre circulação destes no mercado europeu [10]. Neste âmbito, na União Europeia integram-se os sistemas acionados por motores elétricos através da diretiva 640/2009, em conjunto com a emenda 4/2014, que têm como objetivo a redução do consumo de energia elétrica, de recursos para a sua produção e a consequente diminuição de emissões de CO₂ [11], [12].

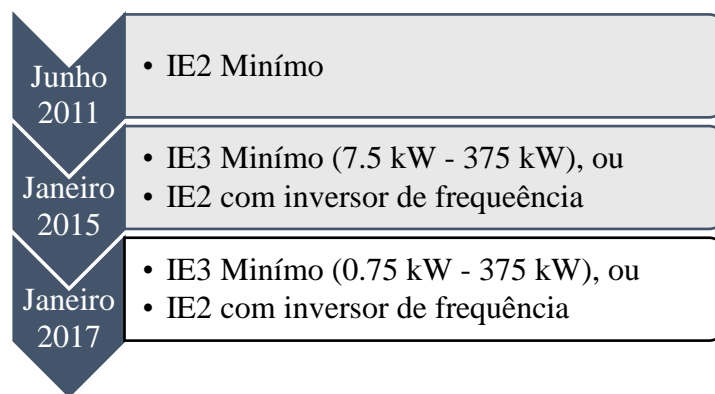


Figura 4 Evolução dos requisitos mínimos de motores no mercado europeu [12].

Assim, é traçado claramente um planeamento com objetivos claros de redução de consumo, incorporando metas e regras a serem alcançadas progressivamente ao longo desta década. A figura 4 ilustra a calendarização das classes de eficiência mínimas para a comercialização na UE de motores elétricos trifásicos do tipo gaiola de esquilo com características padronizadas, tais como:

- Número de polos igual a 2, 4 ou 6;
- Motores de uma velocidade;
- Motores com tensão nominal até 1000 V;
- Serviço contínuo de funcionamento.

O aumento da procura de motores de alto rendimento resulta do aumento dos requisitos de comercialização no mercado europeu, e conseqüentemente da diminuição do custo produtivo do motor elétrico de corrente alternada e do aumento do conhecimento das causas que originam um mau rendimento do motor. No futuro, é de se prever a evolução destes requisitos para classes de eficiência superiores, como já é exemplo a comercialização de motores da classe IE4.

2.5. EVOLUÇÃO DAS NORMAS DE DETERMINAÇÃO DE RENDIMENTO

A determinação do rendimento de motores elétricos apresenta um histórico de normas publicas desde o inicio do século passado. De forma a perceber o historial desta legislação emitidas pela IEC, é de seguida indicada a evolução temporal das normas adotadas para determinação do rendimento:

- Máquinas Elétricas Rotativas Parte 2 (1972): Métodos para determinação de perdas e rendimento de máquinas elétricas rotativas através de ensaios (excluindo máquinas para veículos de tração);
- IEC 60034-2 Emenda 1 (1995);
- IEC 60034-2 Emenda 2 (1996);
- IEC 61972 (2002): Métodos para a determinação das perdas e do rendimento de motores de indução trifásicos;
- IEC 60034-2-1 (2007): Máquinas elétricas rotativas, métodos para determinação de perdas e rendimento a partir de ensaios (excluindo máquinas para veículos de tração);
- IEC 60034-2-1 Parte 2 (2014): Máquinas elétricas rotativas, métodos para determinação das perdas e rendimento a partir de ensaios (excluindo máquinas para veículos de tração);

É de assinalar, relativamente à norma atualmente em vigor, face às anteriores, que existiram três melhorias significativas. A primeira prende-se com a organização do conteúdo e a forma como foi reestruturada, permitindo ao leitor, que na maioria das vezes é o fabricante, uma interpretação e leitura fluída, com auxílio a fluxogramas, descrições dos procedimentos de ensaio e respetivos cálculos analíticos para a determinação do rendimento. A segunda melhoria identificada, é originada pelo aumento qualitativo dos requisitos da aparelhagem de medição necessária nos ensaios, ou seja, foram introduzidos requisitos que permitem reduzir a incerteza dos aparelhos e consequentemente introduzem um erro menor no resultado final. A terceira melhoria e talvez a mais significativa na ótica deste trabalho, mas já tida em consideração na versão de 2007, prende-se com a inclusão de três métodos para a determinação das perdas suplementares, ao contrário do que era anteriormente descrito, em que a sua determinação estava limitada à atribuição de 0.5 % da potência absorvida pela máquina. Este valor atribuído de 0.5 % no valor das perdas suplementares permaneceu inalterado durante três décadas, apesar das críticas e das diferenças notadas que influenciavam o resultado final do rendimento [13]. No entanto, na perspetiva da competitividade dos mercados, este não era um modelo aceitável, pois os mercados que adotavam a norma europeia, eram favorecidos face a outros, devido à depreciação das perdas suplementares.

Tabela 1 Tolerâncias dos valores declarados no motor de indução[14].

Item	Quantidade	Tolerância
1	Rendimento: Motor \leq 150 kW	-15 % de $(1-\eta)$
	Motor $>$ 150 kW	-10 % de $(1-\eta)$
2	Perdas totais	+ 10 % das perdas totais

Para além da incerteza dos métodos de determinação das perdas e do rendimento declarados na norma IEC2, o valor de rendimento declarado na placa de características está afeto a uma tolerância, que poderá influenciar a classificação do índice de eficiência. Os valores destas tolerâncias são definidos na norma IEC 60034-1 de acordo com a potência da máquina, tal como é possível observar na tabela 1. Em determinadas gamas de potência e para índices de eficiência mais altos, os valores de rendimento chegam a superar os 95 %, portanto, é providencial a correta escolha do método de determinação do rendimento, a utilização dos aparelhos de medição com a classe de precisão requisitada e a execução dos procedimentos tal como descritos, pois o mínimo desvio no resultado poderá ter um peso significativo no investimento e no consumo do motor. De fabricante para fabricante de motores elétricos, poderão haver diferenças mínimas, no entanto estas deverão ser atenuadas se o correto cumprimento e execução das normas for tido em consideração. O contrário deverá ser evitado, pois um motor de características idênticas, comprado a dois fabricantes que seguem a mesma legislação deverá ser classificado de igual forma, de forma a promover a correta competitividade dos mercados, e não disparidade de preços.

No seguinte tópico, a par da caracterização do motor de indução, que é o tipo de motor escolhido para a realização deste trabalho, é também apresentada uma descrição detalhada da origem e das causas dos cinco diferentes tipos do motor elétrico.

2.6. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E CARACTERIZAÇÃO DAS PERDAS

A elevada utilização do motor de indução com rotor em gaiola de esquilo em comparação às restantes tipologias de máquinas elétricas rotativas, a par da multiplicidade de aplicações e robustez, foram fatores significativos na escolha do tipo de motor alvo de caracterização e estudo ao longo deste trabalho [3], [7].

O motor de indução foi desenvolvido por Nikola Tesla e a sua patente ficou registada no ano de 1888 [15]. O MIT é uma máquina elétrica rotativa que transforma energia elétrica em energia mecânica através do fenómeno de indução eletromagnética. As bobinas correspondentes a cada fase são deslocadas entre si 120° elétricos e distribuídas ao longo das ranhuras do estator. Esta distribuição proporciona a formação de três campos magnéticos pulsantes centrados no eixo de cada fase, cuja distribuição no espaço apresenta a forma de onda sinusoidal. Pelo teorema de Ferraris, é demonstrado que a soma dos três campos magnéticos, origina um campo rotacional ao longo do entreferro de amplitude máxima constante, denominado de campo girante [16]. Por consequência da variação do fluxo magnético criado pelo campo girante, e segundo a lei de Faraday, são induzidas forças eletromotrizes nos circuitos elétricos. Assim são originadas correntes a circular no rotor com as barras curto-circuitadas a partir de anéis nas extremidades, o qual é chamado de rotor em gaiola de esquilo. De acordo com a lei de Laplace, um condutor, neste caso as barras do rotor, percorrido por uma corrente no seio de um campo magnético é submetido a uma força que o fará descolar, originando assim binário motor. Pela lei de Lenz, a força eletromotriz induzida fará com que a corrente que circula nos condutores elétricos apresente sempre um sentido, que o seu efeito magnético se oporá à variação que o produziu [17]. Em normal funcionamento, no MIT a velocidade do rotor nunca atingirá a velocidade de sincronismo, e se estas se iguallassem, não seria induzida nenhuma força eletromotriz no rotor.

Relativamente aos componentes do MIT com rotor em gaiola de esquilo é usual ser constituído, tal como apresenta a figura 5, por:

- Estator:
 - Circuito magnético;
 - Bobinagem estatórica;
- Rotor:
 - Circuito magnético;
 - Barras e anéis que constituem a gaiola de esquilo;
 - Veio;
- Rolamentos;
- Tampas;
- Ventiladores;
- Carcaça e caixa de ligações;



Figura 5 Desenho em corte de um motor de indução com rotor em gaiola de esquilo.

No MIT, tal como nas restantes máquinas elétricas rotativas, a energia elétrica fornecida não iguala a potência mecânica transferida para o veio. Isto acontece devido às perdas que se manifestam no funcionamento da máquina, tal como é explícito no diagrama da figura 6. O conhecimento das perdas que fazem parte do fluxo energético do motor elétrico e das suas causas são fundamentais para a melhoria da eficiência do motor, possibilitando a avaliação de materiais, suas características, melhorias no projeto e das técnicas de fabrico. Serão de seguida descritas, as diversas componentes de perdas, inclusive as perdas convencionais, em que existe um consenso quanto às causas que o originam, e as perdas suplementares, verificando-se que existem autores que sustentam diferentes origens para o seu aparecimento.

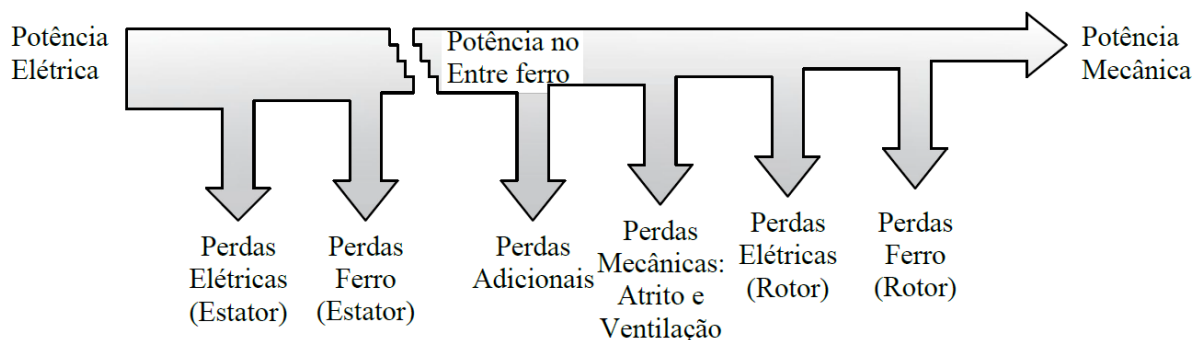


Figura 6 Diagrama energético do motor de indução trifásico

2.6.1. PERDAS ELÉTRICAS

Também denominadas como perdas no cobre, ou perdas por efeito de joule, estas são manifestadas pela dissipação de calor, originada pela circulação de corrente elétrica nos condutores da máquina.

A corrente elétrica flui desde a chegada da alimentação nos terminais da caixa de ligação, cabos e ligações, e percorre todos os fios condutores dos enrolamentos que preenchem as ranhuras do estator. Também no rotor em gaiola de esquilo, estas manifestam-se nas barras de cobre e nos anéis de curto circuito. Fatores como o enchimento das ranhuras, o número de espiras, a secção dos fios condutores, a secção dos cabos de ligação entre a bobina e a caixa de ligações, os terminais e as ligações executadas, influenciam de forma quantitativa as perdas elétricas no estator, devido à resistência, que depende do comprimento, da secção e da resistividade do condutor elétrico. As perdas elétricas, p_{el} , são proporcionais à resistência, R , e ao quadrado da corrente elétrica, I , tal como indica a expressão seguinte

$$p_{el} = R \times I^2 \quad (1)$$

2.6.2. PERDAS NO FERRO

A formação de um circuito magnético é essencial no funcionamento da máquina elétrica, utilizando-se material ferromagnético como o ferro, que assegura uma boa permeabilidade magnética. A permeabilidade do material, a par da geometria do rotor e do estator, assumem um papel preponderante no funcionamento da máquina [17]. No entanto, devido as propriedades destes materiais, estes não apresentam características ideais, que é evidente através da curva de magnetização de materiais ferromagnéticos, tal como é exposta na curva a tracejado da figura 7, deste o ponto 0 até ao ponto 1.

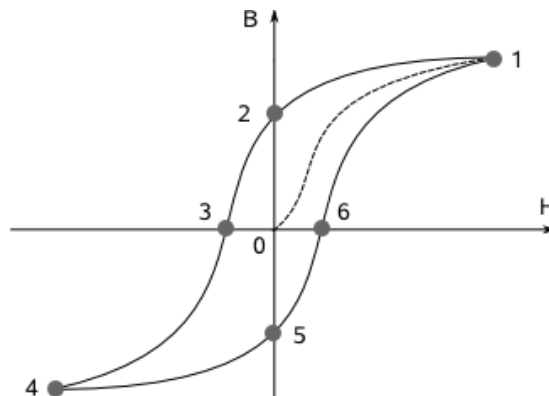


Figura 7 Curva de magnetização e ciclo histerético [18].

O aumento gradual da densidade de fluxo magnética, B , num material ferromagnético, originado pela excitação magnética, H , não apresenta uma variação linear, tal como ilustra a curva de magnetização. A par disso, o material ferromagnético pode ser sujeito ao fenómeno de saturação para valores de excitação magnética elevados, em que a relutância do material passa a ser elevada, tal fenómeno evidencia-se a partir do ponto 1 da figura 7.

Considerando uma variação lenta da excitação magnética, de forma de onda sinusoidal e a desmagnetização do material ferromagnético num estado inicial, a densidade de fluxo desse mesmo material apresentaria a evolução desde o ponto 0 até 6 e tornava a voltar para um valor muito próximo da densidade verificada no ponto 1. Este ciclo é denominado de ciclo histerético. No fenómeno de histerese verifica-se que a densidade de fluxo se apresenta em atraso em relação à excitação magnética e quanto maior for a área do ciclo histerético maior são as perdas devido à histerese [17].

Outras das causas que originam perdas no material ferromagnético é a variação rápida de densidade de fluxo no mesmo, que provoca o aparecimento de uma força eletromotriz induzida, e conseqüentemente correntes induzidas, as quais são designadas de correntes de Foucault. A circulação de correntes de Foucault causam aquecimento no ferro, e por esse motivo, o estator e o rotor apresentam chapas magnéticas de espessura reduzida e isoladas entre si, de forma a reduzir a secção, que conseqüentemente aumenta a resistência elétrica e atenuam as perdas de corrente de Foucault[17].

As perdas no ferro, p_{fe} , são então obtidas pelo somatório das perdas de histerese, p_H , e das perdas de correntes de Foucault, p_{cF} , tal como indica a expressão 2.

$$p_{fe} = p_H + p_{cF} \quad (2)$$

2.6.3. PERDAS MECÂNICAS (DE ATRITO E VENTILAÇÃO)

O motor de indução é uma máquina de conversão eletromecânica rotativa, constituído pelo estator (parte fixa) e pelo rotor (parte móvel). O rotor é assente sobre rolamentos montados nas duas tampas nas extremidades. Devido ao movimento rotacional do rotor nos rolamentos, é causada fricção entre os anéis e as esferas dos rolamentos, originando perdas e aquecimento devido ao atrito mecânico.

Os motores normalmente são equipados com ventiladores no seu veio, que têm como função a refrigeração, auxiliando a dissipação do calor do interior do motor para o exterior, mas aumentando assim as perdas mecânicas. As perdas mecânicas, p_m , dependem essencialmente da velocidade de funcionamento, e são o conjunto das perdas de atrito, p_a , e as perdas de ventilação, p_v .

$$p_m = p_a + p_v \quad (3)$$

2.6.4. PERDAS SUPLEMENTARES OU ADICIONAIS

Pela diferença entre a potência absorvida, a potência útil, e as componentes de perdas acima descritas, é possível identificar a existência de mais uma parcela de perdas, as quais são denominadas perdas suplementares ou adicionais. A identificação de uma metodologia de cálculo com vista à determinação direta das perdas suplementares verifica-se como um dos mais difíceis problemas na caracterização das perdas do motor de indução e consequentemente, esta complexidade é transparecida na incerteza no resultado do rendimento. Esta dificuldade foi detetada e explorada ao longo de todo o século passado, no entanto, permaneceu o estado de resignação de que não havia real conhecimento das perdas suplementares e hoje em dia continua a não existir nenhum método mundialmente aceite. A exemplo do trabalho efetuado no século passado, é exposto o gráfico na figura 8, que ilustra o número reduzido de artigos desenvolvidos.

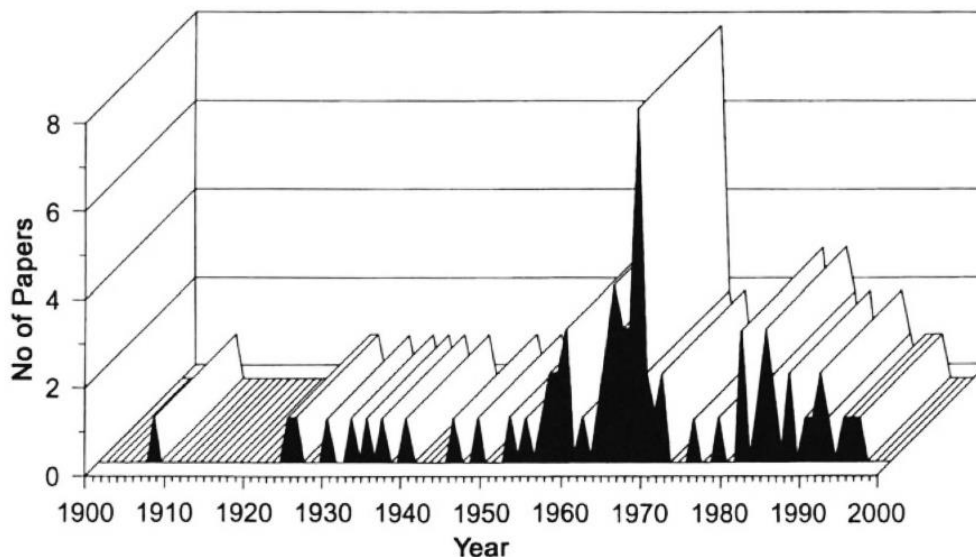


Figura 8 Número de documentos de trabalho dedicados ao cálculo e medição das perdas suplementares no século XX [19].

Apesar da inexistência de dados estatísticos, no século XXI, houve um aumento de trabalhos desenvolvidos abrangendo a determinação das perdas suplementares e do rendimento, ensaios experimentais, trabalhos de investigação e outros, como é exemplo [20]–[26].

São vários os autores e os métodos expostos para a classificação e determinação das perdas suplementares. Serão expostas aqui as afirmações que detêm uma maior aceitação e reunião de consensos, referente à classificação das causas e impacto das perdas suplementares no funcionamento do motor de indução.

Desde os primeiros tempos em que as perdas suplementares foram identificadas, e de acordo com Smith [13], foi verificada a sua dependência com a carga, no entanto a sua exata natureza continuou desconhecida durante muitas décadas. Contudo com o desenvolvimento de novos estudos e aprofundamento do conhecimento do assunto, chegaram-se a novas conclusões.

Citando Neville Glew, que concorda com a dependência das perdas suplementares com a carga e adiciona que estas resultam da necessidade prática de ter de posicionar as bobinagens do rotor e do estator em ranhuras no material ferromagnético [19]. Segundo o mesmo autor, as perdas suplementares têm dois efeitos prejudiciais: o aquecimento adicional e a consequência de poderem reduzir o binário produzido pela máquina. Para além da necessidade de localizar os enrolamentos das bobinagens nos núcleos de ferro, outra das origens identificadas das perdas suplementares é a necessidade de ter ligações na bobinagem que facilitam a ligação entre os grupos de espiras nas ranhuras para permitir que a corrente percorra a bobinagem de forma distribuída [13]. Posteriormente, o modelo computacional dos elementos finitos permitiu um maior conhecimento do comportamento da máquina, em que foram identificados uma série de harmónicos que influenciam negativamente o campo no entreferro. São estes:

- Harmónicos da força magneto-motriz, que são produzidos devido ao tipo, ligações e geometria da bobinagem do estator. A frequência e ordem dos harmónicos dependem do numero de ranhuras;
- Harmónicos de permeabilidade, produzidos inteiramente e influenciados pelo número de ranhuras do estator e do rotor devido à reduzida permeabilidade magnética dos materiais condutores de eletricidade;

- Harmónicos de saturação, presentes quando as chapas ferromagnéticas são colocadas em funcionamento a níveis de densidade de fluxo que se encontram na zona de saturação.

Outra das causas identificadas e expondo a conhecimento de Alger, é a de que os processos de fabrico, como o torneamento das superfícies do entre-ferro e a variação do contacto das barras do rotor com o ferro podem afetar consideravelmente as perdas suplementares [19], [13].

De acordo com [26], [27], com base no motor analisado pelo método de cálculo dos elementos finitos, é clarificado que grande parte das perdas suplementares são originadas devido ao aumento dos harmónicos de perdas devidos à carga, que são os harmónicos das perdas elétricas do rotor e do estator, e os harmónicos das perdas do ferro do rotor e do estator.

A IEC2 define as perdas suplementares como as *“perdas produzidas pela corrente de carga no núcleo magnético e nas outras partes não metálicas, salvo condutores e perdas por correntes de Foucault nos condutores dos enrolamentos devidas às pulsações do fluxo causadas pela corrente de carga”*[28].

Apesar de em termos relativos a influência das perdas suplementares estarem sujeitas a uma pequena parcela em relação à potência total da máquina, este valor percentual poderá ter impacto na determinação da classe de eficiência, no custo de investimento inicial e no custo de operação ao longo do seu tempo de vida útil. Com o objetivo de explorar os métodos expostos na norma IEC2, é elaborada uma análise à possibilidade de implementação de algumas das suas metodologias no laboratório de máquinas do ISEP.

São expostos de seguida, os métodos, a descrição e os principais fundamentos dos ensaios de determinação do rendimento de motores de indução trifásicos na norma atualmente em vigor.

2.7. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO NA IEC2 DE MOTORES DE INDUÇÃO

A norma IEC2 inclui no seu conteúdo os métodos abaixo listados:

- Método A: Medição direta da entrada e da saída;
- Método B: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método das perdas residuais;
- Método C: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método das perdas atribuídas;
- Método D: Ensaio em oposição em paralelo sobre rede;
- Método E: Ensaio em oposição com alimentação única;
- Método F: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método do rotor removido e do ensaio de rotação inversa;
- Método G: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método do ensaio Eh-star;
- Método H: Determinação do rendimento a partir dos parâmetros do circuito equivalente.

Numa perspetiva de motores de indução trifásicos, a norma IEC2 indica preferência sobre três diferentes métodos, de acordo com o tipo ou a potência da máquina em estudo. Estes métodos de ensaio preferenciais são ilustrados na tabela 2 de acordo com o tipo de aplicação.

De seguida será exposta uma análise a todos os métodos, indicando quais os ensaios a implementar, e se estes serão ou não considerados no âmbito deste trabalho para a determinação das perdas e do rendimento, com particular atenção no que respeita às perdas suplementares.

Tabela 2 Métodos de ensaio preferenciais de máquinas de indução.

Método	Aplicação
Método A	Máquinas monofásicas
Método B	Máquinas trifásicas com potência até 2 MW
Método C	Máquinas trifásicas com potência superior a 2 MW

2.7.1. MÉTODO A: MEDIÇÃO DIRETA DA ENTRADA E DA SAÍDA

O motor deverá ser colocado em funcionamento em regime nominal, e após a estabilização da temperatura, as medições deverão ser realizadas e de seguida procede-se ao cálculo do rendimento, tal como é evidenciado no fluxograma da figura 9.

O método de determinação direta do rendimento, calcula o rendimento pelo quociente entre a potência útil e a potência absorvida. A potência útil que é disponibilizada no rotor, é determinada através do produto do binário motor, T , e da velocidade angular, w , tal como indicado na seguinte expressão 4.

$$P_m = 2 \times \pi \times T \times w \quad (4)$$

Assim, tal como referido anteriormente, o rendimento do motor η é obtido pelo quociente entre a potência mecânica, P_m , e a potência elétrica, P_{el} , tal como indica a expressão 5.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} \quad (5)$$

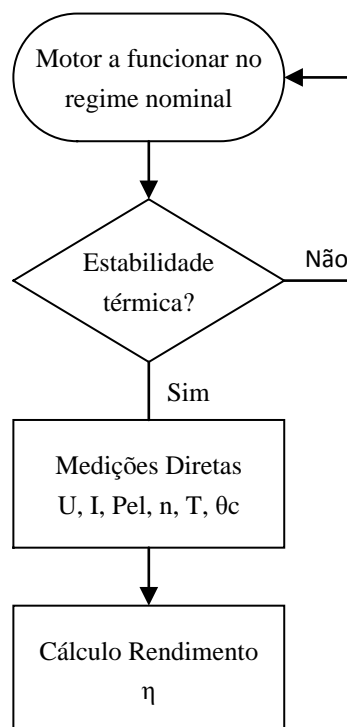


Figura 9 Fluxograma de determinação do rendimento pelo método A.

O ensaio de determinação direta do rendimento deverá ser efetuado com aparelhagem, de classe de precisão superior à exigida pelos restantes métodos, para a medição das grandezas elétricas, pois o erro numa leitura terá enorme influência no resultado. Por esse motivo, este método é classificado com grau de incerteza alto e não é considerado como método preferencial para motores de indução trifásicos. No entanto, este não é um veredicto aceite por todos os especialistas na área, pelo que foi mesmo alvo de investigação, se o método direto forma ou não uma fonte de incerteza superior face aos métodos indiretos de separação das perdas.

Numa análise elaborada em [23], foi comparada a incerteza originada pelo método direto e pelo método indireto de separação das perdas. O estudo foi efetuado com a realização dos ensaios a um motor de 3 kW de dois polos. A conclusão do estudo evidencia que o método direto permite obter bons resultados, com as ordens de grandeza das incertezas do rendimento a mostrarem-se muito próximas entre os dois métodos. Na sua reflexão, expõem que isso se deve à incerteza baixa oferecida pelos leitores de binários atuais, e que, com a atual tecnologia dos aparelhos de medição, é possível referir o ensaio direto como um método de incerteza baixa.

A mesma análise comparativa é realizada num estudo em [20], elaborado na universidade de tecnologia de Lappeenranta, na Finlândia. Foram alvos de estudo 5 motores de indução. Contudo, ao contrário da reflexão anteriormente obtida, e de acordo com os resultados obtidos, verificaram que a influência das incertezas no método indireto tem menor impacto do que no método direto.

Em anteriores edições da norma, o método A, de determinação do rendimento diretamente da potência de entrada e de saída, não era totalmente descredibilizado para motores de indução trifásicos. Era até preferencialmente indicado para motores de indução com potência inferior a 1 kW e classificado como um método de incerteza baixa. Por esse motivo, e devido à não necessidade de executar qualquer ensaio adicional, face aos ensaios de separação de perdas, este será um método em estudo.

2.7.2. MÉTODO B: SOMA DAS PERDAS COM AS PERDAS SUPLEMENTARES A SEREM DETERMINADAS A PARTIR DO MÉTODO DAS PERDAS RESIDUAIS.

O método B é caracterizado pela determinação do rendimento através da separação e soma das perdas, entre as quais:

- Perdas elétricas;
- Perdas mecânicas, por atrito e ventilação;
- Perdas no ferro;
- Perdas suplementares.

O fluxograma da figura 10 evidência os principais procedimentos a realizar e a devida sequência.

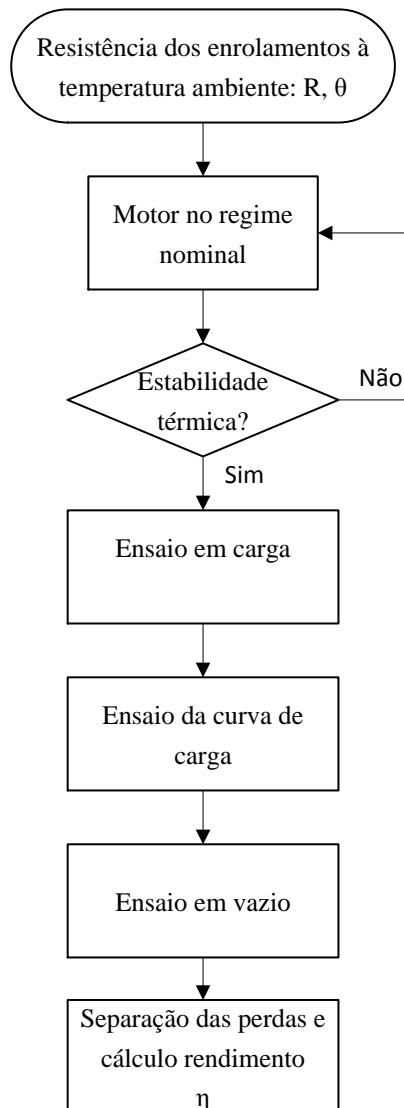


Figura 10 Fluxograma de determinação do rendimento pelo método B.

A determinação das componentes de perdas tem em consideração a realização de três ensaios após atingida a estabilização térmica do motor, são estes:

- Ensaio em carga;
- Ensaio de curva de carga;
- Ensaio em vazio.

Este é o método recomendado para a gama de potências dos motores de indução utilizados para os ensaios realizados neste trabalho, pelo que, a explicação dos cálculos e dos procedimentos será evidenciado no capítulo 3. De referir que as perdas suplementares são obtidas pela diferença entre a potência de entrada e o somatório da potência de saída com as restantes componentes de perdas.

2.7.3. MÉTODO C: SOMA DAS PERDAS COM AS PERDAS SUPLEMENTARES DETERMINADAS A PARTIR DO MÉTODO DAS PERDAS ATRIBUÍDAS

O método C foi desenvolvido para máquinas de elevada potência, onde a execução dos ensaios em carga apresenta dificuldades de ordem prática, tal como ter à disposição a carga para o qual foi designado, a potência de alimentação na instalação, para além dos custos de consumo de grandes quantidades de energia.

Por esses motivos, este método apresenta uma alternativa face ao método B, respetivamente à realização dos ensaios em carga, uma vez que o ensaio é realizado com uma tensão reduzida de alimentação. De salientar que o valor das perdas suplementares é atribuído. Assim sendo, os dois ensaios em carga do método B são substituídos pelos seguintes ensaios:

- Ensaio em carga a tensão reduzida à velocidade nominal;
- Ensaio em vazio à mesma tensão reduzida;
- Ensaio em vazio a tensão e frequência nominal.

