



**Aplicação da Norma IEC 61800-9-2:2023 a
Acionamentos Elétricos Avançados de
Velocidade Variável**

Versão Final Após Defesa

Bartolomeu Júlio Rodrigues Kapalandanda

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Doutor Fernando José Figueiredo Bento

Covilhã, dezembro de 2025

Declaração de Integridade

Eu, Bartolomeu Júlio Rodrigues Kapalandanda, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M13430 de Engenharia Electromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã, 30/12/2025

A handwritten signature in blue ink that reads "Bartolomeu J. R. Kapalandanda". The signature is written in a cursive style and is centered on a light-colored rectangular background.

Dedicatória

Em África, existe um conceito profundamente enraizado - *Ubuntu*: “*eu sou, porque tu és*”. É a tradução de um modo de vida que compreende o ser como parte de um todo. Nesta visão, o ser humano simplesmente não é, “ele está”, cada indivíduo integra o fluxo contínuo da vida. Para que alguém exista hoje, outros tiveram de vir antes. Por isso, cada indivíduo carrega consigo a responsabilidade de garantir que os que vêm depois tenham um caminho mais digno.

Dedico este trabalho aos meus pais, Júlio Kapalandanda e Dalva Chitunda.

Graças às suas lutas, dedicação, trabalho árduo e rigor na minha educação, sou hoje um homem formado, capaz de levar o nome da família adiante com honra e responsabilidade.

Este trabalho é também dedicado a todos os meus ancestrais.

Sou apenas uma parte de um todo. Espero cumprir a minha missão com o mesmo zelo com que outros, antes mim, cumpriram as suas.

Este trabalho não é apenas meu, pertence a todos os membros da minha família. É a prova de que, com dedicação, paixão, esforço contínuo, somos capazes de alcançar o que quisermos.

Desejo que este trabalho sirva como uma forma de desbloqueio de qualquer crença limitante.

Este é apenas o começo.

B. J. R. Kapalandanda

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a *Ngana Nzambi*, pelo fôlego da vida, por ter sido aconchego quando o caminho foi rochoso, por ter sido paz nos momentos de medo, por ter sido luz quando só havia escuridão, e por ter sido bússola quando me senti perdido.

Gostaria de agradecer ao CISE - Centro de Investigação de Sistemas Electromecatrónicos, mais especificamente, ao patrono da instituição, Professor Doutor António João Marques Cardoso, pela oportunidade que me foi concedida de trabalhar num projeto internacional de grande relevância e atualidade científica.

Expresso igualmente a minha profunda gratidão ao meu orientador, Doutor Fernando José Figueiredo Bento. Confesso que, sem o seu apoio e visão, dificilmente estaria a concluir esta dissertação neste momento. Os meus eternos agradecimentos pelo convite para integrar esta empreitada, e pelo acompanhamento rigoroso ao longo do processo.

Agradeço também aos meus colegas do CISE, que, sempre que necessário, se mostraram disponíveis a ajudar.

Gostaria ainda de agradecer ao senhor Conrad U. Brunner, pela partilha de informações essenciais para a concretização deste trabalho. É com grande honra que refiro ter tido a oportunidade de trocar correspondências com uma figura amplamente reconhecida como um dos principais precursores no domínio da normalização internacional. Desde 2006, tem contribuído para o desenvolvimento de diversas normas globalmente reconhecidas, sendo membro fundador do projeto CAISEMS, ligado à IEC, e membro do grupo consultivo JAG 22, que colabora com os comités técnicos IEC TC2 (motores), IEC SC 22G (conversores) e ISO TC 117 (ventiladores), sendo que os dois primeiros foram responsáveis pelo desenvolvimento da norma IEC 61800-9-2.

A minha eterna gratidão ao Instituto Nacional de Petróleos (INP), minha escola secundária, e a toda equipa que ali trabalha arduamente para manter o elevado padrão de ensino que caracteriza a instituição. Posso afirmar, sem margem de dúvidas que o INP foi a base sólida que permitiu desenvolver as competências necessárias para a execução deste trabalho.

Ao meu padrasto, José Pompílio, pela constante instrução e inspiração ao longo da minha vida.

Aos meus amigos, Dário António, Deodato Gonda, Werowildes Brandão, e a todos os outros que não menciono nominalmente, mas que, de alguma forma, marcaram positivamente este ciclo da minha vida, deixo um agradecimento especial.

O meu muito obrigado.

B. J. R. Kapalandanda

Resumo

Nas últimas décadas, o mundo tem assistido a evoluções tecnológicas significativas que, de forma inegável, contribuíram para a melhoria das condições de vida da humanidade. Este progresso impulsionou a expansão industrial e, com ele, o aumento do consumo de energia elétrica, sobretudo no setor industrial, suscitando diversas discussões em torno da sustentabilidade do atual modelo de desenvolvimento industrial.

Estudos indicam que os motores elétricos são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica efetuado a nível global. Tal constatação impulsionou o debate sobre estratégias de mitigação de perdas, entre as quais se destacam a utilização de motores elétricos mais eficientes e a adoção generalizada de variadores de velocidade (*variable frequency drives* - VFDs). A concretização dessas medidas requer não apenas o desenvolvimento de novas tecnologias, mas também a definição de métodos de avaliação de desempenho fiáveis, que assegurem a adoção rápida e segura de novas tecnologias de acionamentos elétricos.

Neste contexto, a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission* - IEC) desenvolveu a norma IEC 61800-9-2:2023, que estabelece métodos de ensaio e sistemas de classificação para estes equipamentos. Contudo, a escassez de informação científica relativa ao comportamento das novas tecnologias de motores elétricos em diferentes perfis de carga e em condições industriais severas levanta dúvidas sobre a fiabilidade da norma na sua avaliação e caracterização.

Com o intuito de contribuir para o esclarecimento desta questão, a presente dissertação propõe-se a testar um sistema de acionamento elétrico de velocidade variável, constituído por um motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes (*permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor* - PMA-SynRM), modelo Baldor *EC-Titanium* e um conversor de frequência variável *Yaskawa A1000*, ambos disponíveis comercialmente. Pretende-se, com tais testes, avaliar o grau de adequação da metodologia estabelecida na norma IEC 61800-9-2:2023 quando aplicada a acionamentos elétricos compostos por PMA-SynRM, comparando os resultados obtidos com os adquiridos por estabilização térmica. Desta forma, será possível verificar a efetividade da norma na caracterização de tecnologias de motores elétricos mais recentes.

Palavras-chave

Acionamentos elétricos de velocidade variável; motores síncronos; normalização internacional; IEC 61800-9-2:2023; eficiência energética.

Abstract

In recent decades, the world has witnessed significant technological developments that have undeniably contributed to improve humanity's living conditions. This progress has driven industrial expansion and, with it, the increase in electricity consumption, particularly in the industrial sector, raising numerous discussions around the sustainability of the current development model.

Studies indicate that electric motors are responsible for a significant share of the worldwide electricity consumption. This finding has fueled the debate on strategies to mitigate losses, among which the use of more efficient electric motors and the widespread adoption of variable frequency drives (VFDs) stand out. The implementation of such measures requires not only the development of new technologies, but also the creation of reliable evaluation methods that ensure the fast and safe adoption of new motor drives technologies.

In this context, the International Electrotechnical Commission (IEC) developed the IEC 61800-9-2:2023 standard, which establishes testing methods and classification systems for such equipment. However, the lack of scientific data regarding the behavior of these new technologies under different load profiles and in harsh industrial conditions raises doubts about the effectiveness of the standard in their evaluation and characterization.

Aiming to contribute towards the clarification of this issue, the present dissertation proposes to test a variable-speed electric drive system composed of a commercially available EC-Titanium permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM) and a Yaskawa A1000 variable frequency drive. The purpose of these tests is to assess the degree of adequacy of the methodology established in IEC 61800-9-2:2023 when applied to electric drives composed of PMA-SynRM machines, by comparing the results obtained with those derived from thermal stabilization. In this way, it will be possible to verify the effectiveness of the standard in the characterization of more recent electric motor technologies.

Keywords

Variable speed electric drives; synchronous motors; international standardization; IEC 61800-9-2:2023; energy efficiency.

Índice

Resumo.....	viii
Palavras-chave.....	viii
Abstract	x
Keywords.....	x
Índice.....	xii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
1. Contextualização	1
1.1. Instalação de Motores de Elevado Rendimento	6
1.2. Utilização de Acionamentos Elétricos com Conversores de Frequência Variável (VFD)	7
1.3. O que é a Normalização?	9
1.4. Principais Entidades	9
1.5. Normas Ligadas a Eficiência Energética dos Sistemas de Acionamentos Elétricos e Equipamentos Acionados	12
1.6. Porquê a Norma IEC 61800-9-2:2023?.....	13
1.7. Objetivos e Estrutura da Dissertação	14
2. Introdução à Norma IEC 61800-9-2	17
2.1. Trabalhos Relacionados com a Aplicação da Norma IEC61800-9-2:2023	18
2.2. Sistema de Classes de Eficiência IE e IES e Seus Limites	19
2.2.1. Classe IE do Motor	20
2.2.2. Classe IE do CDM	21
2.2.3. Classe IES do PDS	22
2.3. Metodologia de Teste	24
2.3.1. Obtenção das Perdas do CDM Através de Cálculos	26
2.3.2. Obtenção das Perdas do CDM Através de Medições de Potência na Entrada e Saída.....	27
2.3.3. Obtenção das Perdas no Motor	29
2.3.3.1. Perdas Adicionais Devido a Distorções Harmónicas	30
2.3.4. Obtenção das Perdas no PDS	31

2.3.5. Obtenção das Perdas do PDS Através de Medições de Potência na Entrada e Saída	32
3. Motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes (PMA-SynRM).....	33
3.1. Características Construtivas	35
3.2. Princípio de Funcionamento de um PMA-SynRM	36
3.3. Aplicabilidade Prática	37
4. Modelo Matemático para o Cálculo das Perdas no CDM e Segregação das Perdas no Motor.....	39
4.1. Modelo Matemático Para o Cálculo das Perdas no CDM	39
4.1.1. Perdas no Filtro de Linha	40
4.1.2. Perdas no Retificador	40
4.1.3. Perdas no Barramento DC	41
4.1.4. Perdas no Inversor	41
4.1.5. Perdas nos Condutores	43
4.1.6. Perdas por Ventilação	43
4.2. Modelo Matemático para a Segregação das Perdas no Motor	44
5. Montagem Experimental, Resultados e Discussão	47
5.1. Montagem Experimental	47
5.2. Resultados Obtidos Através de Cada Metodologia	50
5.2.1. Estimativas das Perdas no VFD por Cálculos Matemáticos	50
5.2.2. Segregação das Perdas no Motor	53
5.2.3. Resultados Experimentais – Metodologia de Ensaio Baseada na Norma IEC 61800-9-2	55
5.2.4. Resultados Experimentais – Metodologia de Ensaio Baseada na Estabilização Térmica.....	58
5.3. Análise Comparativa dos Resultados	60
5.3.1. Norma vs. Estimativa – CDM	61
5.3.2. Norma IEC 61800-9-2 vs. Estabilização Térmica	62
6. Conclusões	67
6.1. Limitações do Estudo	68
6.2. Recomendações	68
6.3. Trabalhos Futuros	69
Referências	70

Lista de Figuras

Figura 1: (a) Distribuição do fornecimento global de motores elétricos por gama de potência nominal; (b) Contribuição para o consumo global de eletricidade dos motores elétricos por faixa de potência nominal [4].....	2
Figura 2: Exemplos de equipamentos comumente acionados por motores elétricos.....	2
Figura 3: Sistema de bombagem com controlo puramente mecânico de fluxo. Adaptado de [5].	4
Figura 4: Sistema de bombagem com controlo eletrónico de fluxo. Adaptado de [5].	4
Figura 5: Comitês técnicos responsáveis pelos componentes dos EMDS. Adaptado de [20].	10
Figura 6: Exemplo de um PDS e os respetivos CDM e SDM. Adaptada de [26].....	17
Figura 7: Ilustração gráfica do sistema de classificação IE do CDM.....	22
Figura 8: Pontos de referência para medição das perdas em PDS, CDM e RM. Extraída da norma IEC 61800-9-2.	24
Figura 9: Ilustração do CDM genérico e da sua configuração para o ensaio em carga.....	26
Figura 10: Montagem para determinar as perdas do CDM através de medições entrada-saída.....	28
Figura 11: Ordem de medição de pontos para CDM.....	29
Figura 12: Montagem para medição das perdas do PDS. Adaptada de [26].....	32
Figura 13: Estator genérico.....	35
Figura 14: Rotor e estator de um PMa-SynRM.	36
Figura 15: Diagrama de perdas em motores elétricos. Adaptado de [37].	36
Figura 16: Ilustração gráfica das perdas no CDM.	39
Figura 17: Ilustração gráfica da obtenção das perdas adicionais por regressão linear [42].	45
Figura 18: Montagem experimental do sistema de teste.....	49
Figura 19: Estimativa das perdas no CDM, obtida através de modelo matemático.	52
Figura 20: Separação das perdas adicionais relativas ao nível de carga das perdas residuais, por regressão linear.	54
Figura 21: Representação percentual das principais perdas no PMa-SynRM, para o funcionamento em condições nominais.....	54
Figura 22: Rendimento do CDM medido experimentalmente, segundo a norma IEC 61800-9-2:2023.	56
Figura 23: Rendimento do motor, obtido experimentalmente em simultâneo com a aquisição dos dados do PDS, de acordo com a norma IEC 61800-9-2:2023.....	56

Figura 24: Rendimento do PDS, determinado experimentalmente em conformidade com a norma IEC 61800-9-2:2023.	57
Figura 25: Rendimento do CDM medido experimentalmente, por estabilização térmica.	59
Figura 26: Rendimento do motor, obtido experimentalmente em simultâneo com a aquisição dos dados do PDS, por estabilização térmica.	60
Figura 27: Rendimento do PDS, determinado experimentalmente, por estabilização térmica.....	60
Figura 28: Comparação das perdas no CDM: estimativas vs. procedimento experimental.	61
Figura 29: Análise comparativa das perdas no sistema de acionamento elétrico (PDS): norma IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica.....	62
Figura 30: Análise comparativa das perdas estimadas por interpolação linear vs. perdas medidas por estabilização térmica.....	65

Lista de Tabelas

Tabela 1: Análise comparativa entre tecnologias de motores elétricos com a mesma potência nominal (7.5 kW).....	6
Tabela 2: Família de normas IEC referente aos sistemas de acionamentos elétricos de velocidade variável.	12
Tabela 3: Sistema de classificação do PDS.	23
Tabela 4: Sete pontos de funcionamento normalizados para a interpolação das perdas ...	25
Tabela 5: Análise comparativa de diferentes tecnologias de motores elétricos.	37
Tabela 6: Características do motor em estudo	47
Tabela 7: Características do VFD em estudo	48
Tabela 8: Dados do fabricante do VFD	50
Tabela 9: Dados de I_{out} , CDM, λ , $\cos\phi$, para os 8 pontos de funcionamento.	50
Tabela 10: Valores típicos das grandezas elétricas nos subcomponentes do VFD, estabelecidos pela norma.	51
Tabela 11: Estimativas das perdas no VFD.....	52
Tabela 12: Segregação das perdas no motor.....	53
Tabela 13: Distribuição percentual das perdas no PMA-SynRM, por componente.	53
Tabela 14: Resultados experimentais obtidos a partir do procedimento estabelecido na norma IEC 61800-9-2:2023.....	55
Tabela 15: Resultados experimentais obtidos a partir do procedimento de estabilização térmica dos 8 pontos de funcionamento.	59
Tabela 16: Quadro resumo - comparação das perdas no CDM: estimativas vs. procedimento experimental.....	61
Tabela 17: Quadro resumo - comparação das perdas no sistema de acionamento elétrico (PDS): norma IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica	63
Tabela 18: Pontos intermédios escolhidos para a avaliação do método de interpolação linear da norma IEC 61800-9-2:2023	63
Tabela 19: Quadro resumo - comparação das perdas estimadas por interpolação linear vs. perdas medidas por estabilização térmica.	64

Lista de Acrónimos

ACEE	<i>Advisory Committee on Energy Efficiency</i> – Comité Consultivo em Eficiência Energética
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> – Instituto de Normalização Americano
BIS	<i>Bureau of Indian Standards</i> – Gabinete de Normalização Indiano
CAISEMS	<i>Coordination and Alignment of IEC and ISO Standards for Energy Efficient Electronic Motor Driven Systems</i> – Coordenação e Alinhamento de Normas IEC e ISO para Sistemas de Acionamentos Elétricos Energeticamente Eficientes
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i> – Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica
CDM	<i>Complete Drive Module</i> – Módulo de Acionamento Completo
DoE	<i>United States Department of Energy</i> – Departamento de Energia dos Estados Unidos da América
ECM	<i>Electronically Commutated Motor</i> – Motor Comutado Electronicamente
EMDS	<i>Electric Motor Driven System</i> – Sistema Acionado por Motor Elétrico
EPA	<i>Extended Product Approach</i> – Abordagem de Produto Estendido
EV	<i>Electric Vehicle</i> – Veículo Elétrico
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Agência Internacional de Energia
IE	<i>International Efficiency</i> – Rendimento Internacional
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> – Comité Eletrotécnico Internacional
IES	<i>International Efficiency of System</i> – Rendimento Internacional do Sistema
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> – Transístor Bipolar de <i>Gate</i> Isolada
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Organização Internacional de Normalização
IPM	<i>Interior Permanent Magnet</i> – Íman Permanente Interior
JISC	<i>Japanese Industrial Standards Committee</i> – Comissão Japonesa para Normas Industriais
LSPM	<i>Line Started Permanent Magnet</i> – Motor Síncrono de Ímanes Permanentes com Arranque Direto À Rede
MIT	Motor de Indução Trifásico
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> – Associação Nacional de Fabricantes de Equipamentos Elétricos
PMa-SynRM	<i>Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor</i> – Motor Síncrono de Relutância Assistido por Ímanes Permanentes
PDS	<i>Power Drive System</i> – Acionamento Elétrico de Potência

RCDM	<i>Reference Complete Drive Module</i> – Módulo Completo de Acionamento de Referência
RM	<i>Reference Motor</i> – Motor de Referência
RMS	<i>Root Mean Square</i> – Valor Quadrático Médio
ROI	<i>Return on Investment</i> – Rentabilidade do Investimento
SAC	<i>Standardization Administration of China</i> – Administração para a Normalização da China
SDM	<i>Sub Drive Module</i> – Submódulos de Acionamento
SEAD	<i>Super-Efficient Equipment Appliance Deployment</i> – Implementação de Equipamento e Aparelhos de Elevado Desempenho
SPM	<i>Surface Permanent Magnet</i> – Ímã Permanente de Superfície
SRM	<i>Switched Reluctance Motor</i> – Motor de Relutância Comutada
SynRM	<i>Synchronous Reluctance Motor</i> – Motor Síncrono de Relutância
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i> – Conversor de Frequência Variável

Capítulo 1

1. Contextualização

Cerca de um terço da produção global de energia tem como consumidor final o sector industrial. Aproximadamente 38 % desta energia é consumida pela China, enquanto a União Europeia (UE), os Estados Unidos da América (EUA), a Índia e o Japão apresentam um consumo combinado de cerca de 28 % da energia global [1].

As indústrias pesadas são os maiores consumidores de energia elétrica a nível mundial. Segundo [2], estima-se que as indústrias cimenteira, siderúrgica e de alumínio consumam, em conjunto, cerca de 60 % de toda a eletricidade utilizada pelo setor industrial.

Um dos principais fatores que contribui para este consumo tão expressivo de energia elétrica é a adoção massiva de motores elétricos nestas indústrias. Esta constatação é apresentada pela Agência Internacional da Energia (*International Energy Agency* - IEA), no seu relatório anual, *World Energy Outlook* [1], onde se estima que cerca de 65 % da eletricidade utilizada no setor industrial se destine à alimentação de motores elétricos. Este é um padrão que se mantém há mais de uma década.

A maior parte deste consumo está associada a motores de baixa e média potência, entre os 0.75 kW e 375 kW, que representam cerca de 10 % de todo o fornecimento global de motores. Apesar do número limitado de unidades, estes motores são responsáveis por aproximadamente 68 % da eletricidade consumida pelos motores elétricos no sector industrial [3]. Em contrapartida, os motores com potência nominal superior a 375 kW representam apenas 0.03 % do fornecimento global de motores. Estes são responsáveis por cerca de 23 % do consumo de eletricidade industrial associado a motores elétricos. Esta distribuição pode ser observada na Figura 1 [4].

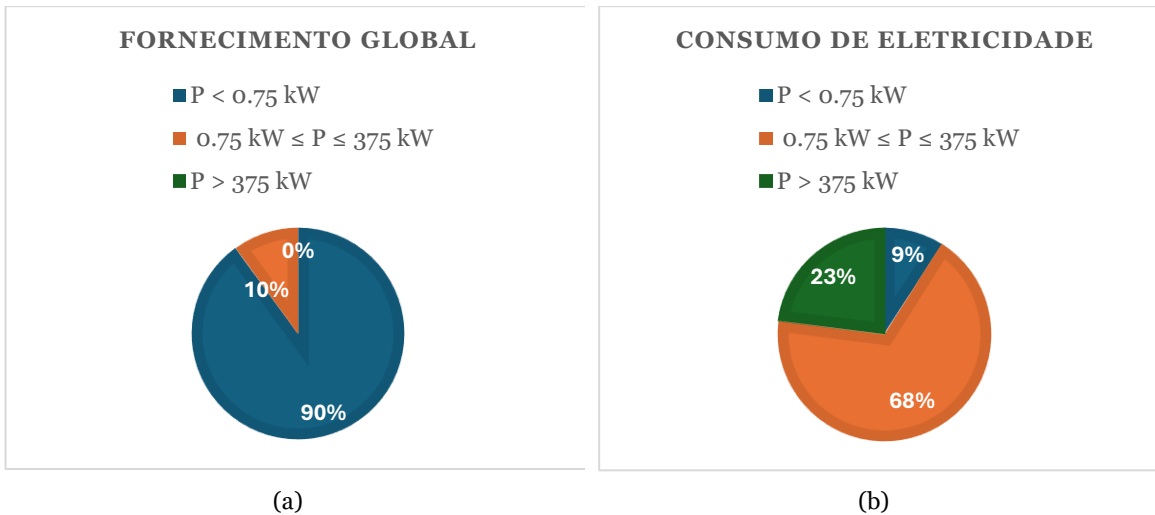


Figura 1: (a) Distribuição do fornecimento global de motores elétricos por gama de potência nominal; (b) Contribuição para o consumo global de eletricidade dos motores elétricos por faixa de potência nominal [4].

A grande maioria destes motores é utilizada em aplicações como sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), esteiras transportadoras, gruas, misturadoras, compressores, entre outras, como se pode ver na Figura 2.

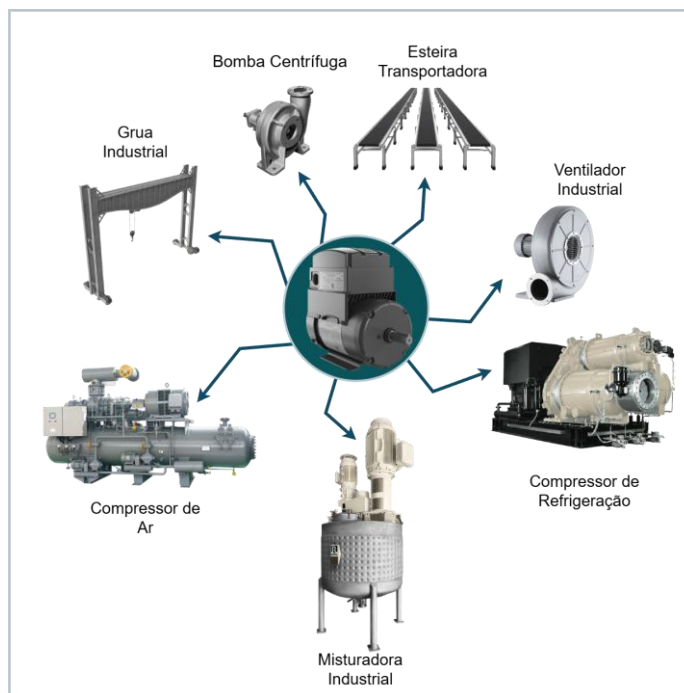


Figura 2: Exemplos de equipamentos comumente acionados por motores elétricos.

Em termos tecnológicos, os equipamentos industriais acionados por motores elétricos recorrem maioritariamente a motores de indução trifásicos, dada a sua simplicidade, robustez, facilidade de manutenção e maturidade tecnológica.

Apesar do seu papel essencial, os motores elétricos apresentam perdas associadas que, na maioria dos casos, fazem com que o seu consumo energético seja superior ao necessário.

Essas perdas devem-se, sobretudo, ao controle de velocidade ineficiente, frequentemente realizado de forma puramente mecânica, recorrendo a equipamentos e técnicas tecnologicamente ultrapassados. Tal abordagem acarreta significativos desperdícios energéticos nos sistemas industriais.

