



**Aplicação da Norma IEC 61800-9-2:2023 a  
Acionamentos Elétricos Baseados em Motores  
Síncronos de Relutância (SynRM)**

**Eduarda Castanheira Meireles**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**  
(2º ciclo de estudos)

Versão Pós-Defesa  
Orientador: Doutor Fernando José Figueiredo Bento

**Covilhã, Janeiro de 2026**



## **Declaração de Integridade**

Eu, Eduarda Castanheira Meireles, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M14064 de/o Engenharia Eletrotécnica e de Computadores 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 referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 28 /01 /2026

Eduarda Castanheira Meireles



# **Dedicatória**

Ao meu pai, por me ter transmitido desde cedo os valores da Engenharia Eletrotécnica e por ser, através do seu exemplo de trabalho, dedicação e resiliência, a maior inspiração no meu percurso acadêmico.

Dedico também esta dissertação aos meus avôs e avós que partiram cedo demais e não tiveram a oportunidade de testemunhar esta conquista. Em especial, à minha avó Rosalette, cuja memória me acompanha todos os dias e cuja ausência é profundamente sentida. Espero que esta realização vos encha de orgulho, onde quer que estejam.



# Agradecimentos

A concretização deste trabalho só foi possível graças ao apoio de várias pessoas, a quem deixo o meu sincero agradecimento.

Quero, em primeiro lugar, agradecer aos meus pais, por me terem sempre proporcionado uma vida estável, tranquila e sem preocupações, garantindo que nunca me faltasse nada. Obrigada, também, por me terem permitido seguir o meu caminho e os meus objetivos, mesmo quando isso implicou estar longe de casa.

Às minhas irmãs, deixo igualmente um profundo agradecimento pelo apoio nesta etapa.

Quero agradecer, de forma muito especial, aos meus sobrinhos Eduardo, Lia e Dinis, por não serem apenas os meus melhores amigos, mas também os melhores sobrinhos que alguém poderia desejar. Apesar da distância e da minha ausência em vários momentos importantes das suas vidas, foram sempre uma fonte de alegria e motivação.

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão ao meu orientador de dissertação de Mestrado, Doutor Fernando José Figueiredo Bento, pela supervisão e orientação. Ao CISE – Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos, agradeço pela disponibilização do espaço de trabalho e dos equipamentos laboratoriais.

Não posso deixar de agradecer aos meus gatos, Mancha, Leão e Tigre, pela companhia silenciosa e reconfortante. Mesmo sem palavras, estiveram sempre presentes, transmitindo-me serenidade nos momentos em que mais precisei.

Aos meus colegas e amigos Joana Figueira, Tomás Mendes, José Rita, Marcus Vinicius e Leonel Duarte, agradeço profundamente pela amizade, apoio incondicional e ajuda ao longo destes dois anos, tornando possível a concretização desta etapa.

Quero ainda agradecer ao Professor Humberto Valente, por me ter acompanhado desde o meu percurso no Colégio até à Faculdade, acreditando sempre em mim e apoiando-me ao longo deste caminho.

À Universidade da Beira Interior, deixo o meu reconhecimento por me ter acolhido tão bem ao longo destes seis anos, permitindo-me crescer não só academicamente, mas também a nível pessoal.

Por fim, quero também agradecer a mim própria, por nunca ter desistido, por encontrar sempre formas de ultrapassar os obstáculos e alcançar os meus objetivos. Este percurso foi exigente, mas sinto um profundo orgulho por ter conseguido chegar até ao fim.

Chega assim ao fim o meu percurso académico, repleto de experiências e aprendizagens. A todos, muito obrigada.



# Resumo

A crescente exigência de eficiência energética no setor industrial tem impulsionado a aplicação de normas internacionais que permitam avaliar e comparar o desempenho de sistemas de acionamento elétrico. Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo aplicar a norma IEC 61800-9-2:2023 a um sistema de acionamento constituído por um motor síncrono de relutância (SynRM) acoplado a um conversor de frequência (VFD), analisando o seu rendimento em diferentes condições operacionais.