Com a realização destes ensaios, para a determinação dos valores em carga, a norma IEC 34-2 Parte 2 assume que a uma tensão reduzida, enquanto se mantém a velocidade constante, a corrente diminui como a tensão e a potência diminui como a quadrado da tensão. Assumindo estes pressupostos, os procedimentos de determinação das perdas convencionais são em tudo idêntico ao método B, sendo apenas converter os pontos de carga a tensão reduzida para a tensão nominal.

A determinação das perdas suplementares é obtida tendo em consideração a seguinte função de ordem discreta, tal como apresentam as expressões 6, 7 e 8, expostas graficamente na figura 11.

$$\text{Para } P_2 \leq 1 \text{ kW} \quad PLL = P1 \times 0.025 \quad (6)$$

$$\text{Para } 1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000 \text{ kW} \quad PLL = P1 \times \left(0.025 - 0.005 \times \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right) \quad (7)$$

$$\text{Para } P_2 \geq 10\,000 \text{ kW} \quad PLL = P1 \times 0.005 \quad (8)$$

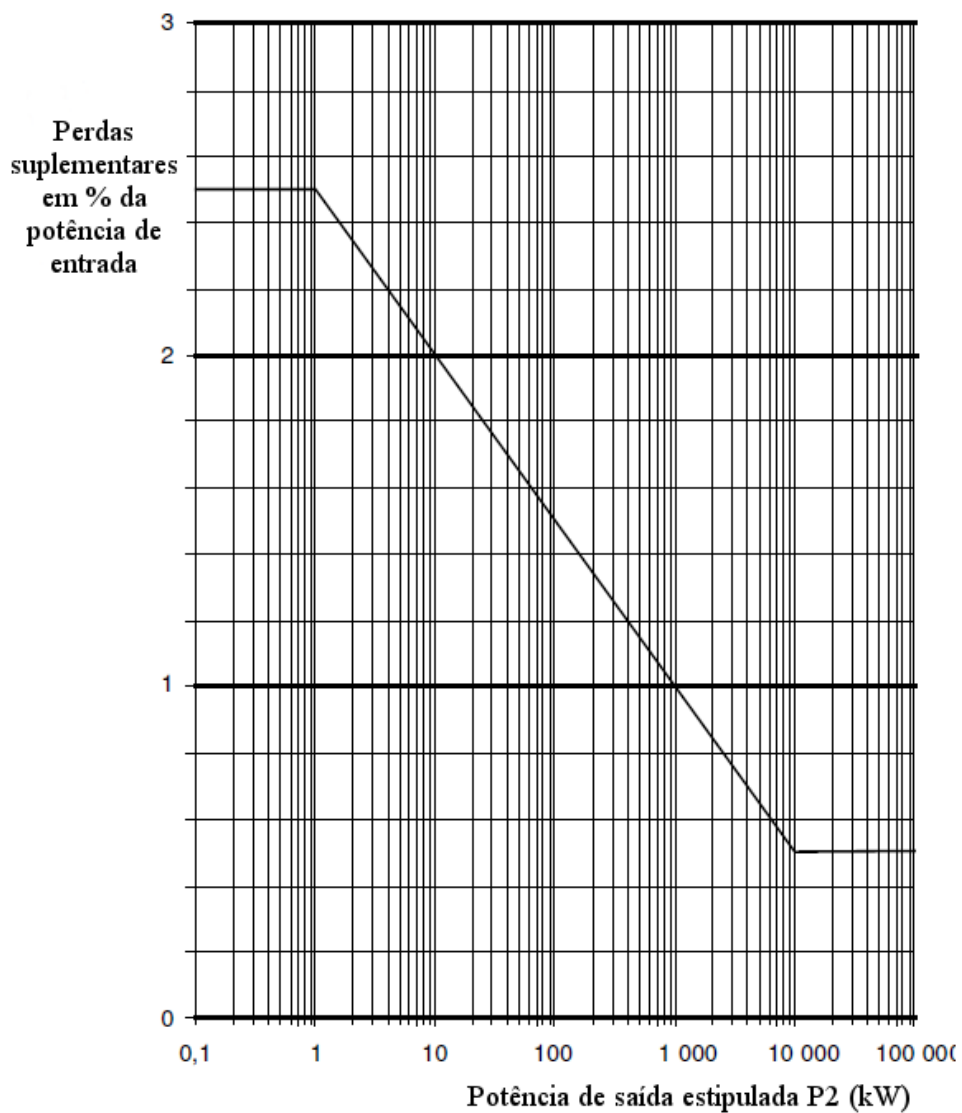


Figura 11 Perdas suplementares atribuídas pelo método C.

De acordo com a norma IEC2, a curva não representa uma média, mas sim o valor máximo de uma amostra grande de perdas suplementares calculadas pelo método B. No entanto, de acordo com estudos efetuados, esta não é uma afirmação que corresponda na sua totalidade à verdade, pois de acordo com [24] e [25] ficou evidenciado que 68 % dos 182 motores alvos de classificação das perdas e do rendimento, apresentavam um valor das perdas suplementares superior ao valor atribuído pela curva da figura 11. O estudo concluiu que atribuir o valor das perdas suplementares em função da potência de saída, introduz uma fonte de erro e de incerteza na determinação final do rendimento.

A determinação do rendimento é obtida, tal como no método B, pelo cálculo das perdas totais, p_T , a partir da soma de todas as componentes de perdas, perdas elétricas p_{el} , perdas no ferro, p_{fe} , perdas mecânicas, p_m , e as perdas suplementares, p_s .

$$p_T = p_{el} + p_{fe} + p_m + p_s \quad (9)$$

E em que o rendimento, η , é obtido pela diferença entre a potência elétrica absorvida, P_{el} , e as perdas totais em relação à potência elétrica.

$$\eta = \frac{P_{el} - p_T}{P_{el}} \quad (10)$$

2.7.4. MÉTODO D: ENSAIO EM OPOSIÇÃO EM PARALELO SOBRE REDE

A determinação do rendimento pelo ensaio com duas máquinas em oposição, e em paralelo com a rede, requer que estas máquinas acopladas sejam duas máquinas exatamente iguais. Neste ensaio uma das máquinas é colocada em funcionamento como motor e outra em funcionamento como gerador. A máquina a funcionar como gerador deverá ser ligada a um conversor, que forneça energia reativa e absorva energia ativa de forma a transferir a energia gerada novamente para a rede. Assim, a diferença da potência absorvida pelo motor com a potência fornecida pelo gerador indica as perdas totais do conjunto das duas máquinas.

Assumindo as duas máquinas como exatamente iguais, o rendimento é obtido considerando metade das perdas totais p_T , tal como indica a expressão 11.

$$p_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \quad (11)$$

Em que P_1 é a potência transferida pela rede para o motor, e P_2 é a potência transferida da segunda máquina, ou seja, do gerador para a rede.

Assim o rendimento é obtido considerando as perdas da máquina, pela média da potência transferida entre as máquinas e a rede, tal como indicado em (12).

$$\eta = 1 - \frac{p_r}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \quad (12)$$

Devido à inexistência de dois motores de indução exatamente iguais no laboratório de máquinas no ISEP, este método foi dispensado, pois os motores disponíveis e utilizados ao longo deste trabalho detêm classes de eficiência distintas.

2.7.5. MÉTODO E: ENSAIO EM OPOSIÇÃO COM ALIMENTAÇÃO ÚNICA

O ensaio em oposição com alimentação única é apenas aplicável a máquinas de indução de rotor bobinado. Este método tem por princípio acoplar duas máquinas exatamente iguais, uma como motor e outra a funcionar como gerador, e ligando as duas à mesma fonte de alimentação de modo a funcionarem à mesma tensão e velocidade.

Tal como anteriormente mencionado, os objetivos deste trabalho concentraram-se no estudo do MIT com rotor em gaiola de esquilo, pelo que este método não foi considerado.

2.7.6. MÉTODO F: SOMA DAS PERDAS COM AS PERDAS SUPLEMENTARES A SEREM DETERMINADAS A PARTIR DO MÉTODO DO ROTOR REMOVIDO E DO ENSAIO DE ROTAÇÃO INVERSA

A determinação das perdas pelo método F tem como princípio os mesmos ensaios e procedimentos do método B no que respeita à determinação das perdas convencionais. No entanto, as perdas suplementares são determinadas a partir do ensaio com o rotor removido e o ensaio de rotação inversa. O ensaio com o rotor removido é utilizado para o cálculo das perdas suplementares de frequência fundamental, enquanto que o ensaio de rotação inversa é utilizado para o cálculo das perdas suplementares de frequências superiores à fundamental.

De acordo com Taegen e Walczak [19] , as leituras e cálculos demonstram claramente, que na maioria dos casos, o ensaio de rotação inversa determina as perdas adicionais de forma incorreta, identificando que a magnitude do erro difere consideravelmente de máquina para máquina. Esta, é uma afirmação partilhada por outros autores, que vão ao encontro da mesma análise conclusiva.

Para além desse argumento, do ponto de vista prático não é exequível efetuar tal ensaio, uma vez que as máquinas já se encontram completamente montadas, e a remoção do rotor e posterior colocação, sem as corretas ferramentas poderá ser uma tarefa difícil. Por esse motivo, e pela descredibilização atrás enunciada, o estudo das perdas suplementares e do rendimento a partir deste método foram descartados.

2.7.7. MÉTODO G: SOMA DAS PERDAS COM AS PERDAS SUPLEMENTARES A SEREM DETERMINADAS A PARTIR DO MÉTODO DO ENSAIO EH-STAR

Este ensaio será alvo de estudo ao longo deste trabalho, pois é um ensaio que a par da sua exequibilidade de ordem prática, apresenta uma metodologia direta e distinta no cálculo das perdas suplementares. Todos os procedimentos e a totalidade da metodologia de cálculo são expostos no capítulo 3.

2.7.8. MÉTODO H: DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO A PARTIR DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

De acordo com a norma IEC2 o método do circuito equivalente deverá ser aplicado quando os ensaios em carga não são possíveis de se realizar. É baseado no modelo em T do circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico, tal como é possível verificar na figura 12.

Os parâmetros do rotor, resistência e reatância, são referidos ao lado do estator, tal como indica a presença do apóstrofo. As perdas no ferro são indicadas pela resistência R_{fe} e o parâmetro X_m traduz a reactância de magnetização. Os ensaios necessários para a determinação dos parâmetros do circuito são expostos no fluxograma da figura 13.

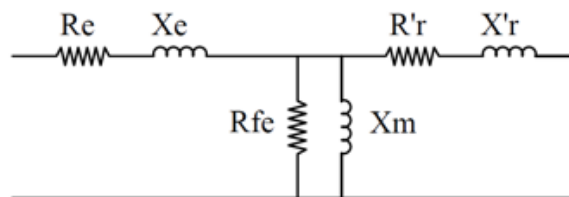


Figura 12 Modelo T do circuito equivalente.

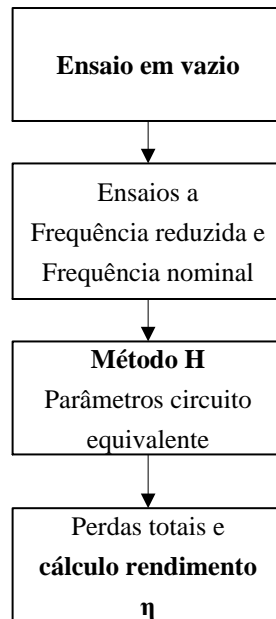


Figura 13 Fluxograma de determinação do rendimento pelo método H.

Devido à sua extensa aplicabilidade, (trata-se de um método analítico bastante explorado no que diz respeito ao motor de indução), e grau de incerteza elevado por ser um método puramente de cálculo analítico de determinação do rendimento, a par da necessidade de conhecimento de parâmetro de projetos e de ensaios a frequência reduzida em relação à frequência da rede, este método não será alvo de estudo ao longo deste trabalho.

No âmbito deste trabalho, considerando os factos acima apurados e os recursos existente no laboratório de máquinas do ISEP, foram colocados em prática quatro dos ensaios acima descritos, os quais:

- Método A: Medição direta da entrada e da saída;
- Método B: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método das perdas residuais;
- Método C: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método das perdas atribuídas;
- Método G: Soma das perdas com as perdas suplementares a serem determinadas a partir do método do ensaio Eh-star.

Os quais terão, no capítulo seguinte, a descrição dos seus requisitos, procedimentos e metodologias de determinação das perdas e do rendimento.

3. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

Com vista à execução dos métodos de separação das perdas e de determinação do rendimento a partir de ensaios, procedeu-se à análise dos requisitos de alimentação e das classes de precisão dos aparelhos de medição necessários para que os resultados obtidos não tenham impacto negativo no grau de incerteza. Por esse motivo, numa fase de preparação à realização dos ensaios, fez-se uma análise dos requisitos das condições de alimentação das máquinas em estudo, dos equipamentos disponíveis no laboratório de máquinas e a dificuldade de ordem prática dos ensaios elaborados. Essa análise é descrita nas seguintes secções.

3.1. REQUISITOS DA ALIMENTAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DOS ENSAIOS

De acordo com a norma geral de classificação de máquinas elétricas rotativas, a IEC 60034-1, para as máquinas alimentadas a partir da rede de distribuição, são definidos limites quanto à forma e simetria da tensão de alimentação, estando afetadas as grandezas da tensão, frequência, distorção harmónica e componentes assimétricas [14].

Para a verificação dos requisitos abaixo expostos, foi preparada uma folha de cálculo com a utilização da ferramenta Microsoft Excel. Assim as condições são verificadas de forma automática, sendo apenas necessário o utilizador introduzir as leituras efetuadas com auxílio ao analisador trifásico utilizado. Estes resultados podem ser observados na secção 2 do anexo A e B (requisitos de ensaio dos motores A e B).

3.1.1. TENSÃO E FREQUÊNCIA

Relativamente às condições de tensão e frequência, uma máquina alimentada em regime nominal de funcionamento, a partir da rede de distribuição, deverá funcionar nos limites definidos da zona A, tal como definido no gráfico da figura 14. A máquina também pode funcionar dentro dos limites delineados como zona B de funcionamento, no entanto o seu desempenho poderá sofrer pequenas alterações, pelo que, não é aconselhado um funcionamento prolongado nestas condições [14].

Contudo, apesar da normal geral de máquinas elétrica IEC 60034-1 definir os limites de frequência acima descritos, a norma IEC2 que define as condições de ensaio, impõe que a média da frequência medida ao longo dos ensaios seja delimitada de $\pm 0.1\%$ da frequência estipulada do ensaio em execução.

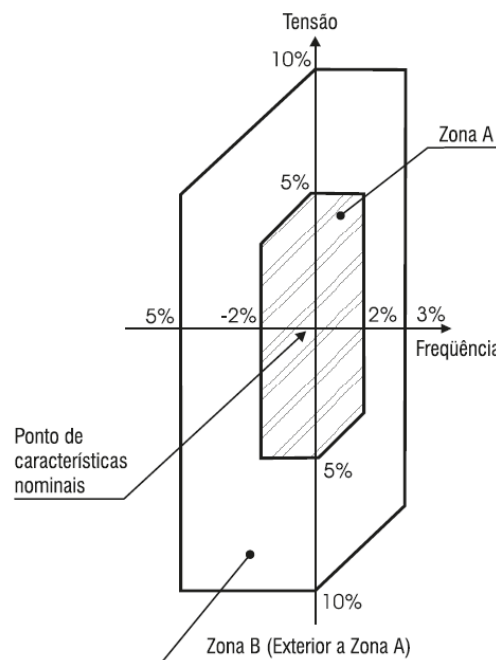


Figura 14 Limites de tensão e frequência para motores[29].

3.1.2. DISTORÇÃO HARMÓNICA

Para motores de concepção N, ou seja, motores de indução trifásicos de gaiola de esquilo que são preparados com binário de arranque capaz de sustentar o arranque direto, é limitada o Fator de Distorção Harmónico (FDH) a 0.03 [14], [30]. O seu cálculo deve ser determinado de acordo com a expressão 13.

$$FDH = \sqrt[2]{\sum_{n=2}^k \frac{u_n^2}{n}} = \sqrt[2]{\sum_{n=2 \neq 3 \neq 6 \neq 9 \neq 12}^{k=13} \frac{\left(\frac{U_n}{U_N}\right)^2}{n}} \quad (13)$$

Em que u_n é a razão entre o valor eficaz do harmónico de ordem n (U_n), e o valor eficaz da tensão nominal (U_N) e k igual a 13. De referir para motores de corrente alternada trifásicos, que n não é divisível por três.

3.1.3. COMPONENTES ASSIMÉTRICAS

Para a realização dos ensaios de acordo com a norma IEC2 é necessário garantir a simetria da tensão de alimentação trifásica, em que a componente inversa não deve exceder 1 % da componente direta, durante um longo período, ou 1.5 % para curtos períodos, considerados de apenas alguns minutos. Também, a componente homopolar não deverá exceder 1 % da componente direta [28].

De assinalar, que na execução dos ensaios de estabilização térmica, o valor FDH não deverá exceder 0.015 e a componente inversa do sistema de tensões deve ser inferior a 0.5 % da componente direta.

3.2. REQUISITOS DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

No que diz respeito aos equipamentos de medição a utilizar para a leitura das grandezas dos ensaios, a norma IEC2 define limites de exatidão para as grandezas elétricas, binário, velocidade, frequência e temperatura, tendo em vista a minimização do erro causado no resultado final do rendimento. Estes requisitos são expostos de seguida.

3.2.1. GRANDEZAS ELÉTRICAS

Os aparelhos de medição com vista à leitura de grandezas elétrica na realização de um ensaio direto devem garantir uma classe de exatidão de 0.2 % do valor fim de escala do aparelho, enquanto que para a realização de um ensaio indireto é requisitado uma classe de precisão de 0.5 % [23], [28].

Tal como a norma propõe, as folhas de cálculo de apoio à realização dos ensaios, foram preparadas para o calculo da média aritmética das correntes de linha e das tensões nos terminais.

3.2.2. BINÁRIO

A leitura do binário, através de transdutores de binários, requisita uma classe de exatidão mínima de 0.2 N.m.. Para além da classe de exatidão, o menor binário medido ao longo dos ensaios deverá ser, no mínimo, 10 % do binário nominal do aparelho de medida. Contudo a segunda condição não foi garantida, devido ao transdutor de binário utilizado ter um binário nominal de 50 N.m. e as leituras efetuadas estarem na gama de 1 N.m a 9 N.m.

O correto alinhamento e posicionamento do motor, transdutor de binário, e carga, e a utilização de acoplamentos flexíveis foi tido em consideração, de forma a minimizar a origem de cargas parasitas.

3.2.3. VELOCIDADE E FREQUÊNCIA

Para medir a frequência de alimentação, o aparelho de medição deve ter uma precisão de ± 0.1 % da escala total. A precisão requisitada para a leitura da velocidade é de 0.1 r.p.m.

3.2.4. TEMPERATURA

Os aparelhos usados para medição da temperatura deverão ter uma precisão de ± 1 °C.

Para garantir a classe de precisão de ± 1 °C e a extração de dados de forma automática foi utilizado o multímetro *Fluke 185* e o software *Fluke View Forms*, disponível nos computadores do laboratório. No entanto, o multímetro apenas garante o grau de precisão de 1°C e sem se proceder à calibração do termopar a sua precisão por defeito é de 3°C.

3.2.5. CALIBRAÇÃO DA TEMPERATURA NO MULTÍMETRO FLUKE 185

Para realizar a calibração do termopar foi necessária uma taça de gelo com água. De seguida, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Misturar e picar durante 3 minutos;
- Colocar a sonda dentro (termopar);
- Deixar estabilizar;
- Gravar a calibração efetuada (pressionando F1 durante 5 segundos).

A figura 15 ilustra o procedimento efetuado.



Figura 15 Calibração do termopar no multímetro Fluke 185.

Uma das mudanças mais influentes nos resultados do rendimento face a versões anteriores da norma verifica-se no aumento dos requisitos dos aparelhos de medição. A tabela 3 ilustra a aproximação para com a norma americana IEEE 112, que também define os ensaios de determinação das perdas e do rendimento, que em conjunto são as duas normas mais aplicadas no mundo.

Tabela 3 Requisitos dos equipamentos de medição na IEC 60030-2-1 (2ª edição) e IEEE 112.

Grandeza	IEC 60034-2-1 (2ª edição)	IEEE 112
Grandezas elétricas	Ensaio Direto: 0.2 % valor fim de escala Ensaio Indireto: 0.5 % valor fim de escala	Ensaio Método B: 0.2 % valor fim de escala Outros ensaios: 0.5 % valor fim de escala
Binário	0.2 N.m.	0.25 % valor fim de escala
Frequência	± 0.1 % da escala total	--
Velocidade	0.1 r.p.m.	1 r.p.m.
Temperatura	± 1 °C	--

3.3. EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DO ISEP

Após a análise das normas e dos métodos de ensaios de determinação das perdas e do rendimento, foi executado um levantamento das condições e equipamentos disponíveis para a realização dos ensaios, no qual foram tidos em consideração os seguintes pontos:

- Motores disponíveis para a realização dos ensaios;
- Equipamentos de metrologia disponíveis no laboratório;
- Equipamentos auxiliares à realização dos ensaios.

Considerando os motores, foram escolhidos dois motores de indução que apresentavam boas condições de funcionamento e de igual potência.

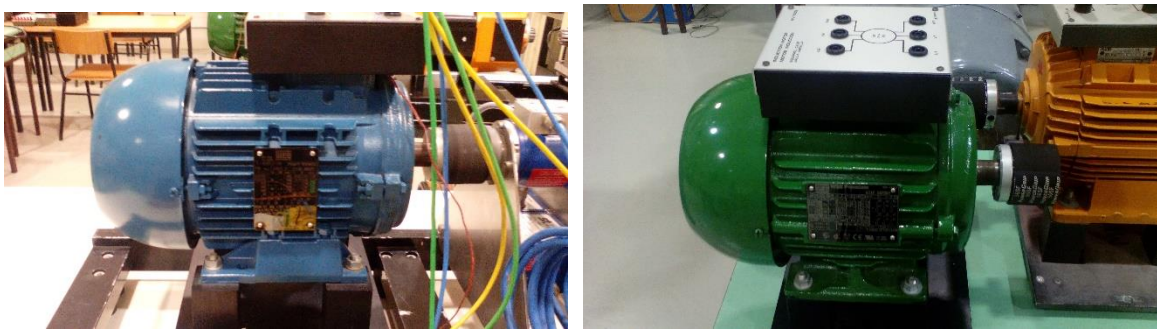


Figura 16 Fotografias do motor A (à esquerda) e do motor B (à direita).

Ambos os motores apresentam como potência nominal estipulada 1.1 kW. Contudo as suas classes de eficiência são distintas: o motor A tem o rendimento estipulado de 81.5 % (classificado com a classe IE2), enquanto que motor B tem um rendimento estipulado de 84.3 % (classificado com a classe IE3). As características completas estipuladas de cada motor são colocadas na secção 1 do anexo A e B, referentes ao motor A e B, respetivamente.

Relativamente aos aparelhos de medição, foram utilizados apenas equipamentos digitais, tal como recomendado pela norma. A par disso, alguns dos equipamentos têm a possibilidade de escala automática, o que facilita a realização dos ensaios. Os requisitos de medição são apresentados em percentagem do valor de fim de escala do aparelho. Por esse motivo, a norma recomenda, que sejam utilizados aparelhos cujo valor de fim de escala se aproxime do valor da leitura a efetuar. Este cuidado, em conjunto com o bom funcionamento dos aparelhos e possibilidade de ligar ao computador, foram aspetos fundamentais na escolha dos aparelhos de medição a utilizar. Contudo a escala de alguns aparelhos apresentam valores muito superiores aos valores medidos, pelo que, as suas leituras podem gerar alguma incerteza no resultado final.

A norma recomenda, em vez de ser realizada apenas uma amostra de medição para cada ponto de carga, sejam medidas muitas amostras, de forma automática. No entanto, no âmbito deste trabalho, não seria exequível e viável em tempo útil, mediante as ferramentas do laboratório executar tais automatismos. Para além disso, é preciso ter em atenção que os ensaios apenas serão implementados a 2 motores. O automatismo dos ensaios é essencial ser implementado, na ótica de um fabricante de máquinas elétricas, em que são ensaiados muitos motores por ano.

3.4. PROCEDIMENTOS E METODOLOGIAS DE CÁLCULO DO RENDIMENTO DO MOTOR A E DO MOTOR B.

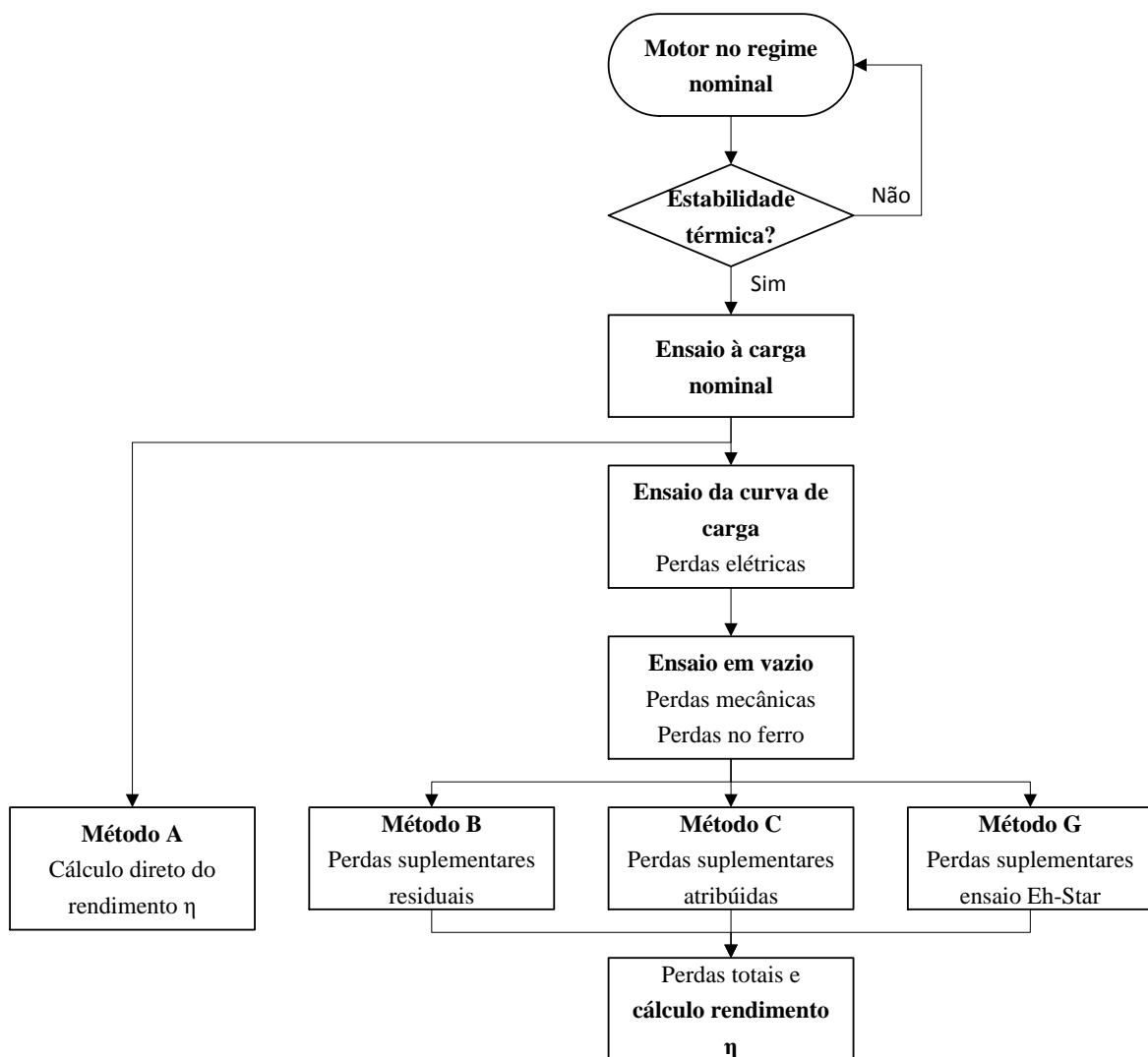


Figura 17 Fluxograma geral dos ensaios realizados para determinação das perdas e rendimento do motor A e B.

Ao longo desta secção e subsecções seguintes serão ilustrados os procedimentos e metodologias de cálculo das perdas e do rendimento dos 4 métodos que foram colocados em prática, a foram sujeitos o motor A e o motor B. O fluxograma da figura 17 apresenta de forma sucinta, a sequência dos ensaios realizados, e posteriormente, a determinação dos rendimentos, de acordo com os métodos em estudo. Os ensaios em carga, de estabilização térmica, da curva de carga e em vazio foram realizados em sequência imediata.

3.4.1. ENSAIO À CARGA NOMINAL E ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA

Antes da colocação em funcionamento dos motores, foi necessário instalar uma sonda térmica em cada um deles, para permitir a leitura da temperatura do enrocamento do estator durante todo o ensaio de estabilidade térmica. As figuras 18 e 19 ilustram o local do posicionamento do termopar após calibração do multímetro Fluke 185 para a classe de precisão de 1 °C.

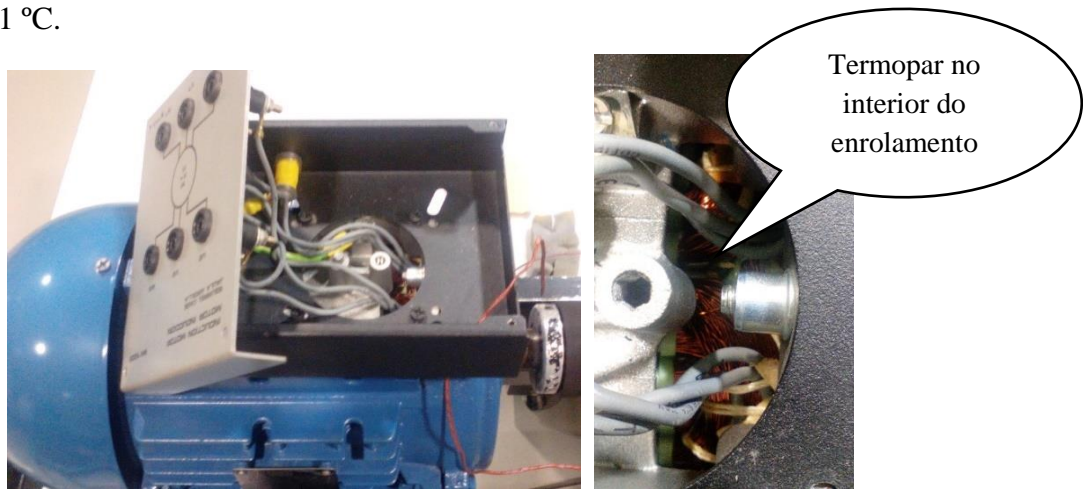


Figura 18 Localização do termopar no interior dos enrolamentos da bobinagem do motor A.