Outro fator importante é o sobredimensionamento dos motores. Em muitos casos, o binário de arranque necessário para acionar uma carga é substancialmente superior ao binário exigido em condições de funcionamento contínuo. Para garantir a capacidade de arranque, as equipas de projeto optam frequentemente por motores com potência superior à necessária em regime permanente. No entanto, esta decisão pode ter consequências indesejáveis no rendimento do sistema, uma vez que os motores elétricos apresentam diferentes níveis de rendimento consoante o ponto de funcionamento. Quando os motores operam abaixo da sua condição nominal, o seu rendimento tende a diminuir significativamente.

Todos esses fatores, somados às perdas intrínsecas dos próprios processos industriais, podem induzir perdas expressivas ao longo da cadeia de conversão e utilização de energia elétrica [5].

Com o intuito de ilustrar de forma clara a cadeia de conversão e utilização de energia, consideram-se, de seguida, dois exemplos gráficos. A Figura 3 e a Figura 4 representam um sistema de bombagem de água alimentado por uma central termoelétrica. Na Figura 3, observa-se um sistema de bombagem operado a velocidade constante, que recorre a um sistema de controlo de caudal puramente mecânico. Este sistema apresenta um rendimento total de apenas 11 %. Já na Figura 4, a simples introdução da capacidade de variação de velocidade permite reduzir significativamente o consumo energético necessário para alcançar o mesmo resultado operacional [5].

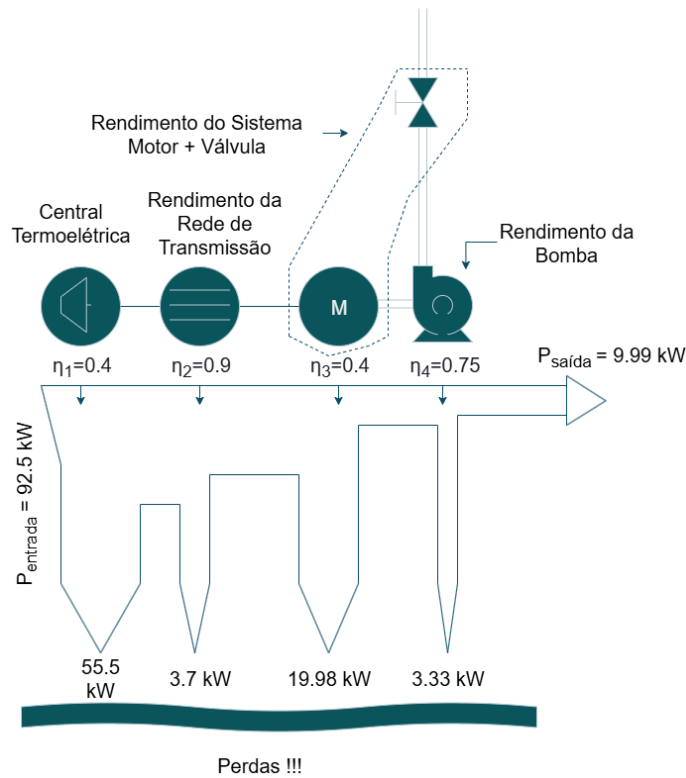


Figura 3: Sistema de bombagem com controlo puramente mecânico de fluxo. Adaptado de [5].

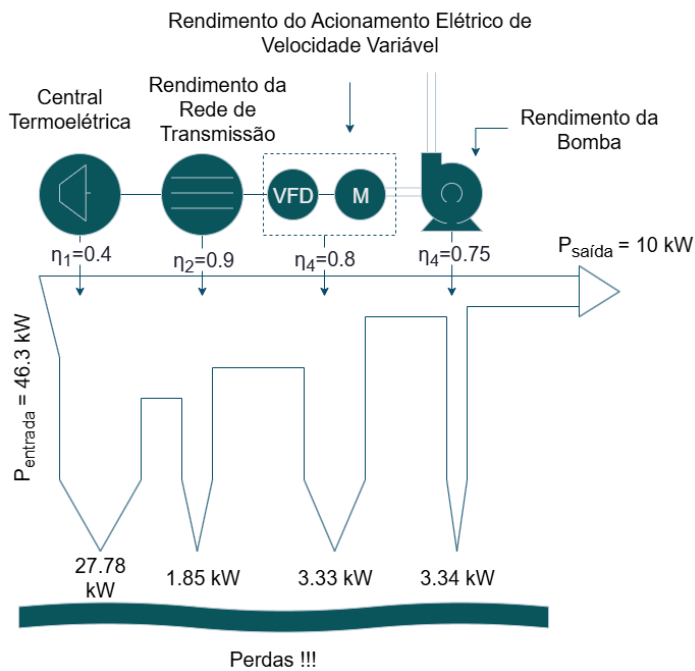


Figura 4: Sistema de bombagem com controlo eletrónico de fluxo. Adaptado de [5].

A abordagem mais eficaz para a promoção da eficiência energética no setor industrial, no que diz respeito a motores elétricos, passa precisamente por garantir a redução de perdas ao máximo dentro de um sistema ou processo, sem comprometer a qualidade do resultado.

Apesar de ser um problema amplamente reconhecido, o consumo elétrico expressivo das máquinas elétricas rotativas continua a exigir ações concretas por parte de todos os intervenientes, desde os grandes produtores industriais, até aos governos e às organizações internacionais que regulam o sector. Caso não sejam implementadas medidas reais, é plausível que os 65 % de eletricidade consumida no setor industrial por motores elétricos se mantenha ou até aumente ligeiramente nos próximos anos, na melhor das hipóteses.

Contudo, a atual conjuntura também representa uma oportunidade. Com o esforço necessário, é possível inverter esta tendência e reduzir significativamente o consumo de eletricidade no sector industrial.

Todo o conteúdo até aqui apresentado visa reforçar a ideia da urgência em repensar todos os aspetos relacionados com as máquinas elétricas rotativas, desde as características construtivas à forma como são integradas em sistemas completos. Parte considerável deste processo passa também, por criar políticas que incentivem fabricantes e utilizadores finais a optarem por soluções com rendimento energético superior.

Neste contexto, destaca-se a iniciativa *Energy Efficiency Movement*, lançada pela ABB em 2022, em colaboração com a Reuters. Desta iniciativa, resultou a publicação de um artigo [6] em que se discutiram 10 medidas tangíveis que as empresas devem adotar imediatamente para reduzir o consumo energético e as emissões de carbono inerentes a tal consumo.

O tema desta dissertação, bem como a sua abordagem, resultam em parte, das recomendações deste artigo. Duas das medidas, em particular, merecem reflexão:

- Medida 4: Instalação de motores de elevado rendimento;
- Medida 5: Utilização de acionamentos elétricos com conversores de frequência variável.

Antes de se abordar mais detalhadamente as duas medidas, é importante clarificar dois conceitos fundamentais, de modo a evitar interpretações incorretas ou distorções terminológicas: o de “conversor de frequência variável (*Variable Frequency Drive - VFD*)” e o de “acionamento elétrico”.

Um VFD é um equipamento que regula a velocidade e o binário disponíveis no veio de um motor elétrico. Tal funcionalidade é possível graças à capacidade destes dispositivos para controlar a frequência e potência de alimentação do motor, ajustando assim o seu funcionamento às necessidades do processo [7], [8].

Por sua vez, um acionamento elétrico é um sistema composto por um ou vários motores elétricos, bem como por todo o equipamento de controlo elétrico concebido para regular o funcionamento desses motores [9].

Deste modo, é correto afirmar que um acionamento elétrico pode ou não incluir um VFD, mas um motor elétrico estará sempre presente num acionamento elétrico.

1.1. Instalação de Motores de Elevado Rendimento

Historicamente, os motores de indução trifásicos mantiveram uma posição dominante no setor industrial ao longo das últimas seis a sete décadas, devido à sua robustez, baixo custo de aquisição e reduzidos requisitos de manutenção. Esta hegemonia deve-se também à escassez, durante muito tempo, de tecnologias alternativas viáveis [10].

Contudo, nas últimas duas a três décadas, esse panorama tem vindo a alterar-se consideravelmente. Atualmente, já existem soluções igualmente robustas e energeticamente mais eficientes. No entanto, a sua adoção em larga escala, tem sido limitada por fatores regulatórios, constrangimentos financeiros e, em alguns casos, pela inércia dos próprios intervenientes do mercado.

De acordo com [6], estima-se que o consumo global de eletricidade poderia ser reduzido em até 10 % caso o setor industrial substituísse os mais de 300 milhões de motores elétricos atualmente em operação por outros mais modernos e de elevado rendimento.

Para ilustrar o potencial técnico das tecnologias de motores elétricos mais modernas e eficientes face aos motores de indução trifásicos, apresenta-se na Tabela 1 uma análise comparativa entre o motor de indução trifásico (MIT) [11], e três motores síncronos mais modernos, nomeadamente:

- o motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes à base de ferrite (PMA-SynRM) [12];
- o motor síncrono de relutância (SynRM) [13];
- o motor com ímanes permanentes montados à superfície (SPM), baseado em terras raras [14].

Tabela 1: Análise comparativa entre tecnologias de motores elétricos com a mesma potência nominal (7.5 kW).

Características	PMA-SynRM	SynRM	SPM	MIT
Rendimento típico (%)	94.8 %	92.4 %	93.2 %	91.7 %
Fator de Potência	0.937	0.72	>0.9	0.75
Densidade de Potência	0.134 W/m ³	0.114 W/m ³	0.224 W/m ³	0.0624 W/m ³

Uma análise comparativa entre as quatro tecnologias permite observar que o SPM apresenta, simultaneamente, maior densidade de potência e maior rendimento. Tal significa que, para uma mesma potência, o motor é duas a três vezes mais leve. A conjugação destes fatores afigura-se como uma vantagem significativa em aplicações onde a massa, volume e reduzido consumo energético são críticos, como é o caso de plataformas de exploração petrolífera. Em contrapartida, esta tecnologia é potencialmente mais dispendiosa, devido ao custo elevado dos ímanes permanentes de terras raras.

Uma potencial alternativa é o PMA-SynRM, que combina rendimento elevado, elevada densidade de potência e menor dependência de materiais críticos. Já o SynRM, embora

também ofereça um rendimento superior ao MIT, apresenta um fator de potência mais baixo, o que pode traduzir-se em circulação de corrente elétrica de maior amplitude no circuito estático e conseqüente aumento de perdas por condução.

Do ponto de vista de perdas internas, os motores SynRM ou SPM apresentam, em geral, menos perdas agregadas em comparação com os MIT com a mesma potência nominal.

Com base nos dados apresentados, a principal questão prende-se com a robustez e fiabilidade dos equipamentos alternativos em contextos industriais exigentes. É evidente que a substituição destes motores implica custos iniciais frequentemente elevados. No entanto, é essencial que os gestores/decisores adotem uma abordagem baseada no ciclo de vida dos equipamentos, e não apenas no custo de aquisição inicial.

1.2. Utilização de Acionamentos Elétricos com Conversores de Frequência Variável (VFD)

Relativamente à adoção massiva de conversores de frequência variável (*variable frequency drives* - *VFDs*), importa reforçar que estes proporcionam uma economia de energia significativamente superior quando comparados com métodos rudimentares de controlo de velocidade que, infelizmente, ainda são utilizados em muitas unidades fabris.

Apesar de os VFDs poderem aumentar as perdas por distorção harmónica na corrente elétrica de alimentação do motor, tal desvantagem é facilmente colmatada pelo controlo preciso da velocidade. Tal funcionalidade permite que o sistema forneça apenas a energia necessária para cada fase de um processo industrial, adaptando o funcionamento do motor às necessidades operacionais. Para além disso, os VFDs possibilitam uma monitorização mais rigorosa das grandezas elétricas e mecânicas envolvidas, permitindo assim prevenir avarias causadas por situações anómalas, como sobrecorrentes, temperaturas elevadas, sobrecarga e outros fatores críticos [15]. Com alguma frequência, os motores elétricos são sujeitos a condições extremas de operação que implicam a circulação de correntes elétricas de elevada amplitude no seu circuito. Este fenómeno resulta em esforço térmico acrescido nos componentes do motor, o que pode desencadear diferentes modos de avaria, como a degradação do isolamento dos enrolamentos, levando eventualmente a curto-circuitos entre espiras ou até mesmo entre bobinas, que podem ser consideradas situações de avaria catastrófica [16]. Em suma, os VFDs não apenas reduzem as perdas no sistema, como também aumentam o grau de proteção dos motores elétricos.

De modo geral, a utilização de VFDs resulta numa redução direta do consumo energético no processo industrial, à prolongação da vida útil dos motores, o que, por sua vez, se traduz em economia financeira a longo prazo [17].

Coloca-se, no entanto, a seguinte questão: como garantir a aceitação global de tais tecnologias, de forma consistente e segura?

Neste contexto, a normalização assume um papel preponderante na transição para um mundo energeticamente mais eficiente. As normas definem métodos sistemáticos de avaliação e certificação, eliminam barreiras de entrada e viabilizam a adoção massiva de tecnologias emergentes. Frequentemente, são essas normas que direcionam o setor industrial para a adoção de tecnologias mais sustentáveis.

O processo de normalização permite a padronização de processos, melhoria da qualidade dos sistemas e a melhoria da eficiência dos métodos de fabrico. No caso específico do sector de acionamentos elétricos, a normalização promove uma aceitação global de determinado equipamento, reduzindo a incompatibilidade entre sistemas. Para além disso, facilita melhorias contínuas no desenvolvimento dos equipamentos, visto que as normas são periodicamente atualizadas, funcionando como um processo iterativo até se alcançar o sistema ou qualidades de certo componente que melhor responde às necessidades do coletivo.

É evidente que a adoção massiva destas medidas por parte dos diversos intervenientes não ocorrerá de forma imediata. No entanto, dada a sua importância estratégica, muitos países passaram a tratar a eficiência energética como uma questão de estratégia nacional. Neste sentido, governos, organismos de normalização, grandes empresas, centros de investigação e outras partes interessadas têm promovido esforços conjuntos para fomentar a sustentabilidade industrial.

É o caso do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*US Department of Energy - DoE*), do Instituto de Engenharia Eletrotécnica e Eletrónica (*Institute of Electrical and Electronics Engineering - IEEE*), da Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission - IEC*), da Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization - ISO*) e do Comité Europeu para a Normalização Eletrotécnica (*European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC*). Estas organizações têm vindo a desenvolver diversos projetos de investigação científica e normas técnicas, com o intuito de orientar o setor industrial para práticas mais eficientes e sustentáveis.

Um exemplo prático da efetividade e relevância das normas técnicas prende-se com a estrutura física das próprias máquinas elétricas rotativas. Caso os fabricantes de motores elétricos tivessem liberdade para definir arbitrariamente a posição dos furos de fixação da estrutura à base ou as dimensões dos veios, o sector tornar-se-ia caótico, dificultando reparações, substituições e a integração de equipamentos em larga escala.

1.3. O que é a Normalização?

Relativamente ao conceito de normalização e de normas técnicas, há uma certa unanimidade, tanto na comunidade científica como na indústria. Duas das maiores entidades internacionais de normalização - a IEC e a ISO - definem estes termos no guia ISO/IEC 2:2004 [18].

A normalização é definida como “A atividade de estabelecer, em relação a problemas reais ou potenciais, disposições para uso comum e repetido, com o objetivo de alcançar o grau de ordem ótimo num determinado contexto” ou, de forma concisa, “A atividade que consiste nos processos de formulação, emissão e implementação de normas”.

Perante esta definição, surge naturalmente a questão: O que são normas técnicas?

Segundo o guia ISO/IEC 2:2004 [18], uma norma técnica é:

“Um documento estabelecido por consenso e aprovado por um órgão reconhecido que fornece, para uso comum e repetitivo, regras, diretrizes ou características para atividades ou os seus resultados, com o objetivo de alcançar o grau ótimo de ordem num determinado contexto”.

É evidente que nem todas as normas são aplicáveis em todos os sectores. Dependendo do sector, determinado grupo de norma terá a sua classificação. Nesta ordem de ideias, importa referir que a presente dissertação apenas se irá cingir a uma norma específica, que se enquadra no âmbito das normas industriais. O termo “normas industriais” é utilizado para fazer referência ao grupo de normas que representam os requisitos mínimos aceites pelos membros de uma indústria, com o objetivo de garantir as expectativas básicas de qualidade e segurança [19]. Essas normas são desenvolvidas por organizações que representam os membros da indústria e variam entre diferentes setores, podendo possuir diferentes níveis de reconhecimento geográfico e vários estatutos legais.

1.4. Principais Entidades

No contexto da presente dissertação, existem diferentes órgãos de normalização, com distintos níveis de influência geográfica e respaldo legal. Quando se analisam os subsectores do ramo da electromecatrónica e sistemas acionados por máquinas elétricas rotativas, é evidente que tais entidades têm responsabilidades complementares.

Essa distinção de responsabilidades tornou-se ainda mais evidente com a criação do projeto CAISEMS (*Coordination and Alignment of IEC and ISO Standards for Energy Efficient Electric Motor Driven Systems*) [20], uma parceria entre a IEC e a ISO que visa reduzir as barreiras de mercado para sistemas acionados por motores elétricos energeticamente eficientes (*Electric Motor Driven Systems – EMDS*), bem como melhorar a coordenação e o alinhamento das normas internacionais relativas aos componentes desses sistemas, a distribuição de responsabilidades é apresentada na Figura 5.

Controlo de Velocidade		Motor	Equipamento Mecânico		Equipamento Accionado			
IEC TC 121	IEC TC 22 SC 22G	IEC TC 2	ISO TC 41	ISO TC 60	ISO TC 115	ISO TC 117	ISO TC 86	ISO TC 118
Aparelhagem de Manobra e Controlo	Accionamento de Velocidade Variável	Máquinas Rotativas	Polias e Correias	Engrenagens	Bombas	Ventiladores	Compressores de Refrigeração	Compressores de Ar
1927	1934	1911	1947	1947	1964	1964	1957	1965

Figura 5: Comitês técnicos responsáveis pelos componentes dos EMDS. Adaptado de [20].

No âmbito deste projeto, a IEC ficou responsável por normalizar os componentes relacionados com:

- Fontes de alimentação;
- Equipamentos de potência (transformadores, aparelhagem de manobra e proteção);
- Controladores (acionadores, VFDs) e motores.

Já à ISO, cabe a responsabilidade sobre os seguintes componentes:

- Acoplamentos e transmissão mecânica (acoplamentos, engrenagens, correias, correntes, polias, embraiagens, travões);
- Equipamentos acionados (máquinas de produção, transportadoras, bombas, ventiladores, compressores, etc.);
- Equipamentos de processo e controlo mecânico (tubagem, válvulas, dispositivos de estrangulamento e amortecedores).

Com base nas premissas apresentadas na parte introdutória deste capítulo, destaca-se também a criação, por parte da IEC, do grupo ACEE (*Advisory Committee on Energy Efficiency*) [21]. Este é um grupo multidisciplinar composto por vários comitês técnicos da própria IEC, no seio do qual foram desenvolvidos dois documentos orientadores: o Guia IEC 118 e o Guia IEC 119. Estes guias têm como objetivo definir o conceito de Aspectos de Eficiência Energética (EEAs), fornecendo orientação sistemática aos comitês técnicos da IEC sobre como abordar a normalização com foco em eficiência energética.

Durante o workshop SEAD [22] (*Super-Efficient Equipment Appliance Deployment*), organizado pela IEC, em novembro de 2020, Philippe Vollet (à data chairman do IEC ACEE), afirmou:

“Trabalhar no campo da normalização industrial, com foco na eficiência energética, requer mudanças na narrativa da normalização tradicional, que tem sido historicamente centrada em produtos individuais e numa organização vertical, para uma abordagem de integração de sistemas, e soluções orientadas a aplicações globais. Uma abordagem holística garante um maior potencial de eficiência energética”.

Ainda no mesmo evento [22], identificaram-se as principais barreiras para a adoção massiva de medidas de eficiência energética, a saber:

- Falta de conhecimento sobre o potencial de redução de custos;
- Foco em aparelhos isolados em vez de sistemas integrados, o que resulta em baixos retornos de investimento (ROI);
- Priorização do baixo custo de aquisição em detrimento dos ganhos durante o ciclo de vida;
- Ausência de incentivos, dado que, frequentemente, os utilizadores finais não são os decisores da compra.

Tanto a ISO como a IEC têm como membros os comités nacionais dos países a si associados [23], [24]. Uma vez aceites, estes comités passam a ter a responsabilidade de representar os interesses do sector público e privado dos respetivos países.

As normas desenvolvidas por estes órgãos podem ou não adquirir a força da lei, dependendo do seu grau de relevância e da forma como determinado órgão de normalização nacional ou bloco económico atua. Em muitos casos, essas normas não são tão harmonizadas, devido ao conflito de interesses entre determinadas nações ou blocos económicos.

No caso da União Europeia (UE), além de cada país membro possuir o seu organismo de normalização nacional ligado às entidades de normalização internacional, existe ainda o CENELEC, responsável por desenvolver normas harmonizadas para o mercado europeu, muitas vezes vinculadas à legislação da UE. Um cenário comum é uma norma ser criada por um organismo internacional, a UE legisla sobre o tema, o CENELEC harmoniza a norma para o mercado europeu e, por fim, os comités nacionais definem a obrigatoriedade da aplicação em cada país. No entanto, também existem normas desenvolvidas por iniciativa própria da CENELEC, sem depender de normas internacionais pré-existentes.

Nos Estados Unidos da América, o ANSI (*American National Standards Institute*) exerce um papel similar, trabalhando em estreita colaboração com organismos internacionais de normalização. A ANSI influencia diretamente a regulamentação e certificação dentro dos EUA. Contudo, ao contrário do modelo europeu, a maioria das normas nos EUA são de carácter voluntário, embora amplamente adotadas pela indústria.

Outra entidade de grande relevância no cenário norte-americano é a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), que desenvolve normas não obrigatórias para os equipamentos elétricos. A NEMA representa os interesses dos fabricantes, funcionando como uma associação de classe, enquanto a ANSI é um órgão oficial nacional de normalização, tal como a CENELEC.

Já em países como a China, Japão e Índia, destacam-se respetivamente as entidades SAC (*Standardization Administration of China*), JISC (*Japanese Industrial Standards Committee*) e BIS (*Bureau of Indian Standards*), responsáveis pela normalização nestes países. Estas entidades representam os interesses nacionais junto de organismos como a IEC, ISO, IEEE, entre outros.

Em geral, a implementação das normas nestes países também é voluntária, salvo em situações específicas em que certas leis fazem menção a estas normas, ou quando se trata de setores estratégicos, cuja regulamentação está diretamente ligada à segurança nacional.

1.5. Normas Ligadas a Eficiência Energética dos Sistemas de Acionamentos Elétricos e Equipamentos Acionados

É evidente que existem normas técnicas que atendem às especificidades de todos os tipos de indústria, e não é o objetivo desta dissertação abordar exaustivamente todas as normas. Dentro de cada indústria, existe aquilo a que se chama “família de normas”, ou seja, o conjunto de normas relacionadas com determinado sistema, equipamento, ou temática específica.

No caso do projeto CAISEMS, estão envolvidas diversas famílias de normas, cada uma cobrindo um aspeto específico dos sistemas de acionamento elétrico de velocidade variável, com foco na eficiência energética industrial. A Tabela 2 apresenta um exemplo representativo da família de normas IEC 61800, referente aos sistemas de acionamentos elétricos de velocidade variável.

Tabela 2: Família de normas IEC referente aos sistemas de acionamentos elétricos de velocidade variável.

Norma	Descrição
IEC 61800-1	Requisitos gerais: especificações de classificação para sistemas de acionamento DC de velocidade ajustável de baixa tensão
IEC 61800-2	Requisitos gerais: especificações de classificação para sistemas de acionamento AC de velocidade ajustável
IEC 61800-3	Requisitos de compatibilidade eletromagnética (EMC) e métodos de teste específicos para sistemas de acionamentos elétricos e máquinas-ferramentas
IEC 61800-5-1	Requisitos de segurança elétrica, térmica e energética
IEC 61800-5-3	Requisitos de segurança – requisitos funcionais, elétricos e ambientais para a <i>encoders</i>
IEC 61800-6	Guia para determinação dos tipos de regime de carga e das correspondentes classes de corrente nominal
IEC 61800-9-1	Requisitos gerais para a definição de normas de eficiência energética para equipamentos acionados utilizando a abordagem de produto estendido e o modelo semi-analítico
IEC 61800-9-2	Determinação e classificação da eficiência energética

Uma vez apresentadas as principais motivações para o desenvolvimento da presente dissertação, e tendo sido contextualizada a representatividade de consumo elétrico dos motores no sector industrial, bem como as possíveis estratégias para mitigar este problema, importa referir que o objeto de estudo deste trabalho incide exclusivamente sobre a norma IEC 61800-9-2, conforme será exposto na secção seguinte.

1.6. Porquê a Norma IEC 61800-9-2:2023?

Conforme apresentado nas secções anteriores, torna-se evidente a urgência em substituir os acionamentos elétricos ineficientes por soluções mais modernas e eficientes, que possibilitam ganhos reais de rendimento energético e operacional. No entanto, o conhecimento técnico e científico atualmente disponível relativamente a estas tecnologias ainda é limitado.