Foram realizados ensaios experimentais em várias frequências de saída e em regimes frio e quente, com e sem filtros adicionais, de modo a segregar as perdas no conversor e no motor, calcular o rendimento global do acionamento elétrico e comparar os resultados obtidos através da norma com os obtidos experimentalmente. As tendências observadas confirmam a robustez da metodologia proposta pela norma, evidenciando grande proximidade entre os valores teóricos e os medidos. Ainda assim, a análise permite identificar potenciais melhorias na topologia do conversor, na conceção eletromagnética do motor e na gestão térmica, visando alcançar classes superiores de eficiência, segundo a norma IEC 61800-9-2. Recomenda-se a realização de estudos adicionais em condições industriais reais para consolidar a aplicação da norma e reforçar o papel do SynRM como alternativa eficiente e sustentável aos motores de indução.

## Palavras-chave

IEC 61800-9-2; Eficiência energética; Sistema de acionamento elétrico (PDS); Motor síncrono de relutância (SynRM); Conversor de frequência (VFD); Estabilidade térmica; Rendimento



# Abstract

The growing demand for energy efficiency in the industrial sector has driven the adoption of international standards that allow for the evaluation and comparison of the performance of electric drive systems. In this context, the present dissertation aimed to apply standard IEC 61800-9-2:2023 to an electric drive system consisting of a synchronous reluctance motor (SynRM) coupled with a variable frequency drive (VFD), analyzing its efficiency under different operating conditions.

Experimental tests were carried out at various output frequencies and in both cold and hot regimes, with and without additional output filters, in order to segregate converter and motor losses, calculate the overall efficiency of the Power Drive System (PDS), and compare the results obtained with the standard with those obtained through experimental measurements. The observed trends confirm the robustness of the methodology proposed by the standard, revealing a strong correlation between theoretical and experimental values. Still, potential improvements were discussed regarding converter topology, motor electromagnetic design, and system thermal management, highlighting the possibility of bringing the performance of SynRM motors closer to the higher efficiency classes defined by IEC 61800-9-2. Finally, the dissertation emphasized the relevance of future studies under real industrial operating conditions, in order to consolidate the application of this standard and reinforce the role of synchronous reluctance motors as an efficient and sustainable alternative to induction motors in industrial applications.

## Keywords

IEC 61800-9-2; Energy efficiency; Electric drive system (PDS); Synchronous reluctance motor (SynRM); Variable frequency drive (VFD); Thermal stability; Efficiency



# Índice

Dedicatória .....	v
Agradecimentos.....	vii
Resumo .....	ix
Palavras-chave.....	ix
Abstract.....	xi
Keywords .....	xi
Índice .....	xiii
Lista de Figuras .....	xv
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos e Siglas .....	xix
Lista de Variáveis e Símbolos .....	xxi
Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1 Contextualização .....	3
1.2 Consumo de energia elétrica no setor industrial, presente e tendências.....	4
1.3 Contributo das máquinas elétricas rotativas para o consumo de energia elétrica ao nível industrial.....	5
1.4 Potencial de redução de consumo/custos.....	8
1.5 Impacto global dos sistemas de motores elétricos no consumo energético .....	10
1.7 Importância das políticas públicas e regulamentações .....	10
1.8 Normalização .....	11
Capítulo 2.....	15
O motor síncrono de relutância (SynRM) .....	15
2.1 Características construtivas.....	15
2.2 Princípios de funcionamento .....	17
2.3 Aplicabilidade prática.....	17
2.4 Vantagem comparativamente a outras tecnologias de acionamentos elétricos.....	18
Capítulo 3.....	21
Modelo matemático do acionamento elétrico .....	21
3.1 Modelo Matemático da máquina.....	22
3.2 Modelo Matemático do Variador de Frequência.....	24
3.3 Estimativa de perdas na máquina.....	25
3.4 Estimativa de perdas no variador de frequência.....	26
Capítulo 4.....	29