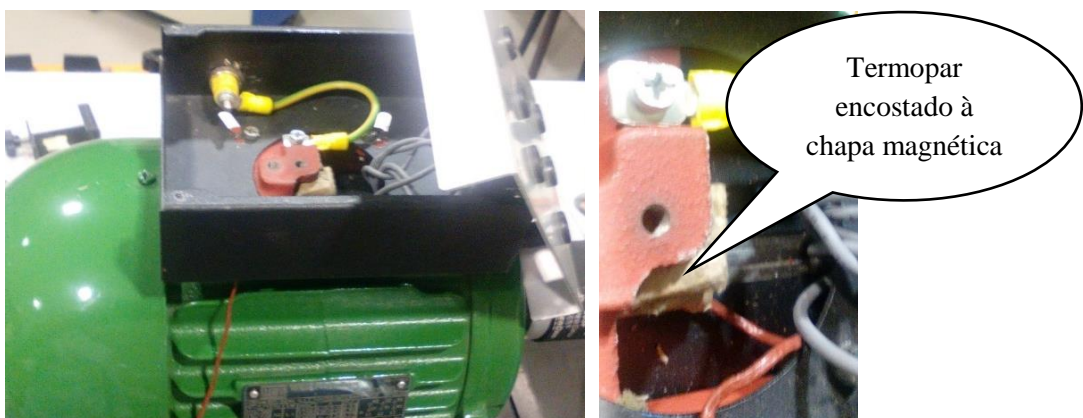


Figura 19 Localização do termopar encostado à face exterior do estator do motor B.

No entanto, devido às diferenças da forma construtiva das carcaças, as caixas de ligação dos motores permitem diferentes acessos ao interior dos mesmos. No motor A, o termopar ficou localizado no interior dos enrolamentos do estator, na testa do lado do ataque, enquanto que no motor B, devido à falta de acesso aos enrolamentos, optou-se por colocar o termopar encostado à superfície exterior das chapas ferromagnéticas do estator.

Após este procedimento, e com a caixa de ligações devidamente fechada, procedeu-se ao acoplamento da máquina com o leitor de binário e com a carga. A funcionar como carga mecânica, utilizou-se uma máquina DC, em funcionamento como gerador, com excitação shunt, ligado a uma carga elétrica resistiva, tal como é possível verificar no esquema da figura 20 e que corresponde à imagem da figura 21, no caso do ensaio do motor A. A aparelhagem de medição, nomeadamente, pinças amperimétricas, o analisador trifásico e multímetros para a medição da temperatura foram também devidamente ligados.

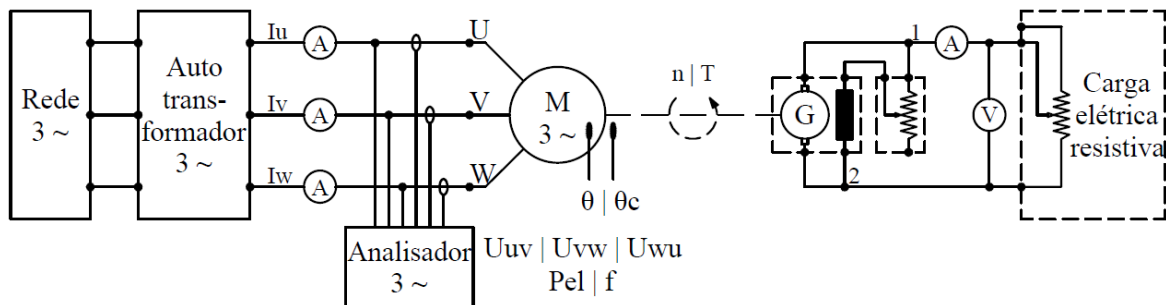


Figura 20 Esquema do ensaio em carga.

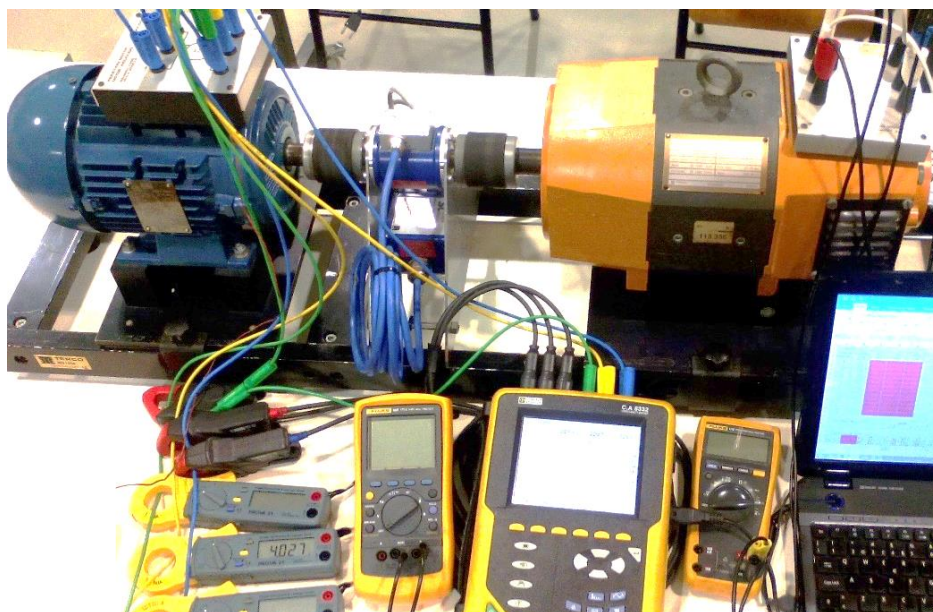


Figura 21 Fotografia do ensaio em carga.

Antes de ligar o motor, e dar início ao ensaio em carga e de estabilização térmica, procedeu-se à leitura do valor da resistência da bobinagem estatórica e da temperatura do enrolamento com o motor à temperatura ambiente, registando-se:

- R_{uv} , R_{vw} , R_{wu} – Resistência aos terminais uv, vw e wu, respetivamente;
- θ_a – Temperatura ambiente.

A resistência de cada enrolamento do motor, é obtida pela leitura da resistência entre cada par de terminais, com a ligação em triângulo ou estrela já efetuada. A ligação dos terminais do motor foi estabelecida em triângulo. Assim, a razão entre a resistência por fase e a resistência em triângulo, é de 1,5 vezes [28]. A expressão 14 ilustra esta relação.

$$R = 1,5 \times R_{II} \quad (14)$$

Em que R é a resistência média por fase do enrolamento estatórico e R_{II} é a média das resistências linha-para-linha, ou seja, é a média aritmética de resistências entre cada par de terminais, com ligação do motor em triângulo.

Após a leitura das resistências entre fases, colocou-se o motor no regime nominal de funcionamento. As características nominais estipuladas pelo fabricante do motor A e do motor B são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 Características estipuladas com ligação em triângulo do motor A e do motor B.

Característica	Motor A	Motor B
Tensão	230 V	230 V
Corrente	4,17 A	4,07 A
Frequência	50 Hz	50 Hz
Potência	1,1 kW	1,1 kW
Velocidade	1440 r.p.m	1455 r.p.m.
Fator de potência	0.81	0.80
Rendimento	81,5 %	84,3 %

Ao longo do ensaio de estabilização térmica, as leituras da temperatura no interior da máquina foram registadas com auxílio ao multímetro Fluke 185, sendo os dados exportados para o software *Fluke View Forms*, disponível no computador do laboratório de máquinas. As características de evolução térmica dos motores A e B são ilustradas na figuras 22 e 23.

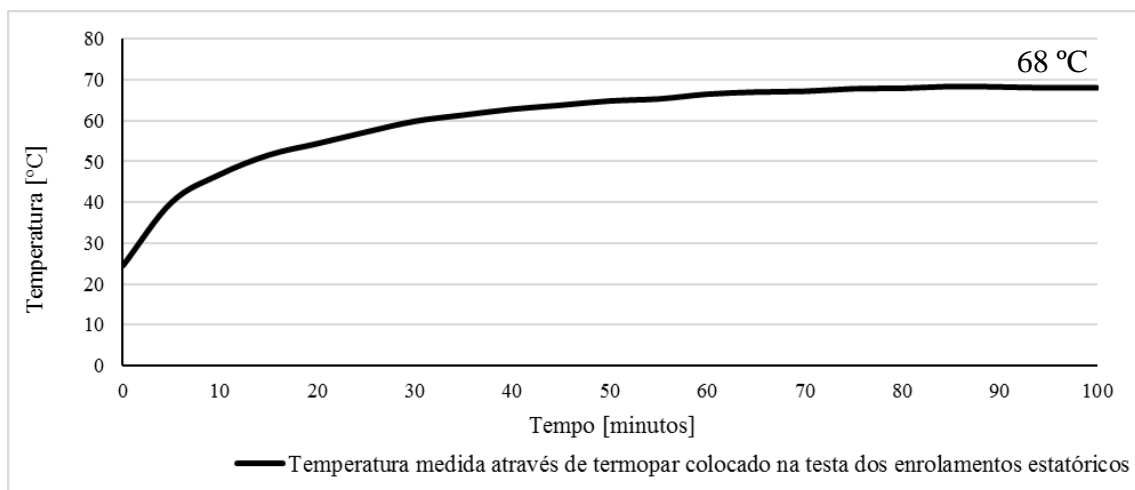


Figura 22 Ensaio de estabilização térmica do motor A.

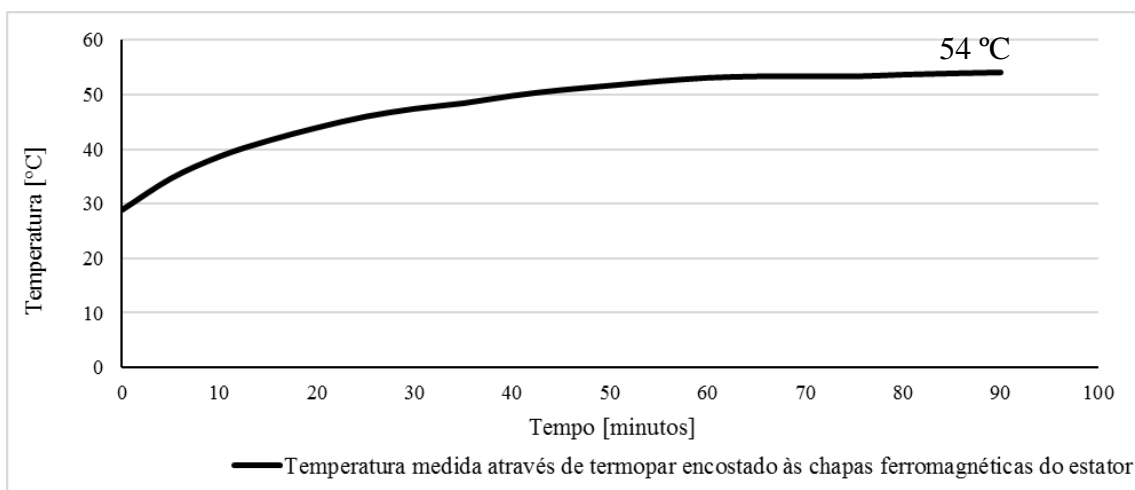


Figura 23 Ensaio de estabilização térmica do motor B.

De notar, que a temperatura de estabilização térmica do motor A, a 68 °C, é muito superior à temperatura de estabilização do motor B, que é de 54 °C. Isto acontece porque as sondas térmicas estão posicionadas em lugares distintos, como já foi verificado anteriormente. No que diz ao tempo decorrido até à estabilização térmica, como expectável, apresentam tempos muito próximos devido às características de ambos os motores serem idênticas. O motor A estabiliza termicamente ao fim de 100 minutos, enquanto que o motor B estabiliza termicamente no minuto 90 após o seu início.

Em complemento ao ensaio de estabilização térmica do motor, e de forma a melhor perceber o comportamento térmico de ambos os motores, foram registadas algumas fotografias termográficas, apresentadas nas figuras 24 e 25.

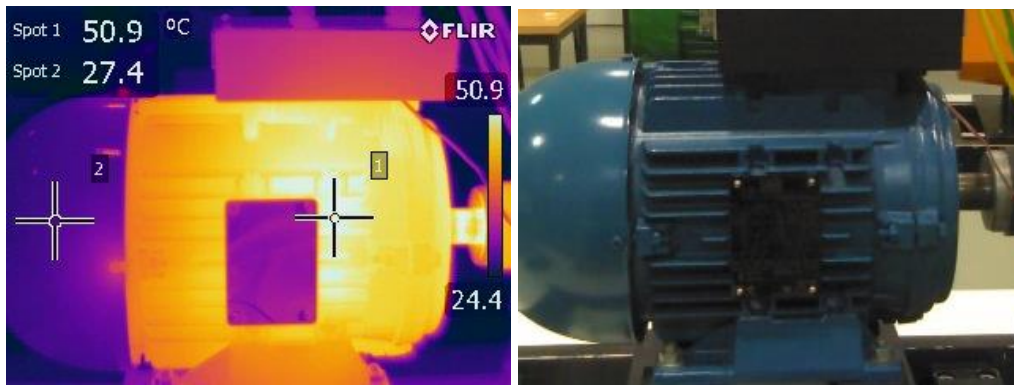


Figura 24 Termografia do motor A.

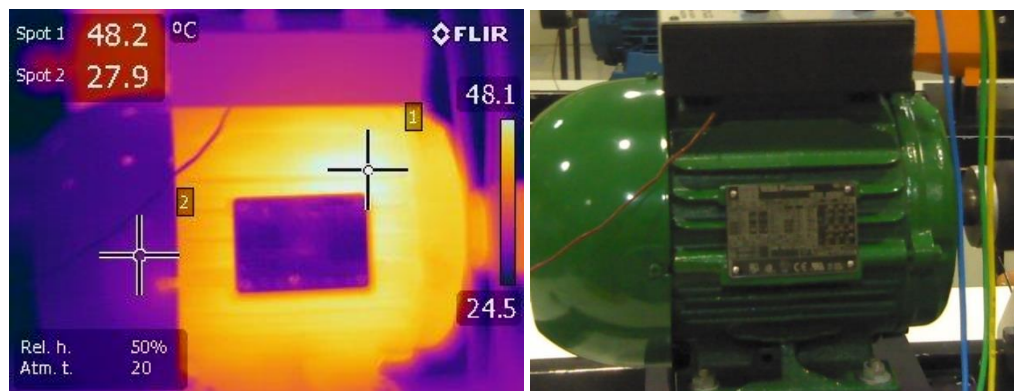


Figura 25 Termografia do motor B.

O comportamento térmico de ambos os motores é semelhante, em que do lado do ventilador o motor está notoriamente menos quente do que do lado oposto. Neste ponto mais distante do ventilador, a influência do arrefecimento é menor, o que traduz um maior aquecimento. Após o ensaio de estabilização térmica, registou-se o ponto de funcionamento da máquina à carga nominal, em que foram medidas as seguintes grandezas:

- U_{uv} , U_{vw} e U_{wu} – Tensões compostas entre terminais;
- I_u , I_v e I_w – Correntes de linha;
- f – Frequência da tensão de alimentação;
- n – Velocidade angular no veio;
- T – Binário motor;
- P_{el} – Potência elétrica;
- θ_c – Temperatura do fluido de arrefecimento (admissão de ar junto ao ventilador);
- θ_e – Temperatura dos enrolamentos após estabilização térmica do ensaio em carga;
- R_N – Resistência dos enrolamentos após estabilização térmica do ensaio em carga.

Os valores registados dos ensaios ao motor A e B podem ser observados na secção 4.1 do anexo A e B. São marcados a vermelho os valores medidos diretamente dos aparelhos de medição, enquanto que a preto se encontram os valores calculados. O mesmo se aplica a todos os cálculos e valores registados dos restantes ensaios.

A resistência do enrolamento R_N é obtida através da extrapolação para zero da variação da resistência após corte da alimentação do motor, quando estabilizado termicamente. A variação da resistência deve ser registada em intervalos de 1 minuto. O primeiro valor deve ser medido num intervalo de tempo inferior a 30 segundos, de acordo com a tabela 5, que indica o tempo máximo de acordo com a potência nominal da máquina.

Tabela 5 Intervalo de tempo máximo após corte da alimentação.

Potência Estipulada (P_N) [kW]	Intervalo de tempo após corte da alimentação [s]
$P_N \leq 50$	30
$50 < P_N \leq 500$	90
$200 < P_N \leq 5000$	120
$5000 < P_N$	Por acordo

A extrapolação para zero é executada traçando uma curva com os valores das resistências registadas em função do tempo. É recomendado pela norma IEC 60034-1 que a temperatura seja representada numa escala logarítmica, tal como apresentado na figura 26.

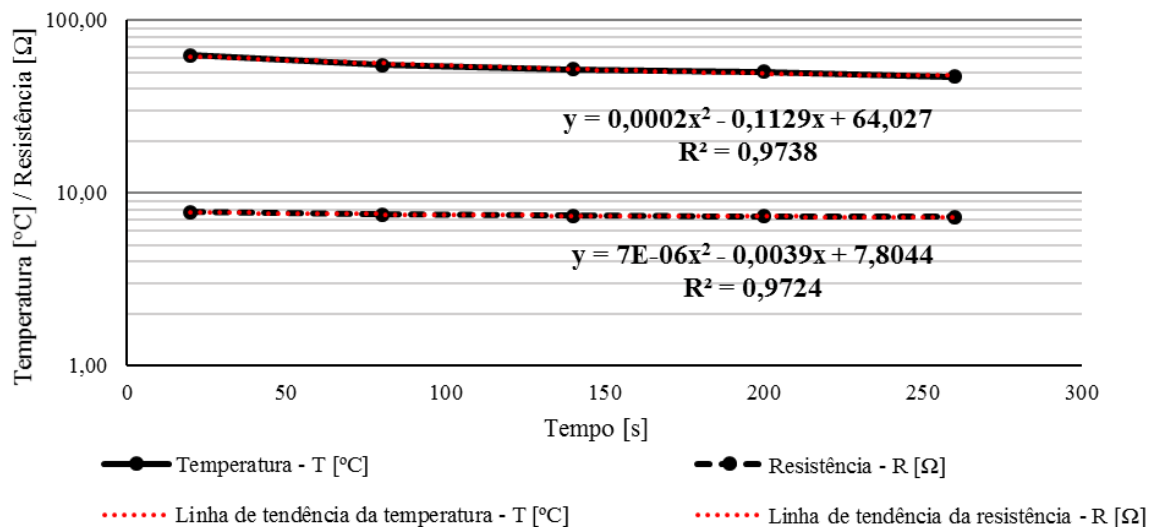


Figura 26 Variação da resistência e da temperatura do enrolamento após desligamento do motor A.

O valor da temperatura medida nos enrolamentos, θ_e , é determinado através da resistência R_N pelo mesmo procedimento de extrapolação acima descrito. Apesar de possível medir a temperatura no enrolamento do estator no caso do motor A, a norma IEC2 indica preferência na determinação da temperatura em relação ao método da resistência, (método de extrapolação acima descrito). Isto acontece, porque quando se está a medir a partir de uma sonda térmica num dado ponto, apenas se está a obter uma leitura da temperatura naquele ponto. No entanto, se se determinar a temperatura pela resistência do enrolamento, obtém-se o valor da temperatura média ao longo de todo o enrolamento.

De acordo com a IEC 60034-1, a variação da temperatura, θ , com a resistência elétrica, R , segue a seguinte expressão:

$$\frac{\theta + k}{\theta_0 + k} = \frac{R}{R_0} \quad (15)$$

Colocando a expressão em ordem à temperatura θ , tem-se:

$$\theta = \frac{R - R_0}{R} \times (k + \theta_0) + \theta_0 \quad (16)$$

Onde k é o inverso do coeficiente de temperatura da resistência a 0°C do material condutor, que no caso do cobre é igual a 235. A variável da temperatura, θ , sem sufixo, representa a temperatura final enquanto que θ_0 é a temperatura inicial. O mesmo se aplica às grandezas da resistência, R e R_0 .

Imediatamente após o ensaio à carga nominal, tal como a norma recomenda, o desvio do leitor de binário foi verificado, o qual estava em conformidade. O leitor de binário, com auxílio ao software Torq View, permite colocar o valor de binário a zero, que era nulo quando o motor estava na posição de parado.

3.4.2. MÉTODO A – MEDIÇÃO DIRETA DA ENTRADA E DA SAÍDA;

A determinação do rendimento pelo método A é obtida tal como descrito na subsecção 2.7.1. Os resultados do rendimento podem ser observados na secção 4.2 do anexo A e B, respetivamente ao motor A e B.

3.4.3. ENSAIO DA CURVA DE CARGA E CÁLCULO DAS PERDAS ELÉTRICAS

Imediatamente após o ensaio em carga e o ensaio de estabilização térmica, procede-se ao ensaio da curva de carga. Este ensaio consiste em aplicar ao motor 6 pontos distintos de carga, são estes 125 %, 115 %, 100 %, 75 %, 50 % e 25 % da carga nominal. De forma a minimizar as variações de temperatura ao longo do ensaio, estes ensaios foram realizados o mais rapidamente possível. Foi também tida em consideração que a variação da frequência não deverá ser superior a 0.1 %, condição validada nos ensaios aos dois motores.

Em cada um dos 6 pontos de carga, registaram-se as seguintes grandezas:

- Uuv, Uvw e Uwu – Tensões compostas entre terminais;
- Iu, Iv e Iw – Correntes de linha;
- f – Frequência da tensão de alimentação;
- n – Velocidade angular no veio;
- T – Binário motor;
- P_{el} – Potência elétrica;
- R – Resistência dos enrolamentos antes e depois do ensaio;

Os valores registados deste ensaio, estão disponíveis na secção 4.4 do anexo A e B. Estão salientados a negrito os valores do ponto de carga do regime nominal, ou seja a 100 %.

A resistência para o ponto de carga a 100 % e superiores deverá ter o valor da leitura antes do ensaio. Para valores inferiores a 100 % da carga, a resistência é determinada por variação linear com a carga, usando a leitura antes para a carga mais elevada, e a leitura depois para a carga mais baixa.

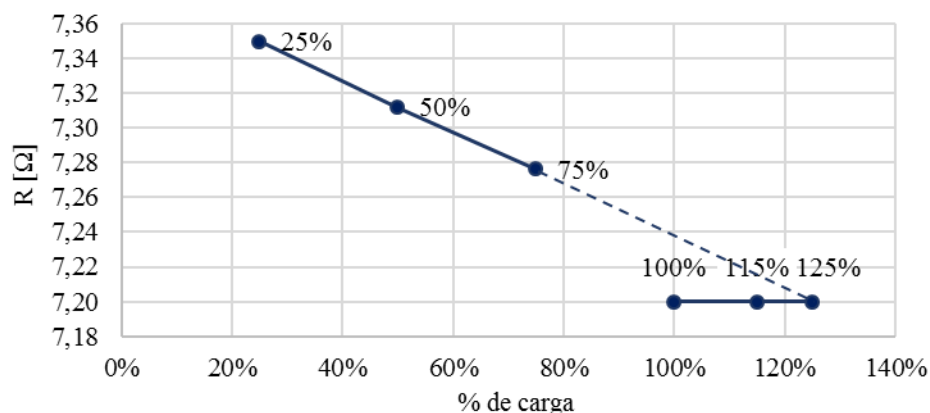


Figura 27 Atribuição do valor da resistência no ensaio da curva de carga do motor A.

No caso do motor A, a resistência medida antes do ensaio foi de 7,20 Ω , e a resistência depois foi de 7,35 Ω , assim o valor atribuído para cada ponto de carga está de acordo com o gráfico da figura 27 e o que foi descrito no paragrafo anterior.

As perdas elétricas dos enrolamentos do estator em cada ponto de carga são calculadas de acordo com a seguinte expressão:

$$p_e = 1,5 \times R \times I^2 \quad (17)$$

Em que R é a resistência dos enrolamentos e I é a média da corrente de linha. Na norma IEC2 esta expressão contém o fator multiplicativo de 1,5, referente à razão de transformação da resistência de triângulo para a resistência por fase dos enrolamentos. Contudo, nos cálculos em anexo, a resistência R considerada, é o valor da resistência por fase dos enrolamentos, já com a razão de 1,5 aplicada.

As perdas elétricas que se manifestam no rotor, p_r , são calculadas pela diferença entre a potência elétrica, P_{el} , as perdas elétricas dos enrolamentos do estator, p_e , e as perdas no ferro, p_{fe} , de acordo com a seguinte expressão:

$$p_r = (P_{el} - p_e - p_{fe}) \times s \quad (18)$$

Em que o deslizamento, s, depende do número do número de par de polos, p, da velocidade de funcionamento, n, e da frequência da alimentação f.

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f} \quad (19)$$

Onde, a potência elétrica, P_{el} , a velocidade rotórica, n, e a frequência, f, são as grandezas registradas no ensaio em carga. As perdas elétricas no estator, p_e , são as calculadas a partir de cada ponto de carga enquanto que as perdas do ferro p_{fe} são calculadas de acordo com o procedimento de cálculo ilustrado no ensaio em vazio.

3.4.4. ENSAIO EM VAZIO E CÁLCULO DAS PERDAS MECÂNICAS E PERDAS NO FERRO

O ensaio em vazio realizou-se logo após o ensaio da curva de carga. Começou-se por desacoplar o motor do leitor de binário e da carga, ficando o seu veio livre. Então cumpriu-se o esquema da figura 28.

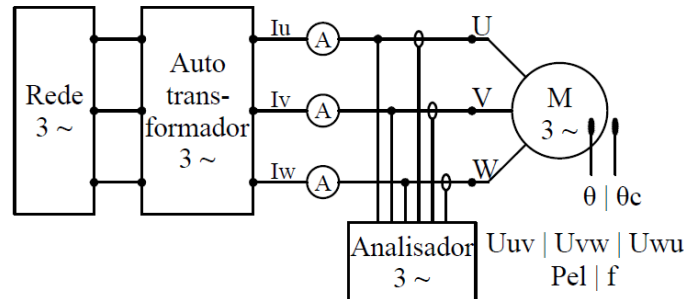


Figura 28 Esquema do ensaio em vazio.

De seguida, são ensaiados 8 pontos distintos de tensão. Os pontos 110 % 100 % 95 % e 90 % da tensão nominal são utilizados para a determinação das perdas no ferro e os pontos de 60 % 50 % 40 % e 30 % da tensão nominal são utilizados para a determinação das perdas mecânicas. Deve-se proceder aos pontos de ensaio de forma decrescente, começando em 110 % e acabando em 30 % da tensão nominal.

Em cada um dos 8 pontos de tensão, registaram-se as seguintes grandezas:

- U_0 – Tensões compostas entre terminais em vazio;
- I_0 – Correntes de linha em vazio;
- P_0 – Potência elétrica em vazio;
- R_0 – Resistência dos enrolamentos. Registam-se as resistências imediatamente antes e imediatamente após o ensaio, e o valor calculado da resistência dos enrolamentos para cada ponto de tensão é obtido através da interpolação entre essas resistências e a potência elétrica em vazio.

As leituras e cálculos do ensaio em vazio podem ser visualizadas na secção 4.8 dos anexos A e B. Com auxílio à folha de cálculo preparada para este trabalho, procedeu-se ao cálculo das perdas constantes p_c , perdas estas que são obtidas pela diferença entre a potência em vazio, P_0 , e a perdas elétricas no estator, p_e . As perdas constantes são o conjunto das perdas no ferro, p_{fe} , com as perdas mecânicas, p_m , tal como pode é indicado na expressão 20.

$$p_c = P_0 - p_e = p_m + p_{fe} \quad (20)$$

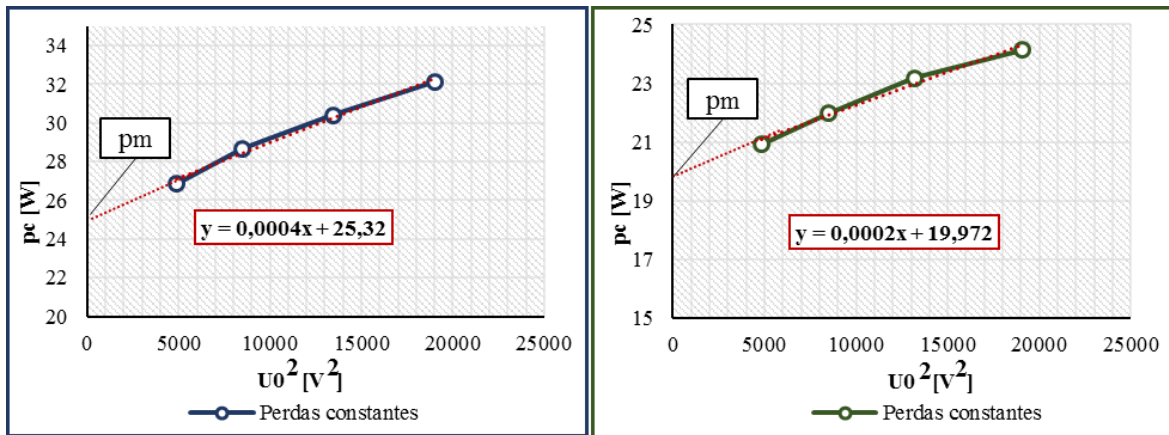


Figura 29 Extrapolação das perdas mecânicas através das perdas constantes.

As perdas mecânicas são determinadas pelo desenvolvimento de uma curva das perdas constantes em função do quadrado da tensão, para os quatro pontos em vazio mais baixos, de 60 % 50 % 40 % e 30 % da tensão nominal. Assim, as perdas mecânicas são obtidas pela extrapolação de uma linha reta até ao ponto de ordenada zero. Neste ponto são consideradas as perdas mecânicas à velocidade síncrona. Estes procedimentos de cálculo são ilustrados nos gráficos da figura 29.

Dos pontos de 110 % 100 % 95 % e 90 da tensão nominal, desenvolve-se uma curva da diferença entre as perdas constantes, p_c , e as perdas mecânicas, p_m , em função da tensão em vazio, U_0 . Para determinar as perdas no ferro à carga nominal, calcula-se a tensão interna, U_i , que tem em consideração a queda de tensão resistiva dos enrolamentos do estator pela seguinte expressão:

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \times \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \times \sin\varphi\right)^2} \quad (21)$$

Onde

$$\cos\varphi = \frac{P_{el}}{\sqrt{3} \times U \times I} \quad (22)$$

E

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \quad (23)$$

Em que a potência elétrica, P_{el} , a corrente, I , a tensão U e a resistência R são obtidos do ensaio à carga nominal.