No caso específico do PMA-SynRM, por exemplo, não está claramente definido em que condições de carga esta tecnologia apresenta o seu melhor rendimento, ou seja, como se comporta sob diferentes perfis de carga, um fator determinante em aplicações industriais reais.

Neste contexto, a adoção dos métodos de avaliação e classificação definidos na norma IEC 61800-9-2 representa um avanço importante, ao estabelecer uma metodologia padronizada e comparável para diferentes tecnologias de acionamento elétrico de velocidade variável. Esta abordagem permite superar limitações de normas anteriores, que se encontravam fragmentadas, o que não permitia uma comparação direta entre acionamentos elétricos de velocidade variável. Ao harmonizar os critérios de medição e de cálculo de rendimento, a norma fornece uma base sólida para decisões técnicas, económicas e regulamentares no setor industrial.

Por outro lado, tal como referido anteriormente, cada aplicação industrial apresenta um perfil de carga específico. Tal significa que nem todas as tecnologias de acionamentos elétricos disponíveis responderão de forma igualmente satisfatória.

Importa destacar que uma análise aprofundada da norma em questão revela que a mesma foi originalmente desenvolvida com base em acionamentos elétricos baseados em motores de indução trifásicos, conforme apresentado ao longo do capítulo 2 desta dissertação. Assim, levanta-se a questão da efetividade da aplicação direta da norma na avaliação de tecnologias mais recentes, como os motores síncronos de relutância assistidos por ímanes permanentes (PMA-SynRM).

Uma vez analisada a sua real efetividade para tecnologias mais modernas, a norma IEC 61800-9-2 poderá ser útil em dois domínios:

- Caso se comprove que a norma não está adequada para tecnologias de acionamentos elétricos mais modernas, será evidenciada a necessidade de se desenvolver novos métodos de avaliação que se adequem a essas soluções.
- Caso se verifique a sua efetividade na avaliação de tecnologias como o PMA-SynRM, a norma poderá acelerar a adoção, no sector industrial, das mais recentes tecnologias de acionamentos elétricos.

Neste contexto, a União Europeia promulgou o **regulamento (UE) 2019/1781 de 1 de outubro de 2019** [25], que estabelece os requisitos de conceção ecológica aplicáveis aos motores elétricos e aos conversores de frequência variável, nos termos da Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu. Este regulamento define as classes de eficiência energética mínimas tanto para motor como para VFD, de forma separada, tendo como base a norma IEC 60034-1:2017 e outras normas.

O regulamento aplica-se especificamente a:

- Motores de indução trifásicos, sem escovas, comutadores, anéis coletores ou ligações elétricas ao rotor, alimentados por tensão sinusoidal de 50 Hz, 60 Hz ou 50/60 Hz, com até 8 polos, tensão nominal entre 50 V a 1 kV, e potência nominal entre 0.12 kW e 1 MW, destinados a funcionar ligados a rede;
- Conversores de frequência variável trifásicos, projetados para os motores acima descritos, com tensão nominal entre 100 V e 1 kV, e saída em corrente alternada.

O regulamento entrou em vigor a 1 de julho de 2021 e previa-se uma revisão até 14 de novembro de 2023, que até ao momento ainda não foi tornada pública. São focados os seguintes pontos:

1. Avaliar a pertinência de requisitos adicionais relacionados com a eficiência no uso dos recursos, em consonância com os objetivos da economia circular, como a identificação e reutilização de terras raras em motores que utilizem ímanes permanentes;
2. Estabelecer requisitos aplicáveis a combinações de motores e VFDs comercializados em conjuntos, bem como os variadores de velocidade integrados;
3. Incluir outros tipos de motores, nomeadamente os que utilizam ímanes permanentes.

A norma IEC 61800-9-2 surge precisamente como resposta ao ponto 2), oferecendo métodos padronizados para avaliar o rendimento de sistemas de acionamentos elétricos completos (VFD + motor), o que reforça a sua relevância atual e indica que poderá ser a base técnica para a próxima revisão do Regulamento EU 2029/1781 [25].

Assim sendo, convida-se o leitor a uma apreciação cuidada e reflexiva das questões aqui abordadas. Para orientar essa leitura, apresenta-se de seguida a estrutura da dissertação, os respetivos objetivos, e o que se pretende com os resultados.

1.7. Objetivos e Estrutura da Dissertação

O principal objetivo desta dissertação é estudar a efetividade real da norma IEC 61800-9-2:2023 na avaliação do rendimento de sistemas de acionamento elétrico de velocidade variável, e assim poder aferir, de forma inequívoca sobre qual o grau de adequação dos métodos definidos na norma à caracterização de tecnologias de acionamento elétrico

compostas por PMa-SynRM. Para isso, propõe-se uma comparação detalhada entre a metodologia de ensaios estabelecida pela referida norma e uma metodologia alternativa, baseada na estabilização térmica do motor em diferentes pontos de funcionamento.

Dessa forma, o objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a tecnologia de acionamento elétrico testada;
- Testar um motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes (PMa-SynRM) e um conversor de frequência variável (VFD) através da metodologia estabelecida pela norma IEC 61800-9-2:2023 e da metodologia de estabilização térmica;
- Comparar os resultados obtidos com ambas as metodologias e avaliar se a norma IEC 61800-9-2:2023 está devidamente ajustada às especificidades dos acionamentos elétricos de velocidade variável avançados.

O objeto de estudo consistiu num acionamento elétrico trifásico composto por um motor PMa-SynRM trifásico de 7.5 kW, de referência 37Q435L001G1, disponível comercialmente e desenvolvido para ser acionado apenas de forma eletrónica, e por um VFD Yaskawa A1000.

Do ponto de vista da sua estrutura, a dissertação está organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresenta a contextualização e descrição da relevância dos motores elétricos para o sector industrial, o seu impacto no consumo de energia elétrica, o potencial de redução de perdas, e o papel da normalização técnica na promoção da eficiência energética;
- Capítulo 2: Descreve a norma IEC 61800-9-2:2023 [26], a sua relevância para o sector industrial, o sistema de classificação internacional IE e IES, e duas das metodologias de obtenção de perdas de potência em CDM (*Complete Drive Module*) e PDS (*Power Drive Systems*), estabelecidas pela norma;
- Capítulo 3: Fornece numa visão abrangente sobre os PMa-SynRM, abordando as suas características construtivas, princípios de funcionamento, aplicabilidade prática e uma análise comparativa com outras tecnologias de máquinas elétricas rotativas;
- Capítulo 4: Apresenta um modelo matemático de discretização das perdas em PMa-SynRM com base em literatura científica, bem como um modelo matemático para determinação das perdas de potência no VFD, conforme estabelecido pela norma [26];
- Capítulo 5: Descreve o procedimento experimental, incluindo os equipamentos utilizados, os procedimentos de ensaio com ambas as metodologias (norma e estabilização térmica), a forma de extração e análise dos dados, e as limitações enfrentadas;

- Capítulo 6: Apresenta os resultados obtidos, a comparação entre as duas metodologias, as principais conclusões da dissertação, uma análise crítica do estudo e limitações;
- Capítulo 7: Contém as conclusões finais, as lições extraídas, um conjunto de recomendações de melhoria de procedimentos e propostas de trabalhos futuros no mesmo domínio.

Capítulo 2

2. Introdução à Norma IEC 61800-9-2

A norma IEC 61800-9-2 insere-se num conjunto de publicações da IEC, a família de normas IEC 61800, cujo principal objetivo é definir requisitos técnicos, métodos de ensaio e classificações de eficiência energética para sistemas de acionamento elétrico de velocidade variável.

A subfamília IEC 61800-9 centra-se na determinação do rendimento dos PDS (*power drive system* - é essencialmente a agregação de um VFD a um motor), equipamentos acionados e seus componentes, estando dividida em duas partes:

- IEC 61800-9-1:2017: apresenta o conceito de *extended product approach* (EPA), que consiste essencialmente na análise dos sistemas de acionamento elétrico (PDS) integrados com a carga. O objetivo desta norma é definir a metodologia geral para o cálculo das perdas e definição das classes de eficiência energética do conjunto PDS + equipamentos acionados (*extended product*). De modo geral, esta norma está mais focada na integração de PDS com cargas, permitindo a avaliação do rendimento final do sistema VFD + motor + carga.
- IEC 61800-9-2:2023: Define indicadores de rendimento para os módulos completos de acionamento (Complete Drive Module - CDM) e o sistema de acionamento elétrico PDS, usados para acionar as cargas. Esta norma estabelece as classes de eficiência IE¹ para VFDs e IES² para PDS, define os limites dessas classes de eficiência e apresenta os procedimentos de ensaio necessários à posterior classificação, com base nas perdas do sistema. A Figura 6 apresenta de forma gráfica a composição de um PDS.

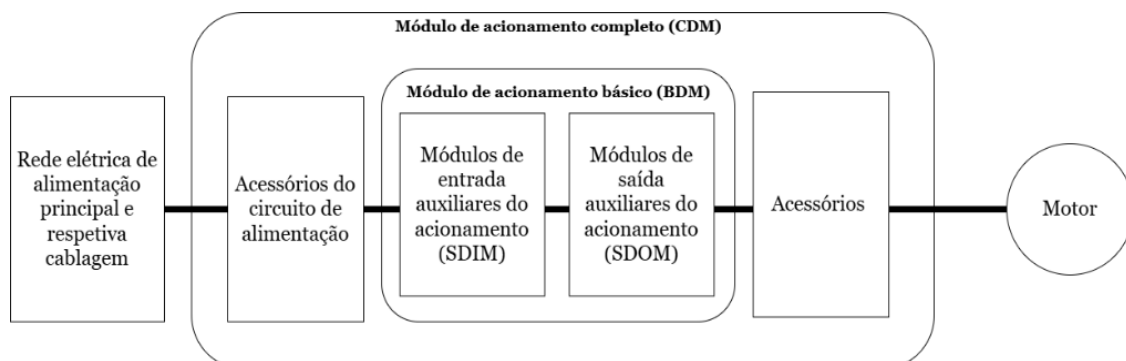


Figura 6: Exemplo de um PDS e os respetivos CDM e SDM. Adaptada de [26].

¹ IE – *International Efficiency*.

² IES – *International Efficiency of Systems*.

2.1. Trabalhos Relacionados com a Aplicação da Norma IEC61800-9-2:2023

Antes de se estabelecer a base para a discussão em torno da norma IEC 61800-9-2:2023, torna-se pertinente analisar alguns dos trabalhos já desenvolvidos neste domínio. Esta secção dedica-se precisamente a essa análise.

Em [27], embora o autor tenha validado a metodologia definida na norma e o modelo matemático de perdas no VFD, o estudo ficou limitado a máquinas elétricas rotativas assíncronas. No que respeita ao modelo matemático, o autor limita-se a referir que existem perdas em determinados componentes, apresentando apenas parte do modelo descrito na norma, e realizando uma comparação dos valores globais obtidos. Para além disso, não é apresentada a metodologia utilizada, nem os equipamentos envolvidos no estudo.

No trabalho apresentado em [4], é explorada a aplicabilidade prática da norma em acionamentos elétricos baseados em motores de indução, bem como ao conjunto “acionamento elétrico + equipamento acionado”. Ao avaliar o modelo matemático proposto na norma, a autora conclui que a norma tende a sobrestimar as perdas no sistema. Comparativamente a este estudo, o diferencial que o presente trabalho traz reside na análise da aplicabilidade da norma para acionamentos de velocidade variável baseados em motores síncronos de relutância assistidos por ímanes permanentes, o que representa um contributo inovador para a comunidade científica.

No trabalho desenvolvido em [28], o autor deu um contributo relevante no domínio industrial, beneficiando de uma estreita colaboração com um dos principais fabricantes de máquinas elétricas rotativas. Neste contexto, foi desenvolvida uma ferramenta funcional aplicável na prática. No entanto, a ferramenta não foi validada, o que torna o trabalho incompleto do ponto de vista científico. Para além disso, o autor limitou-se a aplicar a norma ao contexto industrial, sem realizar uma reflexão crítica sobre as suas limitações, nem apresentar comparações com outros métodos de avaliação.

Já em [29], foi realizada uma análise comparativa entre diferentes sistemas de acionamentos, sendo a única variável considerada a tecnologia de motor utilizado. Destaca-se o facto de o estudo incluir dois motores assíncronos (com enrolamentos em alumínio e cobre, respetivamente), um motor síncrono de relutância e um motor de ímanes permanentes. Para além disso, os autores foram capazes de realizar, com base nos dados obtidos e em fontes complementares, uma análise financeira para estimar o tempo de retorno de investimento associado a cada solução.

IEC 61800-9-2

O documento introduz os conceitos de módulo completo de acionamento de referência (*Reference Complete Drive Module - RCDM*), motor de referência (*Reference Motor - RM*) e perdas do PDS padrão.

Estes três conceitos estão interligados, pois constituem a base comparativa padronizada que permite avaliar e classificar, de forma consistente, diferentes tipos de motores, conversores e PDS. Assim, o RCDM funciona como um VFD genérico de referência, o RM estabelece o comportamento de um motor típico, e as perdas do PDS padrão permitem a determinação das classes de eficiência do sistema.

A principal mudança de paradigma trazida pela norma IEC 61800-9-2:2023 está na introdução das classes IES, que permitem avaliar o rendimento de sistemas completos (PDS), e não apenas de motores ou conversores isoladamente. Outra inovação é a definição de metodologias normalizadas para a estimativa e interpolação das perdas, assegurando maior comparabilidade entre fabricantes. Além disso, a norma amplia a aplicabilidade dos dados de referência, permitindo a sua adaptação a diferentes tipologias de conversores e motores para além dos de indução, incluindo, entre outros, os motores comutados eletronicamente (ECM), motores de ímãs permanentes (SPM ou IPM), motores síncronos de relutância (SynRM) e motores síncronos de ímãs permanentes de arranque direto (LS-PMSM).

Nota 1: os dados dos RCDM, RM, limites dos PDS e classes IE/IES são apresentados para baixa tensão (de 100 V até 1 kV), acionamentos elétricos mono-eixo AC/AC com motores trifásicos. Contudo, a norma fornece uma metodologia para adaptar esses dados de referência a outras topologias, como conversores AC/DC ou DC/AC.

2.2. Sistema de Classes de Eficiência IE e IES e Seus Limites

Com o intuito de garantir a comparabilidade entre motores, CDM e PDS de forma justa, a IEC estabeleceu um sistema de classificação baseado em classes de eficiência. Neste sistema, as classes de eficiência são determinadas a partir das perdas de potência, criando-se assim as classes de eficiência IE para motores (de IE1 a IE5), as classes de eficiência IE dos CDM (de IE0 a IE2), e as classes de eficiência do PDS (de IES0 a IES5).

Nas seções seguintes, apresentam-se em maior detalhe as classes de eficiência definidas pela norma para motores, CDM e PDS, bem como os respectivos limites.

É evidente que, quanto mais elevada for a classe IE ou IES, menores serão as perdas e, conseqüentemente, maior será o rendimento do motor, CDM, PDS.

Qualquer funcionalidade de controlo disponível no CDM pode ser utilizada para minimizar as perdas durante a avaliação do PDS, e deve ser devidamente registada como parte do relatório de avaliação.

A entidade ou indivíduo responsável por executar os ensaios poderá optar livremente por um dos métodos descritos na norma.

As perdas necessárias para a determinações das classes IES e IE devem ser calculadas através da soma das perdas obtidas em cada um dos métodos, considerando-se também as respetivas incertezas de medição, conforme as equações seguintes:

$$P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determinada} + \Delta P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determinada} * (1 + \Delta P_{L,CDM}) \quad (1)$$

$$P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determinada} + \Delta P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determinada} * (1 + \Delta P_{L,PDS}) \quad (2)$$

Onde:

$P_{L,CDM}$: perda total de potência no CDM, tendo em conta erros de medição;

$P_{L,PDS}$: perda total de potência no PDS, tendo em conta erros de medição;

$P_{L,CDM,determinada}$: perda total de potência no CDM, obtida através de medições;

$P_{L,PDS,determinada}$: perda total de potência no PDS, obtida através de medições;

$\Delta P_{L,CDM}$: erro de medição ao longo dos ensaios, para o CDM;

$\Delta P_{L,PDS}$: erro de medição ao longo dos ensaios, para o PDS.

As perdas do RCDM e RM são usadas como base para a avaliação da conformidade das classes IE e IES de um determinado motor, CDM ou PDS.

2.2.1. Classe IE do Motor

São definidas duas condições para a classificação dos motores, de acordo as classes IE:

- a) Motores alimentados diretamente da rede: a norma estabelece que estes motores se enquadram no âmbito da norma IEC 60034-30-1, sendo que a sua classificação máxima está limitada a classe IE4;
- b) Motores alimentados através de VFDS: segundo a norma IEC 61800-9-2:2023, estes devem ser classificados de acordo a norma IEC 60034-30-2, cuja classe máxima de eficiência corresponde ao nível IE5.

Existem também motores que podem estar abrangidos tanto pela norma IEC 60034-30-1 como pela norma IEC 60034-30-2. Nestes casos, a classe de eficiência deverá ser definida exclusivamente de acordo a norma IEC 60034-30-1.

No caso específico desta dissertação, o motor em estudo (PMA-SynRM) foi desenvolvido exclusivamente para ser acionado por conversores de frequência variável, o que o coloca sob domínio da norma IEC 60034-30-2 [30].

De acordo com a norma IEC 60034-30-2, as classes de eficiência (IE) aplicáveis a motores alimentados por CDMs estão compreendidas entre IE1, correspondente ao nível de menor rendimento, e IE5, correspondente ao nível de maior rendimento. A determinação da classe de eficiência de um motor específico depende diretamente da sua velocidade nominal, contemplada na norma no intervalo entre 600 rpm e 6000 rpm, e da sua potência nominal, no intervalo de 0,12 kW e 1000 kW.

Importa salientar que todas as classes, de IE1 a IE5, possuem limites de rendimento tabelados, definidos pela norma, os quais constituem a referência para a classificação.

A título ilustrativo, considere-se um motor de 7,5 kW de potência nominal, 1800 rpm de velocidade nominal e 94,8% de rendimento. Para determinar a respetiva classe de eficiência, seria necessário recorrer às tabelas de limites apresentadas na norma. Neste caso concreto, os valores indicados enquadrar-se-iam nos requisitos estabelecidos para a classe IE5.

2.2.2. Classe IE do CDM

As classes de eficiência IE dos CDMs variam de IE0 a IE2, sendo a classe atribuída a partir da comparação entre as perdas relativas do CDM, obtidas experimentalmente, e as perdas do RCDM com a mesma potência aparente de saída. Esta comparação corresponde ao nível de eficiência IE1. Todos os dispositivos existentes com perdas relativas menores que 75% das perdas de referência são classificados com níveis superiores a IE1.

Como é expectável, a norma estipula que a classe de eficiência do CDM deve ser determinada com base em ensaios em carga.

A classe IE do CDM deverá ser determinada tendo como base as perdas registadas no ponto de funcionamento $P_{L,CDM(90,100)}$.

A norma prevê três métodos para aquisição dos dados necessários para aferir a classe de eficiência energética IE de um CDM ou SDM:

- Cálculo das perdas componente a componente;
- Medição direta entre a entrada e a saída;
- Medição por calorimetria.

A norma apresenta os valores de referência para a classe IE1 do CDM para determinadas potências aparentes nominais. Caso a potência aparente nominal do CDM em estudo esteja entre dois valores na tabela, a perda relativa a ter em conta deverá ser o maior valor próximo da potência aparente de saída nominal.

- Um CDM deve ser classificado como IE0 se as suas perdas relativas forem mais de 125 % das perdas do RCDM;

- Um CDM deve ser classificado como IE1 se as suas perdas relativas estão entre 75 % e 125 % das perdas do RCDM;
- Um CDM deve ser classificado como IE2 se as suas perdas relativas forem menos que 75 % das perdas do RCDM.

O sistema de classificação IE dos CDM pode ser visualizado graficamente na Figura 7.

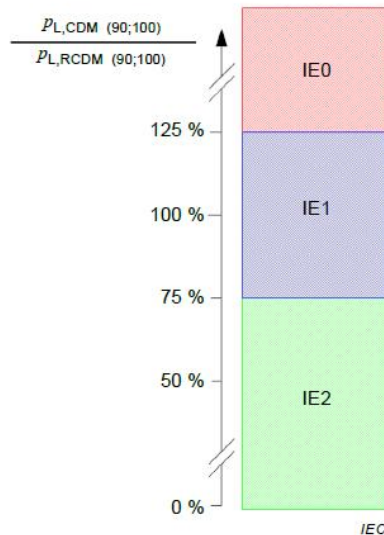


Figura 7: Ilustração gráfica do sistema de classificação IE do CDM.

2.2.3. Classe IES do PDS

O conceito de IES é bastante relevante, pois permite realizar uma comparação direta entre diversas tipologias de PDS, pois, antes da norma IEC 61800-9-2:2023 apenas era possível fazer comparação entre motores, não de sistemas completos.

A classificação de qualquer PDS deve situar-se dentro do intervalo IES0 a IES5.

A classe de eficiência IES do PDS deve ser determinada tendo como base as perdas registadas no ponto de funcionamento $P_{L,PDS(100,100)}$.

A norma estabelece duas formas de determinação da classe de eficiência energética IES de um PDS:

- Cálculo das perdas;
- Medição entre a entrada e a saída.

Compete à entidade executante garantir a aplicação correta da incerteza de medição. A norma define ainda um procedimento para o cálculo da incerteza, que pode ser consultado no Anexo G do documento original.

As classes IES são definidas de acordo ao limite relativo das perdas para a classe IES em questão ($P_{L,IESx,rpm}$) tal variável é definida por (3):

$$p_{L,IESx,rpm} = \frac{p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)} * P_{r,RM} + p_{L,IE2,CDM,m(90;100)} * S_{r,CDM}}{P_{r,RM}} \quad (3)$$

com $p_{L,IE2,CDM,m(90;100)} = 0.75 * p_{L,IE1,RCDM}$

Onde:

x : classe IES, é igual à classe IE do motor escolhido;

$p_{L,IESx,rpm}$: limite relativo das perdas para a classe IES em questão;

$p_{L,IE2,CDM,m(90;100)}$: perdas relativas do CDM corrigidas para o nível IE2;

$p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)}$: perdas relativas do motor conforme a norma IEC 60034-30-2, considerando a classe IE e a gama de velocidade;

$S_{r,CDM}$: potência aparente nominal do CDM;

$P_{r,RM}$: potência nominal do motor de referência.

As perdas relativas do motor de referência são calculadas através de (4).

$$p_{L,RM,IEx,rpm(90;100)} = \frac{(1 - \eta_{(90,100)}) * P_{L(90;100)}}{P_{r,RM}} \quad (4)$$

Onde:

$\eta_{(90,100)}$: rendimento do motor em estudo a 90% da velocidade nominal e 100% do binário nominal;

$P_{L(90;100)}$: potência consumida pelo motor em estudo, a funcionar a 90% da velocidade nominal e 100% do binário nominal.

As perdas relativas do PDS são calculadas a partir das perdas relativas do CDM e do motor:

$$p_{L,PDS} = \frac{p_{L,M} * P_{r,M} + p_{L,CDM} * S_{r,CDM}}{P_{r,M}} \quad (5)$$

Para aferir a classe de eficiência de determinado PDS basta comparar as perdas relativas do PDS (5) com o limite relativo das perdas para a classe IES em questão ($p_{L,IESx,rpm}$) (4), seguindo os critérios apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Sistema de classificação do PDS.

Nível IES	Comparação
IES0	$P_{L,IES0,1800} > p_{L,PDS}$
IES1	$P_{L,IES1,1800} \leq p_{L,PDS}$
IES2	$P_{L,IES2,1800} \leq p_{L,PDS}$
IES3	$P_{L,IES3,1800} \leq p_{L,PDS}$
IES4	$P_{L,IES4,1800} \leq p_{L,PDS}$
IES5	$P_{L,IES5,1800} \leq p_{L,PDS}$

2.3. Metodologia de Teste

Para assegurar a determinação consistente das classes IE e IES, a norma estabelece uma metodologia de ensaio baseada em 8 pontos de funcionamento de referência, apresentados na Figura 8. Estes pontos, definidos em função da velocidade de rotação e do binário relativo, constituem a base para a medição ou estimativa das perdas no CDM, motor e PDS. Os valores de perdas obtidos nestes pontos são utilizados no cálculo dos limites normalizados que permitem a atribuição da respetiva classe de eficiência.

Os oito pontos de referência são: $P_{L,PDS(100; 100)}$, $P_{L,PDS(50; 100)}$, $P_{L,PDS(0; 100)}$ ³, $P_{L,PDS(90; 50)}$, $P_{L,PDS(50; 50)}$, $P_{L,PDS(0; 50)}$ ³, $P_{L,PDS(50; 25)}$, $P_{L,PDS(0; 25)}$ ³.