Descrição da Norma IEC 61800-9-2:2023 .....	29
4.1 O que é? Para que serve? Qual a relevância? .....	29
4.2 Sistemas de Classificação .....	30
4.3 Metodologia de teste .....	30
4.4 Considerações sobre a diferença entre perdas calculadas e medidas, conforme a metodologia sugerida pela IEC 61800-9-2:2023 .....	31
4.5 Discussão sobre as dificuldades práticas de medição de perdas e como a norma propõe lidar com estas .....	32
Capítulo 5 .....	35
5.1 Montagem experimental.....	35
5.2 Metodologia proposta pela norma.....	38
5.3 Estabilização térmica .....	39
Capítulo 6 .....	43
6.1 Resultados obtidos pela norma IEC 61800-9-2:2023.....	43
6.2 Resultados obtidos pela estabilidade térmica .....	49
6.3 Comparação e análise dos resultados .....	52
6.4 Comparação entre rendimento teórico e rendimento real em diferentes condições operacionais.....	58
6.5 Exemplos de melhorias possíveis em sistemas integrados (conversor e motor) utilizando a norma IEC 61800-9-2.....	59
6.6 Limitações de estudo.....	60
Capítulo 7.....	62
Conclusões.....	62
7.1 conclusões gerais.....	62
7.2 Potencial de aplicação da norma em motores SynRM como alternativa mais eficiente para aplicações industriais.....	63
7.3 Recomendações e trabalhos futuros .....	64
7.4 Relevância de estudos adicionais sobre o impacto da norma em aplicações reais de motores SynRM.....	64
7.5 Considerações finais .....	65
Bibliografia .....	66

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Distribuição global do consumo de energia elétrica por setor de atividade (adaptado de IEA, 2023).....	6
Figura 1.2 – Distribuição do consumo de energia elétrica na indústria por tipo de utilização (adaptado de European Commission, 2022). .....	7
Figura 1.3 – Comparação entre um sistema de motor convencional (velocidade fixa) e um sistema com variação de velocidade (VFD).....	9
Figura 2.1 – Geometrias típicas de rotores de motores síncronos de relutância (SynRM): a) pólos salientes; b) anisotropia por laminação axial; c) anisotropia por laminação transversal; d) pólos magneticamente isolados .....	15
Figura 2.2 – Estrutura típica de um motor síncrono de relutância (SynRM), evidenciando o rotor com barreiras de fluxo e o estator trifásico. ....	16
Figura 3.1 - Transformação das grandezas trifásicas (abc) para o referencial síncrono em coordenadas d-q. ....	22
Figura 5.1 – Esquema <u>da montagem experimental elétrico</u> .....	35
Figura 6.1 – Comparação das perdas no conversor de frequência (CDM): IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica. ....	53
Figura 6.2 – Comparação das perdas no motor síncrono de relutância (SynRM): IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica. ....	53
Figura 6.3 – Comparação das perdas globais no sistema PDS: IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica. ....	54
Figura 6.4 – Mapa de rendimento do motor SynRM obtido pela norma IEC 61800-9-2:2023.....	55
Figura 6.5 – Mapa de rendimento do motor SynRM obtido experimentalmente após estabilização térmica. ....	55
Figura 6.6 – Mapa de rendimento do conversor (CDM) obtido pela norma IEC 61800-9-2:2023.....	56
Figura 6.7 – Mapa de rendimento do conversor (CDM) obtido experimentalmente após estabilização térmica. ....	56
Figura 6.8 – Mapa de rendimento global do PDS obtido pela norma IEC 61800-9-2:2023 .....	57
Figura 6.9 – Mapa de rendimento global do PDS obtido experimentalmente após estabilização térmica. ....	57



# Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Classes de eficiência energética IE e IES segundo a norma IEC 61800-9-2:2023. .....	12
Tabela 2.1 – Comparação entre tecnologias de acionamentos elétricos (Indução, SPM, PMSynRM e SynRM). .....	19
Tabela 5.1 – Especificações técnicas do motor síncrono de relutância (SynRM Siemens) .	36
Tabela 5.2 – Pontos de operação do motor (segundo placa de características) .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Tabela 5.3 – Especificações técnicas do conversor de frequência Siemens SINAMICS G120 .....	37
Tabela 5.4 – Conjunto de cenários de ensaio para o funcionamento em vazio. ....	40
Tabela 6.1 – Resultados experimentais na gama de velocidade nominal (54–60 Hz, regime frio e quente, com/sem filtro e redutor/ventilador). ....	46
Tabela 6.2 – Resultados experimentais a velocidade reduzida (6 Hz e 30 Hz, regime frio e quente, com/sem filtro). ....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Tabela 6.3 – Resultados segundo a metodologia normalizada da IEC 61800-9-2:2023. ..	49
Tabela 6.4 – Comparação do desempenho energético do PDS em regime frio e quente. .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Tabela 6.5 – Resultados experimentais após estabilização térmica, em todos os pontos de funcionamento. ....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>