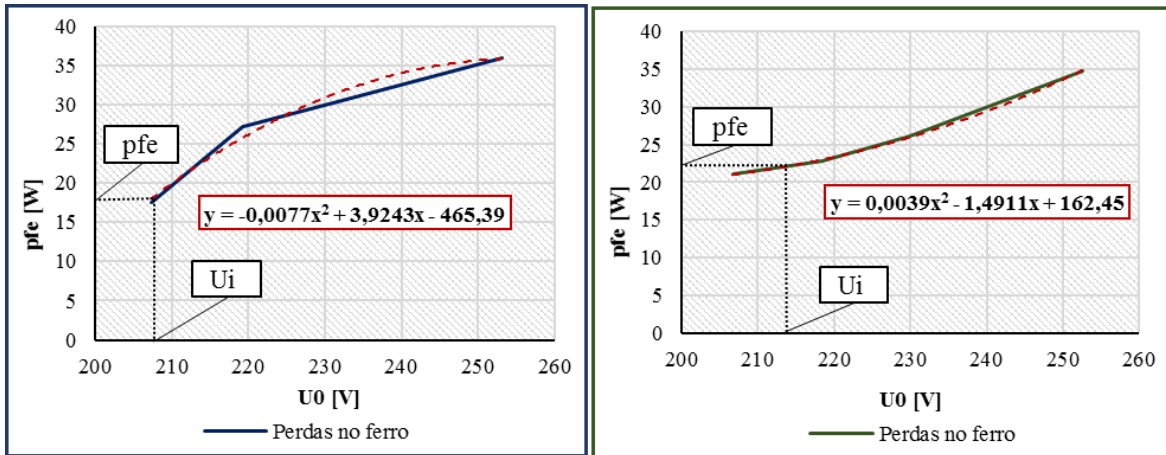


Figura 30 Interpolação das perdas no ferro com a tensão interna, U_i .

As perdas no ferro à carga nominal são obtidas pela interpolação das perdas no ferro à tensão interna de U_i , tal como é indicado nos gráficos da figura 30. Após determinadas as perdas convencionais, (perdas elétricas no estator e no rotor, perdas mecânicas e perdas no ferro), são de seguida ilustrados os cálculos de determinação das perdas suplementares e do rendimento dos métodos B, C e G.

3.4.5. MÉTODO B – DETERMINAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES E RENDIMENTO PELAS PERDAS SUPLEMENTARES RESIDUAIS

A determinação das perdas suplementares pelo método das perdas residuais, tem por base o calculo da diferença entre a potência absorvida, e a soma da potência útil com as perdas. Para cada ponto obtido do ensaio de curva de carga, determina-se as perdas suplementares residuais, p_{sr} , como indicado pela expressão 24.

$$p_{sr} = P_{el} - (P_m + p_e + p_r + p_{fe} + p_m) \quad (24)$$

Em que as perdas mecânicas são corrigidas para a velocidade de funcionamento de cada ponto de carga, de acordo com o deslizamento do mesmo e com as perdas mecânicas obtidas do ensaio em vazio p_{m0} ,

$$P_m = P_{m0} \times (1 - s)^{2.5} \quad (25)$$

Com

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f} \quad (26)$$

E

$$P_{m0} = 2 \pi \times T \times n \quad (27)$$

No entanto, as perdas suplementares residuais obtidas, de acordo com a norma IEC2 são corrigidas para que sejam nulas quando a carga também é nula. Para corresponder a este pressuposto, com base nos pontos do ensaio em carga, é obtida uma característica linear em função do quadrado do binário, com declive A e ordenada na origem B, tal como é indicado nas três expressões seguintes.

$$p_{sr} = A \times T^2 + B \quad (28)$$

A e B são constantes determinadas dos 6 pontos de carga usando as formulas 30 e 31.

$$A = \frac{((i \times \sum(p_{sr} \times T^2) - \sum p_{sr} \times \sum T^2))}{i \times \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (29)$$

$$B = \frac{\sum p_{sr}}{i} - A \times \frac{\sum T^2}{i} \quad (30)$$

Em que i é número de pontos somados.

A regressão linear dos valores de perdas residuais obtidas deverá ter um coeficiente de correlação, γ , menor do que 0.95. Se tal não acontecer, dever-se-á eliminar o pior ponto e repetir-se a regressão. Se γ aumentar para maior ou igual que 0.95, então é aceite esta segunda regressão. Se γ permanecer menor que 0.95, a condição não será valida e o ensaio deverá ser repetido. O coeficiente de correlação é obtido pela expressão 32.

$$\gamma = \frac{((i \times \sum(p_{sr} \times T^2) - \sum p_{sr} \times \sum T^2))}{\sqrt{i \times \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2 \times (i \times \sum p_{sr}^2 - (\sum p_{sr})^2)}} \quad (31)$$

A ordenada na origem B pode ser negativa ou positiva, pois poderá ser verificado um excesso ou falta na correção das perdas suplementares quando a carga é nula. Por esse mesmo motivo é que se faz a correção e se remove a componente fixa da ordenada. Assim o valor das perdas suplementares para cada ponto de carga deve ser determinado usando a expressão em 33.

$$p_s = A \times T^2 \quad (32)$$

Os gráficos presentes nas figuras 31 e 32 ilustram este procedimento de correção das perdas residuais, obtendo assim as perdas suplementares corrigidas.

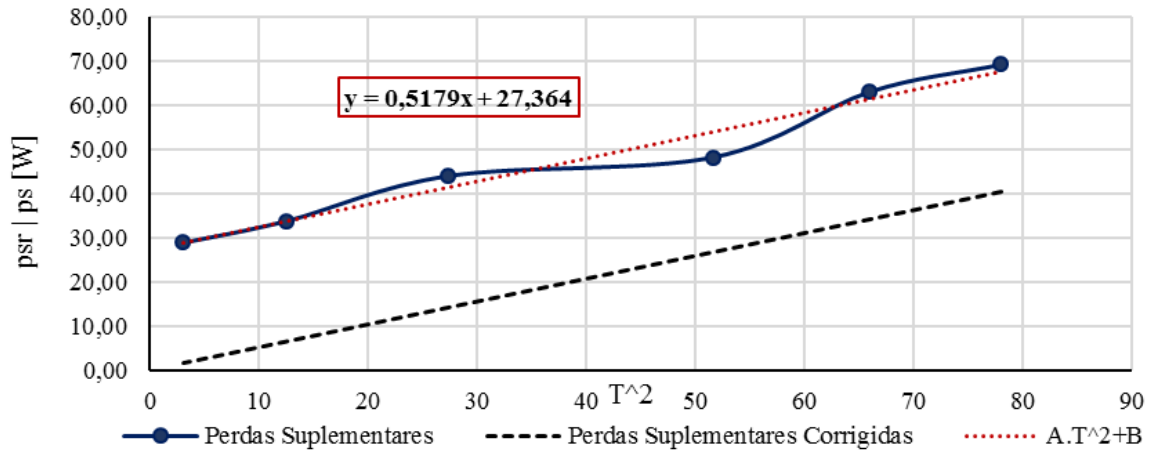


Figura 31 Perdas suplementares corrigidas do motor A.

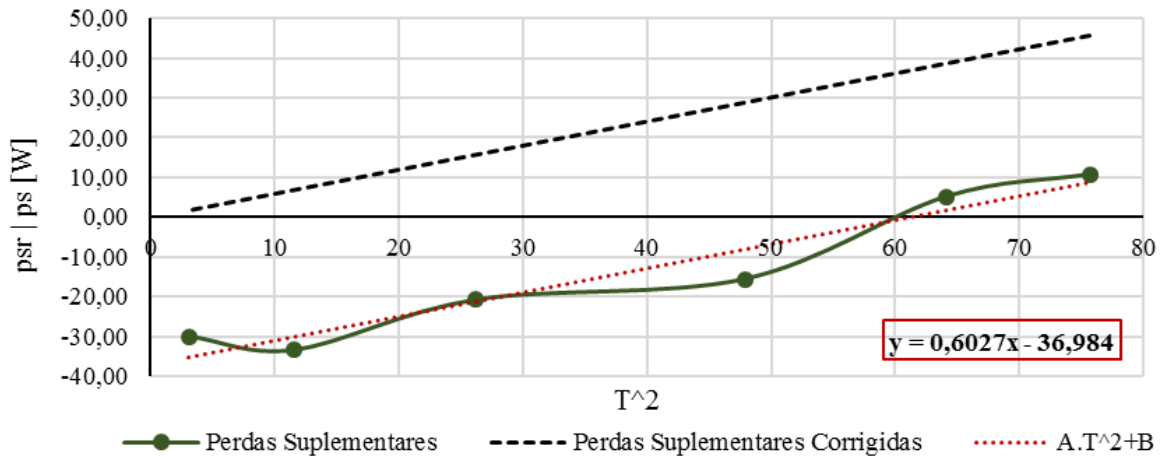


Figura 32 Perdas suplementares corrigidas do motor B.

Após determinadas as perdas suplementares, reúnem-se todas as perdas do motor de indução, calculando-se assim as perdas totais, p_T , pela soma de todas as perdas, como indicado de seguida:

$$p_T = p_{fe} + p_m + p_{e\theta} + p_{r\theta} + p_s \quad (33)$$

Em que o sufixo θ representa a correção da temperatura da resistência da bobinagem à temperatura de referência normalizada de 25 °C. Então, estas grandezas são multiplicadas pelo fator de correção k_θ .

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_e + 25 - \theta_c}{235 + \theta_e} \quad (34)$$

Em que θ_e é a temperatura do enrolamento e θ_c é a temperatura do fluido de arrefecimento durante os ensaios, ou seja, é a temperatura medida na entrada de ar do ventilador. Contudo, os ensaios do motor A e B foram realizados à temperatura ambiente de 24°C e 25°C respetivamente, sendo a sua diferença para com os 25°C nula ou reduzida, e por esse motivo o impacto deste fator k_θ é diminuído.

O rendimento da máquina para cada ponto de carga é obtido pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{P_{el\theta} - P_T}{P_{el\theta}} \quad (35)$$

Os resultados do método B podem ser observados na secção 4.5 dos anexos A e B.

3.4.6. MÉTODO C

As perdas suplementares pelo método das perdas atribuídas são calculadas de acordo com o redigido na secção 2.7.3, e determinada pela expressão 7. Assim para o motor A e para o motor B, e de acordo com o ponto de carga a 100 %, as perdas totais são obtidas por:

$$p_T = p_m + p_{fe} + p_e + p_r + p_s \quad (36)$$

Em que o rendimento é obtido por:

$$\eta = \frac{P_{el} - p_T}{P_{el}} \quad (37)$$

Os resultados das perdas atribuídas e do rendimento estão disponíveis na secção 4.6 dos anexos A e B.

3.4.7. MÉTODO G - EH-STAR

O método eh-star foi proposto por Heinz Jordan em 1967, na Alemanha, e o seu principio de funcionamento é assente na alimentação assimétrica de um motor de indução trifásico. A assimetria da alimentação é obtida pela ligação dos enrolamentos em estrela, alimentado por uma tensão monofásica. A alimentação monofásica é concebida pela tensão composta entre a fase U e V, e em paralelo, é inserida uma resistência auxiliar, tal como apresentado na figura 33. Para evitar a produção de componentes homopolares, o ponto neutro da ligação em estrela do motor não é ligado ao neutro da alimentação. São originadas no funcionamento da máquina como motor, duas componentes assimétricas distintas, uma componente direta

e uma componente inversa. A abreviatura Eh é proveniente do termo *Einphasig mit Hilfswiderstand*, que significa monofásico com resistência auxiliar, [22], [24].

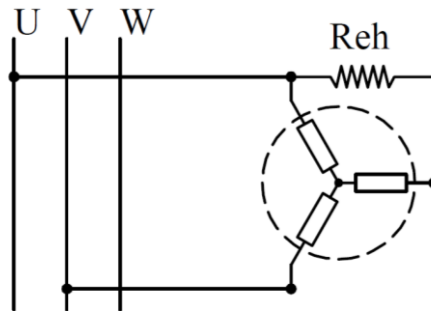


Figura 33 Esquema de ligação dos enrolamentos do motor no ensaio Eh-Star.

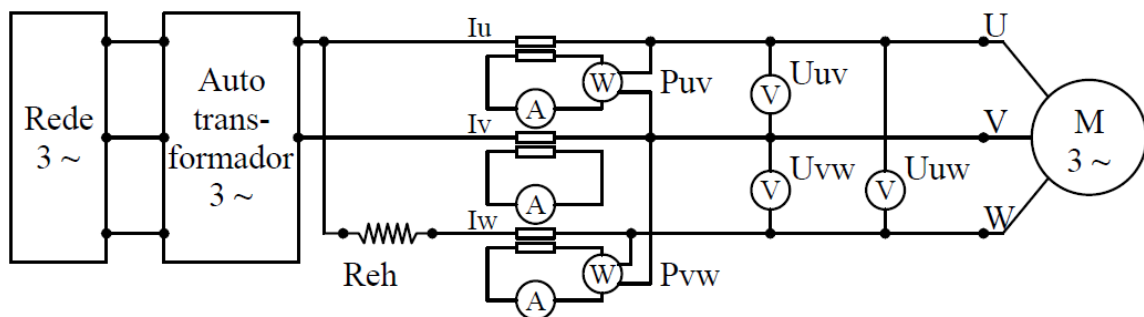


Figura 34 Esquema do ensaio Eh-Star.

Dá-se início ao ensaio, estabelecendo todas as ligações e equipamentos tal como apresenta a figura 34. A resistência auxiliar utilizada para promover o desequilíbrio é denominada de resistência R'_{eh} , sendo este valor determinado pela seguinte expressão:

$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \times I_N} \quad (38)$$

Na elaboração dos ensaios aos motores A e B, o valor de R'_{eh} teve a necessidade de ser reajustado, de forma a que a componente direta permanecesse abaixo de 30 % da componente inversa e que a velocidade de funcionamento permaneça num intervalo próximo da velocidade nominal. Assim, as seguintes condições foram garantidas para a execução destes ensaios:

- Componente direta < 30 % da componente inversa;
- Valor inicial de R'_{eh} não deverá ter uma diferença superior a 20 % do valor calculado;
- Valor da velocidade, n , não deverá ser superior a duas vezes a diferença entre a velocidade nominal, n_N , e a velocidade síncrona n_{sinc} , tal como é indicado na expressão 39.

$$n > n_{\text{sinc}} - 2 \times (n_{\text{sinc}} - n_N) \quad (39)$$

Se esta condição não for estabelecida, o ensaio deverá ser realizado novamente com um valor superior de R'_{eh} .

O valor de referência da corrente do ensaio eh-star depende da corrente nominal e da corrente em vazio, de acordo com:

$$I_{Eh} = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}} \quad (40)$$

E o valor de referencia da tensão do ensaio será:

$$U_{Eh} = U_N \times \sqrt{3} \quad (41)$$

Para ambos os motores, registaram-se os pontos de 150 %, 135 %, 120 %, 105 %, 90 %, 75 % do valor da corrente I_{Eh} . Os pontos são obtidos variando o valor da tensão de alimentação, começando pelo valor mais elevado e decrescendo até ao ponto final. De referir que os pontos a 90 % e 75 % do motor A, e o ponto a 75 % do motor B, não garantiram na totalidade a condição de que a componente direta fosse menor que 30 % da componente inversa, pois a razão entre as duas componentes nestes pontos foi de 31 %. Como a diferença foi apenas de 1 %, esta mesma diferença foi desprezada e os pontos foram aceites e tidos em consideração no resultado final.

Em cada um dos 8 pontos de corrente, registaram-se as seguintes grandezas:

- $U_u U_v U_w$ – Tensões entre terminais;
- $I_u I_v I_w$ – Correntes de linha em vazio;
- $P_{uv} P_{vw}$ – Potências elétricas;
- n – Velocidade de funcionamento;
- R_{vw} – Resistência dos enrolamentos v e w. Registam-se as resistências imediatamente antes e imediatamente após o ensaio. O valor após o ensaio é obtido pelo método de variação da resistência após o corte da alimentação e extrapolado para zero. Para cada ponto inferior a 100 % do valor da corrente de ensaio I_{eh} , ao valor da resistência é atribuído o valor medido após o ensaio. Para cada ponto superior a 100 %, o valor calculado da resistência dos enrolamentos é obtido através da interpolação entre essas resistências e a corrente, exceção ao valores de corrente.

O procedimento de cálculo das perdas suplementares do método Eh-Star será de seguida descrito. Começa-se por calcular os vetores das grandezas das tensões e correntes, através das suas componentes reais e imaginárias, tal como indicam as seguintes expressões. De referir que o apóstrofo indica a partir real do valor complexo, enquanto que o duplo apóstrofo indica que se trata do valor imaginário da grandeza.

Tensões:

$$\underline{U}_{UV} = U_{UV} \quad (42)$$

$$U'_{UV} = \frac{U_{VW}^2 - U_{WU}^2 - U_{UV}^2}{2 \times U_{UV}} \quad (43)$$

$$U''_{UV} = \sqrt{U_{WU}^2 - U'^2_{WU}} \quad (44)$$

$$U'_{VW} = -U_{UV} - U'_{WU} \quad (45)$$

$$U''_{VW} = -U''_{WU} \quad (46)$$

A partir dos graficos da figura 35, é possível observar o desequilíbrio das tensões de alimentação em cada fase do motor A e B. Este desequilíbrio, com a máquina em vazio, é o principio de funcionamento do método.

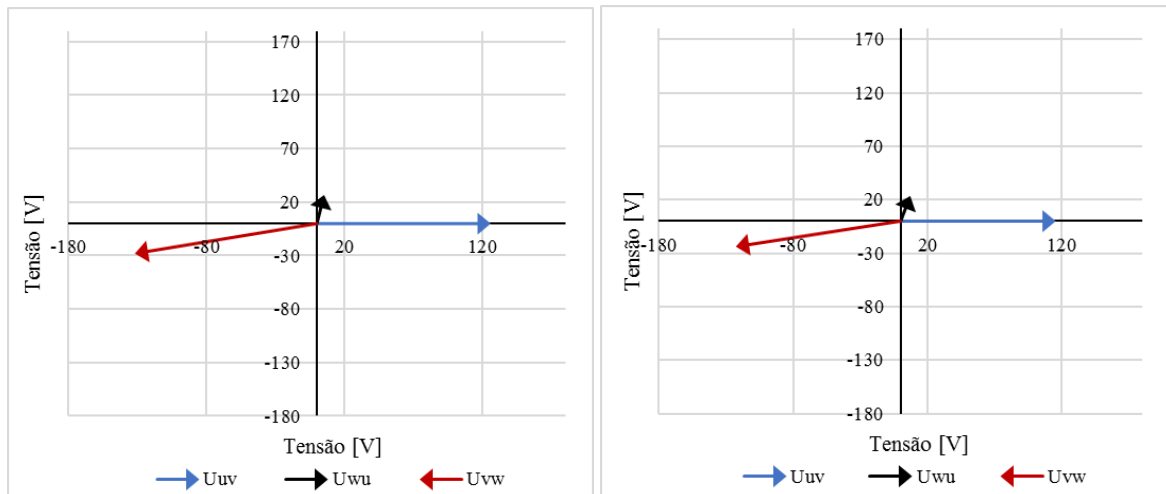


Figura 35 Tensões de alimentação do motor A e B no ensaio Eh-Star no ponto 105 % de It.

Correntes:

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} \times I_W}{U_{UV}} \quad (47)$$

$$I'_V = \sqrt{I_V^2 - I_V'^2} \quad (48)$$

$$k_1 = \frac{1}{2 \times I_V^2} \times (I_W^2 - I_U^2 - I_V^2) \quad (49)$$

$$I'_U = K_1 \times I'_V + \sqrt{\left(K_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2}\right) \times (I_V'^2 - I_V^2)} \quad (50)$$

$$I''_U = \frac{k_1 \times I_V^2 - I'_U \times I'_V}{I'_V} \quad (51)$$

$$I'_W = -I'_U - I'_V \quad (52)$$

$$I''_W = -I''_U - I''_V \quad (53)$$

De seguida, são calculadas as tensões internas, suprimindo as perdas elétricas, a partir da queda de tensão resistiva dos enrolamentos primários, de acordo com as seguintes expressões seguintes:

$$\underline{U}_{iUV} = \underline{U}_{UV} + \frac{R_{VW}}{2} \times (\underline{I}_V - \underline{I}_U) \quad (54)$$

$$\underline{U}_{iVW} = \underline{U}_{VW} + \frac{R_{VW}}{2} \times (\underline{I}_W - \underline{I}_V) \quad (55)$$

$$\underline{U}_{iWU} = \underline{U}_{WU} + \frac{R_{VW}}{2} \times (\underline{I}_U - \underline{I}_W) \quad (56)$$

Posteriormente, decompõem-se as componentes diretas e indiretas das tensões compostas (linha para linha), tal como indicam as expressões 58 e 59.

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (57)$$

$$\underline{U}_{iLL(1)} = \frac{1}{3} \times (\underline{U}_{iUV} + \underline{a} \times \underline{U}_{iVW} + \underline{a}^2 \times \underline{U}_{iWU}) \quad (58)$$

$$\underline{U}_{iLL(2)} = \frac{1}{3} \times (\underline{U}_{iUV} + \underline{a}^2 \times \underline{U}_{iVW} + \underline{a} \times \underline{U}_{iWU}) \quad (59)$$

Em complemento ao passo anterior, determinam-se as componentes diretas e inversas da tensão interna por fase, tal como indicado em 61 e 62.

$$\underline{U}_{i(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times e^{-j\frac{\pi}{6}} \times \underline{U}_{iLL(1)} \quad (60)$$

$$\underline{U}_{i(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times e^{j\frac{\pi}{6}} \times \underline{U}_{iLL(2)} \quad (61)$$

No passo seguinte, determina-se as tensões assimétricas internas por fase:

$$\underline{U}_{iU} = \underline{U}_{i(1)} + \underline{U}_{i(2)} \quad (62)$$

$$\underline{U}_{iV} = \underline{a}^2 \times \underline{U}_{i(1)} + \underline{a} \times \underline{U}_{i(2)} \quad (63)$$

$$\underline{U}_{iW} = \underline{a} \times \underline{U}_{i(1)} + \underline{a}^2 \times \underline{U}_{i(2)} \quad (64)$$

Posteriormente, determina-se a resistência das perdas no ferro

$$R_{fe} = \frac{U_{Eh}^2}{p_{fe}} \quad (65)$$

Onde U_{Eh} é a tensão de referência do ensaio eh-star e p_{fe} são as perdas no ferro. Assim as correntes das perdas no ferro, por fase, são determinadas de acordo com as expressões 66, 67, e 68.

$$I_{feU} = \frac{U_{iU}}{R_{fe}} \quad (66)$$

$$I_{feV} = \frac{U_{iV}}{R_{fe}} \quad (67)$$

$$I_{feW} = \frac{U_{iW}}{R_{fe}} \quad (68)$$

Após determinadas as correntes originadas pelas perdas no ferro, a corrente interna é calculada subtraindo essas mesmas correntes, tal como:

$$I_{iU} = I_U - I_{feU} \quad (69)$$

$$I_{iU} = I_U - I_{feU} \quad (70)$$

$$I_{iU} = I_U - I_{feU} \quad (71)$$

De seguida, calculam-se as componentes direta e inversa da corrente interna.

$$I_{i(1)} = \frac{1}{3} \times (I_{iU} + \underline{a} \times I_{iV} + \underline{a}^2 \times I_{iW}) \quad (72)$$

$$I_{i(2)} = \frac{1}{3} \times (I_{iU} + \underline{a}^2 \times I_{iV} + \underline{a} \times I_{iW}) \quad (73)$$

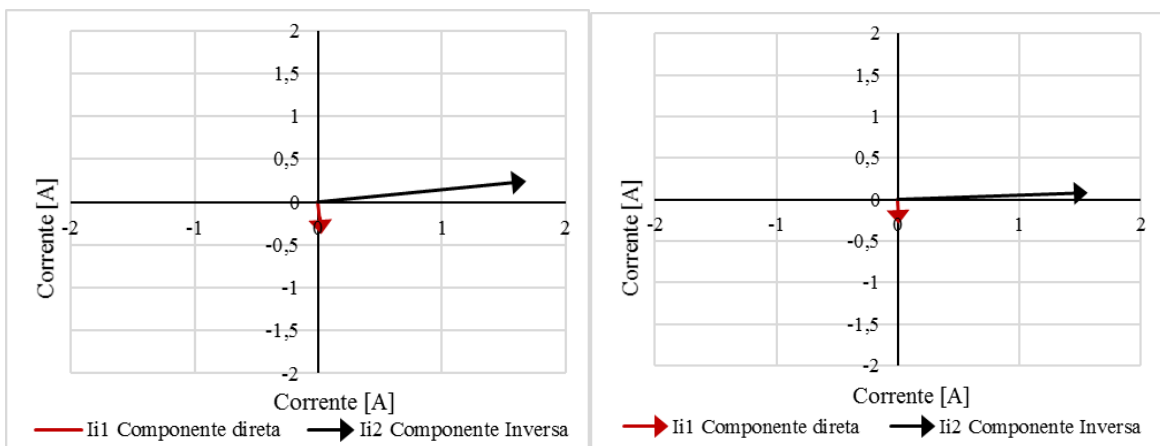


Figura 36 Componentes direta e inversa do motor A e B no ensaio Eh-Star no ponto de 105 % de I_t .

Tal como é possível verificar nos gráficos da figura 36, o modulo da componente direta é bastante inferior ao modulo da componente inversa, tal como a condição do ensaio o especifica.

Posteriormente, calculam-se as potências no entreferro, de acordo com:

$$P_{\delta(1)} = 3 \times (U'_{i(1)} \times I'_{i(1)} + U''_{i(1)} \times I''_{i(1)}) \quad (74)$$

$$P_{\delta(2)} = 3 \times (U'_{i(2)} \times I'_{i(2)} + U''_{i(2)} \times I''_{i(2)}) \quad (75)$$

Tabela 6 Componentes direta e inversa das potências transferidas no entreferro do motor A.

	150 %	135 %	120 %	105 %	90 %	75 %
$P_{\delta(1)}$	97 W	85 W	74 W	62 W	51 W	42 W
$P_{\delta(2)}$	50 W	39 W	29 W	24 W	18 W	12 W

Tal como é possível verificar na tabela 6, para todos os pontos de ensaio, os valores calculados da componente direta da potência no entreferro são sempre superiores à componente inversa da potência do entreferro. Este é um registo que tem sempre que se verificar, pois a componente predominante no funcionamento de um motor será sempre a componente direta, por muito reduzida que seja a potência absorvida.

O calculo analítico das perdas suplementares é obtido tendo em consideração o modelo T do circuito equivalente em carga. Nas expressões atrás foram depreciadas as perdas elétricas e as perdas no ferro. Não considerando a separação da máquina em duas componentes assimétricas distintas, mas sim considerando-a como um todo. Verifica-se que esta funciona em vazio, dada a ausência de carga no rotor. Considerando esse facto, verifica-se que apenas as perdas mecânicas e as suplementares estão a oferecer carga à máquina. As perdas suplementares são então obtidas pela diferença entre as potências de componente diretas e indiretas, no entreferro, e a diferença das perdas mecânicas, tal como indica a expressão 76.

$$p_{s\text{ Eh}} = k \times \left((1 - s) \times (P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - p_m \right) \quad (76)$$

Onde:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{I_{i(1)}}{I_{i(2)}}} \quad (77)$$

Após determinadas as perdas suplementares, estas deverão ser corrigidas pelo mesmo procedimento descrito na subsecção 3.4.5. No entanto, neste caso, as perdas suplementares deverão ser corrigidas em função da variação de $I_{i(2)}$ em relação à corrente estipulada do ensaio I_{Eh} , tal como:

$$p_{s\,Eh} = A \times \left(\frac{I_{i(2)}}{I_{Eh}} \right)^2 + B \quad (78)$$

Em que A e B são calculados de acordo com as expressões 29 e 30. Assim, as perdas suplementares corrigidas do ensaio Eh-star são determinadas pela anulação da ordenada na origem, tal como:

$$p_s = A \times \left(\frac{I_{i(2)}}{I_{Eh}} \right)^2 \quad (79)$$

As perdas suplementares, são obtidas apenas para o ponto de carga no regime nominal de funcionamento, ou seja, quando a razão da corrente de componente inversa com a corrente estipulada para o ensaio eh-star é igual a 1. Assim, as perdas suplementares no regime nominal de funcionamento são iguais ao declive A. A figura 37 apresenta a correção das perdas suplementares, com os 6 pontos do ensaio eh-star.

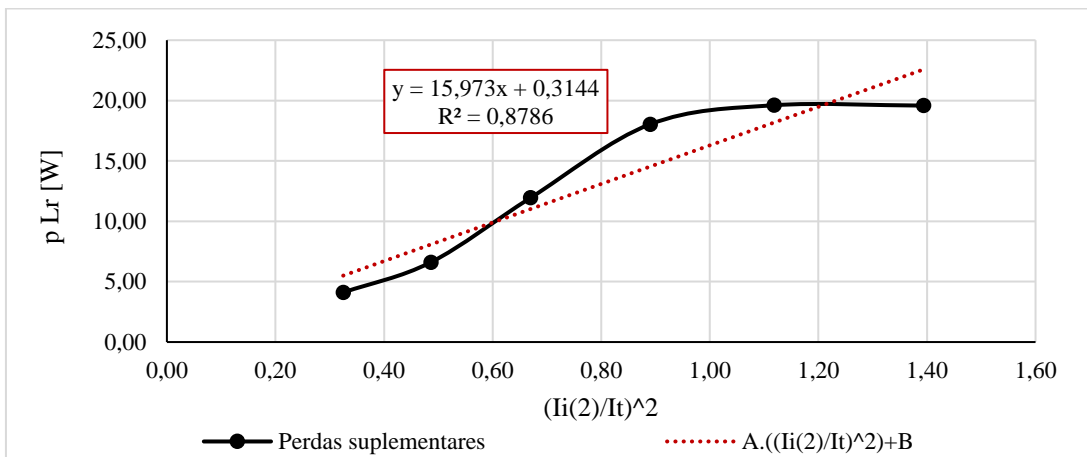


Figura 37 Perdas suplementares corrigidas pelo método Eh-Star do motor A (resistência R'_{eh} fixa a $62,5 \Omega$).