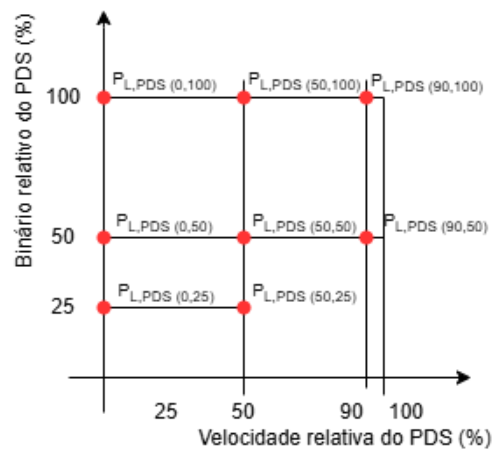


Figura 8: Pontos de referência para medição das perdas em PDS, CDM e RM. Extraída da norma IEC 61800-9-2.

Com o intuito de garantir a comparabilidade e reprodutibilidade das medições entre diferentes fabricantes e ensaios laboratoriais, a norma não adota o conceito tradicional de rendimento, entendido como o rácio entre a energia de entrada e a energia de saída. Em vez disso, considera as perdas relativas à potência nominal do PDS, e as perdas relativas à potência aparente de saída do CDM.

A norma também prevê situações em que seja necessário determinar as perdas em pontos intermédios. Para tal, são definidos dois métodos de interpolação:

- Interpolação linear bidimensional entre dois pontos de operação vizinhos;
- Cálculo das perdas do CDM de acordo com o modelo descrito no Anexo C do documento original.

³ Por razões físicas, esses pontos são alcançados apenas com uma tensão de saída diferente de zero, de modo a permitir a circulação de corrente através da resistência nos enrolamentos do motor.

No caso da interpolação linear, a norma estabelece que, na região de funcionamento em que a velocidade mecânica é inferior à velocidade nominal, o cálculo das perdas em qualquer um dos pontos intermédios deve ser efetuado com recurso às equações (6) e (7):

$$P_{L,(n,T)} = c_{L1} + c_{L2} * n + c_{L3} * n^2 + c_{L4} * n * T^2 + c_{L5} * n^2 * T^2 + c_{L6} * T + c_{L7} * T^2 \quad (6)$$

Onde:

$c_{L1} \dots c_{L7}$: são os coeficientes de interpolação linear que dependem das perdas no motor;

n : velocidade do motor para o ponto de funcionamento que se quer aferir as perdas;

T : Binário do motor para o ponto de funcionamento que se quer aferir as perdas.

Os coeficientes de interpolação $c_{L1} \dots c_{L7}$ podem ser determinados com recurso às perdas obtidas experimentalmente:

$$\begin{aligned} c_{L1} &= -\frac{25}{156} * P_{L1} + \frac{529}{780} * P_{L2} - \frac{12}{65} * P_{L3} + \frac{25}{39} * P_{L4} - \frac{103}{39} * P_{L5} - \frac{56}{195} * P_{L6} + \frac{192}{65} * P_{L7} \\ c_{L2} &= +\frac{25}{26} * P_{L1} - \frac{599}{390} * P_{L2} + \frac{112}{195} * P_{L3} - \frac{50}{13} * P_{L4} + \frac{50}{13} * P_{L5} + \frac{1792}{195} * P_{L6} - \frac{1792}{195} * P_{L7} \\ c_{L3} &= -\frac{50}{39} * P_{L1} + \frac{22}{13} * P_{L2} - \frac{16}{39} * P_{L3} + \frac{200}{39} * P_{L4} - \frac{200}{39} * P_{L5} - \frac{256}{39} * P_{L6} + \frac{256}{39} * P_{L7} \\ c_{L4} &= -\frac{50}{13} * P_{L1} + \frac{2542}{195} * P_{L2} - \frac{1792}{195} * P_{L3} + \frac{50}{13} * P_{L4} - \frac{50}{13} * P_{L5} - \frac{1792}{195} * P_{L6} + \frac{1792}{195} * P_{L7} \\ c_{L5} &= +\frac{200}{39} * P_{L1} - \frac{152}{13} * P_{L2} + \frac{256}{39} * P_{L3} - \frac{200}{39} * P_{L4} + \frac{200}{39} * P_{L5} + \frac{256}{39} * P_{L6} - \frac{256}{39} * P_{L7} \\ c_{L6} &= -2 * P_{L2} + 10 * P_{L5} - 8 * P_{L6} \\ c_{L7} &= +\frac{25}{39} * P_{L1} - \frac{181}{195} * P_{L2} + \frac{192}{65} * P_{L3} - \frac{25}{39} * P_{L4} - \frac{287}{39} * P_{L5} + \frac{1616}{195} * P_{L6} - \frac{192}{65} * P_{L7} \end{aligned} \quad (7)$$

Onde:

$P_{L1} \dots P_{L7}$ representam as perdas obtidas experimentalmente em sete pontos de funcionamento, identificados na tabela abaixo:

Tabela 4: Sete pontos de funcionamento normalizados para a interpolação das perdas

	n	T
P_{L1}	0.9	1
P_{L2}	0.5	1
P_{L3}	0.25	1
P_{L4}	0.9	0.5

P_{L5}	0.5	0.5
P_{L6}	0.5	0.25
P_{L7}	0.25	0.25

Com o intuito de se simplificar o processo de certificação, a avaliação da conformidade com as classes IE e IES, para CDM, motores e PDS devem ser feitas nos pontos $P_{L,CDM(90;100)}$, $P_{L,M(90;100)}$ e $P_{L,PDS(100;100)}$, respetivamente.

2.3.1. Obtenção das Perdas do CDM Através de Cálculos

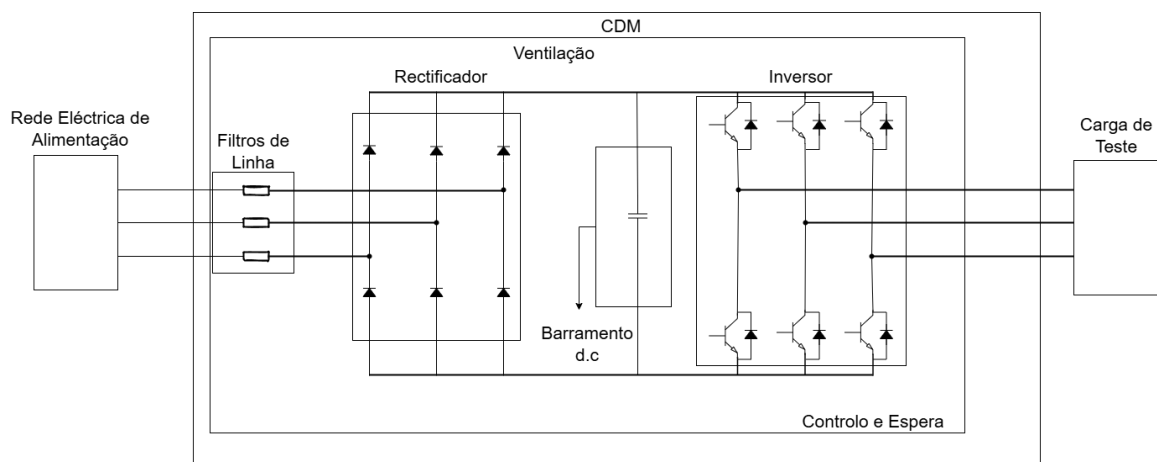


Figura 9: Ilustração do CDM genérico e da sua configuração para o ensaio em carga.

De acordo com a norma, para o cálculo das perdas num CDM, devem ser consideradas as perdas nos seguintes componentes:

- Perdas no inversor;
- Perdas no retificador;
- Perdas no barramento DC;
- Perdas nos condutores;
- Perdas de controlo e espera;
- Perdas por ventilação;
- Perdas no filtro de entrada.

A Figura 9 apresenta uma ilustração dos principais componentes do CDM, nos quais, de acordo com a norma IEC 61800-9-2, se verificam as principais contribuições para as perdas totais.

Todas as outras perdas em componentes adicionais do CDM podem ser negligenciadas no modelo matemático proposto pela norma, pois são significativamente inferiores às listadas acima.

Para determinar de forma correta as perdas no CDM, devem ser utilizados os valores dos parâmetros correspondentes ao equipamento em teste, considerando exclusivamente os

elementos integrados nos respectivos módulos. Para mais detalhes, ver o Anexo C da norma IEC 61800-9-2:2023.

As perdas em cada componente devem ser expressas em relação à potência aparente de saída nominal do CDM, que é calculada com base na tensão de fase nominal e a corrente de saída nominal do CDM.

A soma das perdas absolutas nos diferentes componentes do CDM resultará nas perdas totais absolutas do módulo (8):

$$P_{L,CDM} = P_{L,inv} + P_{L,rect} + P_{L,B.d.c} + P_{L,condu} + P_{L,cont} + P_{L,vent} + P_{L,bob} \quad (8)$$

Onde:

$P_{L,CDM}$: perdas de potência totais no CDM;

$P_{L,inv}$: perdas no inversor;

$P_{L,rect}$: perdas no retificador;

$P_{L,B.d.c}$: perdas no barramento DC;

$P_{L,condu}$: perdas nos condutores;

$P_{L,cont}$: perdas de controlo e em espera;

$P_{L,vent}$: perdas por ventilação;

$P_{L,bob}$: perdas no filtro de entrada.

E a perda relativa total do CDM (8), será:

$$p_{L,CDM} = \frac{P_{L,CDM}}{S_{r,CDM}} \quad (9)$$

Nesta secção não será apresentado em detalhe o modelo matemático para o cálculo das perdas no CDM, dado que o capítulo 4 contempla parcialmente este assunto.

2.3.2. Obtenção das Perdas do CDM Através de Medições de Potência na Entrada e Saída

Este método é baseado nas medições da potência à entrada e saída do CDM, recorrendo à montagem da Figura 10.

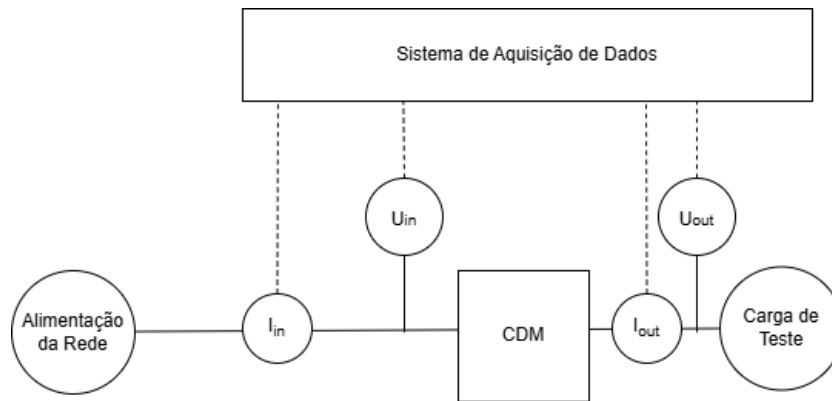


Figura 10: Montagem para determinar as perdas do CDM através de medições entrada-saída.

As perdas em cada ponto devem ser calculadas através (10):

$$P_{L,CDM} = P_{in,CDM} - P_{out,CDM} \quad (10)$$

As potências na entrada e na saída - $P_{in,CDM}$ e $P_{out,CDM}$, respetivamente - são calculadas com base nas tensões e correntes elétricas U_{in} , I_{in} , U_{out} e I_{out} , respetivamente.

Os dados devem ser adquiridos diretamente nos terminais do CDM. No caso de um sistema trifásico, as ligações à instrumentação devem contemplar três condutores, dado que, geralmente, não existe ligação ao neutro, quer nos terminais de entrada, quer nos terminais de saída do CDM.

A estabilidade térmica do CDM deverá ser determinada por intermédio da medição de temperatura. Para tal, pode ser utilizado qualquer dispositivo de medição de temperatura padronizado, como termopares, resistências RTD ou dispositivos equivalentes. Esta medição deverá ser realizada de acordo com um dos seguintes métodos:

- Afixação de sensor de temperatura na estrutura dissipadora de calor do CDM;
- Afixação de sensor de temperatura no fluxo de ar à saída do CDM,
- Indicação da temperatura medida pelo próprio CDM em ensaio.

A norma especifica o procedimento a adotar na determinação das perdas.

Procedimento:

1. **Medição das perdas em modo de espera:** O CDM deverá ser colocado em funcionamento sem comando de acionamento, fornecendo apenas a potência necessária para manter em operação os componentes eletrónicos, o sistema de controlo e, se aplicável, a ventoinha de arrefecimento. Apenas após garantir que esses elementos estão a operar corretamente, os dados deverão ser extraídos.
2. **Medição das perdas em estabilidade térmica:** Inicialmente, o CDM deverá funcionar a 90 % da frequência nominal e 100 % da corrente nominal, até atingir a estabilidade térmica. Considera-se a estabilidade térmica atingida quanto a variação de temperatura for inferior a 1 K em 30 minutos. Uma vez atingida a estabilidade

térmica, devem ser extraídos os dados de tensão, corrente, potência e fator de potência nos terminais de entrada e saída do CDM, realizando-se simultaneamente uma média das flutuações. Os dados obtidos neste ponto deverão ser usados para aferir a classe IE do CDM.

3. **Medição das perdas nos 8 pontos de funcionamento:** Os pontos seguintes devem medidos o mais rapidamente possível, de modo a garantir que a temperatura do sistema não se altere significativamente. Em cada ponto, devem ser extraídos os mesmos dados referidos no ponto anterior, e feita igualmente a média das flutuações.

São também dadas recomendações relativamente à ordem para medição dos pontos. A regra consiste em manter o binário constante e reduzir a velocidade, antes de avançar para o ponto seguinte com menor binário. Assim, a ordem sugerida começa no ponto de maior binário e velocidade, como apresentado na Figura 11.

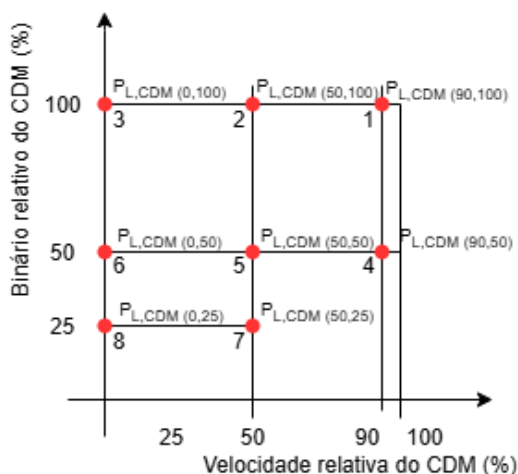


Figura 11: Ordem de medição de pontos para CDM.

A norma também admite que possam existir limitações dos equipamentos de medição comercialmente disponíveis, especialmente para medições de grandezas elétricas em baixas frequências. Nestes casos, é permitido medir as perdas no CDM a velocidade entre 0 % e 25 % da nominal, em substituição da velocidade nula.

2.3.3. Obtenção das Perdas no Motor

Na norma, esta secção foi claramente desenvolvida tendo como referência motores assíncronos trifásicos alimentados por CDM. Este aspeto revela-se particularmente relevante no contexto da dissertação, visto que o motor em análise é um PMA-SynRM, e muitos dos procedimentos normativos não são totalmente explícitos ou diretamente aplicáveis a esta tecnologia.

A norma estabelece que, para determinar as perdas, rendimento e classe de eficiência do PDS, é obrigatório conhecer as perdas no motor. Tal informação poderá ser obtida pelo fornecimento direto pelo fabricante.

Importa salientar que, no caso de motores mais desenvolvidos ou protótipos, como o PMA-SynRM em análise, a fiabilidade dos valores fornecidos pelo fabricante ou constantes em tabelas de referência pode ser questionável, especialmente quando se pretende uma avaliação precisa e comparativa do rendimento. Assim, torna-se essencial a realização de ensaios laboratoriais, como o conduzido nesta dissertação, para garantir representatividade e a validade da metodologia de avaliação da classe IES de sistemas compostos por motores síncronos mais modernos.

No caso da dissertação, os dados foram obtidos por ensaios laboratoriais, que seria o equivalente a obter pelo fabricante, tendo como base a metodologia descrita para a obtenção dos 8 pontos de funcionamento.

2.3.3.1. Perdas Adicionais Devido a Distorções Harmónicas

A norma estabelece que, no caso de motores de indução trifásicos operados por um CDM, ocorrem perdas adicionais associadas às distorções harmónicas P_{LHL} presentes na tensão de alimentação. Nestas condições, a norma recomenda que o motor seja re-testado com um CDM para determinar as suas perdas.

Como alternativa, a norma estabelece que as perdas induzidas por distorção harmónica poderão ser determinadas utilizando uma razão fixa r_{HL} , que serve como uma estimativa entre a razão das perdas no motor alimentado por uma fonte de tensão sinusoidal e uma fonte de tensão com distorções harmónicas (11).

$$P_{LHL} = (1 + r_{HL}) * P_{LTsin} \quad (11)$$

Onde:

P_{LTsin} : são as perdas totais no motor, quando alimentado por uma fonte de tensão puramente sinusoidal em qualquer ponto de operação;

P_{LHL} : são as perdas totais no motor, quando alimentado por um CDM em qualquer ponto de operação.

As perdas causadas por distorção harmónica relativas à alimentação com conversor de frequência variável devem ser consideradas constantes e independentes da carga e velocidade, mas dependentes da frequência de comutação.

Na ausência de medições diretas de r_{HL} realizadas de acordo com os procedimentos da norma IEC 60034-30-2, recomenda-se a utilização das seguintes estimativas:

- $r_{HL} = 0,15$ (ou 15 %) para motores com potência nominal até 90 kW, alimentados por CDMs com frequência de comutação de 4 kHz;

- $r_{HL} = 0,25$ (ou 25 %) para motores com potência nominal superior a 90 kW, alimentados por CDMs com frequência de comutação de 2 kHz.

2.3.4. Obtenção das Perdas no PDS

As perdas de potência do PDS em pontos de funcionamento específicos de velocidade (n) e binário (T) correspondem à soma das perdas de potência nos subcomponentes do PDS, de acordo com (12).

$$P_{L,PDS(n;T)} = P_{L,CDM(n;T)} + P_{L,Acc(n;T)} + P_{L,M(n;T)} \quad (12)$$

Onde:

$P_{L,CDM}$: perdas no CDM, obtidas de acordo com os métodos acima apresentados;

$P_{L,Mot}$: perdas no motor, obtidas de uma das formas acima apresentadas.

$P_{L,Acc(n;T)}$: perdas no PDS causadas por equipamentos acessórios.

O cálculo das perdas totais do PDS é realizado com base em (12), com exceção do ponto $P_{L,PDS(100;100)}$. Neste caso específico, deve-se fazer recorrência à (13), considerando os pontos $P_{L,CDM(90;100)}$ e $P_{L,Mot(90;100)}$. Assume-se que as perdas no CDM para o ponto de operação $P_{L,CDM(100;100)}$ são equivalentes às observadas em $P_{L,CDM(90;100)}$. Adicionalmente, assume-se que as perdas do motor aumentam mediante a aplicação de um fator de correção $k_{VD} = 1,11$, o qual reflete o impacto adicional associado à distorção harmónica.

Assim, de modo a evitar a ocorrência de sobremodulação, a qual se verificaria caso fosse aplicada uma frequência de saída de 100% da frequência nominal do CDM, o cálculo das perdas no PDS para o ponto de funcionamento $P_{L,PDS(100;100)}$ deve recorrer a uma equação modificada, especificamente ajustada para a determinação das perdas absolutas do sistema:

$$P_{L,PDS(100,100)} = P_{L,CDM(90,100)} + k_{VD} * P_{L,M(100,100)} \quad (13)$$

Onde:

k_{VD} : fator de correção devido a distorção harmónica.

A informação desta secção revela-se particularmente útil em contextos em que se recorre a uma abordagem analítica para a estimativa das perdas no PDS, pressupondo o cálculo matemático das perdas no CDM e a disponibilidade completa dos dados de funcionamento do motor.

2.3.5. Obtenção das Perdas do PDS Através de Medições de Potência na Entrada e Saída

Este método é baseado na medição da potência elétrica à entrada PDS e da potência mecânica à saída do PDS. A montagem de medição é apresentada na Figura 12. As perdas no PDS são calculadas com base em (14).

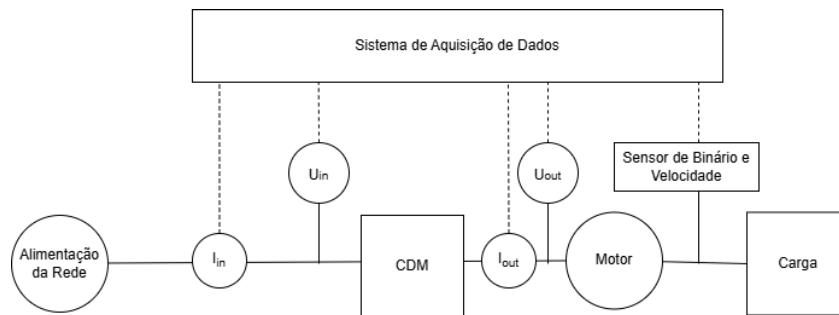


Figura 12: Montagem para medição das perdas do PDS. Adaptada de [26]

$$P_{L,PDS} = P_{in,PDS} - P_{out,PDS} \quad (14)$$

A potência de entrada $P_{in,PDS}$ é determinada com base na tensão de entrada e na corrente de entrada, medidas pelo analisador de potência nos terminais de entrada do CDM. A potência de saída $P_{out,PDS}$ é determinada com base na medição de binário e velocidade do motor, obtida por um sensor de binário instalado no veio do motor. Os sinais de corrente e tensão medidos pelo analisador de potência devem ser extraídos diretamente dos terminais do CDM.

A estabilidade térmica do PDS deverá ser determinada através da medição de temperatura no motor. Para tal, pode ser utilizado qualquer dispositivo de medição de temperatura padronizado, como termopares, resistências RTD ou dispositivos equivalentes. Tal feito deverá ser executado de acordo com um dos seguintes métodos:

- Leitura direta na superfície da carcaça do motor;
- Inserção do sensor dentro da própria carcaça do estator, onde pode ser cuidadosamente posicionado a partir da caixa de terminais.

Procedimento: O procedimento utilizado para aferir as perdas no PDS pelo método de medição à entrada e saída é o mesmo utilizado no caso do VFD, excluindo-se o primeiro passo - medição das perdas em modo de espera.

Após a exposição da base técnica da norma IEC 61800-9-2:2023, o capítulo seguinte incidirá sobre o motor em análise, contemplando quer as suas características construtivas, quer as suas principais aplicações em contexto industrial.

Capítulo 3

3. Motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes (PMA-SynRM)

Antes de avaliar a aplicabilidade da norma IEC 61800-9-2:2023 em acionamentos elétricos de velocidade variável, é essencial clarificar a que tipo de sistemas esta dissertação se refere. Para tal, torna-se necessário analisar as suas características construtivas, o princípio de funcionamento, a aplicabilidade industrial, bem com as vantagens relativamente a tecnologias concorrentes, nomeadamente os motores de ímanes permanentes (IPM ou SPM), motores síncronos de relutância (SynRM), motores de relutância comutada (SRM) e motores de indução trifásicos (MIT).

O motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes (PMA-SynRM), é, do ponto de vista construtivo, uma máquina elétrica rotativa híbrida que combina características de um motor síncrono de relutância com a incorporação de ímanes permanentes embutidos nas saliências do rotor. Estes motores requerem um acionamento eletrónico para possibilitar o seu funcionamento [12].

A principal vantagem da inclusão de ímanes permanentes num motor síncrono de relutância reside no aumento do fator de potência, que possibilita uma redução da amplitude da corrente elétrica nos enrolamentos estatóricos do motor e que, por sua vez, conduz a menores perdas óhmicas. Por outro lado, o binário de relutância contribui para a redução da quantidade de ímanes permanentes necessários, minimizando o uso de materiais mais dispendiosos, o que torna o motor economicamente mais competitivo quando comparado com os motores baseados exclusivamente em ímanes permanentes baseados em terras raras. Importa ainda referir que a incorporação de ímanes num motor síncrono de relutância permite aumentar o binário útil para a mesma amplitude de corrente elétrica, embora a força contraelectromotriz gerada pelos ímanes implique a necessidade de aumentar as tensões de fase para manter a corrente elétrica [31], [32], [33].

Esta tecnologia apresenta semelhanças com os motores IPM (do inglês *Interior Permanent Magnet*). Contudo, no caso do PMA-SynRM, tanto a quantidade de ímanes permanentes como o fluxo concatenado gerado pelos mesmos são inferiores aos dos IPM convencionais, o que justifica a designação diferenciada [33].

É igualmente relevante destacar que a utilização de ímanes permanentes em rotores de máquinas elétricas rotativas é um conceito que remonta ao período anterior ao século XX. No entanto, os primeiros motores com essa tecnologia só começaram a ser comercializados na década de 1920, em virtude da necessidade de desenvolvimento de materiais magnéticos

com densidade de fluxo remanescente e coercividade tecnologicamente viáveis. Já os motores síncronos de relutância passaram a suscitar interesse comercial para aplicações de velocidade variável apenas a partir de 1960, com o surgimento dos inversores de estado sólido (*solid-state inverters*).