## Lista de Acrónimos e Siglas

ABB	ASEA Brown Boveri
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CDM	Complete Drive Module (Módulo de Acionamento Completo)
CISE	Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
FEM	Finite Element Method (Método dos Elementos Finitos)
FOC	Field Oriented Control (Controlo Orientado pelo Campo)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado – equivalente de AVAC)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transístor Bipolar de Porta Isolada)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IE	International Efficiency (Eficiência Internacional)
IES	International Efficiency of Systems (Eficiência Internacional de Sistemas)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos)
IM	Induction Motor (Motor de Indução)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
IPM	Interior Permanent Magnet (Íman Permanente Interior)
MTPA	Maximum Torque per Ampère (Binário Máximo por Ampère)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Transístor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico)
PDS	Power Drive System (Sistema de Acionamento Elétrico)
PMa-SynRM	Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor (Motor Síncrono de Relutância Assistido por Ímanes Permanentes)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Controlo de Supervisão e Aquisição de Dados)
SPM	Surface Permanent Magnet (Íman Permanente de Superfície)
SynRM	Synchronous Reluctance Motor (Motor Síncrono de Relutância)

TEFC	Totally Enclosed Fan Cooled (Motor Totalmente Fechado com Ventilação Forçada)
TLA	Transversally Laminated Anisotropic (Rotor Anisotrópico por Laminado Transversalmente)
UBI	Universidade da Beira Interior
VFD	Variable Frequency Drive (Conversor de Frequência / Variador de Velocidade)

# Lista de Variáveis e Símbolos

$v_d$	tensão no eixo direto (d)
$v_q$	tensão no eixo em quadratura (q)
$i_d$	corrente no eixo d
$i_q$	corrente no eixo q
$R_s$	resistência do estator (por fase)
$\lambda_d$	fluxo magnético concatenado no eixo d
$\lambda_q$	fluxo magnético concatenado no eixo q
$\frac{d\lambda_d}{dt}$	variação temporal do fluxo no eixo d
$\frac{d\lambda_q}{dt}$	variação temporal do fluxo no eixo q
$\omega_e$	velocidade angular elétrica do referencial síncrono
$L_d$	indutância no eixo direto (d)
$L_q$	indutância no eixo em quadratura (q)
$\frac{di_d}{dt}$	variação temporal da corrente no eixo d
$\frac{di_q}{dt}$	variação temporal da corrente no eixo q
$T_e$	binário eletromagnético desenvolvido pela máquina
$p$	número de pares de polos
$P_{em}$	potência eletromecânica desenvolvida
$w_m$	velocidade angular mecânica do rotor
$P_{in}(t)$	potência elétrica instantânea de entrada no estator
$m_d$	índice de modulação no eixo d
$m_q$	índice de modulação no eixo q
$v_{dc}$	tensão do barramento DC
$C_{dc}$	capacitância do barramento DC
$\frac{dv_{dc}}{dt}$	derivada temporal da tensão do barramento DC
$i_{dc,in}$	corrente de entrada no barramento DC
$i_{dc,out}$	corrente de saída do barramento DC
$t$	tempo

$P_{in,CDM}$	potência elétrica de entrada do conversor
$P_{out,CDM}$	potência elétrica de saída do conversor
$P_{loss,CDM}$	perdas totais no conversor
$I_s$	corrente eficaz do estator
$P_{Fe}$	perdas no ferro
$k_h$	coeficiente de perdas por histerese
$k_e$	coeficiente de perdas por correntes parasitas
$f$	frequência elétrica
$B$	densidade de fluxo magnético
$P_{mec}$	perdas mecânicas
$B_m$	coeficiente de atrito viscoso
$\omega_m$	velocidade angular mecânica
$T_f$	binário de atrito seco
$P_{add}$	perdas adicionais
$P_{out}$	potência mecânica de saída do motor
$P_{loss,motor}$	perdas totais do motor
$\eta_{motor}$	rendimento elétrico da máquina
$P_{cond}$	perdas por condução
$k$	índice do semicondutor
$v_{CE}(sat)$	tensão coletor-emissor em saturação
$I_{sw,k}$	corrente no semicondutor $k$
$P_{sw}$	perdas por comutação
$I_{sw}$	corrente no semicondutor
$t_{on}$	tempo de ligação do semicondutor
$t_{off}$	tempo de inativação do semicondutor
$f_{sw}$	frequência de comutação
$P_{dc}$	perdas no barramento DC
$R_{dc}$	resistência do barramento DC
$I_{dc}$	corrente do barramento DC
$P_{filt}$	perdas nos filtros de saída
$R_{filt}$	resistência do filtro de saída
$P_{cond}$	perdas por condução
$P_{sw}$	perdas por comutação
$P_{aux}$	perdas auxiliares
$\eta_{CDM}$	rendimento do módulo conversor