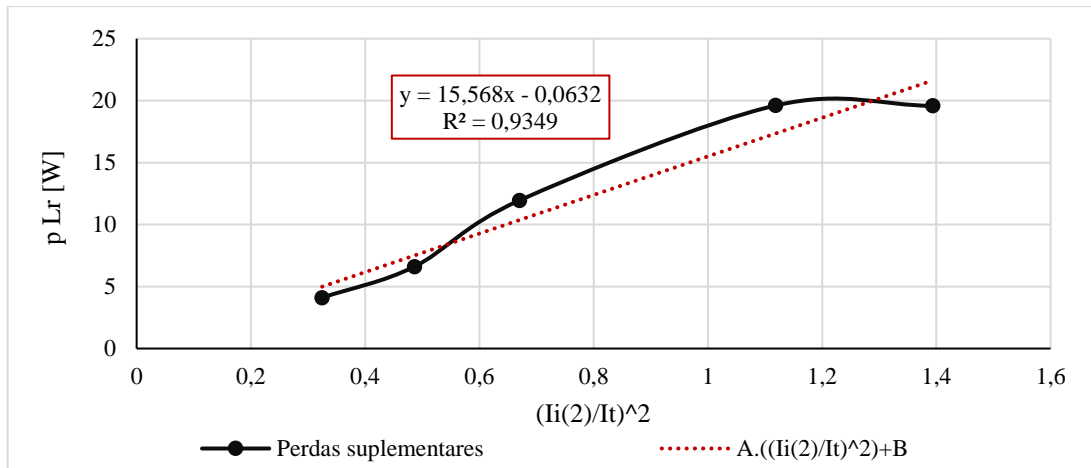


Figura 38 Perdas suplementares corrigidas pelo ensaio eh-star com o ponto a 125% removido do motor A (resistência R'eh fixa a 62.5 Ω).

Contudo, o coeficiente de correlação com 6 pontos de carga, é inferior a 0.95, pelo que, foi necessário remover o ponto a 120 %, que se verificava como o mais prejudicial. Assim as perdas suplementares obtidas foram determinadas de acordo com a regressão linear presente na figura 38. De referir que o coeficiente de correlação presente nas figuras 37 e 38 está ao quadrado, pelo que o valor do coeficiente de correlação a considerar deverá ser obtido através da raiz quadrada de R^2 .

As perdas totais são calculadas pelo somatório de todas as perdas, como indica a expressão 80.

$$p_T = p_{fe} + p_m + p_{e\theta} + p_{r\theta} + p_s \quad (80)$$

O rendimento é obtido considerando as perdas totais da expressão 80, e a potência elétrica do ensaio à carga nominal, tal como.

$$\eta = \frac{P_{el} - p_T}{P_{el}} \quad (81)$$

Os resultados dos cálculos atrás mencionados referentes ao método Eh-star são expostos na secção 4.9 dos anexos A e B. O cálculo das perdas totais e do rendimento são indicados na secção 4.7.

4. ANÁLISE CRÍTICA E COMPARATIVA

Resumidamente, são apresentados na tabela 7, os resultados das perdas e do rendimento de cada um dos métodos experimentalmente elaborados no regime nominal de funcionamento, para o motor A e para o motor B. De notar, que o ponto de carga obtido a 100 % apresenta um desvio na potência mecânica, do valor ideal. No motor A, a potência mecânica registada no ponto é de 1092 W, valor muito próximo da potência nominal de 1100 W, com um desvio de 0,7 %. No entanto, no motor B, regista-se uma diferença maior, de 4,2 %, pois a potência mecânica obtida é de 1054 W. Portanto, os valores dos pontos de carga a 100 % assinalados são um pouco abaixo do valor nominal estipulado, contudo, serão estes os valores a ter em consideração na análise crítica e comparativa a seguir exposta.

Tabela 7 Resumo de resultados, dos valores de perdas e rendimento do motor A e B no ponto de carga a 100 %.

Grandeza	Motor A	Motor B
Potência Elétrica	1344 W	1217 W
Potência Mecânica	1092 W	1054 W
Perdas elétricas no estator	123 W	105 W
Perdas elétricas no rotor	39 W	33 W
Perdas no ferro	19 W	22 W
Perdas mecânicas	23 W	19 W
Perdas suplementares Método B	27 W	29 W
Perdas suplementares Método C	33 W	30 W
Perdas suplementares Método G	16 W	12 W
Rendimento Método A	79.2 %	82.9 %
Rendimento Método B	82.8 %	83.0 %
Rendimento Método C	82.3 %	82.9 %
Rendimento Método G	83.7 %	84.4 %
Rendimento nominal do fabricante	81.5 %	84.3 %

4.1. INCERTEZA NO RESULTADO DO RENDIMENTO

A correta calibração dos aparelhos de medida é vital de forma a cumprir com os requisitos das classes de precisão impostos na norma IEC2. Porém, a sua correta calibração não elimina na totalidade a incerteza da leitura. Por esse motivo, na tabela 8 são apresentadas as incertezas das leituras de velocidade, binário e potência elétrica, grandezas que foram necessárias registar no ensaio à carga nominal para cálculo do rendimento pelo método A. O rendimento do motor A é afetado de uma incerteza no resultado final de $\pm 1,9\%$, enquanto que o rendimento no motor B apresenta uma incerteza de $\pm 2,1\%$. Estes valores de incerteza são elevados, pois a variação do resultado do rendimento, neste caso um intervalo aproximado de 4% , poderá traduzir a atribuição de uma classe de eficiência diferente.

Contudo, de referir que que a norma IEC2 não impõe o calculo da incerteza nos resultados das perdas e do rendimento, sendo unicamente calculado o resultado final do rendimento. A par deste facto, reitero que os requisitos dos aparelhos de medição foram quase na sua totalidade cumpridos, tal como demonstrado no anexo C. Considerando estas duas evidências, a análise aqui desenvolvida não considerou as incertezas dos resultados finais das perdas e do rendimento para o método B, C e G, sendo unicamente apresentado os valores das incertezas para o método A. Assim sendo, os resultados que constam na tabela 7 balizam os valores obtidos tal como apresentam os métodos dispostos na norma IEC2.

A análise crítica e comparativa entre métodos do cálculo das perdas e do rendimento tendo em conta as metodologias de cálculo consideradas, são de seguida apresentadas.

Tabela 8 Incerteza do valor do rendimento calculado com base no método A.

	Motor A		Motor B		Unidade
	Valores	Incerteza	Valores	Incerteza	
Velocidade	1452,0	$\pm 0,25$	1457,0	$\pm 0,25$	r.p.m.
Binário	7,06	$\pm 0,1$	6,60	$\pm 0,1$	N.m.
Potência elétrica	1355	± 14	1214	± 12	W
Rendimento	79,2	$\pm 1,9$	82,9	$\pm 2,1$	%

4.2. PERDAS CONVENCIONAIS DO MOTOR A E DO MOTOR B

As perdas elétricas no rotor e no estator, nos dois motores, apresentam valores muito próximos entre si, contudo no motor B estas são ligeiramente inferiores. Essa diferença de perdas é a mais significativa entre os dois motores, que depende de aspetos de projeto e de fabrico da bobinagem do estator e da gaiola de esquilo do rotor. O número de espiras, o diâmetro do fio, o enchimento das ranhuras do estator, a secção das barras do rotor e do anel de curto circuito, o tipo de ligações, para além do material condutor, são alguns dos aspetos que influenciam as perdas elétricas. O motor B, apresenta uma ligeira melhoria, uma vez que detêm a classe de eficiência superior, IE3.

Relativamente às perdas no ferro, a sua diferença entre os motores não é significativa, pelo que, a qualidade do material ferromagnético, a qualidade dos isolantes e o design das chapas magnéticas deverão ser muito semelhantes, permitindo uma distribuição do fluxo idêntica nos dois motores. Também no que diz respeito às perdas mecânicas, os dois motores devem apresentar muitas semelhanças. Primeiro, é de salientar que de acordo com a informação da placa de características, os motores apresentam os mesmos rolamentos, iguais no lado do ataque e no lado oposto ao ataque. Esta informação está demonstrada na secção 1 do anexo A e B. Em complemento, verificou-se com auxílio à camara termográfica, que o comportamento térmico na tampa dianteira dos dois motores é muito semelhante, tal como é possível verificar nas fotografias da figura 40 e 41. Outros dos aspetos que influenciam as perdas mecânicas é a ventilação. Foi verificado que os ventiladores que equipam os dois motores são de iguais dimensões, e têm o mesmo design. Os ventiladores podem ser visualizados nas fotografias da figura 39.



Figura 39 Ventiladores do motor A e do motor B.

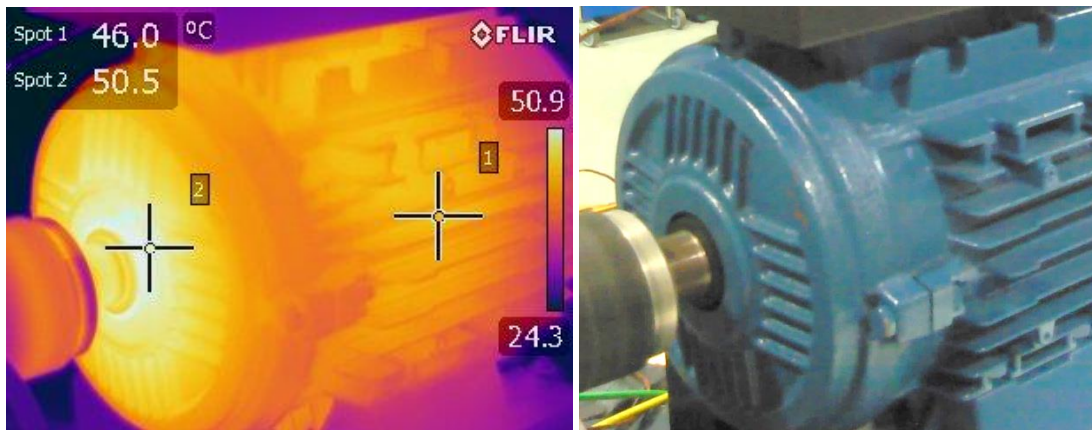


Figura 40 Fotografia termografia da tampa e do rolamento dianteiro do motor A.

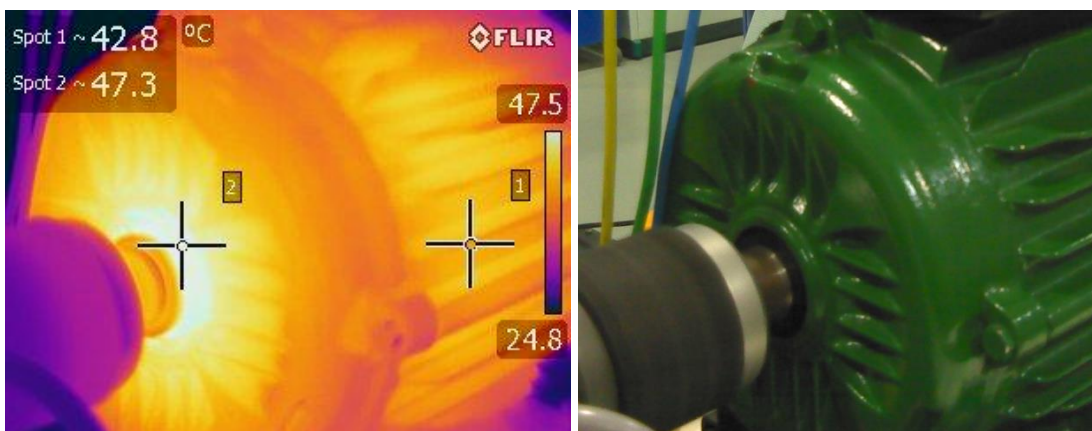


Figura 41 Fotografia termografia da tampa e do rolamento dianteiro do motor A.

4.3. PERDAS SUPLEMENTARES

Nos ensaios aos motores A e B, o método C apresenta os valores das perdas suplementares ligeiramente superior ao método B. Assim, o valor apresentado, foi ao encontro à definição apresentada pela norma IEC2, tal como descrito em 2.6.4.

Considerando os dados na tabela 7, é possível verificar a existência duma diferença acentuada nos resultados das perdas suplementares determinadas pelo método B e C, comparativamente ao método G, o método eh-star. A partir do método eh-star, as perdas suplementares são reduzidas face às obtidas pelos métodos das perdas residuais, B, e das perdas atribuídas, C. Esta diferença tem influência direta no rendimento final do motor, registando-se rendimentos maiores com o ensaio eh-star.

A baixa utilização do método G poderá ser justificada por ter uma formulação matemática mais complexa do que o método B, para além de requisitado mais um ensaio do que o método B. Outra questão verificada ao longo da realização do ensaio pelo método eh-star, foi a influência da variação da resistência R'eh.

Esta observação surgiu devido à necessidade de variar a resistência R'eh nos pontos de 95 % e 75 % para manter o quociente entre a componente direta e a componente inversa inferior a 30 %. Tal como referido anteriormente, a relação permaneceu nos 31 % e foi desprezada a diferença de 1 %. A questão que se verificou foi que, os valores das perdas suplementares pelo método eh-star modificaram considerando dois ensaios idênticos, mas com a resistência R'eh a variar de acordo com:

- Ensaio resistência R'eh variável. Tal como a norma indica, começou-se com o valor de R'eh dentro do intervalo de 20 % do valor de R'eh calculado, igual a 20 Ω. Contudo, para os pontos de 95 % e 75 %, foi necessário aumentar R'eh para 40 e 62.5 Ω, respetivamente (secção 4.9 e 4.10 do anexo A e B);
- Ensaio resistência R'eh fixa. Para todos os pontos do ensaios, a resistência R'eh utilizada foi de 62.5 Ω (secção 4.11 e 4.12 do anexo A e B).

De acordo com a figura 38, (ensaio que foi realizado com a resistência R'eh fixa em 62.5 Ω para todos os pontos do ensaio), as perdas suplementares obtidas foram de 15.57 W. Foi realizado o mesmo ensaio, porém, com a resistência R'eh variável de 20 a 62.5 Ω, e foram cumpridas as condições do ensaio. Verificou-se uma diferença nas perdas suplementares obtidas de 15.57 W para 8.19 W, ou seja, de 7.38 W.

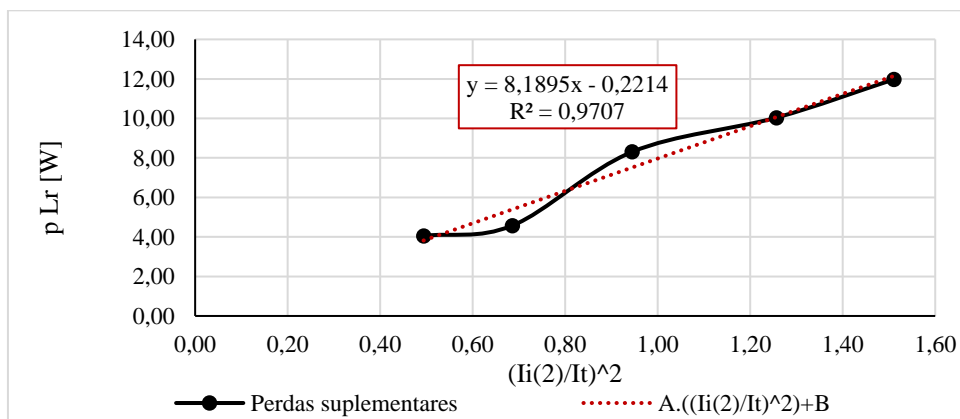


Figura 42 Perdas suplementares corrigidas pelo ensaio eh-star com o ponto a 75 % removido do motor A (resistência R'eh variável de 20 a 62.5 Ω)

Contudo, dada que a norma não coloca nenhuma condição de aceitação da variação da resistência R'_{eh} , seria de esperar obter os mesmos resultados nas perdas suplementares, algo que não se verificou. É que, apesar de a diferença em termos absolutos ser de apenas 7 W, numa análise relativa, estas variaram para quase o dobro, de 8.19 W para 15.57 W.

De acordo com [22], a determinação das perdas suplementares pelo método B, para máquinas de rendimento superior a 95 %, obtém-se resultados do rendimento com incerteza superior face ao método eh-star. Apesar das máquinas experimentalmente ensaiadas neste trabalho não terem um rendimento próximo dos 95 %, o valor absoluto das perdas suplementares é muito baixo, o que dificulta a precisão dos resultados obtidos. Para além desse facto, os parâmetros como a classe de precisão dos aparelhos, a variação de temperatura e as variabilidades das leituras influenciam significativamente o resultado das perdas suplementares obtidas.

4.4. PERDAS TOTAIS

As perdas totais obtidas pelos métodos indiretos são todas obtidas de igual forma (pelo somatório das perdas elétricas, perdas mecânicas, perdas no ferro e perdas suplementares). A variação destas perdas, em função da carga, é ilustrada na figura 43, de acordo com os resultados obtidos do ensaio de curva de carga do motor A, com as perdas suplementares a serem determinadas pelo método B, das perdas residuais.

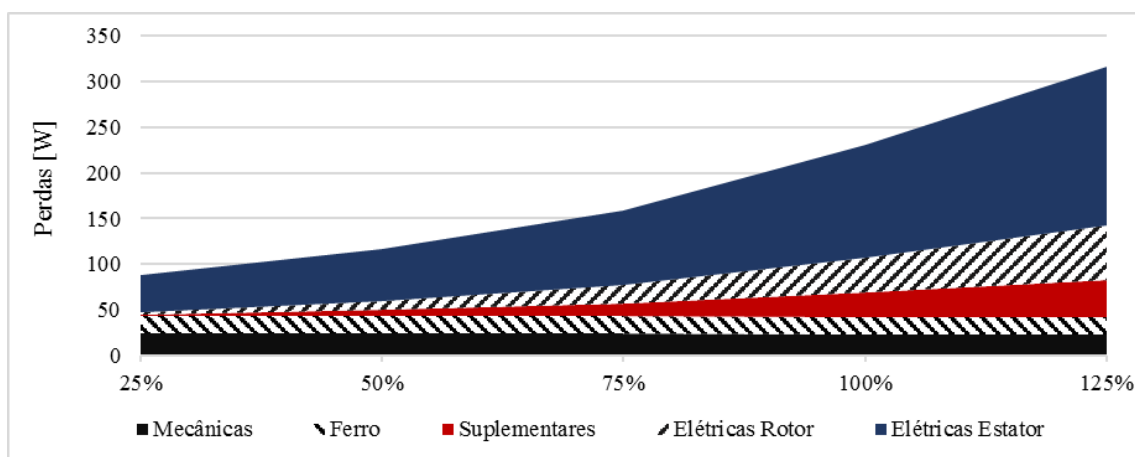


Figura 43 Perdas do motor A no ensaio da curva de carga.

Tal como foi calculado, as duas áreas inferiores representam as perdas constantes, ou seja, o conjunto das perdas mecânicas com as perdas no ferro. Verifica-se também, a influência das

perdas suplementares, (área a vermelho), com a carga. De valor reduzido quando o motor está em vazio e de valor máximo no ponto de carga em sobrecarga de 125 %.

4.5. RENDIMENTOS

Comparando os resultados dos ensaios diretos do motor A e do motor B, verifica-se que não há nenhuma ligação face aos restantes métodos. O rendimento, para o motor A apresenta um valor inferior em relação aos métodos B, C e D, o mesmo não acontece no motor B. Tal como já descrito anteriormente, verifica-se aqui, que a incerteza do método é elevada, uma vez que, um pequeno desvio na leitura da potência elétrica, ou mecânica poderá ter originado um erro nestes resultados.

Devido à diferença nos resultados das perdas suplementares entre o método B e G, o valor do rendimento transparecerá essa mesma desigualdade. Nestes ensaios, para ambos os motores, o rendimento obtido pelo método G é superior em relação aos restantes métodos.

À falta de informação de qual o método utilizado pelo fabricante, para a atribuição do rendimento, considera-se a seguir, os resultados obtidos pelos ensaios do método B, dado que é o método preferencial apresentado pela norma IEC2. O rendimento do motor A, determinado pelo método B é de 82.8 %, e verifica-se superior ao limite mínimo da classe IE2 estipulada na chapa de características, que é de 81.4 %. No que diz respeito ao motor B, a classe estipulada é a IE3, e o rendimento obtido pelo método B é 83.0 %. Contudo o requisito mínimo para a atribuição da classe IE3, de acordo com a norma IEC 60034-30-1 é de 84.1 %, conforme indicado na tabela 8. Apesar disso, o valor determinado do rendimento está sujeito a uma tolerância, tal como definida na tabela 1. Assim sendo, como o motor tem estipulado o valor de rendimento de 84.3 %, o valor mínimo obtido com a tolerância seria de 82.2 %, valor que é inferior ao rendimento calculado pelo método B. Com a consideração da tolerância, o motor B pode então ser classificado com a classe IE3.

Tabela 9 Limites mínimos das classes de eficiência de motores de 1,1 kW, 4 polos e 50 Hz.

Código IE	Limite mínimo
IE1	75.0 %
IE2	81.4 %
IE3	84.1 %
IE4	87.2 %

5. CONCLUSÕES

O aumento dos requisitos de alimentação e da precisão dos equipamentos de metrologia conduziram a uma melhoria significativa nos resultados obtidos para determinação das perdas e do rendimento. Contudo, esta evolução verificada na norma IEC2 foi acompanhada pela incorporação de novos métodos para a determinação das perdas suplementares, entre os quais, o método G, com as perdas suplementares a serem obtidas através do ensaio eh-star. Tal como se verificou pelos resultados obtidos, a determinação das perdas suplementares, tem uma influência significativa na determinação do rendimento. Por este motivo, a continuidade na investigação torna-se essencial, para que sejam aprimorados os métodos de ensaio já existentes ou mesmo obtidas novas soluções para determinação das perdas suplementares.

É de salientar, que as perdas suplementares determinadas pelo método B, no regime nominal de funcionamento, não se apresentam como o menor valor de perdas, sendo superiores às perdas no ferro e às perdas mecânicas. O mesmo não acontece considerando os valores obtidos das perdas suplementares pelo método eh-star. Por esse motivo, a incerteza na determinação das perdas suplementares tem um impacto grande no resultado final do rendimento, ao contrário do que vinha sendo estipulado na norma em vigor em todo o século passado, a IEC 34-2.

A diferença do valor do rendimento estipulada na placa de características dos dois motores em estudo é de 2.8 %. Contudo, tendo em consideração os valores de rendimento obtidos a partir dos ensaios indiretos, é possível verificar, que não existe uma diferença tão significativa, o que pode por em causa a confiabilidade dos dados do fabricante. Este é um facto que não deve ser descurado, pois na maioria das vezes, os motores desta gama de potência poderão ser fabricados em grandes quantidades, a partir de uma linha de montagem, sem o ensaio de determinação do rendimento. Isto acontece devido à enorme quantidade de motores produzidos, sendo ensaiada uma unidade e as restantes, de igual forma construtiva, ficam com o rendimento estipulado da amostra ensaiada.

De evidenciar, que uma das principais dificuldades verificada na realização deste trabalho, foi originada pela descrição muito sucinta dos procedimentos de ensaio e das metodologias de cálculo do rendimento presentes na norma IEC2. Nomeadamente, no que diz respeito ao método G, de determinação das perdas suplementares pelo método eh-star.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

A análise de apenas 2 motores de indução, de baixa potência, apresentou-se como uma das principais dificuldades no que diz respeito ao tratamento de dados e análise comparativa. Será importante, em trabalhos futuros, estender a aplicabilidade dos métodos explorados para máquinas de potência superior.

A diferença obtida nos resultados das perdas suplementares no método eh-star, considerando a variação ou não da resistência R'_{eh} , tal como mencionado na secção 4.2, é outro dos problemas identificados na realização dos ensaios e na análise comparativa. Seria importante verificar a influência da resistência eh-star em máquinas de potência superior, uma vez que na norma IEC2 não é presente nenhuma justificação ou facto que indique a variação verificada no resultado final das perdas suplementares. No entanto, esta incerteza e diferença nos resultados, poderá ter sido originada pela variabilidade das leituras, pela influência da temperatura, ou até, devido à incerteza originada pelos equipamentos de medição.

Referências Documentais

- [1] Internacional Energy Agency, “Electricity,” 2016. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/electricity/>. [Accessed: 24-Sep-2016].
- [2] European Commission, “2020 Energy Strategy.” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2020-energy-strategy>. [Accessed: 24-Sep-2016].
- [3] Internacional Energy Agency, H. Falkner, and S. Holt, “Walking the torque,” 2011.
- [4] Internacional Electrotechnical Commission, *IEC 60034-30-1: Efficiency Classes of line operated AC motors (IE code)*. 2014.
- [5] ABB, “Powering the world economy. Is there a better way to use electricity?,” 2015.
- [6] Austrian Energy Agency, EMSA, and 4E, “Policy Guidelines for Electric Motor Systems,” 2014.
- [7] Internacional Energy Agency, P. Waide, and C. U. Brunner, “Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems,” 2011.
- [8] European Comission, “Guidelines accompanying - Eco Design Requirement of Electric Motors,” 2014.
- [9] ABB, *Low Voltage Motors - Motor guide*, no. February. 2014.
- [10] P. Europeu, “Directiva 2005/32/CE do parlamento europeu e do conselho,” *J. Of. da União Eur.*, vol. 2002, no. 191, pp. 29–58, 2005.
- [11] J. M. BARROSO and Comissão Europeia, “Regulamento (UE) N° 4/2014 da Comissão,” *J. Of. da União Eur.*, no. 2, pp. 1–2, 2015.
- [12] Parlamento Europeu, J. B. FONTELLES, Pelo Conselho, and J. STRAW, “REGULAMENTO (CE) N° 640/2009,” *J. Of. da União Eur.*, vol. 2009, no. 7, pp. 26–34, 2009.
- [13] N. Glew, “Stray Load Losses in induction Motors: A Chalange to Academia,” *Power Eng. J.*, 1998.
- [14] Internacional Electrotechnical Commission, *IEC 60034-1 Rating and performance*. 2004, p. 76.
- [15] N. Tesla, *My Inventions Nikola Tesla’s Autobiography*. 1919.

- [16] J. A. B. Carvalho and Instituto Superior de Engenharia do Porto, *Máquinas Assíncronas de Indução*. 2014.
- [17] J. A. B. Carvalho and Instituto Superior de Engenharia do Porto, *Circuitos Magnéticos e Electromagnetismo*. 2013.
- [18] Marco Soares, “Eletromagnetismo II-60,” 2007. [Online]. Available: <http://www.mspc.eng.br/elemag/eletrm0260.shtml>.
- [19] Aníbal de Almeida, Paolo Bertoldi, and Werner Leonhard, *Energy efficiency improvements in electric motor and drive*. 1997.
- [20] L. Aarniovuori, J. Kolehmainen, A. Kosonen, M. Niemela, and J. Pyrhonen, “Uncertainty in motor efficiency measurements,” *Proc. - 2014 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2014*, no. September, pp. 323–329, 2014.
- [21] E. B. Agamloh, “An evaluation of induction machine stray load loss from collated test results,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2311–2318, 2010.
- [22] M. Aoulkadi, “Experimental Determination of Stray Load Losses in Cage Induction Machines,” 2011.
- [23] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, S. Member, and A. Ometto, “Uncertainty Issues in Direct and Indirect Efficiency Determination for Three-Phase Induction Motors : Remarks About the IEC 60034-2-1 Standard,” pp. 1–16, 2016.
- [24] O. J. G. da Cunha, “Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star – análise crítica,” 2009.
- [25] P. Pillay, M. Al-badri, S. Member, and P. Angers, “A New Stray-Load Loss Formula for Small and Medium-Sized Induction Motors,” 2016.
- [26] K. Yamazaki and Y. Haruishi, “Stray load loss Analysis - Calculation by Finite-Element Method,” 2004.
- [27] A. E. Fitzgerald, J. Charles Kingsley, and S. D. Umans, *Electric machinery*, vol. 319, no. 4. 2003.
- [28] Internacional Electrotechnical Commission, *IEC 60034-2-1 Parte 2: Standard methods for determining losses and efficiency from tests*. 2014.
- [29] WEG, “Motores Elétricos - Guia de Especificação,” 2015.
- [30] Internacional Electrotechnical Commission, *IEC 60034-12 Edition 2.1 Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*, vol. 2002. 2007.