Entre 2010 e 2011, registou-se uma forte valorização do neodímio (metal de terra rara), com os preços a multiplicarem-se por vinte relativamente aos anos anteriores. Esta escalada provocou a saída de vários fabricantes do setor de máquinas elétricas rotativas. Os fabricantes que conseguiram resistir à crise optaram por estratégias de mitigação da exposição à volatilidade do mercado, nomeadamente através de investimentos avultados em duas frentes principais: 1) a exploração de diferentes configurações de motores síncronos, na procura de alternativas viáveis aos motores de ímanes permanentes baseados em terras raras; e 2) a investigação de soluções de motores sem escovas, com especial destaque para os motores de relutância comutada e os motores de indução de elevado rendimento [34]. Destas frentes de investigação, emergiram diversos contributos científicos que conduziram a indústria a considerar os PMA-SynRM como uma alternativa tecnológica e financeiramente viável. Tal reconhecimento deve-se, em parte, ao avanço na fabricação de ímanes baseados em materiais menos dispendiosos, como a ferrite, que permitiu uma redução significativa dos custos de produção. Paralelamente, o desenvolvimento de inversores de frequência avançados proporcionou uma melhoria substancial no desempenho operacional destes motores.

Ao contrário dos motores de indução, que utilizam o princípio da indução eletromagnética para gerar binário, os PMA-SynRM recorrem a dois princípios físicos distintos. O primeiro é o princípio da relutância magnética, que se traduz na tendência do fluxo magnético em seguir o caminho de menor relutância. O segundo princípio prende-se com a interação direta entre campos magnéticos. O campo magnético dos ímanes permanentes interage com o campo magnético gerado pelo estator, o que contribui para a produção de binário. Esta interação pode ser descrita por (15) [35], [36]:

$$T_{em} = \frac{3P}{4} \times [\lambda_{PM}i_q - (L_q - L_d) \times i_d i_q] \quad (15)$$

Onde:

T_{em} : binário eletromagnético;

λ_{PM} : fluxo magnético devido aos ímanes permanentes do rotor;

i_q : corrente no eixo q;

i_d : corrente no eixo d;

L_q : indutância no eixo q;

L_d : indutância no eixo d;

P : número de pólos.

3.1. Características Construtivas

Do ponto de vista construtivo, a principal diferença entre um motor trifásico PMA-SynRM e os demais motores síncronos, ou mesmo os motores de indução trifásicos, reside essencialmente na estrutura do rotor.

No que respeita ao estator, a construção é bastante similar à dos motores trifásicos. O estator é composto por um núcleo de ferro laminado, geralmente constituído por ligas metálicas de elevada qualidade, onde os enrolamentos trifásicos são distribuídos com um desfasamento de 120° elétricos e embutidos em ranhuras na superfície interna da carcaça do estator [37], conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13: Estator genérico.

Tal como nos motores de indução, o estator está sujeito aos mecanismos de perdas amplamente conhecidos, nomeadamente:

- Perdas no cobre, resultante da resistência elétrica dos enrolamentos;
- Perdas no núcleo (perdas no ferro), que incluem perdas por histerese magnética e perdas por correntes parasitas (também designadas por correntes induzidas).

No caso do rotor, este é constituído por chapas empilhadas de ligas metálicas de elevada qualidade, podendo ser laminadas axialmente ou transversalmente. Os ímanes são embutidos em ranhuras do rotor, numa configuração cuidadosamente projetada para maximizar o binário magnético do motor, sem comprometer as suas demais propriedades eletromecânicas. Esta disposição permite alcançar uma maior densidade de potência, conferindo ao motor uma relação peso/volume superior à dos motores de indução trifásicos. No caso específico desta dissertação, o rotor do PMA-SynRM é laminado transversalmente, como se pode observar na Figura 14. Os ímanes utilizados são baseados em ferrite.



Figura 14: Rotor e estator de um PMA-SynRM.

Uma vez que o rotor não dispõe de enrolamentos, não se verifica circulação de corrente elétrica, o que elimina a ocorrência de perdas por efeito de Joule nesta parte do motor. No entanto, importa salientar que este tipo de rotor também está sujeito a perdas no ferro, perdas por atrito e ventilação.

A Figura 15 apresenta um diagrama que apresenta os principais mecanismos de perdas em motores elétricos.

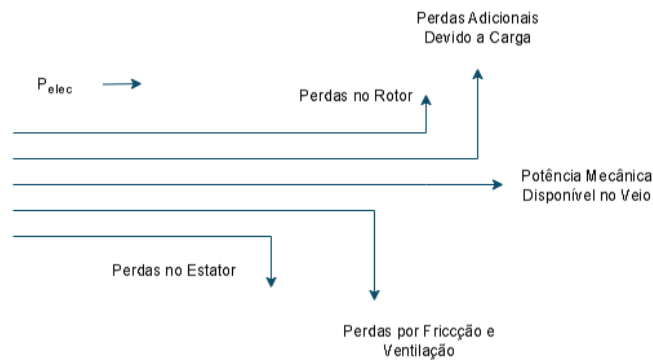


Figura 15: Diagrama de perdas em motores elétricos. Adaptado de [37].

3.2. Princípio de Funcionamento de um PMA-SynRM

Devido ao facto de o PMA-SynRM ser uma máquina elétrica híbrida, o seu funcionamento assenta na produção de binário tanto por relutância magnética, como pela contribuição dos ímanes embutidos. Ou seja, o rotor de um SynRM ou de um PMA-SynRM é projetado de forma a conter barreiras de fluxo que asseguram que a indutância no eixo q (L_q) seja superior à indutância no eixo d (L_d), ou seja $L_q > L_d$. Consequentemente, o fluxo magnético tende a seguir o caminho de menor relutância, fazendo com que o rotor se alinhe naturalmente com o eixo de menor relutância, gerando o binário de relutância.

Estudos como [38] demonstraram a relevância da diferença ($L_q - L_d$) na produção eficaz de binário. Por sua vez, os ímanes permanentes embutidos são responsáveis por gerar um binário adicional, de natureza puramente magnética, resultante da interação entre o campo girante do estator e o campo magnético dos próprios ímanes. Esta combinação permite que,

para a mesma amplitude de corrente, esteja disponível um binário superior. No entanto, devido à força contraelectromotriz gerada pelos ímanes, é necessário aplicar uma tensão adicional para manter a amplitude de corrente desejada, de modo a compensar este efeito.

3.3. Aplicabilidade Prática

Os motores P_{Ma}-SynRM apresentam ampla gama de aplicações práticas, sobretudo em contextos que exigem velocidade variável com um controlo preciso, elevado binário a baixas rotações ou rendimento elevado mesmo em condições de carga parcial.

A adaptabilidade destes motores a diferentes aplicações resulta da possibilidade de ajuste de várias características construtivas, como a disposição dos ímanes (internamente ou à superfície), o tipo de laminação do rotor (axial ou transversal), a geometria dos ímanes, número de polos, a altura dos dentes do estator, o diâmetro externo do estator e o tipo de material magnético utilizado.

Por exemplo, para aplicações em veículos elétricos, privilegiam-se propriedades como elevados binários, elevada densidade de potência, ampla gama de operação e soluções de custo reduzido em produções a larga escala. Estas características construtivas podem assim, ser otimizadas de acordo com o objetivo da aplicação [39], [40].

Atualmente, a grande maioria dos P_{Ma}-SynRM encontra-se implementada em sistemas de bombagem, ventilação, compressores ou esteiras transportadoras. Mais recentemente, tem-se verificado um crescente interesse da indústria automóvel na sua aplicação em veículos elétricos, graças às suas características construtivas e desempenho [41].

A Tabela 5 apresenta uma análise comparativa entre o P_{Ma}-SynRM, o IPM, o SynRM e o MIT.

Tabela 5: Análise comparativa de diferentes tecnologias de motores elétricos.

	P_{Ma}-SynRM (IE₅)	SynRM (IE₄)	IPM (IE₅)	MIT (IE₃)
Benefícios	Rendimento elevado	Rendimento elevado	Melhor rendimento	Tecnologia provada no tempo
	Velocidade de sincronismo	Velocidade de sincronismo	Alta densidade de binário	Arranque directo
	Ímanes baseados em ferrite e baixas temperaturas em rolamentos e enrolamentos	Baixas temperaturas em rolamentos e enrolamentos	Elevado fator de potência	De fácil utilização e manutenção
	Correntes nominais reduzidas, o que requer conversores menos potentes	Elevada densidade de potência	Elevado rendimento à carga parcial	

	Elevada densidade de potência e elevado fator de potência	Não utiliza ímanes ou enrolamentos no rotor, portanto perdas são desprezáveis	Baixo nível de ruído	
	Rendimento mantém-se relativamente elevado, mesmo em velocidades reduzidas ou a cargas parciais			
Limitações	Funcionamento correto requer um conversor	Funcionamento correto requer um conversor	Ímanes baseados em terras raras, de custo elevado, acesso limitado	Precisão da velocidade comprometida caso não se utilizem sensores
		Correntes elétricas elevadas	Serviço severo (elevado fluxo magnético)	Perdas por deslizamento no rotor, mais aquecimento
		Baixo fator de potência	Elevada força contra-eletromotriz	Rendimento limitado em baixas velocidades, o rendimento do acionamento reduz de forma drástica com a redução da carga

Capítulo 4

4. Modelo Matemático para o Cálculo das Perdas no CDM e Segregação das Perdas no Motor

A correta segregação das perdas nas tecnologias envolvidas num sistema de acionamento elétrico, seja de velocidade variável ou não, é um passo de extrema importância na sua classificação e avaliação. Não basta apenas conhecer o nível de perdas total, é fundamental compreender em quais componentes e como essas perdas ocorrem. Esta noção permite estabelecer metodologias adequadas de aquisição de dados e, eventualmente, propor melhorias nas tecnologias em questão. Este capítulo aborda precisamente esses aspetos: modelação matemática das perdas no VFD e segregação das perdas no motor.

4.1. Modelo Matemático Para o Cálculo das Perdas no CDM

A norma IEC 61800-9-2:2023 estabelece um modelo matemático para o cálculo das perdas, tendo em conta os componentes responsáveis pelas perdas mais significativas no CDM. A Figura 16 ajuda a ilustrar as equações que permitem determinar as perdas no CDM.

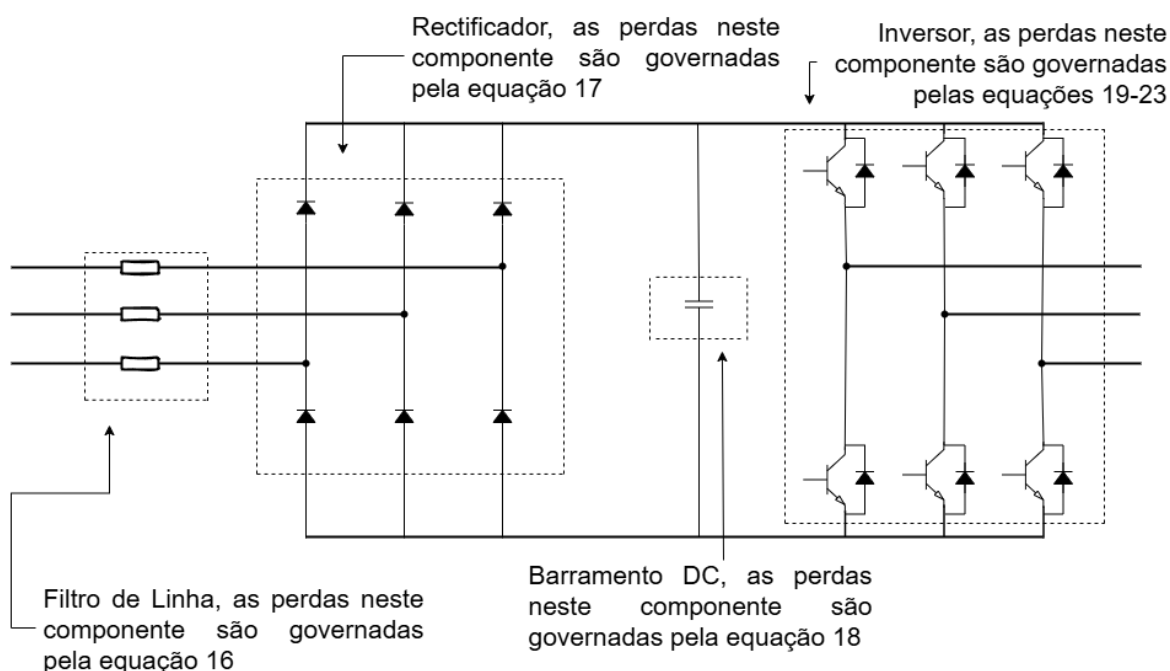


Figura 16: Ilustração gráfica das perdas no CDM.

Antes de analisar as perdas associadas aos diversos componentes do CDM, é relevante destacar a existência de um tipo de perda intrínseca ao funcionamento do próprio

conversor. Este fenómeno, denominado “perdas de controlo e espera”, só pode ser quantificado experimentalmente, uma vez que ocorre quando o sistema está ligado, mas o motor não está energizado.

4.1.1. Perdas no Filtro de Linha

Os filtros de linha são geralmente integrados no circuito de alimentação do CDM com o intuito de mitigar os harmónicos, entretanto, esta integração introduz perdas adicionais, associadas essencialmente à parte resistiva da bobina do filtro. Estas perdas podem ser estimadas em função da impedância equivalente do filtro e das condições de operação do CDM.

De acordo com a norma IEC 61800-9-2:2023, as perdas no filtro de linha podem ser calculadas através de (16)

$$P_{L,choke} = K1_{choke} * k2_{choke} * \left(\frac{m * \cos\phi * I_{out}}{\cos\phi_r * I_{r,out}} \right)^2 * U_{mL1} \quad (16)$$

Onde:

$K1_{choke}$ é a impedância da bobina, relativa à impedância nominal do CDM;

$k2_{choke}$ é a queda de tensão relativa na parte resistiva do filtro;

m é o índice de modulação;

$\cos \phi$ é o fator de potência à saída do CDM, exceto no binário nominal;

$\cos \phi_r$ é o fator de potência à saída do CDM, no binário nominal;

U_{mL1} é a tensão de fase;

$I_{r,out}$ é a corrente de saída nominal do CDM (valor eficaz, RMS);

I_{out} é a corrente de saída do CDM (valor eficaz, RMS);

λ é o fator de potência à entrada do CDM.

4.1.2. Perdas no Retificador

As perdas neste componente do CDM resultam da combinação de dois contributos principais, a perda associada à tensão de limiar ($U_{D,th}$) e a perda relacionada com a queda de tensão quando o diodo está em condução ($U_{D,r}$), avaliadas à corrente nominal de saída do CDM. Estas perdas diretamente ligadas ao valor da corrente de saída do conversor, ao fator de potência à entrada e saída do conversor, e ao índice de modulação.

Para quantificar a potência dissipada no diodo retificador deve-se recorrer a (17), para a sua aplicação prática é necessário conhecer todos os termos da expressão:

$$P_{L,rect} = 6 * \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} * m * \cos\phi * I_{out} * U_{D,th,rec} + \frac{U_{D,th,rec} - U_{D,th,rec}}{\cos\phi_r * I_{r,out}} * \frac{(m * \cos\phi * I_{out})^2}{2} \right) \quad (17)$$

Onde:

$U_{D,th}$ é a tensão de limiar do díodo retificador;

$U_{D,r}$ é a tensão de condução do díodo retificador à corrente nominal de saída do CDM.

4.1.3. Perdas no Barramento DC

As perdas no barramento DC de um conversor de frequência variável são causadas principalmente por resistências em paralelo com os condensadores, que são necessárias para garantir o compartilhamento adequado de tensão entre os condensadores do barramento DC. A resistência equivalente gera uma parte das perdas de energia no barramento DC, apresentada no primeiro termo de (25), como cada condensador do barramento DC precisa de uma certa quantidade de resistências em paralelo para a simetrização, essa parte das perdas no barramento DC é proporcional à corrente de saída nominal do CDM. Além disso, é proporcional ao quadrado da tensão real do barramento DC.

O segundo termo de (18) é a representação da contribuição das perdas no barramento DC devido as resistências em série dentro dos condensadores. As perdas são geralmente seis vezes a frequência fundamental da rede elétrica e são proporcionais ao quadrado da corrente de entrada do retificador.

$$P_{L,dc_{link}} = K1_{DC_{link}} * I_{r,out} * U_{DC}^2 * k2_{DC_{link}} * \frac{(\frac{\sqrt{3}}{1,35} * \frac{m * \cos\phi * I_{out}}{1 + 50 * K1_{choke}})^2}{I_{r,out}} \quad (18)$$

$$K1_{DC_{link}} = \frac{1}{R_{par} * I_{r,out}} \text{ e } K1_{DC_{link}} = R_s * I_{r,out}$$

Onde:

$K1_{DC_{link}}$ é o parâmetro de perdas no barramento DC independente da carga;

$K2_{DC_{link}}$ é o parâmetro de perdas no barramento DC dependente da carga;

R_{par} é a resistência equivalente em paralelo com os condensadores do barramento DC;

R_s é resistência equivalente em série com os condensadores do barramento DC.

4.1.4. Perdas no Inversor

As perdas no inversor à saída do CDM são causadas por diferentes fenômenos relacionados à condução e comutação dos transístores e díodos, em (19) podemos ver que a perda total no inversor é a soma da contribuição destes componentes, sendo o fator de multiplicação por seis reflete os seis transístores e díodos de um inversor de um CDM trifásico.

$$P_{L,inverter} = 6 * (P_{L,on,T} + P_{L,on,D} + P_{L,SW,T} + P_{L,SW,D}) \quad (19)$$

Onde:

$P_{L,on,T}$: perdas devido à condução do transístor;

$P_{L,on,D}$: perdas devido à condução do díodo;

$P_{L,SW,T}$: perdas devido à comutação do transístor;

$P_{L,SW,D}$: perdas devido à comutação do díodo.

A seguir, é apresenta de forma sectorizada as equações que governam cada as perdas em cada um dos componentes do inversor, sendo que (20) e (21) são as expressões matemáticas que expressam as perdas por condução no transístor e díodo, respetivamente e (22) e (23) as perdas por comutação, em ambos os componentes.

Perdas por Condução do Transístor

São as perdas que ocorrem em cada transístor do CDM, quando o mesmo está à condução.

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} * I_{out} * U_{T,th} * \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 * m * \cos\phi}{8} \right) + \frac{U_{T,r} - U_{T,th}}{I_{r,out}} * 2 * I_{out}^2 * \left(\frac{1}{8} + \frac{1,22 * m * \cos\phi}{3\pi} \right) \quad (20)$$

Onde:

$U_{T,th}$ é a tensão de limiar do transístor;

$U_{T,r}$ é a tensão de condução do transístor à corrente de saída nominal do CDM;

Perdas por condução no díodo roda livre

Estas as perdas ocorridas no díodo roda livre quando o mesmo está à condução.

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} * I_{out} U_{D,th} * \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 * m * \cos\phi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} * 2 * I_{out}^2 * \left(\frac{1}{8} + \frac{1,22 * m * \cos\phi}{3\pi} \right) \quad (21)$$

Onde:

$U_{D,th}$ é a tensão de limiar do díodo;

$U_{D,r}$ é a tensão de condução do díodo à corrente nominal de saída do CDM.

Perdas por comutação no transístor

As perdas por comutação no transístor são diretamente proporcionais a frequência de comutação.

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} * U_{DC} * \sqrt{2} + (I_{out} + I_{motor_cable}) * f_{sw} \quad (22)$$

Onde:

E_T é a perda de energia por comutação do transístor, expressa em Volt por Ampère;

U_{DC} é a tensão no barramento DC do CDM;

I_{motor_cable} é a corrente nos cabos de alimentação do motor, relevante para o aumento das perdas por comutação;

f_{sw} é a frequência de comutação do CDM.

Perdas por comutação no díodo roda livre

As perdas por comutação no díodo são diretamente proporcionais a frequência de comutação.

$$P_{L,SW,D} = \frac{E_D}{\pi} * U_{DC} * \sqrt{2} + (I_{out} + I_{motor_cable}) * f_{sw} \quad (23)$$

Onde: E_D : é a perda de energia por comutação no díodo, expressa em Volt por Ampère.

4.1.5. Perdas nos Condutores

São as perdas geradas pela resistência óhmica dos cabos.

$$P_{L,cabos} = \frac{U_{cabos}}{I_{r,out}} * I_{out}^2 \quad (24)$$

Onde:

U_{cabos} é a queda de tensão nos elementos óhmicos do condutor, observada à corrente nominal do CDM.

4.1.6. Perdas por Ventilação

O sistema de ventilação é usado para garantir que o calor gerado por todas as perdas no CDM sejam transportadas para o ambiente, para tal usa-se um ventilador, entretanto, esta situação acarreta consigo perdas. Segundo a norma IEC 61800-9-2:2023, tais perdas são definidas por um parâmetro de ventilação $k_{L,cool} = 0,2$, ou seja, são 20 % da soma de todas as outras perdas ocorridas no CDM, quando este opera no seu ponto de perdas máxima. Como apresentado em (25):

$$P_{L,cool} = k_{L,cool} * (P_{L,inv(90,100)} + P_{L,rect(90,100)} + P_{L,condu(90,100)} + P_{L,B_d.c.(90,100)} + P_{L,bob(90,100)} + P_{L,cont}) \quad (25)$$

Onde: $k_{L,cool}$ é o parâmetro adimensional de ventilação.

Logo, as perdas totais no CDM será a soma de todas essas perdas, nomeadamente:

$$P_{L,CDM} = P_{L,inv} + P_{L,rect} + P_{L,B_d.c} + P_{L,condu} + P_{L,cont} + P_{L,vent} + P_{L,bob} \quad (26)$$

Uma vez apresentado o modelo matemático utilizado para a estimativa das perdas no CDM, a secção seguinte apresenta o modelo matemático aplicado à segregação das perdas no motor.

4.2. Modelo Matemático para a Segregação das Perdas no Motor

Do ponto de vista do motor, é necessário obter alguns dados, quer junto do fabricante, quer através de ensaios laboratoriais, antes de se avançar para o modelo de discretização das suas perdas. A metodologia utilizada para segregar as perdas no motor em estudo na presente dissertação baseia-se em recomendações da norma IEC 60034-2-1 [42] e no método apresentado em [43].

Ensaio em vazio

Este ensaio consiste em aplicar tensões trifásicas equilibradas aos enrolamentos do estator, a diferentes frequências, com o rotor desacoplado de qualquer carga mecânica. O principal objetivo do ensaio é obter informações sobre a corrente de excitação e, a partir dela, estimar as perdas no núcleo (ferro) e as perdas por ventilação e fricção. Uma vez que separar essas duas componentes requer alguma complexidade tecnológica, a literatura agrupa-as sob a designação de perdas constantes (27) – (28). Nestes ensaios, toda a potência elétrica fornecida é utilizada para estabelecer o campo magnético e compensar essas perdas. O seu cálculo é feito da seguinte forma:

$$P_{L,cte} = P_{L,FW} + P_{L,FE} \quad (27)$$

$$P_{L,cte} = P_0 - 1.5 * R_0 * I_0^2 \quad (28)$$

Onde:

$P_{L,cte}$: perdas constantes no motor;

$P_{L,FW}$: perdas por ventilação e fricção;

$P_{L,FE}$: perdas no ferro;

P_0 : potência em vazio;

I_0 : corrente de excitação do motor;

R_0 : resistência por fase do motor.

Ensaio à carga nominal

Como o nome indica, este ensaio é realizado com o motor a funcionar sob o binário nominal aplicado ao veio. O seu objetivo é obter informações relativas às perdas no estator e no rotor do motor, calculadas da seguinte forma:

$$P_{L,S} = 1.5 * R_{imha} * I_L^2 \quad (29)$$

$$P_{L,R} = (P_{in} - P_{L,S} - P_{L,FE}) * S \quad (30)$$

Onde:

$P_{L,S}$: perdas no estator;

I_L : corrente absorvida pelo motor à carga;

$P_{L,R}$: perdas no rotor;

S : deslizamento (para o PMA-SynRM, $S = 0$, logo $P_{L,R} = 0$);

P_{in} : potência absorvida pelo motor.

Ensaio de curva de binário

Este ensaio consiste em submeter o motor a diferentes pontos de operação, de modo a estimar as perdas adicionais de carga. Estas perdas estão associadas ao nível de carga aplicado, e são, do ponto de vista de engenharia eletrotécnica, difíceis de determinar com precisão. A norma IEC 60034-2-1 propõe uma metodologia baseada em regressão linear, que permite separar as perdas residuais (31) – (32) das perdas adicionais (33), possibilitando uma segregação mais rigorosa.

$$P_{L,r} = P_{in} - P_{mec} - P_{L,s} - P_{L,R} - P_{L,cte} \quad (31)$$

$$P_{L,r} = A * T_{mec}^2 + B \quad (32)$$

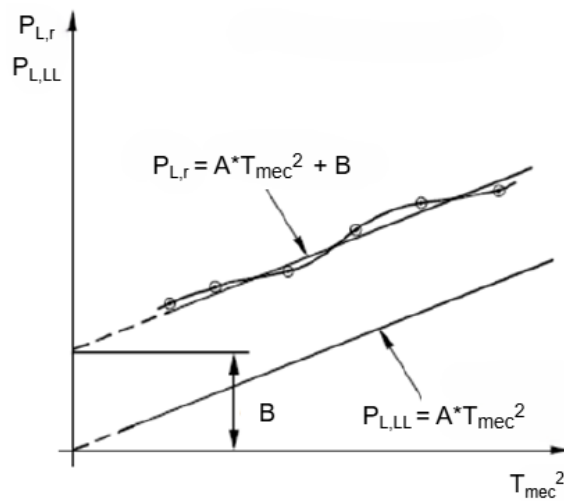


Figura 17: Ilustração gráfica da obtenção das perdas adicionais por regressão linear [42].