Anexo A. Ensaio de determinação das perdas e do rendimento do motor A

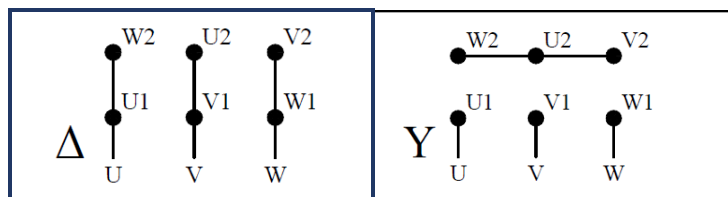
1. IDENTIFICAÇÃO DO MOTOR MOTOR A

Designação do Motor:	WEG W22 1,1 kW 4 Pólos IE2 Azul	Número de Serie: 1013144755
-----------------------------	--	------------------------------------

Características Gerais			
Fabricante	WEG	Temperatura mínima ambiente	-20 °C
Gama	W22	Temperatura máxima ambiente	40 °C
Potência Mecânica	1,1 kW	Classe de Isolamento	F
Número de polos	4	Classe de Aquecimento	B
Serviço	S1	Possível Colocar Termopar	Sim
Fator de Serviço	1.00	Altitude	1000 m.a.s.l
IE Code	IE2	Índice de Proteção IP	55
Rolamento lado ataque	6205-ZZ	Design N	Sim
Rolamento lado oposto ataque	6204-ZZ	Montagem	B3T
Cor exterior	Azul	Peso	18 kg

Características de Desempenho									
	U		f Hz	Pm kW	n rpm	I		FP	η 100% %
	Δ	Y				Δ	Y		
	V	V				A	A		
1°	220	380	50	1,1	1432	4,27	2,47	0,83	
2°	230	400	50	1,1	1440	4,17	2,40	0,81	81,5
3°		415	50	1,1	1444		2,36	0,79	
4°		440	60	1,1	1729		2,50	0,83	
5°		460	60	1,1	1736		2,40	0,82	

Funcionamento durante o ensaio	
Ligado em Δ ou Y?	Δ
Linha de Desempenho	2°



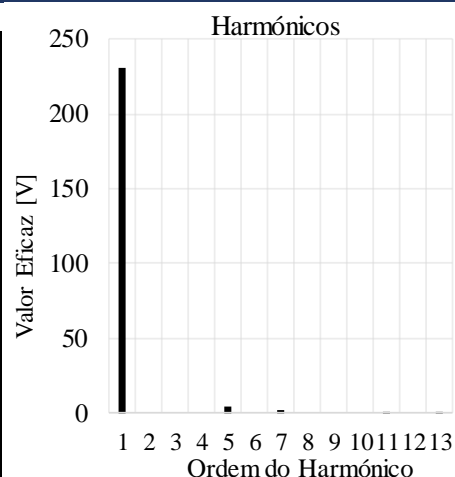
A Vermelho - Leituras Efetuadas

A Preto - Valores Definidos ou Calculados

2.1 Alimentação Elétrica

2.1.1 Harmônicos de tensão

Ordem do Harmônico	Frequência [Hz]	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	Un [V]
1	50	230,00	230,70	230,00	230,23
2	100	0,00	0,00	0,00	0,00
3	150	0,00	0,00	0,00	0,00
4	200	0,00	0,00	0,00	0,00
5	250	4,80	4,80	4,60	4,73
6	300	0,00	0,00	0,00	0,00
7	350	2,30	2,30	2,30	2,30
8	400	0,00	0,00	0,00	0,00
9	450	0,00	0,00	0,00	0,00
10	500	0,00	0,00	0,00	0,00
11	550	0,70	0,50	0,70	0,63
12	600	0,00	0,00	0,00	0,00
13	650	0,70	0,50	0,50	0,57



Fator Harmônico - HFV	Limite	Limite Ensaio Térmico
0,010	0,03 OK	0,015 OK

2.1.2 Componentes Simétricas

V1 [V]	230,1	ϕ_{12} [°]	120	ϕ_1 [°]	0
V2 [V]	231	ϕ_{23} [°]	120	ϕ_2 [°]	-120
V3 [V]	230,4	ϕ_{31} [°]	120	ϕ_3 [°]	120

Componente	Tensão	Razão Comp. Comp. Dir.	Limites Máximos						
			Longo Período		Curto Período (a.)		Ensaio Térmico		
Direta [V]	230,50								
Inversa [V]	0,26	0,1%	1,0%	OK	1,5%	OK	0,5%	OK	
Homopolar [V]	0,26	0,1%	1,0%	OK	a. Curto período - que não exceda alguns minutos				

2.2 Aparelhos de medição

2.2.1 Frequência

Nominal [Hz]	Média [Hz]	Desvio		Limite		
		[Hz]	[%]	[Hz]	[%]	
50	50,01	0,01	0,0%	0,05	0,1%	OK

2.2.2 Grandezas Elétricas

Grandezas Elétricas Limites:	Classe de Exatidão		Incerteza
	Direto	Indireto	$\cos(\phi)=1$
	0,2	0,5	0,02%

2.2.3 Binário

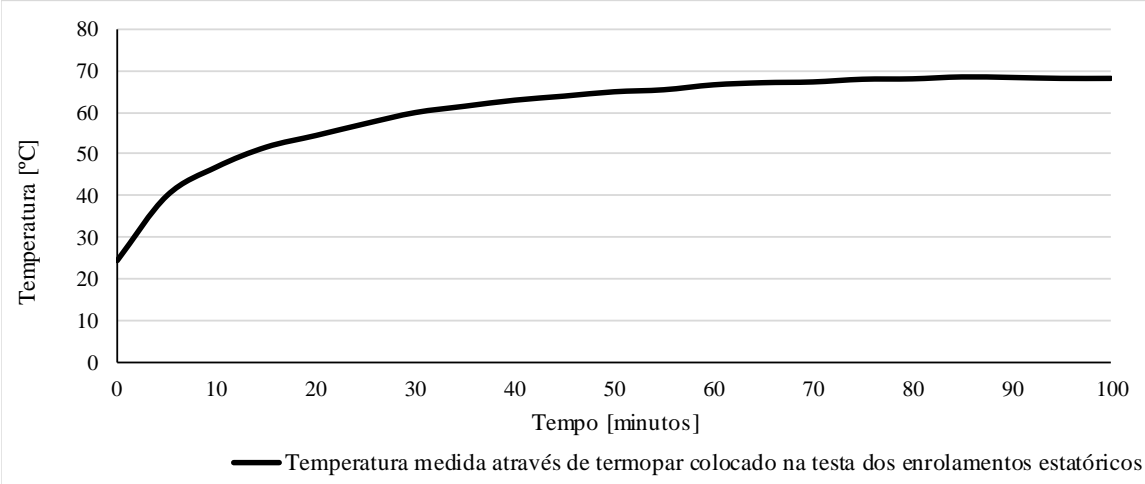
Binário	Classe de Exatidão	Range Leitor de Binário [Nm]	Binário Máximo Motor [N.m]	%	Limite	
Limites:	0,2	50	8,83	17,66%	10,00%	NOK

2.2.4 Velocidade

Classe de Exatidão	% of full scall	[r.p.m.]
	0,10%	0,1

2.2.4 Temperatura

Classe de Exatidão	[K]
	1



Notas:

a. O equilíbrio térmico é alcançado, após se verificar a variação inferior ou igual a 1 °C por meia hora.

1. As leituras da temperatura foram efectuadas em intervalos de tempo de 10 segundos até que seja cumprido o requisito acima enunciado, contudo apenas são apresentados os dados de 5 em 5 minutos.

Tempo		θ [°C]	ΔT 30 min [°C]	$\Delta T < 1^\circ\text{C}$
Hora	Minutos	Estator		
19:25:00	0	25	--	--
19:30:00	5	40	--	--
19:35:00	10	47	--	--
19:40:00	15	52	--	--
19:45:00	20	54	--	--
19:50:00	25	57	--	--
19:55:00	30	60	35	Não
20:00:00	35	61	21	Não
20:05:00	40	63	16	Não
20:10:00	45	64	12	Não
20:15:00	50	65	10	Não
20:20:00	55	65	8	Não
20:25:00	60	66	7	Não
20:30:00	65	67	6	Não
20:35:00	70	67	4	Não
20:40:00	75	68	4	Não
20:45:00	80	68	3	Não
20:50:00	85	68	3	Não
20:55:00	90	68	2	Não
21:00:00	95	68	1	Não
21:05:00	100	68	1	Sim

4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTORA

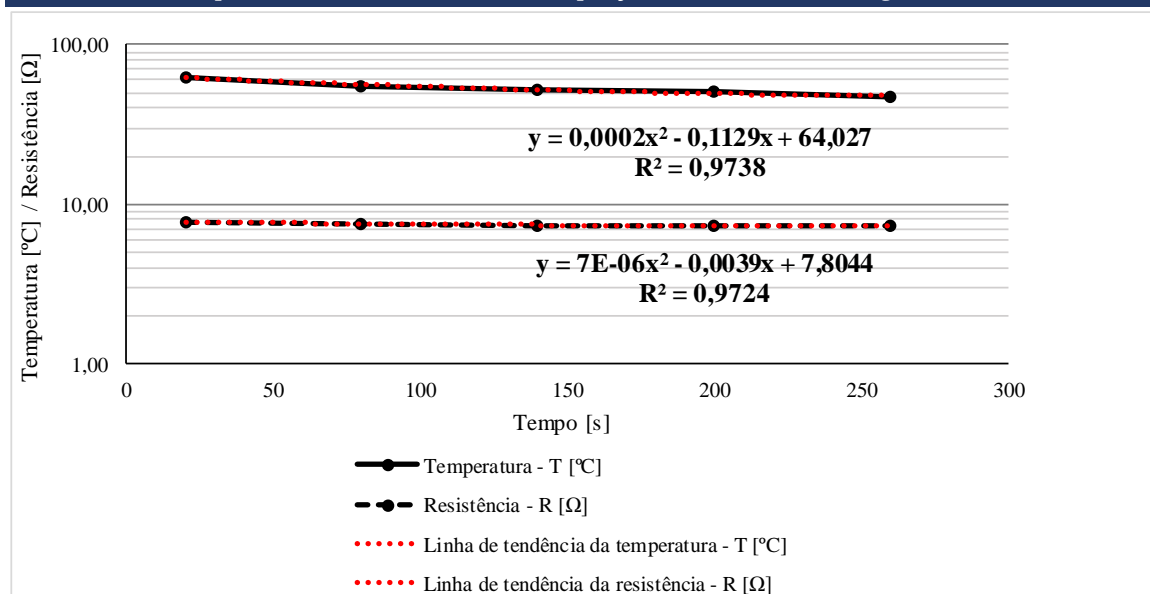
4.1 Ensaio à carga nominal

Tensão composta uv	Uuv	230,1	V	Temp. fluido arrefecimento	θ_c	24	°C
Tensão composta vw	Uvw	231,2	V	Temperatura enrolamento	θ_e	64,0	°C
Tensão composta wu	Uwu	230,7	V	Resistência à carga nominal	RN	7,80	Ω
Tensão composta média	U	230,7	V	Correção para a temperatura ambiente de referência			
Corrente de linha u	Iu	4,1	A	Par de polos	p	2	
Corrente de linha v	Iv	4,1	A	Coeficiente de correção	K θ	1,003	
Corrente de linha w	Iw	4,0	A	Deslizamento	s	0,033	
Corrente de linha média	I	4,1	A	Deslizamento corrigido	s θ	0,033	
Frequência	f	50,04	Hz	Perdas elétricas estator	pe	129	W
Velocidade	n	1452	r.p.m.	Perdas elétricas estator corrigida	pe θ	129	W
Binário	T	7,06	N.m.	Perdas elétricas rotor	pr	40	W
Potência elétrica	Pel	1355	W	Perdas elétricas rotor corrigidas	pr θ	40	W
Potência mecânica	Pm	1073	W	Potência elétrica corrigida	Pel θ	1355,5	W

4.2 Método A - Medição direta da potência de entrada e saída

Rendimento	η	79,2	%
-------------------	--------	------	---

4.3 Resistência e temperatura determinada através da extrapolação da resistência da bobinagem



Motor frio. Antes da estabilização térmica						
Tempo		Resistência [Ω]			RN	θ_a
Hora	Seg.	Ruv	Rvw	Rwu	[Ω]	[°C]
19:25:00	0	4,4	4,4	4,4	6,60	24

Motor quente. Após estabilização térmica.						
Tempo		Resistência linha-linha			R N	θ_e
Hora	Seg.	Rll uv	Rll vw	Rll wu	[Ω]	[°C]
21:01:00	0	--	--	--	7,80	64,03
21:01:20	20	5,2	5,1	5,2	7,75	62,43
21:02:20	80	5	5	5	7,50	55,08
21:03:20	140	4,9	4,9	5	7,40	52,00
21:04:20	200	4,9	4,9	4,9	7,35	50,43
21:05:20	260	4,9	4,8	4,8	7,25	47,22

4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTORA

4.4 Ensaio da curva de carga

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R [Ω]	T [°C]	Hora inicio	
Resistência antes do ensaio	Rll	4,8	4,8	4,8	7,20	54	21:06:00

		125%	115%	100%	75%	50%	25%	
Tensão composta uv	Uuv	230,6	229,7	229,6	230,9	228,8	230,2	V
Tensão composta vw	Uvw	232,6	232,9	232,2	232,9	230,9	231,7	V
Tensão composta wu	Uwu	230,8	230,3	229,5	231,0	229,6	230,5	V
Tensão composta média	U	231,3	231,0	230,4	231,6	229,8	230,8	V
Corrente de linha u	Iu	4,9	4,6	4,2	3,4	2,8	2,4	A
Corrente de linha v	Iv	4,9	4,5	4,1	3,3	2,7	2,3	A
Corrente de linha w	Iw	5,0	4,6	4,2	3,4	2,8	2,3	A
Corrente de linha média	I	4,9	4,6	4,1	3,4	2,8	2,3	A
Potência elétrica	PeI	1676	1535	1344	992	691	387	W
Fator de potência	Cos φ	0,85	0,84	0,81	0,74	0,62	0,41	
Frequência	f	50,00	50,01	50,00	50,01	50,03	50,03	Hz
Velocidade	n	1439	1445	1452	1466	1475	1489	r.p.m.
Binário	T	8,83	8,12	7,18	5,23	3,54	1,74	N.m.
Resistência	R	7,20	7,20	7,20	7,28	7,31	7,35	Ω
Deslizamento	s	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	
Potência mecânica	Pm	1330,6	1228,7	1091,7	802,9	546,8	271,3	W
Perdas Elétrica Estator	pe	174,2	151,0	123,4	82,0	56,7	40,6	W
Perdas Elétricas Rotor	pr	60,3	50,3	38,5	20,4	10,6	2,6	W
Perdas no ferro	pfe	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	W
Perdas mecânicas	pm	22,8	23,1	23,3	23,9	24,2	24,8	W

Δf < 0,1% OK

4.5 Método B - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através das perdas residuais

Perdas suplementares separadas	pss	69,3	63,1	48,3	44,1	33,9	28,9	W
Quadrado do Binário	T ²	77,97	65,93	51,55	27,35	12,53	3,03	
Perdas suplementares corrigidas	ps	40,4	34,1	26,7	14,2	6,5	1,6	W
Perdas totais	pT	316,5	277,3	230,7	159,2	116,8	88,3	W
Rendimento	η	81,1%	81,9%	82,8%	84,0%	83,1%	77,2%	%

γ1 OK

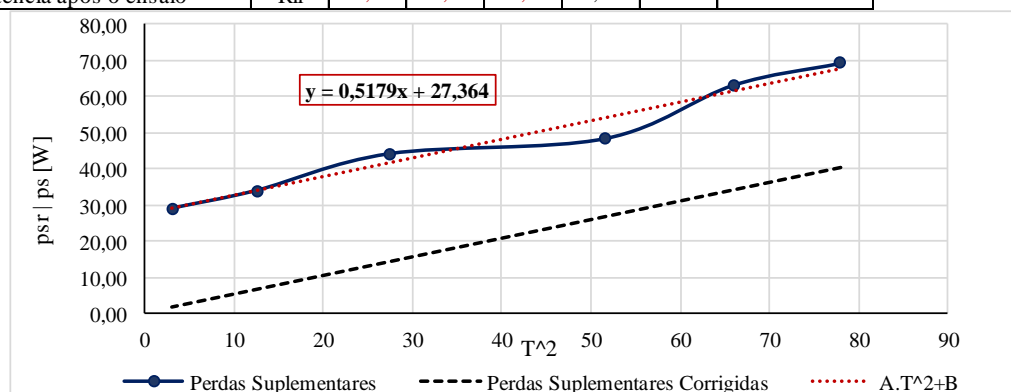
4.6 Método C - Soma de perdas: perdas adicionais determinadas através das perdas atribuídas

Perdas suplementares atribuídas	ps			33,34				W
Perdas totais	pT			237,3				W
Rendimento	η			82,3%				%

4.7 Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star

Perdas suplementares Eh-Star	ps			8,19				W
Perdas Totais	pT			212,2				W
Rendimento	η			84,2%				%

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R	T	Hora Fim	
Resistência após o ensaio	Rll	4,9	4,9	4,9	7,35	56	21:23:00



4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTORA

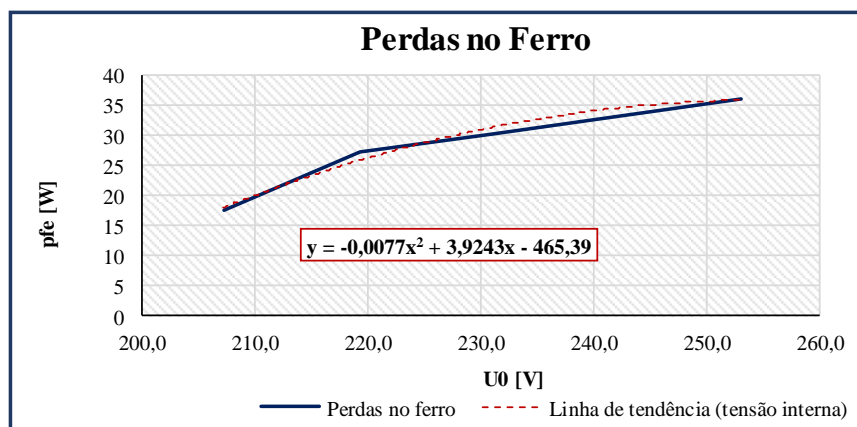
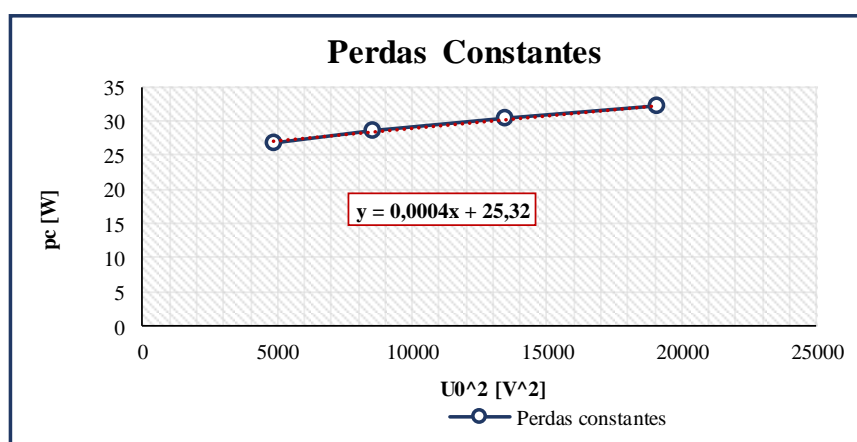
4.8 Ensaio em vazio

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R	T	Hora inicio	
Resistência antes do ensaio	Rll,0	4,8	4,8	4,8	7,20	53	21:24:00

		110%	100%	95%	90%	60%	50%	40%	30%	
Tensão composta uv	Uuv	253,0	230,7	218,9	207,0	137,7	115,7	91,9	69,5	V
Tensão composta vw	Uvw	253,4	231,1	219,5	207,4	138,3	116,1	92,2	69,7	V
Tensão composta wu	Uwu	253,0	231,0	219,3	207,3	138,1	115,9	92,3	69,9	V
Tensão composta média	U0	253,1	230,9	219,2	207,2	138,0	115,9	92,1	69,7	V
Corrente de linha u	Iu	2,9	2,2	2,0	1,8	1,1	0,9	0,7	0,6	A
Corrente de linha v	Iv	2,8	2,1	1,9	1,7	1,1	0,9	0,7	0,6	A
Corrente de linha w	Iw	2,8	2,2	2,0	1,8	1,1	0,9	0,8	0,6	A
Corrente de linha média	I0	2,9	2,2	2,0	1,8	1,1	0,9	0,7	0,6	A
Potência em vazio	P0	120	89,2	79,8	65,2	40,7	36,4	32,6	29,4	W
Frequência	f	50,00	49,98	49,98	49,98	49,99	49,98	49,99	49,99	Hz
Resistência	R	7,20	7,15	7,13	7,11	7,07	7,06	7,06	7,05	Ω
Quadrado da Tensão	U0^2	64076	53330	48063	42946	19053	13433	8488,6	4858,1	V^2
Perdas elétricas	pel	58,687	33,71	27,348	22,39	8,5739	6,0116	3,9229	2,5549	W
Perdas constantes	pc	61,313	55,49	52,452	42,81	32,126	30,388	28,677	26,845	W
Perdas no ferro	pfe	35,993	30,17	27,132	17,49					V

Tensão interna no entre-ferro	Ui				208,30					V
Perdas mecânicas	pm				25,32					W
Perdas no ferro corrigidas	pfe				18,77					W

		Rll uv	Rll vw	Rll wu	R	T	Hora Fim
Resistência após o ensaio	Rll,0	4,7	4,7	4,7	7,05	43	21:37:00



4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR A

4.9 Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star

Ligação em estrela ou triângulo	Δ Y?	Δ		Tensão ensaio Eh-Star	Ueh	398,4	V
Tensão nominal	UN	230	V	Perdas no ferro	pfe	18,77	W
Corrente nominal	IN	4,17	A	Resistência no ferro	Rfe	8456,9	Ω
Corrente em vazio	I0	2,17	A	Perdas mecânicas	pm	25,32	W
Resistência inicial Eh-star	R'eh	19,11	Ω	Par de polos	p	2	
Corrente ensaio Eh-Star	Ieh	2,06	A	Frequência	f	50	Hz

Resistência vw antes do ensaio	Rvw	13,7	Ω
Temperatura antes do ensaio	T	25	$^{\circ}\text{C}$
Resistência ensaio Eh-Star	R'eh	20-62,8	Ω

Hora Fim	21:43:00
----------	----------

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão terminais uv	Uuv	174,2	162	144,2	126,7	112,3	132,6	V
Tensão terminais vw	Uvw	185,6	172,1	154	134,8	119,7	144,8	V
Tensão terminais wu	Uwu	43,4	39	33,3	27,5	24,5	62,8	V
Corrente de linha u	Iu	2,47	2,3	2	1,73	1,5	1,09	A
Corrente de linha v	Iv	3,09	2,8	2,48	2,14	1,85	1,55	A
Corrente de linha w	Iw	2,13	1,91	1,62	1,34	1,09	1	A
Potência uv	Puv	429,4	363	285,3	215	163,2	143	W
Potência vw	Pvw	136,3	114,4	87,8	64,3	46,8	54,5	W
Velocidade	n	1466	1463	1461	1457	1452	1480	r.p.m.

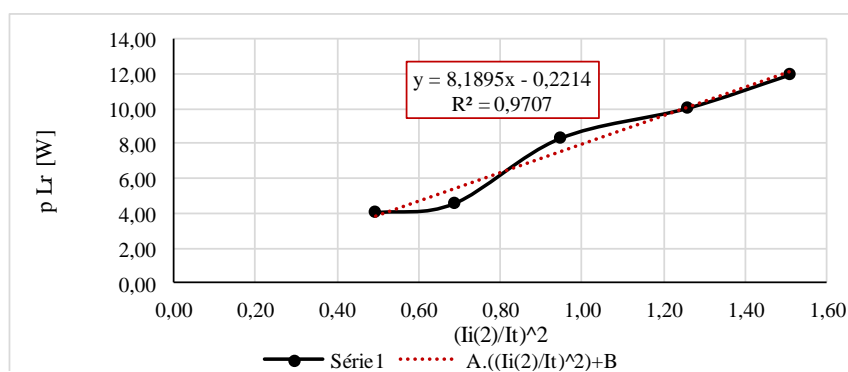
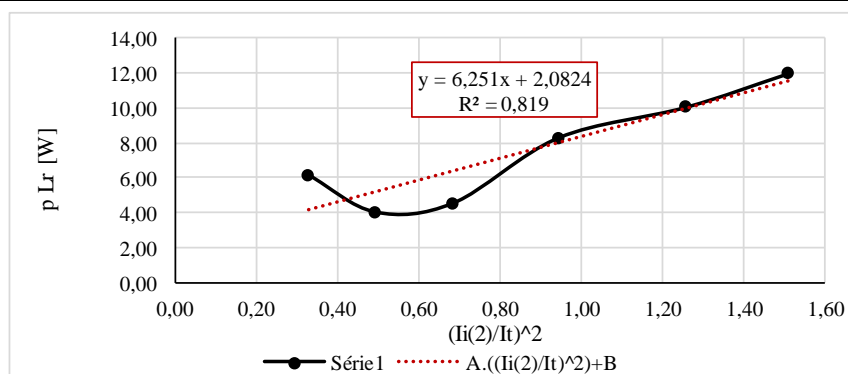
Velocidade mínima
1380 **OK**

	Tempo		Rvw	Temperatura
	Hora	Segundos		
	Resistência e Temperatura após o ensaio	22:15:00	0	14,2 Ω
22:15:20		20	14,2 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$
22:16:20		80	14,0 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$
22:17:20		140	13,9 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$
22:18:20		200	13,9 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$
22:19:20		260	13,8 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Resistência vw	Rvw	13,7	13,8	13,9	14,0	14,2	14,2	Ω
Tensão uv [Real]=[R]	U'uv	174	162	144	127	112	133	V
Tensão uv [Imaginário]=[i]	U"uv	0	0	0	0	0	0	V
Tensão uv [complexo]=[c]	\underline{U}_{uv}	174,2	162	144,2	126,7	112,3	132,6	V
Tensão uv Módulo = M	Uuv	174,2	162,0	144,2	126,7	112,3	132,6	V
Tensão uv $^{\circ}$	$^{\circ}$	0	0	0	0	0	0	$^{\circ}$
Tensão wu [R]	U'wu	6	6	6	5	5	-2	V
Tensão wu [i]	U"wu	43	39	33	27	24	63	V
Tensão wu [c]	\underline{U}_{wu}	6,36670	5,72040	6,28803	5,37450	4,97128	-2,10995	V
Tensão wu M	Uwu	43,4	39,0	33,3	27,5	24,5	62,8	V
Tensão wu $^{\circ}$	$^{\circ}$	82	82	79	79	78	92	$^{\circ}$
Tensão vw [R]	U'vw	-181	-168	-150	-132	-117	-130	V
Tensão vw [i]	U"vw	-43	-39	-33	-27	-24	-63	V
Tensão vw [c]	\underline{U}_{vw}	185,4-42,9	172,1-38,7	154,0-32,7	134,8-26,9	119,7-23,8	144,8-62,7	V
Tensão vw M	Uvw	185,6	172,1	154,0	134,8	119,7	144,8	V
Tensão vw $^{\circ}$	$^{\circ}$	-167	-167	-168	-168	-168	-154	$^{\circ}$
Corrente v [R]	I'v	-2	-2	-2	-1	-1	-1	A
Corrente v [i]	I"v	2	2	2	2	1	1	A
Corrente v [c]	\underline{I}_v	2,01+2,1	1,938+1,9	1,7491+1,7	1,41+1,54	1,2865+1,3	1,564+1,0	A
Corrente v M	Iv	3,1	2,8	2,5	2,1	1,9	1,6	A
Corrente v $^{\circ}$	$^{\circ}$	136	135	135	134	134	137	$^{\circ}$
Coeficiente k	k1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
Corrente u [R]	I'u	2	2	2	2	1	1	A
Corrente u [i]	I"u	0	0	0	0	0	0	A
Corrente u [c]	\underline{I}_u	68-0,041	27-0,079	98-0,165	140-0,220	174-0,264	184-0,050	A
Corrente u M	Iu	2,5	2,3	2,0	1,7	1,5	1,1	A
Corrente u $^{\circ}$	$^{\circ}$	-1	-2	-5	-8	-10	-3	$^{\circ}$

4.10 CONTINUAÇÃO Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão interna uv [c]	$\underline{U}_i uv$	142,122	132,373	118,198	104,275	92,7159	116,719	V
Tensão interna vw [c]	$\underline{U}_i vw$	-167,162	-156,056	-140,092	-123,33	-109,628	-121,992	V
Tensão interna wu [c]	$\underline{U}_i wu$	25,0403	23,6832	21,8941	19,0591	16,9128	5,27289	V
Tensão comp. direta [c]	$\underline{U}_i LL1$	108,390	99,7292	87,6238	75,7264	66,8161	100,756	V
Tensão comp. Inversa [c]	$\underline{U}_i LL2$	33,7314	32,6438	30,5745	28,5489	25,8998	15,9631	V
Tensão /fase comp. Direta [c]	$\underline{U}_i 1$	40,3519	36,9233	32,2475	27,7911	24,5189	40,9028	V
Tensão /fase comp. Inversa [c]	$\underline{U}_i 2$	-1,32454	-0,69341	-0,14610	0,61376	0,74874	-3,75411	V
Tensão u assimétrica [c]	$\underline{U}_i U$	39,0273	36,2299	32,1014	28,4053	25,2676	37,1487	V
Tensão v assimétrica [c]	$\underline{U}_i V$	-103,095	-96,1431	-86,0965	-75,870	-67,4482	-79,5704	V
Tensão w assimétrica [c]	$\underline{U}_i W$	64,0676	59,9131	53,9955	47,4644	42,1805	42,4216	V
Corrente perdas ferro u [c]	$\underline{I}fe u$	0,004614	0,00428	0,00379	0,00333	0,00298	0,00439	A
Corrente perdas ferro v [c]	$\underline{I}fe v$	-0,01219	-0,01136	-0,01018	-0,0089	-0,00797	-0,00940	A
Corrente perdas ferro w [c]	$\underline{I}fe w$	0,00757	0,00708	0,00638	0,00561	0,00498	0,00501	A
Corrente interna u [c]	$\underline{I}_i u$	2,46503	2,29433	1,98956	1,71175	1,47253	1,08443	A
Corrente interna v [c]	$\underline{I}_i v$	-2,20102	-1,98301	-1,73355	-1,4712	-1,26633	-1,13161	A
Corrente interna w [c]	$\underline{I}_i w$	-0,26400	-0,31132	-0,25601	-0,2404	-0,20620	0,04717	A
Corrente comp. direta [c]	$\underline{I}_i 1$	-0,00283	0,03327	0,02173	0,02732	0,03846	-0,05154	A
Corrente comp. direta [M]	$ \underline{I}_i 1 $	0,58	0,52	0,51	0,47	0,44	0,37	A
Corrente comp. direta °	°	-90	-86	-88	-87	-85	-98	°
Corrente comp. inversa [c]	$\underline{I}_i 2$	2,46786	2,26105	1,96783	1,68446	1,43407	1,13598	A
Corrente comp. inversa [M]	$ \underline{I}_i 2 $	2,53	2,30	2,00	1,70	1,44	1,18	A
Corrente comp. inversa °	°	12	11	10	8	7	16	°
30% Corrente comp. inversa [M]	30% $ \underline{I}_i 1 $	0,76	0,69	0,60	0,51	0,43	0,35	A
Relação Comp. Direta / Inversa	$\underline{I}_i 1 / \underline{I}_i 2$	0,229	0,227	0,254	0,275	0,306	0,312	
Comp. direta < 30 % inversa	$\underline{I}_i 1 < \underline{I}_i 2$	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	
Potência entreferro comp. Direta	$P_g(1)$	96	84	71	57	49	43	W
Potência entreferro comp. Invers	$P_g(2)$	57	47	36	26	18	11	W
Coefficiente k	k	1	1	1	1	1	1	
Deslizamento	s	0	0	0	0	0	0	
Perdas suplementares	p Lr	11,97	10,04	8,31	4,57	4,05	6,18	W
Perdas suplementares corrigidas	p LL	8,19						W



4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTORA

4.11 Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star (R'eh fixo em 62,5 Ω)

Ligação em estrela ou triângulo	Δ Y ?	Δ		Tensão ensaio Eh-Star	Ueh	398,4	V
Tensão nominal	UN	230	V	Perdas no ferro	pfe	18,77	W
Corrente nominal	IN	4,17	A	Resistência no ferro	Rfe	8456,9	Ω
Corrente em vazio	I0	2,17	A	Perdas mecânicas	pm	25,32	W
Resistência inicial Eh-star	R'eh	19,11	Ω	Par de polos	p	2	
Corrente ensaio Eh-Star	Ieh	2,06	A	Frequência	f	50	Hz

Resistência vw antes do ensaio	Rvw	14,2	Ω
Temperatura antes do ensaio	T	25	°C
Resistência ensaio Eh-Star	R'eh	62,5	Ω

Hora Fim	21:43:00
----------	----------

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão terminais uv	Uuv	263,8	236,3	214	187,4	161	133	V
Tensão terminais vw	Uvw	280,2	253	230	202,6	174,8	145	V
Tensão terminais wu	Uwu	146,7	129,5	115	98	81,1	63	V
Corrente de linha u	Iu	2,02	1,83	1,65	1,46	1,27	1,08	A
Corrente de linha v	Iv	3,07	2,76	2,48	2,15	1,84	1,53	A
Corrente de linha w	Iw	2,34	2,07	1,82	1,55	1,29	1	A
Potência uv	Puv	519,7	425	348	270,3	202,8	142,2	W
Potência vw	Pvw	231,9	187,1	154	115,2	83,1	53,4	W
Velocidade	n	1490	1490	1490	1489	1488	1482	r.p.m.