Onde:

$P_{L,r}$: perdas residuais;

P_{mec} : potência mecânica disponível no veio;

A, B: coeficientes de regressão linear;

T: binário.

As perdas adicionais relativas à carga são obtidas ignorando o termo B:

$$P_{L,LL} = A * T_{mec}^2 \quad (33)$$

$$A = \frac{i\sum((P_L) + (T^2)) - \sum P_L * \sum T^2}{i\sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (34)$$

$$B = \frac{\sum(P_L)}{i} - A * \frac{\sum T^2}{i} \quad (35)$$

$P_{L,LL}$: perdas adicionais de carga.

A precisão da regressão é validada através do coeficiente de correlação γ . Caso este seja inferior a 0.95, recomenda-se eliminar o ponto com maior discrepância da sequência e repetir o processo. Se γ continuar inferior a 0.95, o ensaio não é considerado satisfatório, devido a possíveis erros de medição. Caso γ (36) se verifique acima de 0.95, significa que o ajuste é quase perfeito, e os valores de A e B são altamente fidedignos.

$$\gamma = \frac{i\sum(P_L * T^2) - (\sum P_L) * \sum T^2}{\sqrt{(i\sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2) - (i\sum P_L^2 - i(\sum(P_L))^2)}} \quad (36)$$

Caso este seja inferior a 0.95, recomenda-se eliminar o ponto com maior discrepância da sequência e repetir o processo. Se γ continuar inferior a 0.95, o ensaio não é considerado satisfatório, devido a possíveis erros de medição. Caso γ se verifique acima de 0.95, significa que o ajuste é quase perfeito, e os valores de A e B são altamente fidedignos.

Assim, a perda total de potência no motor é dada pela soma das parcelas:

$$P_{L,M} = P_{L,cte} + P_{L,s} + P_{L,LL} \quad (37)$$

Capítulo 5

5. Montagem Experimental, Resultados e Discussão

5.1. Montagem Experimental

Para a realização do ensaio experimental, foi necessário efetuar a montagem apresentada na Figura 18. Para a alimentação do VFD, utilizou-se uma fonte de tensão AC programável. O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto de consultoria industrial internacional, no qual uma das premissas consistia em ensaiar os equipamentos de forma a simular um sistema trifásico dos Estados Unidos da América. Assim, a fonte foi programada para alimentar o VFD à tensão de 460 V (entre fases) a 60 Hz.

O VFD utilizado corresponde a um modelo genérico que cumpre todos os requisitos estabelecidos pela norma, podendo, por isso, ser considerado equivalente ao CDM nela definido. Importa salientar quem, dada esta equivalência, ao longo da presente dissertação, o termo VFD é utilizado de forma equivalente ao CDM.

O VFD foi empregue para acionar o motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes em estudo.

As especificações técnicas do motor e do VFD encontram-se apresentadas na Tabela 6 e Tabela 7, respetivamente. Como carga, foi utilizado um gerador com potência nominal de 7.5 kW.

Tabela 6: Características do motor em estudo

Categoria	Especificação
Fabricante	Baldor - Reliance
Série	EC - Titanium
Modelo	37Q435L001G1
Velocidade de Rotação Nominal	1800 rpm
Potência Mecânica Nominal	7.5 kW
Binário	39.8 Nm
Tensão Nominal	460 V
Corrente de Alimentação Nominal	11 A
Resistência por Fase do Estator	0.93 Ω
Frequência de Alimentação Nominal	60 Hz
Fator de Potência	0.937

Tabela 7: Características do VFD em estudo

Categoria		Especificação
Modelo		CIMR-AC4A0023FAA
Série		Yaskawa A1000
Fabricante		Yaskawa Electric Corporation
Potência motor aplicável		7,5 kW Heavy Duty
Entrada	Tipo de alimentação	AC Trifásica
	Tensão de alimentação	380-480 V
	Frequência de alimentação	60 Hz
	Corrente máxima	20 A
Saída	Tipo de saída	AC Trifásica
	Tensão de alimentação	0-480 V
	Frequência de alimentação	0-400 Hz
	Corrente máxima	18 A

Para controlar o binário de carga aplicado e re-injetar a energia na rede elétrica, o gerador foi ligado a uma carga bidireccional programável.

Relativamente aos dados, procedeu-se à aquisição, em tempo real, das grandezas de corrente e tensão à entrada e à saída do VFD, recorrendo a um analisador de potência. Entre o motor e o gerador, foi instalado um sensor de binário e velocidade. Para a visualização e registo dos dados, recorreu-se a um software desenvolvido em LabVIEW e a um mostrador Magtrol.

Adicionalmente, foram colocadas sondas de temperatura no motor, no VFD, no gerador e na própria sala onde os equipamentos estavam a ser testados, com o objetivo de aferir a estabilidade térmica dos equipamentos. No caso da sonda instalada na sala, a sua função foi garantir que a temperatura ambiente se mantivesse em torno de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, por intermédio de um aparelho de ar condicionado.

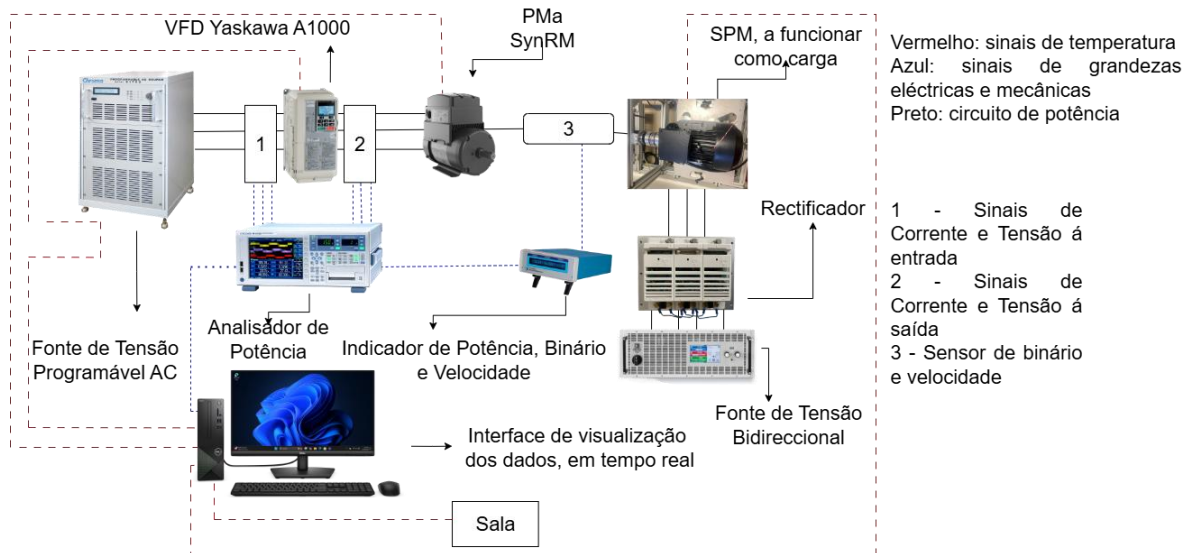


Figura 18: Montagem experimental do sistema de teste.

O equipamento em teste foi avaliado considerando dois métodos de ensaio. Numa primeira fase, o ensaio foi realizado com base na metodologia de estabilização térmica em todos os pontos de funcionamento. Para cada ponto de funcionamento, o sistema foi mantido em operação até atingir a estabilidade térmica, atingida quando se observa uma variação de temperatura do estator inferior a 1 K, num intervalo de 30 minutos, conforme estabelecido em [42] e igualmente referenciado em [26]. Uma vez atingida a estabilidade térmica, foram extraídos os dados de tensão, corrente, potência e fator de potência nos terminais de entrada e saída do CDM. Em cada aquisição, foi efetuada uma média das flutuações com base em vinte medições sucessivas, realizadas num intervalo de três segundos entre si.

Posteriormente, o ensaio foi realizado com base na metodologia estabelecida pela norma, conforme descrito no capítulo 2 da presente dissertação.

Tendo em conta todo o conteúdo técnico e científico aqui apresentado, a secção seguinte tem como objetivo apresentar uma estimativa das perdas no CDM, bem como uma segregação das perdas do PDS formado pelo PMa-SynRM testado, com base nos modelos matemáticos apresentados no capítulo 4. Essa análise fundamenta-se na metodologia técnica descrita igualmente no capítulo 4, e os fundamentos técnicos expostos no capítulo 3.

Como resultado dos ensaios laboratoriais realizados conforme descrito na secção anterior, a secção seguinte apresenta, igualmente, os dados experimentais obtidos durante esses ensaios.

Com o intuito de cumprir com os objetivos propostos neste trabalho, a secção 5.3 inclui também uma análise comparativa entre os resultados obtidos para os dois métodos de ensaio utilizados.

5.2. Resultados Obtidos Através de Cada Metodologia

A presente secção apresenta os resultados obtidos através das diferentes metodologias aplicadas.

5.2.1. Estimativas das Perdas no VFD por Cálculos Matemáticos

No que diz respeito ao cálculo das perdas no VFD, foi adotada a metodologia apresentada no Capítulo 2, na secção Obtenção das Perdas do CDM Através de cálculos, recorrendo às equações descritas no capítulo 4, na secção Modelo Matemático Para o Cálculo das Perdas no CDM. Contudo, dado que não foi possível obter todos os dados das características construtivas do VFD, foram utilizados apenas os dados disponibilizados pelo fabricante, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Dados do fabricante do VFD

Grandeza	Valor	Nomenclatura
λ	0.747	Fator de potência à entrada do VFD
f_{SW}	5 kHz	Frequência de comutação do VFD
$I_{r,out}$	18 A	Corrente de saída nominal do VFD
$U_{r,out,CDM}$	480 V	Tensão de saída nominal do VFD

Existem também os dados relativos à corrente de saída, fator de potência à entrada e saída do VFD, e as perdas de controlo e espera I_{out} , λ , $\cos\phi$, $P_{L,control}$, em cada ponto de funcionamento. Estes dados foram obtidos experimentalmente durante os ensaios para a obtenção das perdas e foram utilizados na estimativa das perdas de potência no VFD, para os oito pontos de funcionamento considerados.

Tabela 9: Dados de I_{out} , CDM, λ , $\cos\phi$, para os 8 pontos de funcionamento.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	$P_{L(90; 100)}$	$P_{L(50; 100)}$	$P_{L(0; 100)}$	$P_{L(90; 50)}$	$P_{L(50; 50)}$	$P_{L(0; 50)}$	$P_{L(50; 25)}$	$P_{L(0; 25)}$
λ	0.74	0.59	0.54	0.58	0.54	0.49	0.49	0.42
$\cos\phi$	0.82	0.59	0.43	0.76	0.57	0.41	0.38	0.28
I_{out}	10.80 A	10.57 A	10.50 A	6.14 A	6.09 A	6.02 A	4.51 A	4.48 A
$P_{L,control}$	14.217 W							

Desta forma, para a estimativa das perdas no VFD, recorreu-se a valores de referência das grandezas em falta, apresentados na própria norma IEC 61800-9-2:2023, os quais se encontram resumidos na Tabela 10.

Tabela 10: Valores típicos das grandezas elétricas nos subcomponentes do VFD, estabelecidos pela norma.

Abreviatura	Descrição	Valores Típicos	Unidade
$U_{T,th}$	Tensão de limiar do transistor de potência	1,0	V
$U_{T,r}$	Tensão em condução do transistor com corrente nominal do CDM	2,3	V
$U_{D,th}$	Tensão de limiar do diodo de potência	1,1	V
$U_{D,r}$	Tensão em condução do diodo de potência com corrente nominal do CDM	2,4	V
$U_{D,th,rectifier}$	Tensão de limiar do diodo do retificador	0,9	V
$U_{D,th,rectifier}$	Tensão em condução do diodo do retificador com corrente nominal do CDM	2,2	V
E_T	Energia de comutação do transistor por Volt e por Ampère	$7,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
E_D	Energia de comutação do diodo por Volt e por Ampère	$2,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
U_{DC}	Tensão do barramento DC	540	V
I_{cable}	Corrente nos cabos do motor	10	A
$K1_{choke}$	Impedância do filtro, relativa à impedância nominal do inversor	0,02	—
$K2_{choke}$	Queda de tensão relativa na parte resistiva do filtro	0,25	—
$K1_{DC_Link}$	Perdas independentes da carga no barramento DC (por $A^2 \cdot V^2$)	8×10^{-7}	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$K2_{DC_Link}$	Perdas dependentes da carga no barramento DC (por A)	2	$\Omega \cdot A$
U_{rails}	Queda de tensão nos condutores ôhmicos à corrente nominal do CDM	0,7	V
$K_{L,cooling}$	Fator de perdas no sistema de arrefecimento	0,2	

Uma vez definidos os referidos valores, procedeu-se a implementação, com recurso a um pequeno programa desenvolvido em MATLAB, de todas as equações necessárias para estimar as perdas no VFD em cada um dos oito pontos de funcionamento.

A Tabela 11 apresenta uma estimativa das perdas nos principais componentes do VFD, para os oito pontos de funcionamento, de acordo com o modelo matemático estabelecido na norma IEC 61800-9-2:2023.

Tabela 11: Estimativas das perdas no VFD.

Componentes segregados	Perdas nos oito pontos de funcionamento [W]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{L,on,T}$	7.29	6.20	5.34	3.38	2.88	2.46	2.01	1.69
$P_{L,on,D}$	7.68	6.53	5.62	3.61	3.08	2.63	2.16	1.818
$P_{L,SW,T}$	18.96	18.75	18.69	14.70	14.67	14.60	13.23	13.20
$P_{L,SW,D}$	6.32	6.2513	6.23	4.90	4.89	4.86	4.41	4.4005
$P_{L,inv}$	241.58	226.47	215.29	159.67	153.09	147.39	130.82	126.68
$P_{L,rect}$	41.39	25.19	10.39	24.24	12.09	5.248	9.36	4.078
$P_{L,bob}$	7.46	4.29	1.36	4.27	1.73	0.5573	1.26	0.4309
$P_{L,B,d.c}$	8.39	3.66	1.09	3.09	1.26	0.3665	0.8392	0.2225
$P_{L,condu}$	4.53	4.35	4.29	1.46	1.44	1.41	0.7914	0.7812
$P_{L,Vent}$	63.51	55.64	49.33	41.39	36.77	33.83	31.45	29.28
$P_{L,cont}$	14.217	14.217	14.217	14.217	14.217	14.217	14.217	14.217
$P_{L,CDM}$	381.11	333.83	295.97	248.35	220.59	203.03	188.76	175.69

A Figura 19 apresenta, num gráfico do tipo *scatter*, a estimativa das perdas no VFD, para cada um dos oito pontos de funcionamento.

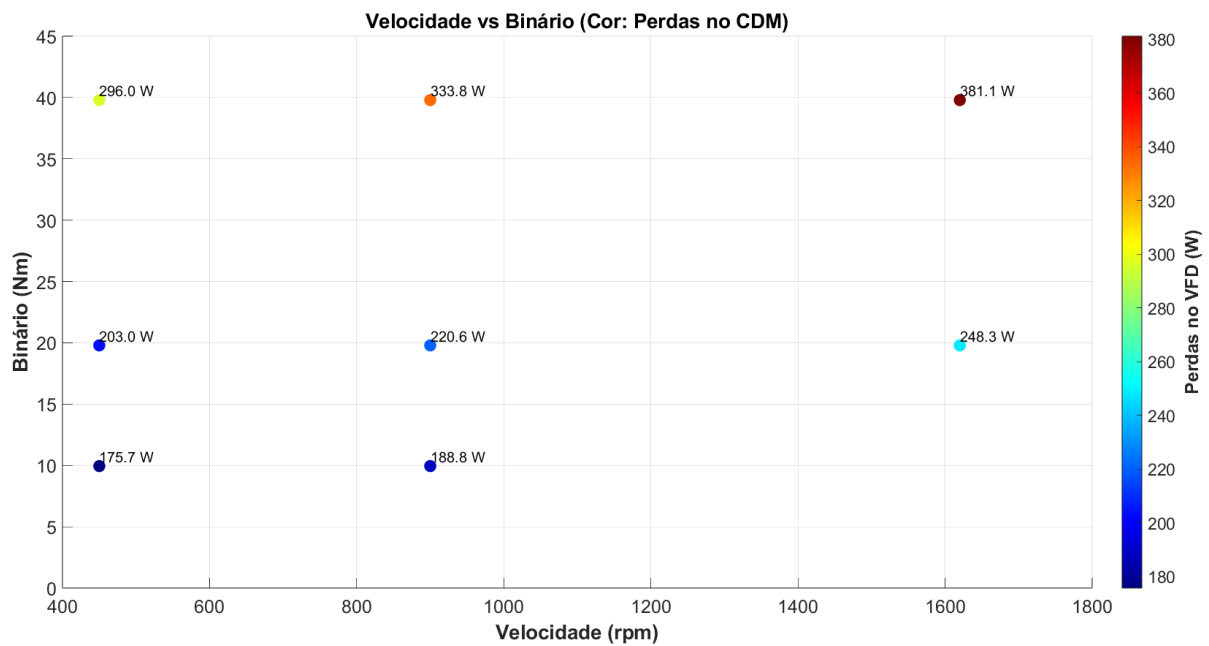


Figura 19: Estimativa das perdas no CDM, obtida através de modelo matemático.

5.2.2. Segregação das Perdas no Motor

Relativamente às perdas no motor, não foi realizada uma estimativa das perdas totais, uma vez que estes dados já eram conhecidos a partir dos ensaios efetuados. Contudo, verificou-se a necessidade de se proceder à segregação das perdas por componentes. Para tal, recorreu-se à metodologia descrita no capítulo 4, na secção Metodologia para a segregação das perdas no motor.

A Tabela 12 apresenta a segregação das perdas no motor.

Tabela 12: Segregação das perdas no motor.

Componentes segregados	Perdas nos oito pontos de funcionamento [W]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{L,cte}$	123.19	60.53	31.73	123.19	60.54	31.73	60.54	31.73
$P_{L,S}$	108.48	103.96	102.59	35.01	34.47	33.72	18.93	18.69
$P_{L,Rotor}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_{L,LL}$	110.03	110.03	110.04	27.22	27.22	27.22	6.8806	6.881
$P_{L,M}$	347.80	304.24	258.32	205.79	130.37	95.50	114.35	72.94
$P_{L,M@calculada}$	341.72	274.53	244.36	185.42	122.23	92.67	86.35	57.30
$P_{L,residual}$	6.09	29.69	13.96	20.37	8.139	2.829	28.01	15.64

A Tabela 13 apresenta, numa distribuição percentual, as perdas no motor por componente, para cada um dos oito pontos de funcionamento. Verificou-se que, nos pontos de funcionamento 2, 4, 7 e 8, as perdas residuais situaram-se entre 9.76% e 24.49%, facto que se justifica por corresponderem a condições de funcionamento em carga parcial, nas quais a influência das perdas constantes é mais significativa.

Tabela 13: Distribuição percentual das perdas no PMa-SynRM, por componente.

Componentes do Motor	Perdas de Potência em Percentagem							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{L,cte}$	35.42%	19.90%	12.28%	59.86%	46.44%	33.23%	52.94%	43.51%
$P_{L,S}$	31.19%	34.17%	39.72%	17.01%	26.44%	35.31%	16.55%	25.62%
$P_{L,LL}$	31.64%	36.17%	42.60%	13.23%	20.88%	28.50%	6.02%	9.43%
$P_{L,residual}$	1.75%	9.76%	5.40%	9.90%	6.24%	2.96%	24.49%	21.44%

A Figura 20 apresenta a separação entre as perdas adicionais, relacionadas com o nível de carga, e as perdas residuais. A linha preta tracejada representa a soma das perdas residuais e perdas adicionais. A linha verde representa exclusivamente as perdas adicionais, já isoladas. Por sua vez, a linha vermelha tracejada corresponde às perdas residuais, resultantes de erros de medição ou eventuais anomalias nos equipamentos de instrumentação.

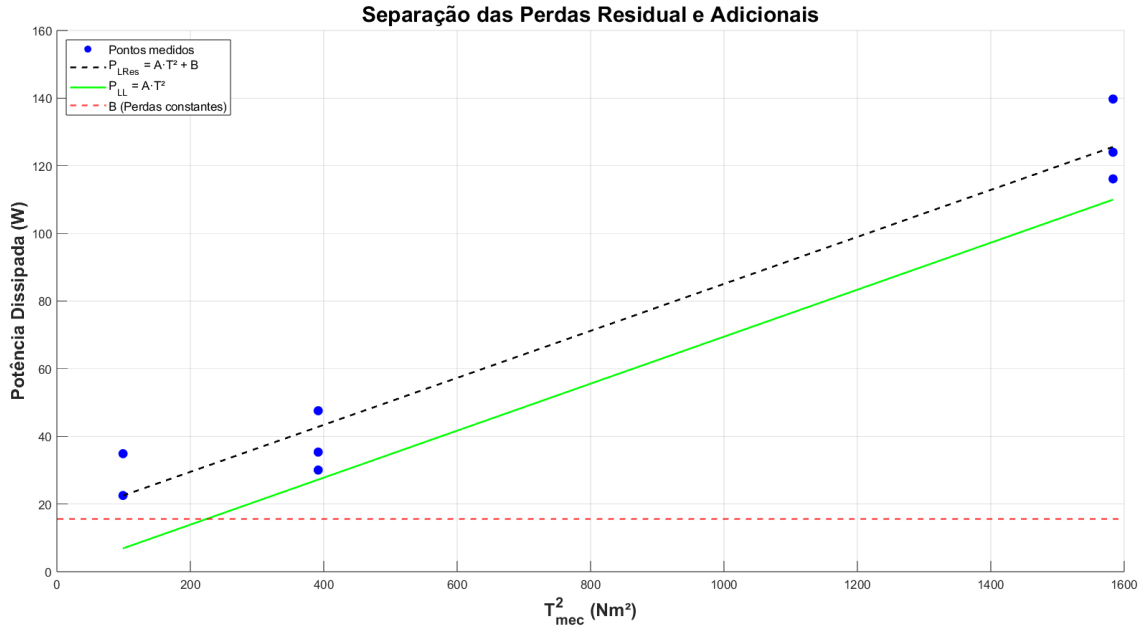


Figura 20: Separação das perdas adicionais relativas ao nível de carga das perdas residuais, por regressão linear.

A Figura 21 apresenta, num gráfico de setores, a distribuição percentual das perdas no PMA-SynRM em estudo, quando este opera dentro das suas condições nominais de funcionamento. Como se pode verificar, as perdas neste tipo de motor estão distribuídas quase que de forma uniforme dentro do motor.

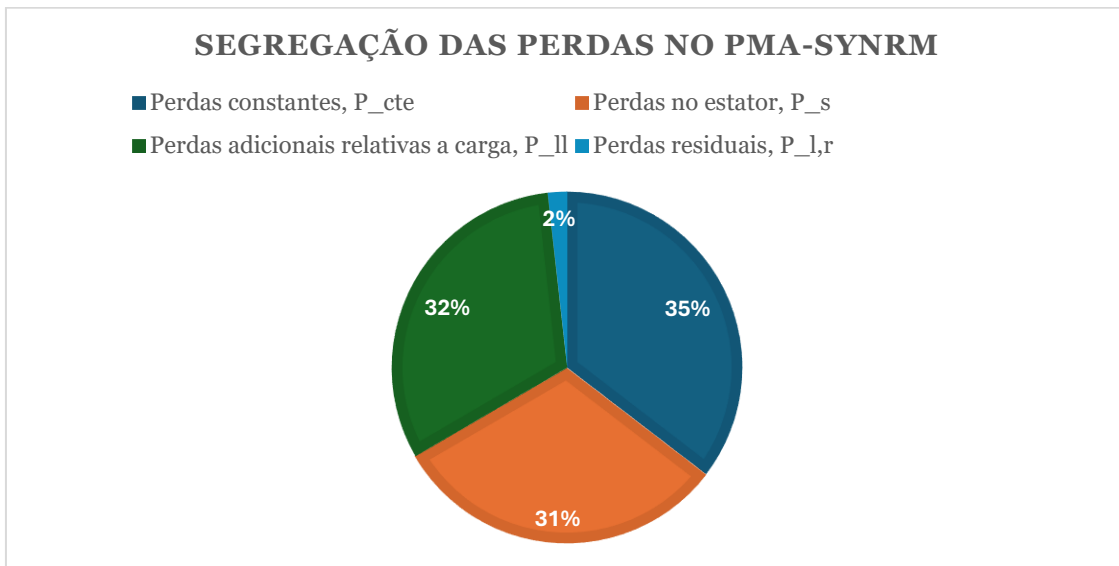


Figura 21: Representação percentual das principais perdas no PMA-SynRM, para o funcionamento em condições nominais.