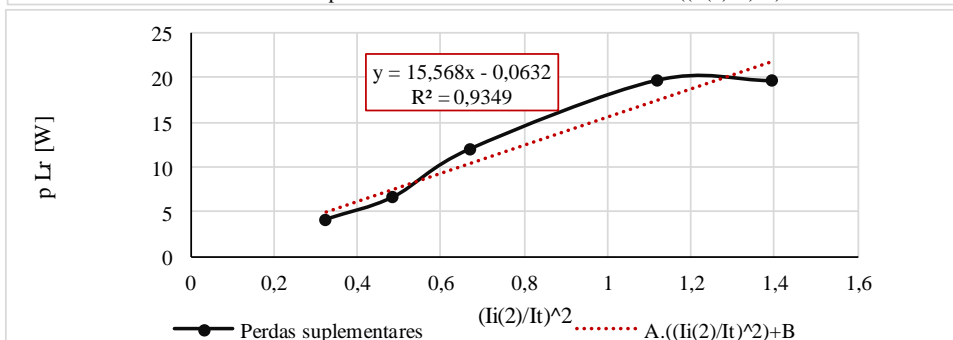
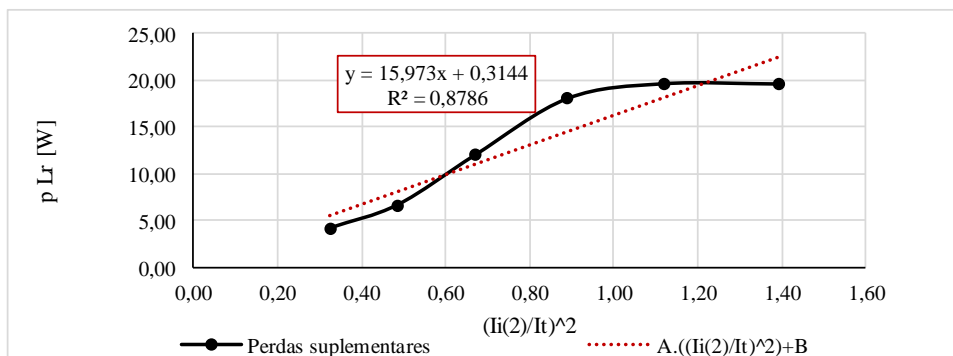
Velocidade mínima
1380 OK

	Tempo		Rvw	Temperatura
	Hora	Segundos		
Resistência e Temperatura após o ensaio	22:15:00	0	14,5 Ω	32 °C
	22:15:20	20	14,5 Ω	32 °C
	22:16:20	80	14,5 Ω	32 °C
	22:17:20	140	14,5 Ω	32 °C
	22:18:20	200	14,5 Ω	32 °C
	22:19:20	260	14,5 Ω	32 °C

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Resistência vw	Rvw	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	Ω
Tensão uv [Real]= R	U'uv	264	236	214	187	161	133	V
Tensão uv [Imaginário]= i	U"uv	0	0	0	0	0	0	V
Tensão uv [complexo]= c	Uuv	263,8	236,3	214	187,4	161	133	V
Tensão uv Módulo = M	Uuv	263,8	236,3	214,0	187,4	161,0	133,0	V
Tensão uv °	°	0	0	0	0	0	0	°
Tensão wu [R]	U'wu	-24	-18	-14	-10	-6	-2	V
Tensão wu [i]	U"wu	145	128	114	98	81	63	V
Tensão wu [c]	Uwu	-23,8803	-18,1949	-14,3014	-9,8078	-6,03468	-2,37969	V
Tensão wu M	Uwu	146,7	129,5	115,0	98,0	81,1	63,0	V
Tensão wu °	°	99	98	97	96	94	92	°
Tensão vw [R]	U'vw	-240	-218	-200	-178	-155	-131	V
Tensão vw [i]	U"vw	-145	-128	-114	-98	-81	-63	V
Tensão vw [c]	Uvw	193-144j	1223-128j	841-114j	642-97,3j	406-80,8j	188-62,9j	V
Tensão vw M	Uvw	280,2	253,0	230,0	202,6	174,8	145,0	V
Tensão vw °	°	-149	-150	-150	-151	-152	-154	°
Corrente v [R]	I'v	-2	-2	-2	-2	-1	-1	A
Corrente v [i]	I"v	2	2	2	1	1	1	A
Corrente v [c]	Iv	889+1,9j	119+1,7j	234+1,6j	167+1,3j	571+1,2j	865+1,0j	A
Corrente v M	Iv	3,1	2,8	2,5	2,2	1,8	1,5	A
Corrente v °	°	141	141	139	140	139	138	°
Coeficiente k	k1	0	0	0	0	0	-1	
Corrente u [R]	I'u	2	2	2	1	1	1	A
Corrente u [i]	I"u	0	0	0	0	0	0	A
Corrente u [c]	Iu	45+0,38j	106+0,30j	108+0,19j	47+0,14j	89+0,08j	105-0,020j	A
Corrente u M	Iu	2,0	1,8	1,7	1,5	1,3	1,1	A
Corrente u °	°	11	9	7	6	4	-1	°

4.12 CONTINUAÇÃO Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star (R' eh fixo)

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão interna uv [c]	$\underline{U}_i uv$	232,729	208,166	188,788	165,188	141,725	116,909	V
Tensão interna vw [c]	$\underline{U}_i vw$	-220,035	-200,444	-184,455	-164,48	-143,959	-121,905	V
Tensão interna wu [c]	$\underline{U}_i wu$	-12,6936	-7,72271	-4,33279	-0,7024	2,23416	4,99688	V
Tensão comp. direta [c]	$\underline{U}_i LL1$	214,099	190,719	171,448	148,461	125,610	101,063	V
Tensão comp. Inversa [c]	$\underline{U}_i LL2$	18,6295	17,4476	17,3396	16,7208	16,1147	15,8454	V
Tensão /fase comp. Direta [c]	$\underline{U}_i 1$	91,3535	80,7816	72,1815	61,8774	51,7933	41,0437	V
Tensão /fase comp. Inversa [c]	$\underline{U}_i 2$	-9,54599	-8,81852	-7,80778	-6,5805	-5,29632	-3,73970	V
Tensão u assimétrica [c]	$\underline{U}_i U$	81,8075	71,9631	64,3737	55,2964	46,4970	37,3040	V
Tensão v assimétrica [c]	$\underline{U}_i V$	-150,921	-136,202	-124,414	-109,89	-95,2282	-79,6049	V
Tensão w assimétrica [c]	$\underline{U}_i W$	69,1139	64,2404	60,0409	54,5945	48,7311	42,3009	V
Corrente perdas ferro u [c]	$\underline{I}fe u$	0,00967	0,00850	0,00761	0,00653	0,00549	0,00441	A
Corrente perdas ferro v [c]	$\underline{I}fe v$	-0,01782	-0,01610	-0,01471	-0,0129	-0,01126	-0,00941	A
Corrente perdas ferro w [c]	$\underline{I}fe w$	0,00817	0,00759	0,00709	0,00645	0,00576	0,00500	A
Corrente interna u [c]	$\underline{I}_i u$	1,97425	1,79656	1,63126	1,44605	1,26185	1,07538	A
Corrente interna v [c]	$\underline{I}_i v$	-2,37441	-2,12509	-1,86986	-1,6252	-1,38202	-1,13194	A
Corrente interna w [c]	$\underline{I}_i w$	0,40015	0,32852	0,23860	0,17911	0,12017	0,05655	A
Corrente comp. direta [c]	$\underline{I}_i 1$	-0,23940	-0,19937	-0,17503	-0,1271	-0,08999	-0,04722	A
Corrente comp. direta [M]	$ \underline{I}_i 1 $	0,65	0,59	0,54	0,46	0,40	0,36	A
Corrente comp. direta °	°	-111	-110	-109	-106	-103	-98	°
Corrente comp. inversa [c]	$\underline{I}_i 2$	2,21365	1,99593	1,80630	1,57327	1,35184	1,12260	A
Corrente comp. inversa [M]	$ \underline{I}_i 2 $	2,43	2,17	1,94	1,68	1,43	1,17	A
Corrente comp. inversa °	°	24	23	21	21	19	17	°
30% Corrente comp. inversa [M]	30% $ \underline{I}_i 1 $	0,73	0,65	0,58	0,50	0,43	0,35	A
Relação Comp. Direta / Inversa	$\underline{I}_i 1 / \underline{I}_i 2$	0,269	0,271	0,278	0,275	0,280	0,303	
Comp. direta < 30 % inversa	$\underline{I}_i 1 < \underline{I}_i 2$	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	
Potência entreferro comp. Direta	Pg(1)	97	85	74	62	51	42	W
Potência entreferro comp. Invers	Pg(2)	50	39	29	24	18	12	W
Coefficiente k	k	1	1	1	1	1	1	
Deslizamento	s	0	0	0	0	0	0	
Perdas suplementares	p Lr	19,58	19,61	18,04	11,95	6,61	4,10	W
Perdas suplementares corrigidas	p LL	15,57						W



Anexo B. Ensaio de determinação das perdas e do rendimento do motor B

1. IDENTIFICAÇÃO DO MOTOR

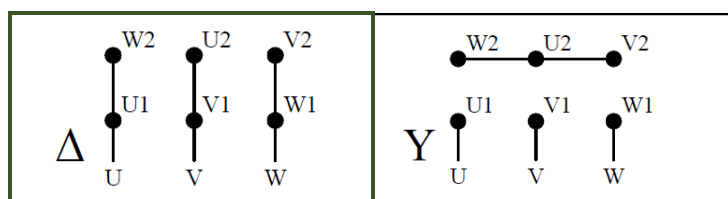
MOTOR B

Designação do Motor:	WEG W22 1,1 kW 4 Pólos IE3 Verde	Número de Serie: 1010728971
----------------------	----------------------------------	-----------------------------

Características Gerais			
Fabricante	WEG	Temperatura mínima ambiente	-20 °C
Gama	W22	Temperatura máxima ambiente	40 °C
Potência Mecânica	1,1 kW	Classe de Isolamento	F
Número de polos	4	Classe de Aquecimento	B
Serviço	S1	Possível Colocar Termopar	Não
Fator de Serviço	1.00	Altitude	1000 m.a.s.l
IE Code	IE3	Índice de Proteção IP	55
Rolamento lado ataque	6205-ZZ	Design N	Sim
Rolamento lado oposto ataque	6204-ZZ	Montagem	B3T
Cor exterior	Verde	Peso	21 kg

Características de Desempenho									
	U		f Hz	Pm kW	n rpm	I		FP	η 100% %
	Δ	Y				Δ	Y		
	V	V				A	A		
1º	220	380	50	1,1	1450	4,13	2,39	0,83	
2º	230	400	50	1,1	1455	4,07	2,34	0,80	84,3
3º		415	50	1,1	1460		2,34	0,77	
4º		440	60	1,1	1745		2,41	0,83	
5º		460	60	1,1	1755		2,35	0,81	

Funcionamento durante o ensaio	
Ligado em Δ ou Y?	Δ
Linha de Desempenho	2º



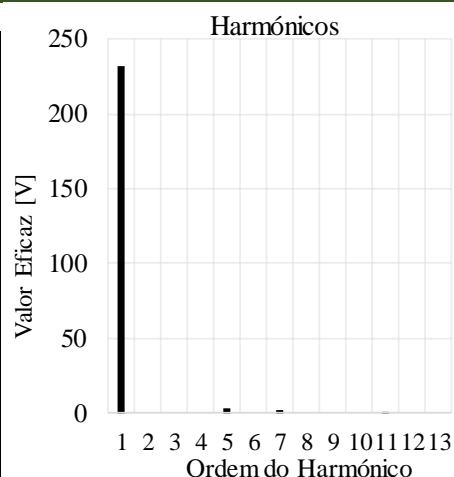
2. REQUISITOS DA ALIMENTAÇÃO E DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

MOTOR B

2.1 Alimentação Elétrica

2.1.1 Harmônicos de tensão

Ordem do Harmônico	Frequência [Hz]	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	Un [V]
1	50	232,40	231,90	231,90	232,07
2	100	0,00	0,00	0,00	0,00
3	150	0,00	0,00	0,00	0,00
4	200	0,00	0,00	0,00	0,00
5	250	3,20	3,20	3,20	3,20
6	300	0,00	0,00	0,00	0,00
7	350	2,10	2,10	2,10	2,10
8	400	0,00	0,00	0,00	0,00
9	450	0,00	0,00	0,00	0,00
10	500	0,00	0,00	0,00	0,00
11	550	0,90	0,90	0,90	0,90
12	600	0,00	0,00	0,00	0,00
13	650	0,00	0,00	0,00	0,00



Fator Harmônico - HFV	Limite	Limite Ensaio Térmico
0,007	0,03 OK	0,015 OK

2.1.2 Componentes Simétricas

V1 [V]	230,1	ϕ_{12} [°]	120	ϕ_1 [°]	0
V2 [V]	230	ϕ_{23} [°]	120	ϕ_2 [°]	-120
V3 [V]	232	ϕ_{31} [°]	120	ϕ_3 [°]	120

Componente	Tensão	Razão Comp.	Limites Máximos							
			Comp. Dir.		Longo Período		Curto Período (a.)		Ensaio Térmico	
Direta [V]	230,70									
Inversa [V]	0,65	0,3%	1,0%	OK	1,5%	OK	0,5%	OK		
Homopolar [V]	0,65	0,3%	1,0%	OK	a. Curto período - que não exceda alguns minutos					

2.2 Aparelhos de medição

2.2.1 Frequência

Nominal [Hz]	Média [Hz]	Desvio		Limite		
		[Hz]	[%]	[Hz]	[%]	
50	49,98	0,02	0,0%	0,05	0,1%	OK

2.2.2 Grandezas Elétricas

Grandezas Elétricas	Classe de Exatidão		Incerteza
	Direto	Indireto	$\cos(\phi)=1$
	Limites:	0,2	0,5

2.2.3 Binário

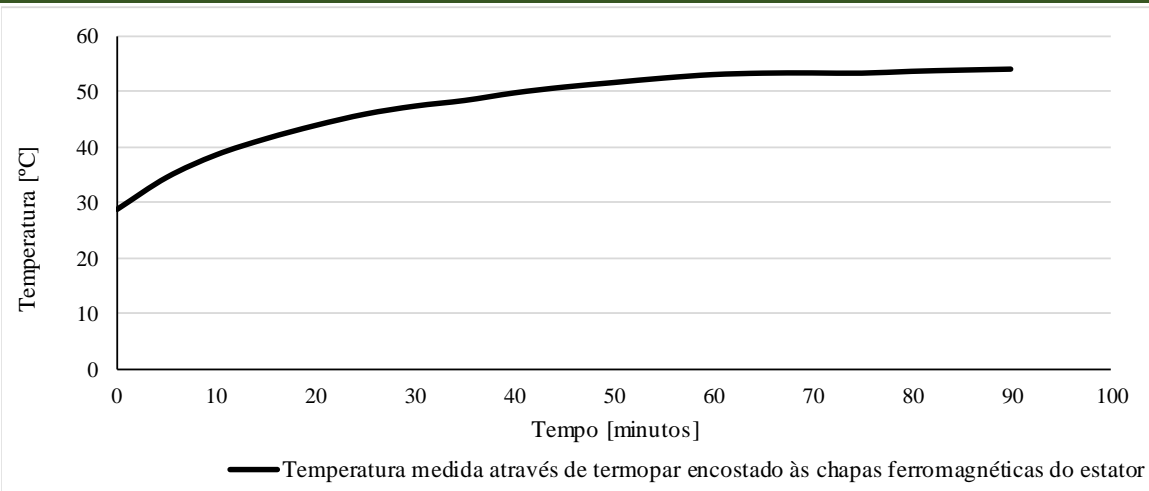
Binário	Classe de Exatidão	Range Leitor de Binário [Nm]	Binário Máximo Motor [N.m]	%	Limite	
Limites:	0,2	50	8,7	17,40%	10,00%	NOK

2.2.4 Velocidade

Classe de Exatidão	% of full scall	[r.p.m.]
	0,10%	0,1

2.2.4 Temperatura

Classe de Exatidão	[K]
	1



Notas:

a. O equilíbrio térmico é alcançado, após se verificar a variação inferior ou igual a 1 °C por meia hora.

1. As leituras da temperatura foram efectuadas em intervalos de tempo de 10 segundos até que seja cumprido o requisito acima enunciado, contudo apenas são apresentados os dados de 5 em 5 minutos.

Tempo		θ [°C]	ΔT 30 min [°C]	$\Delta T < 1^\circ\text{C}$
Hora	Minutos	Estator		
18:02:00	0	29	--	--
18:07:00	5	35	--	--
18:12:00	10	39	--	--
18:17:00	15	42	--	--
18:22:00	20	44	--	--
18:27:00	25	46	--	--
18:32:00	30	47	19	Não
18:37:00	35	48	14	Não
18:42:00	40	50	11	Não
18:47:00	45	51	9	Não
18:52:00	50	52	8	Não
18:57:00	55	53	7	Não
19:02:00	60	53	6	Não
19:07:00	65	53	5	Não
19:12:00	70	53	4	Não
19:17:00	75	53	3	Não
19:22:00	80	54	2	Não
19:27:00	85	54	1	Não
19:32:00	90	54	1	Sim

4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR B

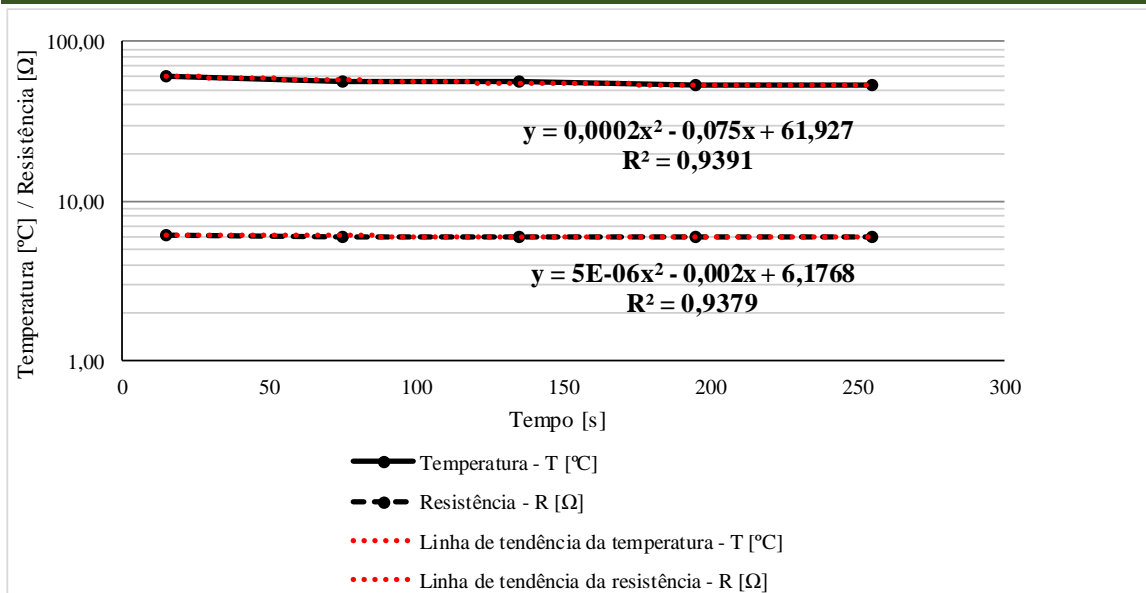
4.1 Ensaio à carga nominal

Tensão composta uv	Uuv	230,9	V	Temp. fluido arrefecimento	θ_c	25	°C
Tensão composta vw	Uvw	230,6	V	Temperatura enrolamento	θ_e	61,9	°C
Tensão composta wu	Uwu	230,4	V	Resistência à carga nominal	RN	6,18	Ω
Tensão composta média	U	230,6	V	Correção para a temperatura ambiente de referência			
Corrente de linha u	Iu	4,0	A	Par de polos	p	2	
Corrente de linha v	Iv	3,9	A	Coeficiente de correção	K θ	1,000	
Corrente de linha w	Iw	3,9	A	Deslizamento	s	0,028	
Corrente de linha média	I	3,9	A	Deslizamento corrigido	s θ	0,028	
Frequência	f	49,98	Hz	Perdas elétricas estator	pe	96	W
Velocidade	n	1457	r.p.m.	Perdas elétricas estator corrigida	pe θ	96	W
Binário	T	6,60	N.m.	Perdas elétricas rotor	pr	31	W
Potência elétrica	Pel	1214	W	Perdas elétricas rotor corrigidas	pr θ	31	W
Potência mecânica	Pm	1007	W	Potência elétrica corrigida	Pel θ	1214	W

4.2 Método A - Medição direta da potência de entrada e saída

Rendimento	η	82,9	%
-------------------	--------	------	---

4.3 Resistência e temperatura determinada através da extrapolação da resistência da bobinagem



Motor frio. Antes da estabilização térmica						
Tempo		Resistência [Ω]			RN	θ_a
Hora	Seg.	Ruv	Rvw	Rwu	[Ω]	[°C]
18:02:00	0	3,56	3,48	3,56	5,30	25

Motor quente. Após estabilização térmica.						
Tempo		Resistência linha-linha			R N	θ_e
Hora	Seg.	Rll uv	Rll vw	Rll wu	[Ω]	[°C]
16:44:00	0	--	--	--	6,18	61,93
16:44:15	15	4,09	4,11	4,12	6,16	61,30
16:45:15	75	4,02	4,03	3,99	6,02	56,10
16:46:15	135	4	4,01	4,01	6,01	55,72
16:47:15	195	3,98	3,98	3,97	5,97	53,99
16:48:15	255	3,97	3,97	3,98	5,96	53,79

4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR B

4.4 Ensaio da curva de carga

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R [Ω]	T [°C]	Hora inicio	
Resistência antes do ensaio	Rll	3,96	3,95	3,97	5,94	50	17:09:00

		125%	115%	100%	75%	50%	25%	
Tensão composta uv	Uuv	230,2	230,5	230,1	230,7	230,8	230,6	V
Tensão composta vw	Uvw	230,2	230,7	230,2	230,6	230,8	230,4	V
Tensão composta wu	Uwu	229,7	230,1	229,7	229,8	230,5	229,8	V
Tensão composta média	U	230,0	230,4	230,0	230,4	230,7	230,3	V
Corrente de linha u	Iu	4,9	4,6	4,1	3,4	2,9	2,6	A
Corrente de linha v	Iv	4,8	4,5	4,4	3,4	2,9	2,5	A
Corrente de linha w	Iw	4,8	4,5	4,1	3,4	2,9	2,6	A
Corrente de linha média	I	4,8	4,5	4,2	3,4	2,9	2,6	A
Potência elétrica	PeI	1557	1426	1217	893	592	326	W
Fator de potência	Cos φ	0,81	0,79	0,73	0,66	0,51	0,32	
Frequência	f	49,98	49,97	50,00	49,97	49,98	49,99	Hz
Velocidade	n	1442	1446	1455	1468	1480	1490	r.p.m.
Binário	T	8,70	8,01	6,92	5,12	3,40	1,75	N.m.
Resistência	R	5,94	5,94	5,94	5,96	5,97	5,98	Ω
Deslizamento	s	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	
Potência mecânica	Pm	1313,8	1212,9	1054,4	787,1	526,9	273,1	W
Perdas Elétrica Estator	pe	138,8	122,1	104,8	68,9	50,2	39,4	W
Perdas Elétricas Rotor	pr	53,4	45,4	32,7	16,6	6,7	1,7	W
Perdas no ferro	pfe	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	W
Perdas mecânicas	pm	18,1	18,3	18,5	19,0	19,3	19,7	W

Δf < 0,1% OK

4.5 Método B - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através das perdas residuais

Perdas suplementares separadas	pss	10,7	5,1	-15,6	-20,8	-33,4	-30,0	W
Quadrado do Binário	T^2	75,69	64,16	47,89	26,21	11,56	3,06	
Perdas suplementares corrigidas	ps	45,6	38,7	28,9	15,8	7,0	1,8	W
Perdas totais	pT	278,2	246,7	207,1	142,5	105,5	84,8	W
Rendimento	η	82,1%	82,7%	83,0%	84,0%	82,2%	74,0%	%

γ1 OK

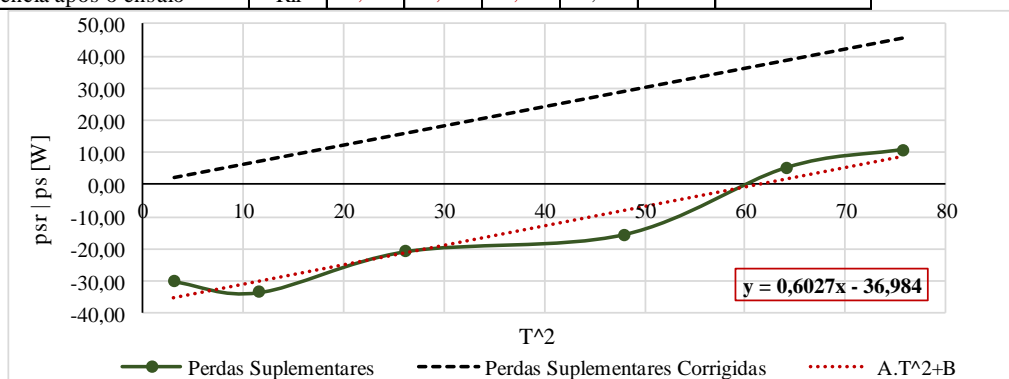
4.6 Método C - Soma de perdas: perdas adicionais determinadas através das perdas atribuídas

Perdas suplementares atribuídas	ps			30,29				W
Perdas totais	pT			208,5				W
Rendimento	η			82,9%				%

4.7 Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star

Perdas suplementares Eh-Star	ps			9,44				W
Perdas Totais	pT			187,7				W
Rendimento	η			84,6%				%

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R	T	Hora Fim	
Resistência após o ensaio	Rll	3,99	3,99	3,97	5,98	52	17:30:00



4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR B

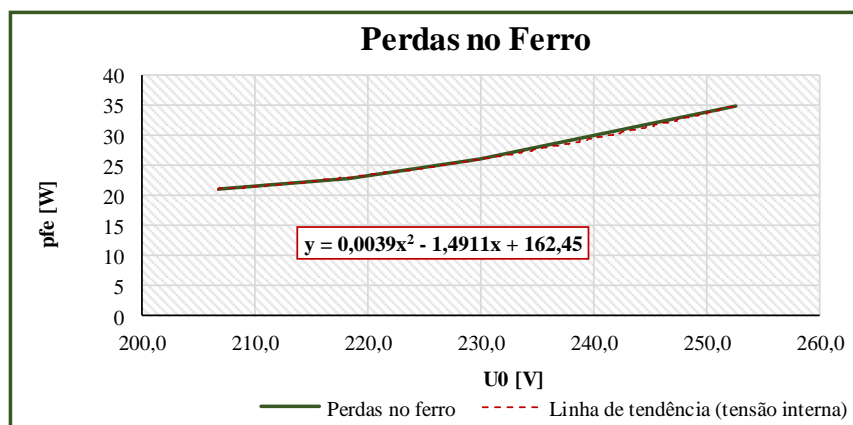
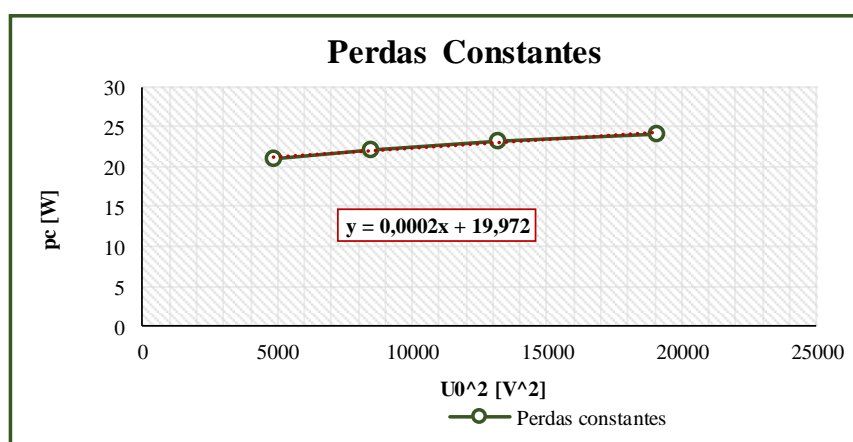
4.8 Ensaio em vazio

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R	T	Hora inicio	
Resistência antes do ensaio	Rll,0	3,99	3,99	3,97	5,98	52	17:32:00

		110%	100%	95%	90%	60%	50%	40%	30%	
Tensão composta uv	Uuv	253,0	230,3	219,0	207,2	138,5	115,2	92,4	69,7	V
Tensão composta vw	Uvw	252,5	229,7	218,1	206,6	137,9	114,8	91,9	69,3	V
Tensão composta wu	Uwu	252,3	229,6	218,0	206,4	137,8	114,5	91,9	69,5	V
Tensão composta média	U0	252,6	229,9	218,4	206,7	138,1	114,8	92,1	69,5	V
Corrente de linha u	Iu	3,1	2,5	2,2	2,0	1,3	1,0	0,8	0,6	A
Corrente de linha v	Iv	3,0	2,4	2,2	2,0	1,2	1,0	0,8	0,6	A
Corrente de linha w	Iw	3,1	2,4	2,2	2,0	1,2	1,0	0,8	0,6	A
Corrente de linha média	I0	3,1	2,4	2,2	2,0	1,2	1,0	0,8	0,6	A
Potência em vazio	P0	111	81,1	71,3	64,6	33	29	25,7	23	W
Frequência	f	49,99	49,98	49,99	49,99	49,98	49,98	49,99	49,99	Hz
Resistência	R	5,98	5,92	5,90	5,89	5,82	5,82	5,81	5,81	Ω
Quadrado da Tensão	U0^2	63807	52839	47684	42739	19062	13187	8476,3	4830,3	V^2
Perdas elétricas	pel	56,192	35,04	28,548	23,541	8,8594	5,8166	3,7185	2,0898	W
Perdas constantes	pc	54,808	46,06	42,752	41,059	24,141	23,183	21,981	20,91	W
Perdas no ferro	pfe	34,836	26,09	22,78	21,086					V

Tensão interna no entre-ferro	Ui				214,79					V
Perdas mecânicas	pm				19,97					W
Perdas no ferro corrigidas	pfe				22,26					W

	Rll uv	Rll vw	Rll wu	R	T	Hora Fim	
Resistência após o ensaio	Rll,0	3,88	3,86	3,87	5,81	43	17:46:00



4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR B

4.9 Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star

Ligação em estrela ou triângulo	Δ Y?	Δ		Tensão ensaio Eh-Star	Ueh	398,4	V
Tensão nominal	UN	230	V	Perdas no ferro	pfe	22,26	W
Corrente nominal	IN	4,07	A	Resistência no ferro	Rfe	7129,9	Ω
Corrente em vazio	I0	2,43	A	Perdas mecânicas	pm	19,97	W
Resistência inicial Eh-star	R'eh	19,58	Ω	Par de polos	p	2	
Corrente ensaio Eh-Star	Ieh	1,88	A	Frequência	f	50	Hz

Resistência vw antes do ensaio	Rvw	10,7	Ω
Temperatura antes do ensaio	T	25	$^{\circ}\text{C}$
Resistência ensaio Eh-Star	R'eh	20-68,5	Ω

Hora Fim	19:57:00
----------	----------

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão terminais uv	Uuv	156	142,7	131	115,7	110,6	120,1	V
Tensão terminais vw	Uvw	169,4	155	142,2	125,1	121,5	133,1	V
Tensão terminais wu	Uwu	38,8	34,15	30,3	24,8	31,8	56	V
Corrente de linha u	Iu	2,27	2,05	1,84	1,62	1,33	0,99	A
Corrente de linha v	Iv	2,83	2,54	2,27	1,99	1,7	1,41	A
Corrente de linha w	Iw	1,9	1,67	1,48	1,21	1,04	0,9	A
Potência uv	Puv	349,2	287,5	235	180,5	142,8	115,2	W
Potência vw	Pvw	133,3	108	88,7	63,8	52,8	49	W
Velocidade	n	1468	1466	1463	1460	1465	1480	r.p.m.

Velocidade mínima
1410 OK

	Tempo		Rvw	Temperatura
	Hora	Segundos		
	Resistência e Temperatura após o ensaio	20:18:00	0	11,6 Ω
20:18:20		20	11,6 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$
20:19:20		80	11,5 Ω	30 $^{\circ}\text{C}$
20:20:20		140	11,5 Ω	29 $^{\circ}\text{C}$
20:21:20		200	11,5 Ω	29 $^{\circ}\text{C}$
20:22:20		260	11,4 Ω	29 $^{\circ}\text{C}$

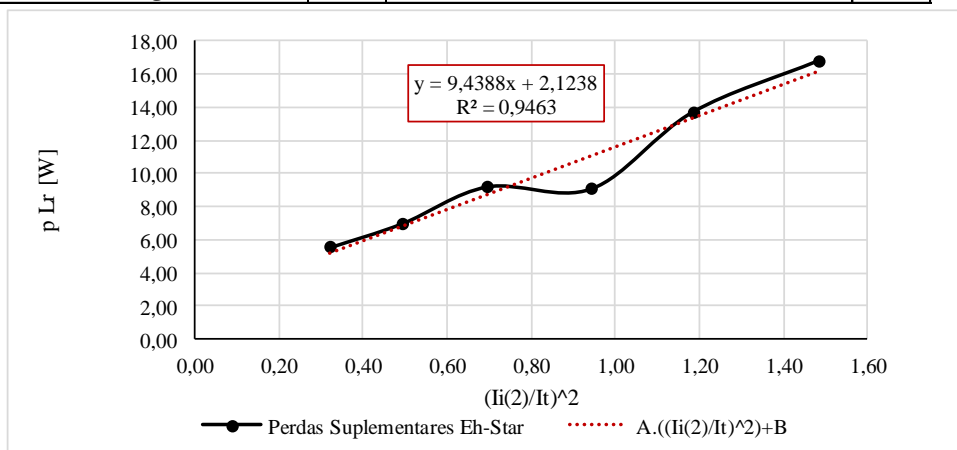
		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Resistência vw	Rvw	10,7	10,9	11,1	11,2	11,6	11,6	Ω
Tensão uv [Real]= $[R]$	U'uv	156	143	131	116	111	120	V
Tensão uv [Imaginário]= $[i]$	U"uv	0	0	0	0	0	0	V
Tensão uv [complexo]= $[c]$	Uuv	156	142,7	131	115,7	110,6	120,1	V
Tensão uv Módulo = $[M]$	Uuv	156,0	142,7	131,0	115,7	110,6	120,1	V
Tensão uv $^{\circ}$	$^{\circ}$	0	0	0	0	0	0	$^{\circ}$
Tensão wu $[R]$	U'wu	9	9	8	7	7	1	V
Tensão wu $[i]$	U"wu	38	33	29	24	31	56	V
Tensão wu $[c]$	Uwu	9,15038	8,74382	8,17461	7,12394	6,86550	6,64779	V
Tensão wu $[M]$	Uwu	38,8	34,2	30,3	24,8	31,8	56,0	V
Tensão wu $^{\circ}$	$^{\circ}$	76	75	74	73	78	89	$^{\circ}$
Tensão vw $[R]$	U'vw	-165	-151	-139	-123	-117	-121	V
Tensão vw $[i]$	U"vw	-38	-33	-29	-24	-31	-56	V
Tensão vw $[c]$	Uvw	385-37,7	3903-33,0	611-29,3	312-23,7	114-31,6	412-55,9	V
Tensão vw $[M]$	Uvw	169,4	155,0	142,2	125,1	121,5	133,1	V
Tensão vw $^{\circ}$	$^{\circ}$	-167	-168	-168	-169	-165	-155	$^{\circ}$
Corrente v $[R]$	I'v	-2	-2	-1	-1	-1	-1	A
Corrente v $[i]$	I"v	2	2	2	2	1	1	A
Corrente v $[c]$	Iv	846+2,1	952+1,9	679+1,7	594+1,5	394+1,2	124+1,0	A
Corrente v $[M]$	Iv	2,8	2,5	2,3	2,0	1,7	1,4	A
Corrente v $^{\circ}$	$^{\circ}$	131	131	130	130	131	134	$^{\circ}$
Coeficiente k	k1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
Corrente u $[R]$	I'u	2	2	2	2	1	1	A
Corrente u $[i]$	I"u	0	0	0	0	0	0	A
Corrente u $[c]$	Iu	895-0,27	152-0,29	72-0,30	67-0,36	84-0,26	3093-0,12	A
Corrente u $[M]$	Iu	2,3	2,1	1,8	1,6	1,3	1,0	A
Corrente u $^{\circ}$	$^{\circ}$	-7	-8	-9	-13	-11	-7	$^{\circ}$

4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR B

4.10 CONTINUAÇÃO Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão interna uv [c]	U _i uv	134,014	122,643	112,906	99,718	96,5922	108,777	V
Tensão interna vw [c]	U _i vw	-157,338	-144,443	-133,077	-117,44	-112,122	-115,186	V
Tensão interna wu [c]	U _i wu	23,3244	21,7994	20,1711	17,729	15,5300	6,40912	V
Tensão comp. direta [c]	U _i LL1	97,3858	88,0539	80,1735	69,260	71,3549	91,2359	V
Tensão comp. Inversa [c]	U _i LL2	36,6283	34,5896	32,7332	30,458	25,2372	17,5417	V
Tensão /fase comp. Direta [c]	U _i 1	35,5015	31,9177	28,9442	24,903	26,3350	36,4430	V
Tensão /fase comp. Inversa [c]	U _i 2	1,39509	1,69700	1,96766	2,4264	0,68568	-2,3202	V
Tensão u assimetrica [c]	U _i U	36,8966	33,6147	30,9118	27,329	27,0207	34,1228	V
Tensão v assimetrica [c]	U _i V	-97,1176	-89,0285	-81,9945	-72,389	-69,5714	-74,6548	V
Tensão w assimetrica [c]	U _i W	60,2210	55,4142	51,0830	45,059	42,5507	40,5319	V
Corrente perdas ferro u [c]	I _{fe} u	0,005174	0,00471	0,00433	0,0038	0,00378	0,00478	A
Corrente perdas ferro v [c]	I _{fe} v	-0,01362	-0,01248	-0,0115	-0,0101	-0,00975	-0,01047	A
Corrente perdas ferro w [c]	I _{fe} w	0,00844	0,00777	0,00716	0,0063	0,00596	0,00568	A
Corrente interna u [c]	I _i u	2,24777	2,02375	1,81065	1,5746	1,29996	0,97759	A
Corrente interna v [c]	I _i v	-1,84291	-1,64505	-1,44761	-1,2578	-1,10300	-0,96038	A
Corrente interna w [c]	I _i w	-0,40485	-0,3787	-0,36303	-0,3168	-0,19696	-0,01720	A
Corrente comp. direta [c]	I _i 1	-0,03150	-0,01587	-0,01325	0,0054	-0,01793	-0,06888	A
Corrente comp. direta [M]	I _i 1	0,55	0,51	0,46	0,45	0,39	0,34	A
Corrente comp. direta °	°	-93	-92	-92	-89	-93	-102	°
Corrente comp. inversa [c]	I _i 2	2,27927	2,03963	1,82390	1,5692	1,31790	1,04647	A
Corrente comp. inversa [M]	I _i 2	2,30	2,05	1,83	1,57	1,32	1,07	A
Corrente comp. inversa °	°	7	6	5	3	6	11	°
30% Corrente comp. inversa [M]	30% I _i 1	0,69	0,62	0,55	0,47	0,40	0,32	A
Relação Comp. Direta / Inversa	I _i 1 / I _i 2	0,241	0,250	0,253	0,288	0,297	0,318	
Comp. direta < 30 % inversa	I _i 1 < I _i 2	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	
Potência entreferro comp. Direta	Pg(1)	81	70	58	51	42	35	W
Potência entreferro comp. Invers	Pg(2)	43	35	28	20	14	8	W
Coefficiente k	k	1	1	1	1	1	1	
Deslizamento	s	0	0	0	0	0	0	
Perdas suplementares	p Lr	16,77	13,67	9,06	9,18	6,96	5,52	W
Perdas suplementares corrigidas	p LL	9,44						W



4. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DAS PERDAS E DO RENDIMENTO

MOTOR B

4.11 Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star (R'eh fixo em 62,5 Ω)

Ligação em estrela ou triângulo	Δ Y ?	Δ		Tensão ensaio Eh-Star	Ueh	398,4	V
Tensão nominal	UN	230	V	Perdas no ferro	pfe	22,26	W
Corrente nominal	IN	4,07	A	Resistência no ferro	Rfe	7129,9	Ω
Corrente em vazio	I0	2,43	A	Perdas mecânicas	pm	19,97	W
Resistência inicial Eh-star	R'eh	19,58	Ω	Par de polos	p	2	
Corrente ensaio Eh-Star	Ieh	1,88	A	Frequência	f	50	Hz

Resistência vw antes do ensaio	Rvw	11,7	Ω
Temperatura antes do ensaio	T	30	°C
Resistência ensaio Eh-Star	R'eh	62,5	Ω

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão terminais uv	Uuv	234	213,6	191,3	169	145,3	121,1	V
Tensão terminais vw	Uvw	255	233,2	210	186,2	160,5	134	V
Tensão terminais wu	Uwu	131,5	118	103	88,3	72,7	57	V
Corrente de linha u	Iu	1,81	1,66	1,48	1,32	1,14	0,98	A
Corrente de linha v	Iv	2,81	2,54	2,25	1,97	1,68	1,4	A
Corrente de linha w	Iw	2,11	1,9	1,64	1,41	1,15	0,9	A
Potência uv	Puv	419,3	350,4	282,2	220,6	164	116	W
Potência vw	Pvw	209,1	173,6	137,8	105,2	74,3	48,6	W
Velocidade	n	1490	1490	1490	1488	1485	1480	r.p.m.

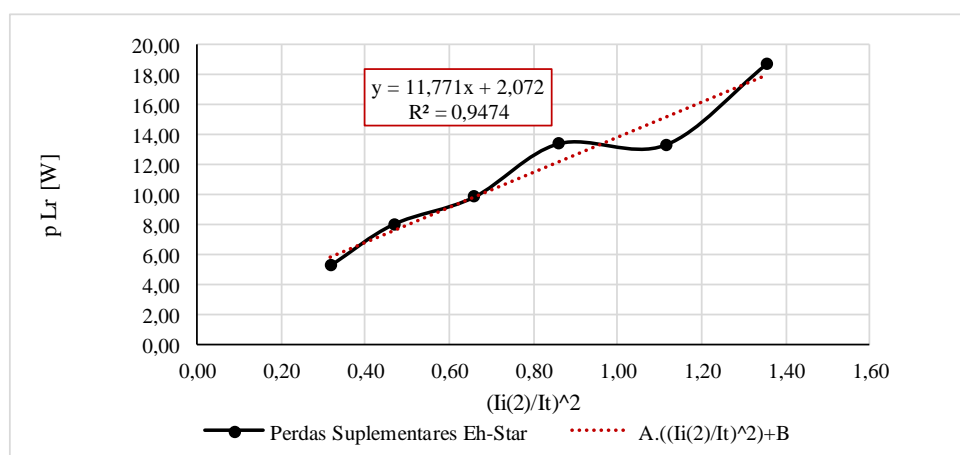
Velocidade mínima
1410 OK

	Tempo		Rvw	Temperatura
	Hora	Segundos		
Resistência e Temperatura após o ensaio	20:18:00	0	12,3 Ω	32 °C
	20:18:20	20	12,3 Ω	32 °C
	20:19:20	80	12,3 Ω	32 °C
	20:20:20	140	12,2 Ω	31 °C
	20:21:20	200	12,2 Ω	31 °C
	20:22:20	260	12,1 Ω	30 °C

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Resistência vw	Rvw	11,7	11,8	11,9	12,1	12,3	12,3	Ω
Tensão uv [Real]= R	U'uv	234	214	191	169	145	121	V
Tensão uv [Imaginário]= i	U"uv	0	0	0	0	0	0	V
Tensão uv [complexo]= c	Uuv	234	213,6	191,3	169	145,3	121,1	V
Tensão uv Módulo = M	Uuv	234,0	213,6	191,3	169,0	145,3	121,1	V
Tensão uv °	°	0	0	0	0	0	0	°
Tensão wu [R]	U'wu	-15	-12	-8	-5	-2	0	V
Tensão wu [i]	U"wu	131	117	103	88	73	57	V
Tensão wu [c]	Uwu	-15,0069	-12,0943	-8,11471	-4,9924	-2,19246	0,17254	V
Tensão wu M	Uwu	131,5	118,0	103,0	88,3	72,7	57,0	V
Tensão wu °	°	97	96	95	93	92	90	°
Tensão vw [R]	U'vw	-219	-202	-183	-164	-143	-121	V
Tensão vw [i]	U"vw	-131	-117	-103	-88	-73	-57	V
Tensão vw [c]	Uvw	556-130	528-117	4838-102	498-88	414-72,6	3601-56,9	V
Tensão vw M	Uvw	255,0	233,2	210,0	186,2	160,5	134,0	V
Tensão vw °	°	-149	-150	-151	-152	-153	-155	°
Corrente v [R]	I'v	-2	-2	-2	-1	-1	-1	A
Corrente v [i]	I"v	2	2	2	1	1	1	A
Corrente v [c]	Iv	846+1,8	800+1,7	6897+1,5	522+1,3	4788+1,1	3294+0,99	A
Corrente v M	Iv	2,8	2,5	2,3	2,0	1,7	1,4	A
Corrente v °	°	138	138	137	136	135	134	°
Coeficiente k	k1	0	0	0	0	0	-1	
Corrente u [R]	I'u	2	2	1	1	1	1	A
Corrente u [i]	I"u	0	0	0	0	0	0	A
Corrente u [c]	Iu	51+0,20	45+0,17	39+0,08	38+0,04	316-0,034	27-0,09	A
Corrente u M	Iu	1,8	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	A
Corrente u °	°	7	6	3	2	-2	-6	°

4.12 CONTINUAÇÃO Método G - Somas de perdas: perdas adicionais determinadas através do método Eh-star (R'_{eh} fixo)

		150%	135%	120%	105%	90%	75%	
Tensão interna uv [c]	$\underline{U}_i uv$	211,288	192,754	172,697	152,471	130,942	109,064	V
Tensão interna vw [c]	$\underline{U}_i vw$	-205,129	-189,073	-172,446	-154,84	-135,437	-115,206	V
Tensão interna wu [c]	$\underline{U}_i wu$	-6,15870	-3,68025	-0,25170	2,36221	4,49437	6,14181	V
Tensão comp. direta [c]	$\underline{U}_i LL1$	191,6610	173,798	154,071	134,484	113,550	92,2390	V
Tensão comp. Inversa [c]	$\underline{U}_i LL2$	19,6273	18,9557	18,6261	17,9930	17,3927	16,8252	V
Tensão /fase comp. Direta [c]	$\underline{U}_i 1$	80,6675	72,7592	63,9389	55,2961	46,1958	36,9839	V
Tensão /fase comp. Inversa [c]	$\underline{U}_i 2$	-8,18515	-7,28104	-6,28909	-5,2577	-4,04638	-2,67643	V
Tensão u assimétrica [c]	$\underline{U}_i U$	72,4823	65,4781	57,6498	50,0385	42,1494	34,3075	V
Tensão v assimétrica [c]	$\underline{U}_i V$	-138,806	-127,276	-115,047	-102,43	-88,7933	-74,7568	V
Tensão w assimétrica [c]	$\underline{U}_i W$	66,3236	61,7979	57,3981	52,4007	46,6438	40,4493	V
Corrente perdas ferro u [c]	$\underline{I}_{fe u}$	0,01016	0,00918	0,00808	0,00701	0,00591	0,00481	A
Corrente perdas ferro v [c]	$\underline{I}_{fe v}$	-0,01946	-0,01785	-0,01613	-0,0143	-0,01245	-0,01048	A
Corrente perdas ferro w [c]	$\underline{I}_{fe w}$	0,00930	0,00866	0,00805	0,00734	0,00654	0,00567	A
Corrente interna u [c]	$\underline{I}_i u$	1,78811	1,64150	1,46921	1,31234	1,13357	0,97010	A
Corrente interna v [c]	$\underline{I}_i v$	-2,06457	-1,85948	-1,62171	-1,4051	-1,18028	-0,96969	A
Corrente interna w [c]	$\underline{I}_i w$	0,27645	0,21797	0,15249	0,09281	0,04671	-0,00041	A
Corrente comp. direta [c]	$\underline{I}_i 1$	-0,25979	-0,22331	-0,18681	-0,1483	-0,10989	-0,06609	A
Corrente comp. direta [M]	$ \underline{I}_i 1 $	0,63	0,56	0,50	0,44	0,39	0,33	A
Corrente comp. direta °	°	-115	-114	-112	-110	-107	-101	°
Corrente comp. inversa [c]	$\underline{I}_i 2$	2,04790	1,86482	1,65602	1,46074	1,24346	1,03620	A
Corrente comp. inversa [M]	$ \underline{I}_i 2 $	2,19	1,99	1,75	1,53	1,29	1,06	A
Corrente comp. inversa °	°	21	20	19	17	15	13	°
30% Corrente comp. inversa [M]	30% $ \underline{I}_i 1 $	0,66	0,60	0,52	0,46	0,39	0,32	A
Relação Comp. Direta / Inversa	$\underline{I}_i 1 / \underline{I}_i 2$	0,286	0,280	0,287	0,285	0,299	0,315	
Comp. direta < 30 % inversa	$\underline{I}_i 1 < \underline{I}_i 2$	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	
Potência entreferro comp. Direta	Pg(1)	77	65	58	49	41	34	W
Potência entreferro comp. Inversa	Pg(2)	36	31	23	18	12	8	W
Coefficiente k	k	1	1	1	1	1	1	
Deslizamento	s	0	0	0	0	0	0	
Perdas suplementares	p Lr	18,72	13,34	13,43	9,86	8,03	5,26	W
Perdas suplementares corrigidas	p LL	11,77						W



Anexo C. Incerteza dos equipamentos de ensaio

Nº	Equipamento	Gran- deza	Unida- de	Valor Mínimo	Leitura	Valor Máximo	Resolu- ção	Cálculo da Incerteza	Incerteza Máxima (% Valor fim de escala)	Incerteza do Instrumento	
1	Analisador C.A. 8332	I _{max}	A	0,2	5,0	240	0,1	±(0,5%+0,2A)	0,5 %	0,54 %	NOK
		I _{min}	A	0,2	0,6	240	0,1	±(0,5%+0,2A)	0,5 %	0,51 %	NOK
		U _{max}	V	10	260,0	960	0,1	±(0,5%+0,2V)	0,5 %	0,16 %	OK
		U _{min}	V	10	50,0	960	0,1	±(0,5%+0,2V)	0,5 %	0,05 %	OK
		P _{max}	W	0	1600	9999	1	±1%	0,5 %	0,24 %	OK
		P _{min}	W	0	20	9999	1	±1%	0,5 %	0,003 %	OK
		f	Hz	40	50	60	0,01	±0,01 Hz	0,1 %	0,02 %	OK
	Cos fi	p.u.	-1	0,800	1	0,001	±1,5%			OK	
2	Analisador C.A. PEL 103	I _{max}	A	0,2	5,0	240	0,1	±(0,2%+0,02%In)	0,5 %	0,08 %	OK
		I _{min}	A	0,2	0,6	240	0,1	±(0,2%+0,02%In)	0,5 %	0,05 %	OK
		U _{max}	V	170	260,0	1700	0,1	±(0,2%+0,4V)	0,5 %	0,05 %	OK
		U _{min}	V	17	50,0	170	0,1	±(0,2%+0,4V)	0,5 %	0,29 %	OK
		P _{max}	W	0	1600	9999	1	±(0,7%+0,0007%Pn)	0,5 %	0,12 %	OK
		P _{min}	W	0	20	9999	1	±(0,7%+0,0007%Pn)	0,5 %	0,002 %	OK
		f	Hz	40	50	60	0,1	±0,1 Hz	0,1 %	0,17 %	NOK
	Cos fi	p.u.	-1	0,8	1	0,001	±0,05			OK	
3	Medidor de Binário SCAIME	T	Nm	0	10	50		±0,25	0,2 %	0,25 %	NOK
4	Medidor de Binário Terco MV1051	T	Nm	0	10	12		± 2%	0,2 %	0,17 %	OK
		n	r.p.m.	120	1500	4000		± 1%	0,1 rpm	1,5 rpm	NOK
		P	W	0	1500	2000		± 2%	0,5 %	3 %	NOK
5	Medidor de Binário TorqueSense RTW341	T	Nm	0	10	50		± 0,2%FS	0,2 %	0,2 %	OK
		n	r.p.m.	120	1500	4000		± 0,2%FS	0,1 rpm	8 rpm	NOK
		P _m	W	0	1500	2000		± 0,2%FS	0,5 %	0,2 %	OK
6	Multímetro Fluke 11	U _{max}	V	0	260,0	400	0,1	±(1,9%+3dgt)	0,5 %	1,31 %	NOK
		U _{min}	V	0	50,0	400	0,1	±(1,9%+3dgt)	0,5 %	0,31 %	OK
		R	Ω	0	6	400	0,1	±(0,9%+2dgt)	0,5 %	0,06 %	OK
7	Multímetro Fluke 179	I _{max}	A	0	5,0	6	0,001	±(1,5%+3dgt)	0,5 %	1,3 %	NOK
		I _{min}	A	0	0,6	6	0,001	±(1,5%+3dgt)	0,5 %	0,2 %	OK
		U _{max}	V	0	260,0	600	0,1	±(1,0%+3dgt)	0,5 %	0,48 %	OK
		U _{min}	V	0	50,0	60	0,01	±(1,0%+3dgt)	0,5 %	0,88 %	NOK
		R	Ω	0	6	600	0,1	±(0,9%+2dgt)	0,5 %	0,04 %	OK
		f	Hz	0	50	99	0,01	±(0,1%+1dgt)	0,1 %	0,06 %	OK
8	Multímetro Fluke 185	Temp	°C	-40	50	400	0,1	±(1,0%+10dgt)	1 °C	1,5 °C	NOK
		I _{max}	A	0	5,0	10	0,01	±(0,6%+2dgt)	0,5 %	2,3 %	NOK
		I _{min}	A	0	0,6	5	0,001	±(0,6%+2dgt)	0,5 %	0,47 %	OK
		U _{max}	V	0	260,0	500	0,1	±(0,4%+2dgt)	0,5 %	0,25 %	OK
		U _{min}	V	0	50,0	50	0,01	±(0,4%+2dgt)	0,5 %	0,44 %	OK
		R	Ω	0	6	50	0,01	±(0,1%+10dgt)	0,5 %	0,21 %	OK
9	Multímetro GW INSTEK GPM-8212	f	Hz	0,5	50	1000	0,01	±(0,1%+1dgt)	0,1 %	0,001 %	OK
		Temp	°C	-50	50	980	1	± 1	1 °C	1 °C	OK
		I _{max}	A	0	5,0	5,12	0,001	±(0,1%+0,1% range)	0,5 %	0,2 %	OK
		I _{min}	A	0	0,6	2,56	0,001	±(0,1%+0,1% range)	0,5 %	0,12 %	OK
		U _{max}	V	0	260,0	320	0,1	±(0,1%+0,1% range)	0,5 %	0,18 %	OK
		U _{min}	V	0	50,0	320	0,1	±(0,1%+0,1% range)	0,5 %	0,12 %	OK
		P _{max}	W	0	1600	1968	1	±(0,2%+0,2% range)	0,5 %	0,36 %	OK
10	Multímetro Prova 11	P _{min}	W	0	20	51,2	0,1	±(0,2%+0,2% range)	0,5 %	0,28 %	OK
		f	Hz	0,5	50	400	0,1	±(0,2%+2dgt)	0,1 %	0,06 %	OK
		Cos fi		0,001	0,800	1	0,001	±0,05			OK
10	Multímetro Prova 11	I _{max}	A	0	5,0	30	0,01	±(2,0%+5dgt)	0,5 %	0,5 %	OK
		I _{min}	A	0	0,6	4	0,001	±(2,5%+5dgt)	0,5 %	0,5 %	OK
		U _{max}	V	0	260,0	400	0,1	±(1,5%+4dgt)	0,5 %	1,08 %	NOK
		U _{min}	V	0	50,0	400	0,1	±(1,5%+4dgt)	0,5 %	0,29 %	OK

Nº	Equipamento	Gran- deza	Unida- de	Valor Mínimo	Leitura	Valor Máximo	Resolu- ção	Cálculo da Incerteza	Incerteza Máxima (% Valor fim de escala)	Incerteza do Instrumento	
11	Multímetro Prova 21	I _{max}	A	3	5,0	30	0,01	$\pm(0,5\%+5dgt)$	0,5 %	0,25 %	OK
		I _{min}	A	0,05	0,6	3	0,001	$\pm(0,5\%+5dgt)$	0,5 %	0,27 %	OK
		U _{max}	V	250	260,0	600	0,1	$\pm(0,5\%+5dgt)$	0,5 %	0,3 %	OK
		U _{min}	V	5	50,0	250	0,1	$\pm(0,5\%+5dgt)$	0,5 %	0,3 %	OK
		P _{max}	W	1000	1600	9999	1	$\pm(2,0\%+25W)$	0,5 %	0,57 %	NOK
		P _{med}	W	100	500	999	0,1	$\pm(2,0\%+2,5W)$	0,5 %	1,25 %	NOK
		P _{min}	W	10	20	99	0,01	$\pm(2,0\%+0,25W)$	0,5 %	0,66 %	NOK
		f	Hz	45	50	65	0,1	$\pm 0,5Hz$	0,1 %	0,77 %	NOK
Cos fi	p.u.	0,001	0,800	1	0,001	$\pm 0,04$		0,04	NOK		
12	Multímetro TES 2732	I _{max}	A	0	5,0	20	0,01	$\pm(1,5\%+5dgt)$	0,5 %	0,63 %	NOK
		I _{min}	A	0	0,6	20	0,01	$\pm(1,5\%+5dgt)$	0,5 %	0,3 %	OK
		U _{max}	V	0	260,0	750	1	$\pm(1,2\%+5dgt)$	0,5 %	1,08 %	NOK
		U _{min}	V	0	50,0	200	0,1	$\pm(1,0\%+5dgt)$	0,5 %	0,5 %	OK
		R	Ω	0	6	200	0,1	$\pm(0,8\%+2dgt)$	0,5 %	0,5 %	OK
		f	Hz	0	50	2000	1	$\pm(0,5\%+2dgt)$	0,1 %	0,11 %	NOK
Temp	°C	0	50	200	0,1	$\pm(0,5\%+1,5^\circ C)$	1 °C	1,75 °C	NOK		
13	Ohmmímetro Wavetek CR50	R	Ω	0	6	20	0,01	$\pm 2\%$	0,5 %	0,6 %	NOK
14	Tacómetro AT-8	n	r.p.m.	2	1500	20000	0,1	$\pm (0,05\%leit+1dgt)$	0,1 rpm	0,85 rpm	NOK
15	Tacómetro PROVA RM-	n	r.p.m.	10	1500	100000	0,1	$\pm (0,01\%leit+1dgt)$	0,1 rpm	0,25 rpm	NOK
16	Termometro Center 309	Temp	°C	-200	50	1370	0,1	$\pm (0,3\%+1,0^\circ C)$	1 °C	1,15 °C	NOK

Incerteza: \pm (erro relativo à leitura + erro absoluto)

\pm (Porcentagem da leitura + dígito menos significativo, dgt)

\pm (Porcentagem da leitura + erro absoluto)

\pm (erro absoluto)

\pm (Porcentagem do valor de fim de escala)

Exemplo: $\pm(1,5\%+4dgt)$

Exemplo: $\pm(0,5\%+0,2A)$

Exemplo: $\pm 0,01 Hz$

Exemplo: $\pm 0,25\% FS$ (FS-Full Scale)

Anexo D. Equipamentos auxiliares

Nº	Equipamento	Descrição
1	Camara Termográfica	Registo do comportamento térmico dos motores
2	Carga resistiva	Utilizada como carga nos ensaios em carga e como resistencia no Eh-Star
3	Computadores: 2 unidades	TorqSense (leitura de binário) e Fluke view (leitura temperatura)
4	Conometro / Relogio	Auxiliar à realização dos ensaios
5	Microsoft Excel	Software utilizado para calculo e obtenção de resultados
6	F.A. SM 7020-D Delta Electronika	Utilizada para alimentação do freio de carga Langlois
7	F.A. Terco MV 1300	Alimentação com autotransformador incorporado
8	Freio de Carga Langlois	Utilizado numa primeira fase mas invalidado por causa de proteção termica
9	Matlab	Complemento ao MS Excel
10	Máquina DC	Carga em funcionamento como dinamo de excitação shunt com carga resistiva
11	Motor ELIN (Amarelo)	Não utilizado devido ao desequilibrio entre fases dos enrolamentos
12	Motor WEG (Azul)	Motor A
13	Motor WEG (Verde) W22 Premium	Motor B
14	Plasticina	Para fixação do termopar
15	Software Fluke view Forms	Registo das leituras da temperatura na bobinagem e no circuito estatórico
16	Software Torq Sense	Utilizado como interface de leitura do binário
17	Tigela com Gelo e Picador de Gelo	Para calibração da classe de precisão do multímetro Fluke 185 de 3°C para 1°C
18	Termopar	3 termopares da Fluke
19	Autotransformador 400 V	Utilizado no Ensaio Eh-Star