5.2.3. Resultados Experimentais – Metodologia de Ensaio Baseada na Norma IEC 61800-9-2

Apresenta-se, em seguida, a Tabela 14, na qual constam os resultados experimentais obtidos através da aplicação da metodologia de ensaio estabelecida na norma IEC 61800-9-2:2023. Os valores de η_M , η_{CDM} , e η_{PDS} , correspondem, respetivamente, aos rendimentos do motor, do VFD e do sistema completo de acionamento elétrico (PDS).

Por sua vez, os valores de $P_{L,M}$, $P_{L,CDM}$, e $P_{L,PDS}$, representam as perdas absolutas, expressas em *Watt*.

Já os parâmetros, $p_{L,M}$, $p_{L,CDM}$, e $p_{L,PDS}$, referem-se às perdas relativas, expressas em percentagem.

Tabela 14: Resultados experimentais obtidos a partir do procedimento estabelecido na norma IEC 61800-9-2:2023.

		Ponto de funcionamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência	%	90	50	25	90	50	25	50	25
Binário	%	100	100	100	50	50	50	25	25
$P_{L,M}$	W	350.27	280.25	244.39	159.64	109.37	89.05	88.44	62.61
$p_{L,M}$	%	4.70	3.76	3.28	2.14	1.47	1.19	1.19	0.84
η_M	%	95.07	93.04	88.47	95.48	94.50	91.30	91.39	88.25
$P_{L,CDM}$	W	169.17	132.25	115.19	89.47	77.10	70.34	61.76	57.83
$p_{L,CDM}$	%	1.13	0.88	0.77	0.60	0.52	0.47	0.41	0.39
η_{CDM}	%	97.67	96.82	94.85	97.53	96.27	93.57	94.33	90.21
$P_{L,PDS}$	W	519.44	412.50	359.58	249.11	186.46	159.39	150.20	120.44
$p_{L,PDS}$	%	6.97	5.53	4.82	3.34	2.50	2.14	2.01	1.62
η_{PDS}	%	92.85	90.09	83.91	93.13	90.97	85.43	86.21	79.62

O gráfico da Figura 22 apresenta o rendimento do VFD nos oito pontos de funcionamento avaliados.

Verifica-se que o rendimento aumenta à medida que o VFD opera em condições próximas das condições nominais, atingindo valores na ordem dos 97,5 – 97,7 % na região de operação de 54 Hz e binário superior a 20 Nm. Em situações de carga parcial, nomeadamente quando a frequência de saída é 15 Hz (25% da frequência de saída nominal), o rendimento desce para valores entre 90 e 94,8 %, evidenciando a influência das perdas constantes no VFD. Apesar de o gráfico não constituir um mapa de rendimentos contínuo, mas sim um conjunto de pontos experimentais discretos, permite ainda assim identificar as zonas operacionais de maior eficiência do CDM.

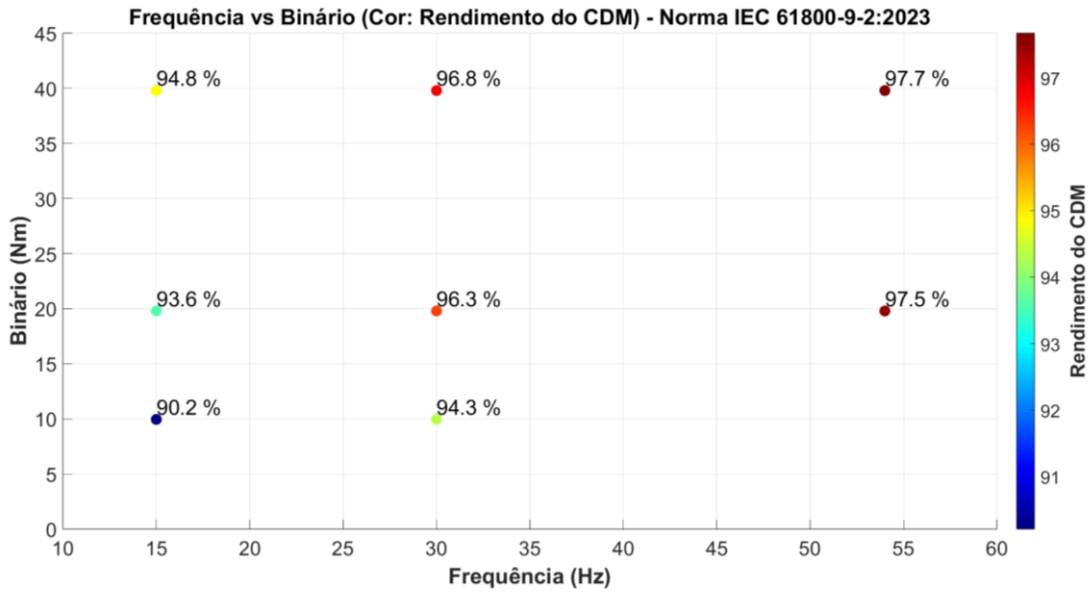


Figura 22: Rendimento do CDM medido experimentalmente, segundo a norma IEC 61800-9-2:2023.

A Figura 23 apresenta um gráfico *scatter* com os rendimentos do PMA-SynRM em estudo. Como se pode observar, o rendimento do motor aumenta à medida que o seu funcionamento se aproxima das condições nominais. Um dado curioso é que o motor atingiu o maior rendimento num ponto de operação próximo do ponto nominal (90 % da velocidade nominal e 50 % do binário nominal), o que é atípico. Esse resultado pode ser decorrente do facto de o motor não ter atingido a estabilização térmica quando os dados desse ponto foram registados. Embora não seja um mapa de rendimento, este tipo de gráfico permite otimizar o dimensionamento e a operação deste motor, identificando gamas de velocidade e binário com maior rendimento. Ao evitar pontos de baixo rendimento e ajustar os parâmetros de operação, é possível reduzir perdas energéticas e melhorar o desempenho global do sistema.

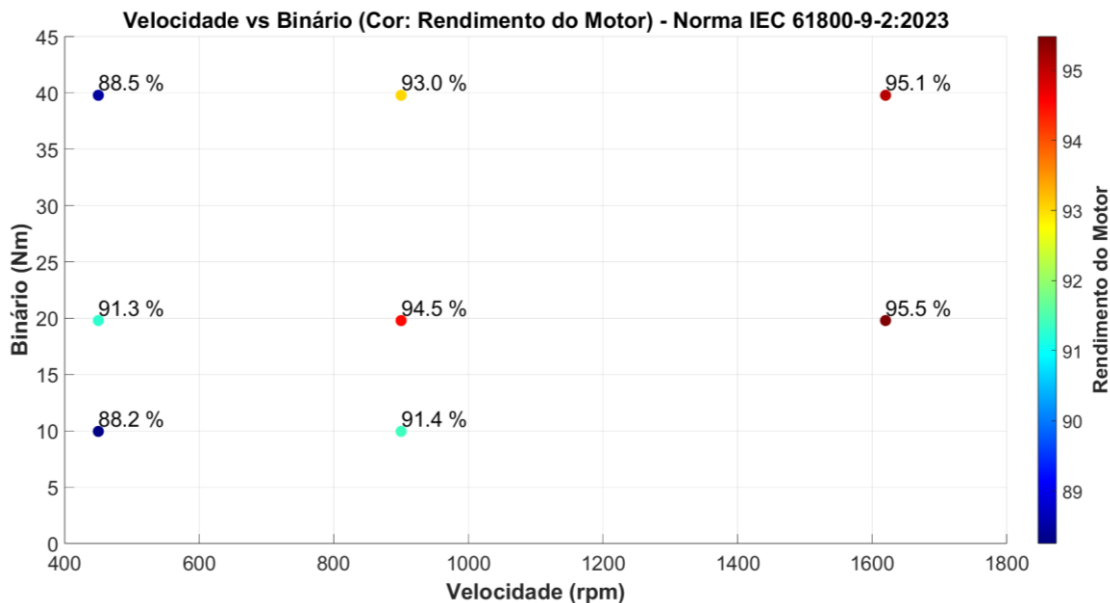


Figura 23: Rendimento do motor, obtido experimentalmente em simultâneo com a aquisição dos dados do PDS, de acordo com a norma IEC 61800-9-2:2023.

Com o intuito de apresentar graficamente o rendimento do PDS, apresenta-se a Figura 24. Como resultado da agregação do VFD ao motor, este gráfico reflete o comportamento de ambas as tecnologias, mostrando ajustes no rendimento do sistema global. Para obter o rendimento do PDS, basta multiplicar os rendimentos do VFD e do motor. Com este gráfico, é possível otimizar a operação do sistema, tendo uma visão mais precisa do rendimento global, o que permite o ajustar a velocidade e o binário para operar em pontos de maior rendimento e, assim, reduzir eventuais desperdícios.

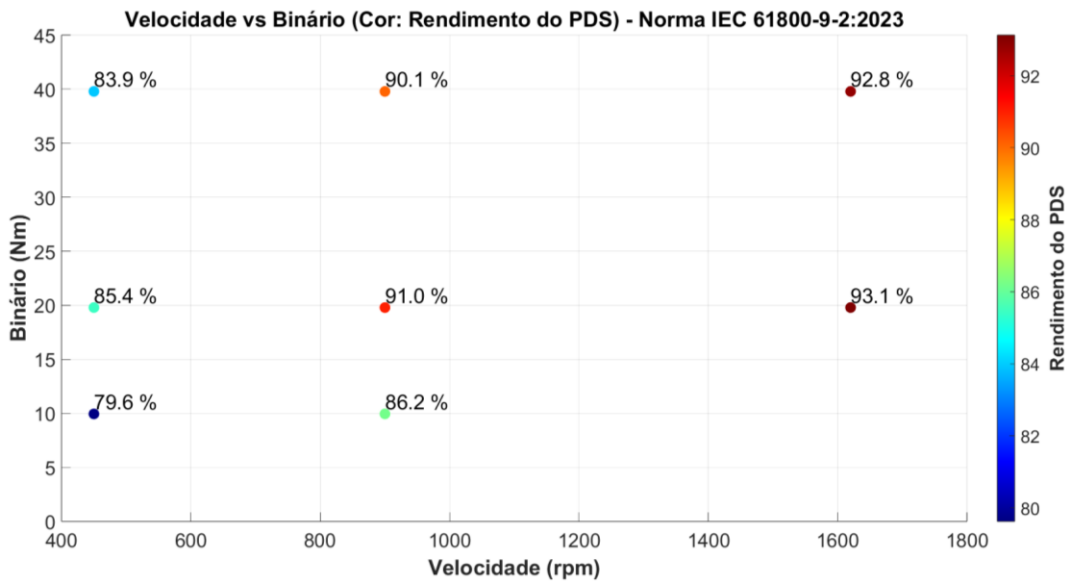


Figura 24: Rendimento do PDS, determinado experimentalmente em conformidade com a norma IEC 61800-9-2:2023.

Abaixo apresenta-se um exemplo de como os resultados apresentados nas Figuras 22 a 24 podem ser utilizados para otimizar um processo e implementar ganhos reais:

Num processo industrial composto por este PDS, o sistema está a operar a 900 rpm e com um binário mínimo necessário de 20 Nm para acionar a carga. Ao analisar o gráfico, observa-se que o rendimento atual do acionamento elétrico é 86.2 %. Caso o processo permita ajustes, seria suficiente aproximar a operação do acionamento elétrico para o ponto de maior rendimento, que ocorre a 1600 rpm e 50 Nm. Esta simples abordagem resultaria num ganho de 6.9% no rendimento.

Para fins de comparabilidade, basta aferir a classe de eficiência do VFD. Para isso, basta dividir o valor da sua perda relativa no ponto normalizado 1 pelas perdas de referência do RCDM com a mesma potência aparente de saída, de acordo com (9). Assim:

$$\frac{p_{L,CDM(90,100)}}{p_{L,RCDM(90,100)}} = \frac{1.13}{5.43} = 0.208 \rightarrow \mathbf{IE2} \quad (38)$$

Conclui-se, portanto, que a classe IE do VFD utilizado é IE2, dado que as suas perdas relativas em condições nominais representam aproximadamente 20.8 % das perdas de

referência, o que está de acordo com os limites estabelecidos na secção Limites IE dos VFD, e é também ilustrado graficamente na Figura 7.

De acordo com a norma IEC 60034-30-2, para um motor com potência nominal 7.5 kW e velocidade nominal de 1800 rpm, um rendimento igual ou superior a 94% enquadra-se na classe de eficiência **IE5**. Este é precisamente o caso do motor em estudo.

Para a determinação da classe IES do PDS em análise, foi necessário calcular o limite correspondente com base na equação (3). Um dos passos consistiu na conversão da classe IE1 do RCDM equivalente ao utilizado nos ensaios para a classe IE2, aplicando-se um fator de correção de 0.75, conforme previsto na norma:

$$\begin{aligned} p_{L,CDM,IE2(90,100)} &= p_{L,IE1} * 0.75 = 5.43 \% * 0.75 \\ p_{L,CDM,IE2(90,100)} &= 4.38\% \end{aligned} \quad (39)$$

E as perdas relativas do motor de referência, são então calculadas através da equação (4):

$$p_{L,RM,IE2,rpm(90;100)} = \frac{(1 - 0.951) * 7106.34}{7500} = 4.64\% \quad (40)$$

Deste modo, o limite da classe IES5 do PDS composto pelo motor PMA-SynRM com a classe de eficiência IE5 e o VFD de classe IE2, com potência nominal de 7.5 kW e com velocidade de rotação nominal de 1800 rpm, será definido por:

$$p_{L,IES5,1800} = \frac{4.64 * 7500 + 4.38 * 9950}{7500} = 10.45\% \quad (41)$$

A soma das perdas relativas dos componentes do PDS, determinada pela equação (5), resultou em:

$$\begin{aligned} p_{L,PDS} &= 6.97\% \\ p_{L,IES5,1800} &> p_{L,PDS} \rightarrow \mathbf{IES5} \end{aligned} \quad (42)$$

Conclui-se que o sistema de acionamento (PDS) avaliado se enquadra na classe de eficiência IES5, a mais elevada prevista na norma.

Concluída a apresentação dos resultados obtidos de acordo a norma IEC 61800-9-2:2023, a secção seguinte abordará os resultados obtidos pelo método alternativo da estabilização térmica.

5.2.4. Resultados Experimentais – Metodologia de Ensaio Baseada na Estabilização Térmica

A Tabela 15 apresenta o conjunto de dados obtidos através de estabilização térmica do acionamento elétrico para os oito pontos de funcionamento analisados. Estes dados foram

posteriormente utilizados como base para a análise comparativa entre o método definido na norma e o método baseado na estabilização térmica, conforme desenvolvido nas secções seguintes.

Tabela 15: Resultados experimentais obtidos a partir do procedimento de estabilização térmica dos 8 pontos de funcionamento.

		Ponto de funcionamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Frequência	%	90	50	25	90	50	25	50	25
Binário	%	100	100	100	50	50	50	25	25
$P_{L,M}$	W	347.80	304.24	258.32	205.79	130.37	95.50	114.35	72.94
$p_{L,M}$	%	4.66	4.08	3.46	2.76	1.75	1.28	1.53	0.98
η_M	%	95.11	92.49	87.89	94.25	93.49	90.74	89.14	86.63
$P_{L,CDM}$	W	167.59	139.84	116.91	94.42	78.21	70.25	61.90	59.50
$p_{L,CDM}$	%	1.12	0.93	0.78	0.63	0.52	0.47	0.41	0.40
η_{CDM}	%	97.70	96.66	94.80	97.43	96.24	93.62	94.45	90.17
$P_{L,PDS}$	W	515.39	444.08	375.22	300.21	208.58	165.75	176.25	132.44
$p_{L,PDS}$	%	6.91	5.96	5.03	4.03	2.80	2.22	2.36	1.78
η_{PDS}	%	92.91	89.41	83.32	91.83	89.97	84.95	84.19	78.11

Como se pode constatar nas Figuras 23 e 25, não há diferenças relevantes nas perdas do CDM quando o PDS é ensaiado de acordo com a norma IEC 61800-9-2:2023 ou com o método alternativo da estabilização térmica. Assim, a análise realizada para a Figura 23 continua válida para a Figura 25.

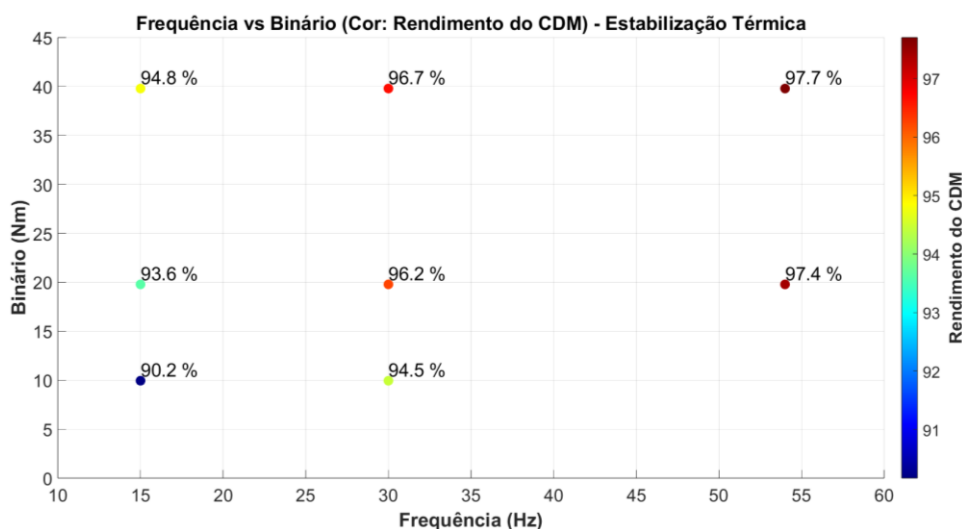


Figura 25: Rendimento do CDM medido experimentalmente, por estabilização térmica.

A Figura 26 apresenta o comportamento do motor quando testado pelo princípio da estabilização térmica. A figura revela que, quanto mais próximas as condições de operação das condições nominais, maior o rendimento do motor. Outra situação de interesse é a

variação nos valores de binário, quando comparados aos valores obtidos pela norma IEC 61800-9-2:2023. Tal situação é abordada em profundidade na secção 5.3.

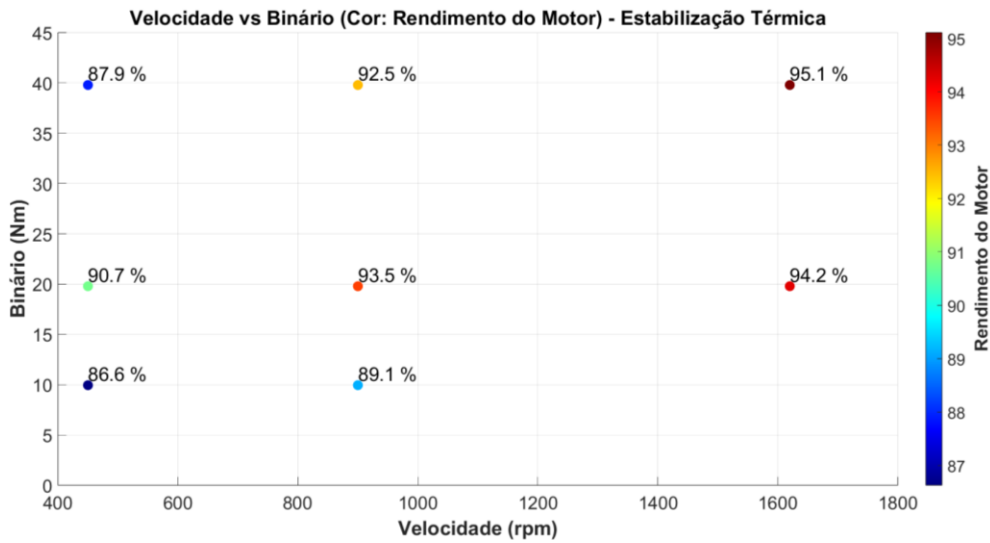


Figura 26: Rendimento do motor, obtido experimentalmente em simultâneo com a aquisição dos dados do PDS, por estabilização térmica.

A Figura 27 mostra o comportamento do PDS quando testado pelo princípio da estabilização térmica. Como o comportamento do VFD se mantém inalterado, o único fator diferenciador é a magnitude das variações no rendimento do motor. Portanto, o PDS reflete tal diferença em seu rendimento. Tal situação é abordada em profundidade na secção 5.3 – “Análise comparativa dos resultados”.

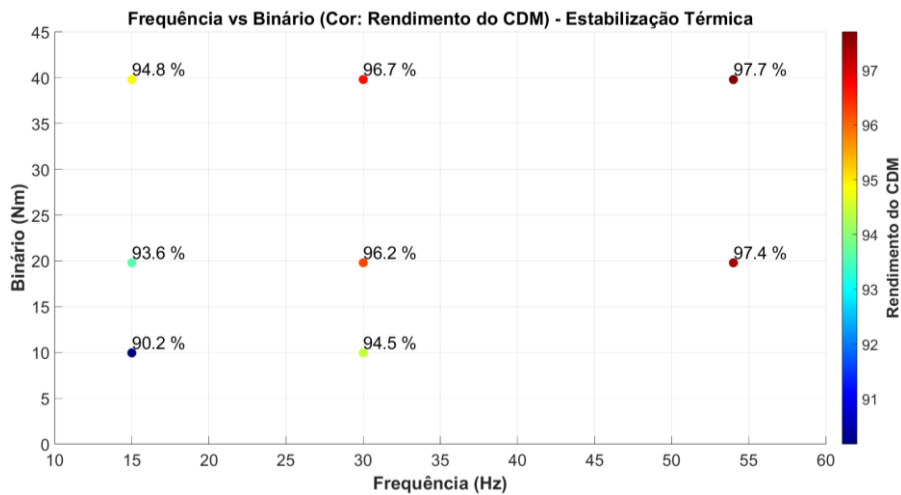


Figura 27: Rendimento do PDS, determinado experimentalmente, por estabilização térmica.

5.3. Análise Comparativa dos Resultados

Esta secção apresenta uma análise comparativa entre os resultados obtidos por estimativa matemática das perdas no VFD e os valores medidos experimentalmente, ambos segundo os procedimentos estabelecidos pela mesma norma IEC 61800-9-2:2023.

Na segunda parte, realiza-se uma análise comparativa entre o método normativo e o método alternativo de estabilização térmica.

5.3.1. Norma vs. Estimativa – CDM

A Figura 28 apresenta uma comparação entre os valores estimados das perdas no VFD, obtidos por meio do modelo matemático definido na norma, e os valores medidos experimentalmente segundo o procedimento prescrito pela própria norma.

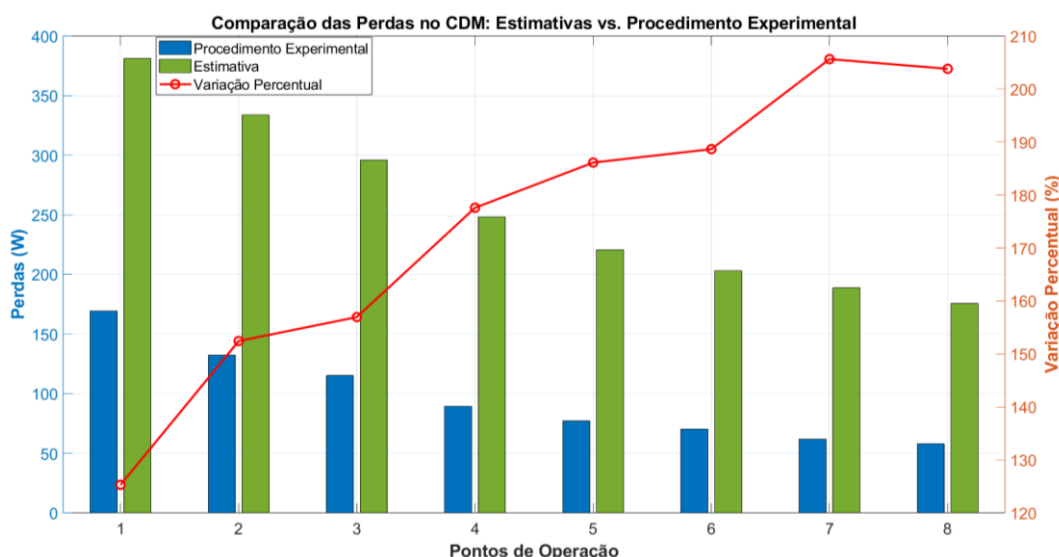


Figura 28: Compara o das perdas no CDM: estimativas vs. procedimento experimental.

Como se pode observar na Figura 28 e na Tabela 16, existe uma discrepância significativa, que aumenta   medida que as perdas diminuem. A maior diferença ocorre nos dois pontos de opera o correspondentes a frequências de alimenta o e binários reduzidos.

Estes resultados sugerem a existência de incongruências no modelo matemático ou nos valores de referência normativos, apresentados neste trabalho na Tabela 10. No entanto, seria prematuro identificar com precisão a origem da discrepância, dado que não foi possível obter dados técnicos detalhados sobre a eletr nica de potência do VFD junto do fabricante.

Assim, apesar de se poder levantar a hipótese de que o modelo matemático ou os parâmetros normativos estejam desajustados, o presente trabalho não dispõe de dados suficientes para afirmar inequivocamente, qual dos dois fatores   o principal responsável pelas divergências entre a estimativa teórica e os valores medidos.

Tabela 16: Quadro resumo - compara o das perdas no CDM: estimativas vs. procedimento experimental.

Ponto	Binário Relativo (%)	Velocidade Relativa (%)	Perdas Medidas (W)	P. Estimadas (W)	Erro (%)
1	100	90	169.17	381.11	+125.3%
2	100	50	132.25	333.83	+152.4%
3	100	25	115.19	295.97	+156.9%

4	50	90	89.47	248.35	+177.6%
5	50	50	77.10	220.59	+186.1%
6	50	25	70.34	203.03	+188.6%
7	25	50	61.76	188.76	+205.6%
8	25	25	57.83	175.69	+203.8%

5.3.2. Norma IEC 61800-9-2 vs. Estabilização Térmica

A Figura 29 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelo procedimento estabelecido na norma IEC 61800-9-2 e os resultados do método alternativo, baseado na estabilização térmica.

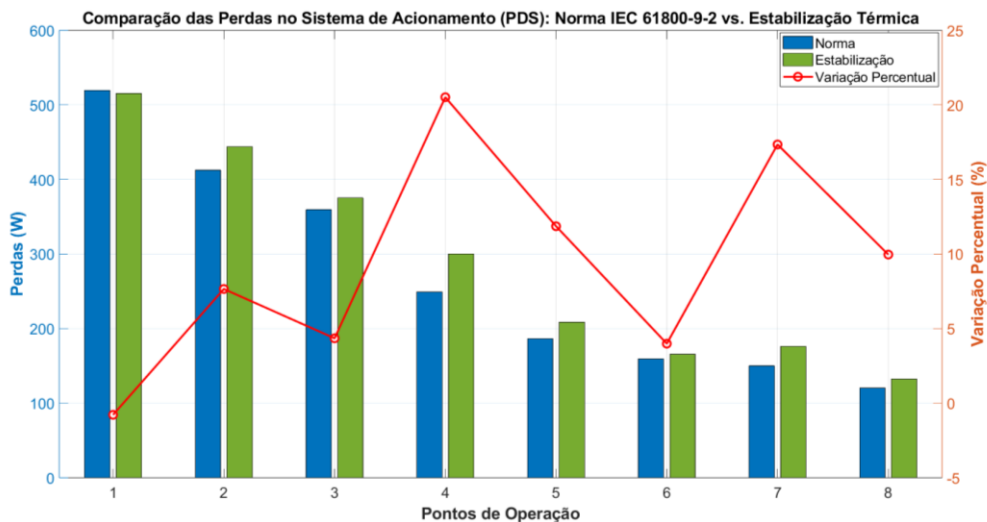


Figura 29: Análise comparativa das perdas no sistema de acionamento elétrico (PDS): norma IEC 61800-9-2 vs. estabiliza o térmica.

Em ambos os métodos, foi imperativo que o motor atingisse previamente a estabiliza o térmica antes da medi o e registo do primeiro ponto de funcionamento $P_{L,PDS(100;100)}$. Este aspeto contribuiu para a semelhança dos resultados   plena carga, onde a diferença entre os métodos   praticamente desprez vel. No entanto, um dado particularmente relevante emerge do facto de que, em pontos de opera o com binário inferior a 50 % do binário nominal, registaram-se varia es superiores a 10 % e, em alguns casos, próximas de 20 %. Tal comportamento evidencia uma rela o direta entre o nível de carga e a discrepância entre os métodos, o que sugere que o método normativo pode não captar com precisão as perdas em regimes de carga parcial.

Este resultado reforça a importância de considerar o perfil de carga completo do acionamento, e não apenas as condi es nominais, sobretudo em aplica es com varia es significativas de binário.

Apesar de existirem pontos em que os valores são muito próximos, noutros observa-se uma diferença expressiva, o que pode comprometer a avalia o do rendimento de tecnologias

mais recentes, caso se considerem apenas as perdas nas condições nominais, sem contemplar variações de carga reais.

De modo a elucidar melhor o leitor, a Tabela 17 apresenta um quadro resumo da análise comparativa dos dois métodos, bem como as variações entre si. Como se pode verificar, os pontos 4, 5, 7 e 8 apresentam desvios iguais ou superiores a 10 %, o que coloca em causa não só a metodologia de ensaios proposta na norma, mas também a própria fiabilidade da norma na classificação destas tecnologias.

Tabela 17: Quadro resumo - comparação das perdas no sistema de acionamento elétrico (PDS): norma IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica

Ponto	T (%)	f (%)	Perdas - Norma (W)	Perdas - Estabilização (W)	Erro (%)
1	100	90	519.44	515.39	-0.779%
2	100	50	412.50	444.08	+7.66%
3	100	25	359.58	375.22	+4.35%
4	50	90	249.11	300.21	+20.51%
5	50	50	186.46	208.58	+11.86%
6	50	25	159.39	165.75	+3.99%
7	25	50	150.20	176.25	+17.34%
8	25	25	120.44	132.44	+9.96%

Outro aspeto igualmente relevante reside no fato de a norma estabelecer uma metodologia de interpolação linear para estimar as perdas em pontos de funcionamento intermédios, distintos dos oito pontos normativos. No entanto, caso a metodologia utilizada para os pontos normativos não reflita com precisão os valores reais das perdas de potência, a aplicação do método de interpolação proposto tenderá igualmente a produzir resultados imprecisos. Esta limitação é evidente no exemplo apresentado abaixo.

Uma vez que, durante os ensaios laboratoriais, foram registados quarenta e dois pontos em condições de estabilização térmica, selecionaram-se oito desses quarenta e dois pontos, distintos dos oito pontos normativos. Estes pontos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 18: Pontos intermédios escolhidos para a avaliação do método de interpolação linear da norma IEC 61800-9-2:2023

Ponto de Operação	(velocidade, binário)	f	T
	(m/s; Nm)	Hz	Nm
$P_{int,1}$	(1422; 24.66)	0.79	0.62
$P_{int,2}$	(1350; 39.78)	0.75	1
$P_{int,3}$	(1350; 29.88)	0.75	0.75
$P_{int,4}$	(1350; 19.88)	0.75	0.5

$P_{int,5}$	(1080; 14.32)	0.6	0.36
$P_{int,6}$	(720; 39.76)	0.4	1
$P_{int,7}$	(900; 29.98)	0.5	0.75
$P_{int,8}$	(450; 29.99)	0.25	0.75

O primeiro passo consistiu na estimativa das perdas nestes oito pontos intermédios, utilizando o método de interpolação linear com base nos oito pontos normativos extraídos segundo a metodologia definida na norma. Em seguida, procedeu-se a uma análise comparativa entre os valores reais medidos por estabilização térmica e os valores estimados por interpolação linear, cujos resultados se encontram apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Quadro resumo - comparação das perdas estimadas por interpolação linear vs. perdas medidas por estabilização térmica.

Pontos de Operação	f	T	Interp. Linear	Estabilização	Variação percentual
$P_{int,1}$	0.79	0.62	172.85	216.70	-20.24%
$P_{int,2}$	0.75	1	322.19	358.35	-10.09%
$P_{int,3}$	0.75	0.75	208.63	251.66	-17.09%
$P_{int,4}$	0.75	0.5	139.96	174.16	-19.64%
$P_{int,5}$	0.6	0.36	103.59	124.46	-16.77%
$P_{int,6}$	0.4	1	265.18	282.69	-6.19%
$P_{int,7}$	0.5	0.75	173.31	205.13	-15.51%
$P_{int,8}$	0.25	0.75	142.13	164.33	-13.51%

Os dados apresentados constituem uma evidencia clara de que, caso se proceda à estimativa das perdas em pontos intermédios com base nos oitos pontos obtidos através da metodologia estabelecida na norma, tal estimativa não seria representativa da realidade. A análise comparativa da Tabela 19, demonstra, de forma inequívoca, que sete dos oito pontos estimados apresentam um desvio negativo igual ou superior a 10 %, sendo que, em cinco desses pontos, o desvio ultrapassa os 15 %. Estes resultados podem ser visualizados de forma mais intuitiva na Figura 30.

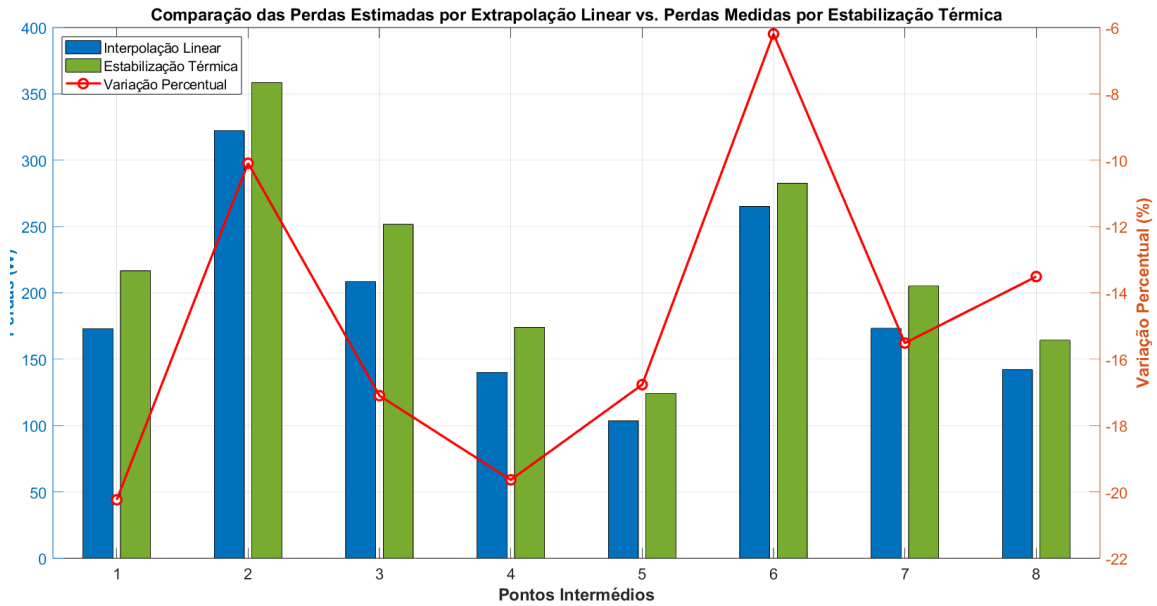


Figura 30: Análise comparativa das perdas estimadas por interpolação linear vs. perdas medidas por estabilização térmica.

Uma vez apresentadas as análises comparativas que nos permitem aferir a real efetividade da norma IEC 61800-9-2:2023 na avaliação e classificação de acionamentos elétricos de velocidade variável compostos por PMA-SynRM, o próximo capítulo desta dissertação abordará as principais conclusões deste trabalho, bem como a suas limitações, recomendações e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 6

6. Conclusões

A adoção massiva de tecnologias mais recentes e, conseqüentemente, mais eficientes, tem sido amplamente debatida nos principais fóruns de decisão política à escala global, desde o Fórum Económico Mundial (*World Economic Forum*) até aos governos de economias desenvolvidas e em desenvolvimento. A principal questão subjacente a estas discussões reside na necessidade de se estabelecer, de forma inequívoca, quais as tecnologias que ainda podem ser otimizadas, quais devem ser substituídas e qual o custo, tanto financeiro como ambiental, associado a tais decisões.

Nesta senda, os motores elétricos surgem como uma das principais tecnologias com margem significativa para melhoria, dada a sua vasta presença no setor industrial e a sua elevada representatividade no consumo global de energia elétrica. O objetivo é alcançar níveis superiores de rendimento e, por conseguinte, uma redução substancial do consumo energético. No entanto, tal só será viável se se garantir que essas versões tecnologicamente aperfeiçoadas são, de facto, substitutos eficazes e confiáveis das tecnologias atualmente em uso. Para isso, é essencial que cumpram um conjunto rigoroso de indicadores de desempenho que assegurem a sua adoção massiva e sustentada, contribuindo para os objetivos de eficiência energética global.

A presente dissertação analisou de forma exaustiva um desses indicadores fundamentais: a caracterização dos motores elétricos em termos de rendimento, ou em termos práticos, a análise das perdas de potência, por meio da avaliação da aplicabilidade da norma IEC 61800-9-2:2023. Esta norma reveste-se de particular importância, uma vez que serve de base técnica para a formulação de regulamentos de carácter obrigatório no espaço económico europeu. Importa, no entanto, sublinhar que a referida norma foi inicialmente concebida tendo por base acionamento elétricos constituídos por motores indução trifásicos, portanto, urge a necessidade de se perceber se norma IEC 61800-9-2:2023 está ajustada a acionamento elétricos compostos por motores mais modernos.

O estudo desenvolvido revela uma tendência significativa da norma para a sobrestimação das perdas no tipo de acionamento elétrico aqui em análise, nomeadamente um inversor de frequência Yaskawa A1000 e um motor síncrono de relutância assistido por ímanes permanentes (PMA-SynRM). Esta tendência é sustentada pelos seguintes fatores:

- I. Os resultados obtidos através do modelo matemático estabelecido pela norma apresentam incongruências face aos medidos experimentalmente. Tais divergências podem resultar de inadequações das equações propostas ou dos dados de referência utilizados.

- II. A metodologia de ensaio do sistema de acionamento elétrico PDS, conforme proposta pela norma, apresenta discrepâncias quando comparada com a metodologia baseada na estabilização térmica, especialmente em determinados pontos de funcionamento. Tais discrepâncias podem comprometer a caracterização precisa dos PDS, sobretudo em análises que considerem diferentes perfis de carga.
- III. A norma adota uma abordagem abrangente, procurando consolidar num único documento uma metodologia capaz de ser usada em diferentes tecnologias. No entanto, essa generalização pode induzir a erros experimentais. Um exemplo disso é a recomendação de testar o motor com e sem VFD para isolar as perdas induzidas por distorções harmônicas. Esta abordagem não é aplicável a motores que foram especificamente concebidos para operar exclusivamente com VFD, como é o caso do PMa-SynRM utilizado neste estudo.

6.1. Limitações do Estudo

A principal limitação deste trabalho foi a indisponibilidade dos dados da eletrônica de potência do VFD utilizado, o que impossibilitou a verificação rigorosa da origem das incongruências observadas entre o modelo matemático proposto pela norma e os valores medidos experimentalmente. Não foi, assim, possível determinar com exatidão se as discrepâncias decorrem das equações da norma ou dos valores de referência nela sugeridos. Outro fator limitativo reside na escassez de literatura científica que permita uma segregação mais detalhada das perdas no PMa-SynRM. Em particular, as perdas associadas à distorção harmônica e o coeficiente r_{HL} não foram consideradas neste estudo, dado que tal coeficiente não foi concebido para motores projetados exclusivamente para funcionamento com VFDs.

6.2. Recomendações

Com o intuito de melhorar o desempenho da norma IEC 61800-9-2 na determinação das perdas na caracterização de sistemas de acionamento elétrico de velocidade variável compostos por PMa-SynRM, recomendam-se as seguintes medidas:

- I. Recomenda-se que os dados dos oito pontos de funcionamento definidos pela norma apenas sejam registados após o motor atingir a estabilização térmica em cada ponto. Esta prática garantiria dados representativos das condições reais de operação industrial.
- II. Sugere-se uma análise crítica da aplicabilidade do coeficiente r_{HL} na avaliação das perdas por distorção harmônica em motores projetados para funcionamento exclusivo com VFD, uma vez que este coeficiente foi originalmente desenvolvido para motores alimentados diretamente pela rede.

- III. Propõe-se a criação de normas distintas para sistemas compostos por motores de indução e por motores síncronos, respetivamente. Esta separação pode evitar interpretações erróneas e garantir uma maior adequação técnica na aplicação da norma.
- IV. Recomenda-se que a análise da conformidade da classe de eficiência do VFD e PDS seja realizada com base nos oito pontos de funcionamento testados, e não apenas no ponto de funcionamento em condições nominais.

6.3. Trabalhos Futuros

Com base nos resultados e nas limitações identificadas nesta dissertação, propõem-se os seguintes trabalhos, com o intuito de aprofundar o conhecimento científico e contribuir para o avanço da normalização e da prática industrial:

- Desenvolvimento de metodologias específicas para a separação das perdas por distorção harmónica em motores concebidos para operação exclusiva com VFD, dado o crescente número de aplicações com esta configuração.
- Análise comparativa entre resultados experimentais e as perdas estimadas no VFD, com recurso a dados reais fornecidos por fabricantes, para identificar se as discrepâncias advêm das equações propostas ou dos parâmetros normalizados.
- Avaliação da aplicabilidade e precisão da norma IEC 61800-9-2 em sistemas compostos por múltiplos motores síncronos de relutância assistidos por ímanes permanentes (PMA-SynRM), considerando a complexidade acrescida de tais configurações.
- Análise da adequação para outras tecnologias de motores síncronos, incluindo o motor síncrono de relutância (SynRM), o motor com ímanes permanentes montados à superfície, baseado em terras raras (SPM), e o motor síncrono de relutância comutada (SRM), de forma a determinar a abrangência e limitações do modelo normativo atual.

Referências

- [1] IEA, “World Energy Outlook 2023,” Paris, 2023. Accessed: Oct. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [2] B. Motherway, J. Bilodeau, J. Cohen, E. Mooney, V. Rozite, and M. Slade, “Energy Efficiency 2024,” *Energy Effic.*, 2024.
- [3] “Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems,” IEA Energy Papers 2011/07, May 2011. doi: 10.1787/5kgg52gb9gjd-en.
- [4] Juliana Moreira Rebolho, “Feasibility of Ecodesign Standard IEC 61800-9 A real case study,” Técnico de Lisboa, 2020.
- [5] I. Boldea and S. A. Nasar, *Electric drives*, Third edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017.
- [6] ABB, “The industrial energy efficiency playbook: 10 actions companies can take right now to reduce energy costs and carbon emissions,” Nov. 2022. [Online]. Available: <https://global.abb/topic/ee-playbook/en>
- [7] O. Onwunta and M. Kahn, “Electric drives and energy efficiency: Myriad meanings,” in *2011 Proceedings of the 8th Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy*, Aug. 2011, pp. 105–110. Accessed: May 16, 2025.
- [8] “What is a variable speed drive?,” Drives. Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: <https://new.abb.com/drives/what-is-a-variable-speed-drive>
- [9] “The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition,” *IEEE Std 100-2000*, pp. 1–1362, Dec. 2000, doi: 10.1109/IEEESTD.2000.322230.
- [10] B. G. Lamme, “The story of the induction motor,” *J. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 203–223, Mar. 1921, doi: 10.1109/JoAIEE.1921.6592844.
- [11] MROSupply.com, “Teco-Westinghouse EP0104 AEHH8N MAX-E1 HP: 10 RPM: 1800 FRAME: 215T.” Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: https://www.mrosupply.com/electric-motors/5050262_ep0104_teco-westinghouse/
- [12] ABB, “EC_Titanium_Manual” Accessed: Mar. 04, 2025. [Online]. Available: https://content.greenheck.com/public/DAMProd/Original/10020/EC_Titanium_%20MN448_iom.pdf
- [13] “SIMOTICS GP-VSD4000 Motor type: 1RV4132B IEC LV motor, synchronous Reluctance motor, self-ventilated Super Premium Efficiency Temperature class 155(F) according to 135(B) Aluminum enclosure, IP55 Only - 1FP10141CB221FF4-Z F01+F10+Y53.” Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.parmley-graham.co.uk/1fp1014-1cb22-1ff4-z-f01f10y53#more-description>

- [14] “HPS112-1800-128-460 - LAFERT NA,” 3BG Supply Co. Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.3bgsupply.com/hps112-1800-128-460-lafert-na>
- [15] Abb, “ABB drives in power generation.” Accessed: May 16, 2025. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/510f71dfde31e8c6c1257b0c00551eeb/00_MV_drives_in_power_RevA_2008.pdf
- [16] A. J. M. Cardoso, “Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos,” Escolar. Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: <https://polytechnica.pt/livro/86434>
- [17] M. Barnes, *Practical variable speed drives and power electronics*. in Practical professional books from Elsevier. Oxford; Burlington, MA: Newnes, 2003.
- [18] “ISO/IEC Guide 2:2004(en), Standardization and related activities — General vocabulary.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:guide:2:ed-8:v1:en:sec:1.1>
- [19] C. Leachman, E. M. Rowley, M. Phillips, and D. Solomon, *Teaching and Collecting Technical Standards: A Handbook for Librarians and Educators*. Purdue University Press, 2023.
- [20] IEC and ISO “CAISEMS - project brief.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2020/04/project_brief_caisems_v2.pdf
- [21] “IEC ACCEE 02.” Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/63476>
- [22] “P.Vollet_SEADIEAWorkshopACEE.pdf.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/b5b6b016-999f-4a44-ac53-00044f778352/P.Vollet_SEADIEAWorkshopACEE.pdf
- [23] “ISO - Members,” ISO. Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/about/members>
- [24] “IEC - National Committees.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iec.ch/national-committees>
- [25] “Regulamento - 2019/1781 - PT - EUR-Lex.” Accessed: Feb. 04, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj/por>
- [26] “IEC 61800-9-2:2023.” Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62107>
- [27] A. Kremser, “Calculation and measurement of motor and converter losses according to IEC 61800-9-2 ED2,” *Forsch. Im Ingenieurwesen*, vol. 88, no. 1, p. 45, Dec. 2024, doi: 10.1007/s10010-024-00766-y.

- [28] N. Loukkaanhuhta, “Standardin IEC 61800-9-2 mukaisen laskennan rakennus sekä vaatimusten selvitys.” Accessed: June 02, 2025.
- [29] J. Fong, F. J. T. E. Ferreira, A. M. Silva, and A. T. De Almeida, “IEC61800-9 System Standards as a Tool to Boost the Efficiency of Electric Motor Driven Systems Worldwide,” *Inventions*, vol. 5, no. 2, p. 20, May 2020, doi: 10.3390/inventions5020020.
- [30] “IEC TS 60034-30-2:2016.” Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/30830>
- [31] Z. Zhang, “Design and Experimental Verification of Low Cost Ferrite PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor,” in *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Chicago, IL, USA: IEEE, June 2020, pp. 327–334. doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161455.
- [32] J. Haataja and J. Pyrhönen, “Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor: an Alternative Motor in Variable Speed Drives,” in *Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, F. Parasiliti and P. Bertoldi, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 101–110. doi: 10.1007/978-3-642-55475-9_16.
- [33] P. Niazi, H. A. Toliyat, D.-H. Cheong, and J.-C. Kim, “A Low-Cost and Efficient Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp. 542–550, 2007, doi: 10.1109/TIA.2006.890033.
- [34] G. Pellegrino, T. M. Jahns, N. Bianchi, W. Soong, and F. Cupertino, *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors*. in SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-32202-5.
- [35] J.-H. Lee, Y.-J. Jang, and J.-P. Hong, “Characteristic analysis of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor for high power application,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 10, p. 10Q503, May 2005, doi: 10.1063/1.1851831.
- [36] B. Kerdsup, N. Takorabet, and B. Nahidmobarakeh, “Design of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors with Maximum Efficiency-Power Factor and Torque per Cost,” in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli: IEEE, Sept. 2018, pp. 2465–2471. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506937.
- [37] P. C. Sen, *Principles of electric machines and power electronics*, Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2014.
- [38] W. L. Soong and D. A. Staton, and T. J. Miller, “Design and Modelling of Axially-Laminated Interior Permanent Magnet Motor Drives for Field-Weakening Applications,” 1993.

- [39] L. Balasubramanian, N. A. Bhuiyan, A. Javied, A. A. Fahmy, F. Belblidia, and J. Sienz, "Design and Optimization of Interior Permanent Magnet (IPM) Motor for Electric Vehicle Applications," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 202–209, June 2023, doi: 10.30941/CESTEMS.2023.00021.
- [40] K. Lee, P. Zhai, T. Ruchti, B. Haberkorn, and J. Zhou, "Optimal Energy Efficiency Evaluation in Induction Machines Driven by Adjustable Speed Drives under EN 50598–2 and IEC 61800-9-1 Standards," in *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA: IEEE, Sept. 2018, pp. 829–836. doi: 10.1109/ECCE.2018.8558445.
- [41] N. Bianchi, S. Bolognani, E. Carraro, M. Castiello, and E. Fornasiero, "Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 4762–4769, Nov. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2599850.
- [42] "IEC 60034-2-1:2024." Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/67756>
- [43] H. Kärkkäinen, M. Tiihonen, L. Aarniovuori, D. Liu, M. Niemelä, and J. Ikäheimo, "Direct-on-Line Synchronous Reluctance Motor Loss Segregation with Measurements," in *2024 IEEE 65th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Oct. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/RTUCON62997.2024.10830829.