$P_{out,CDM}$	potência de saída do conversor
$\eta_{PDS}$	rendimento global do acionamento elétrico
$P_{in}$	potência elétrica de entrada do sistema
$P_{Cu}$	perdas no cobre



# Capítulo 1

## Introdução

A crescente preocupação com a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental tem impulsionado o desenvolvimento das tecnologias mais eficientes e normas que assegurem a sua aplicação. Ao longo desta dissertação, a norma IEC 61800-9-2:2023 surge como uma referência essencial para a avaliação do desempenho energético de sistemas de acionamento elétrico. Esta norma estabelece diretrizes específicas para a classificação e medição de rendimento em sistemas que combinam conversores de potência e motores elétricos, promovendo soluções mais sustentáveis e otimizadas. A melhoria da eficiência energética é apoiada por uma seleção sistemática das tecnologias de conversores e sistemas de acionamento mais eficientes na série de normas IEC 61800-9 [1].

Os motores síncronos de relutância (SynRM) destacam-se como uma tecnologia promissora atualmente, competindo diretamente com os motores de indução e os motores síncronos de ímanes permanentes [2]. Estes motores oferecem vantagens significativas, como uma elevada eficiência energética, baixa manutenção e um desempenho competitivo, especialmente quando integrados em acionamentos com controlo eletrónico. Além disso, o seu funcionamento baseado na relutância magnética confere-lhes características mecânicas vantajosas [2]. A ausência de terras raras posiciona-os como uma solução económica e ambientalmente sustentável para diversas aplicações industriais.

Deste modo, a aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 aos motores SynRM assume um papel importante na promoção da eficiência energética em sistemas industriais. Para além de assegurar a conformidade com os mais elevados padrões de desempenho, esta norma permite identificar oportunidades de otimização, potenciando o desempenho dos sistemas analisados [3]. Este facto traduz-se não só na redução dos custos operacionais, como também num impacto ambiental significativamente reduzido, sobretudo pela diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, a integração da norma IEC 61800-9-2:2023 contribui para a modernização e sustentabilidade das operações industriais, alinhando o setor com os objetivos globais de eficiência energética e responsabilidade ambiental.

A crescente preocupação com a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a criação de normas que assegurem a sua correta aplicação e comparabilidade. Este contexto reflete a necessidade global de reduzir o consumo de energia elétrica e as emissões associadas à produção

industrial, incentivando a adoção de soluções mais sustentáveis no domínio dos sistemas de acionamento elétrico.

Entre os esforços internacionais para padronizar a avaliação do desempenho energético destaca-se a série IEC 61800-9, que define metodologias para a determinação e classificação da eficiência energética de sistemas de acionamento elétrico — sistemas esses que integram o motor elétrico e o conversor de potência como elementos indissociáveis. Em particular, a norma IEC 61800-9-2:2023 estabelece as diretrizes de ensaio e cálculo do rendimento global, promovendo a implementação de soluções tecnologicamente otimizadas e ambientalmente responsáveis [1].

Embora a norma IEC 61800-9-2:2023 defina um procedimento normalizado para a determinação e classificação da eficiência energética de PDS a velocidade variável, a sua aplicação prática tem sido restrita a sistemas baseados em motores de indução e motores síncronos de ímãs permanentes, tipologias para as quais existem dados de referência e curvas normalizadas de perdas. No caso dos motores síncronos de relutância (SynRM), a literatura técnica e os estudos experimentais disponíveis são ainda escassos, não existindo validação publicada que confirme a adequação dos métodos de ensaio e dos modelos semi-analíticos definidos pela norma a esta tecnologia. Assim, a presente dissertação surge como um contributo original, procurando avaliar a aplicabilidade e fiabilidade do método normalizado da IEC 61800-9-2:2023 quando aplicado a um sistema de acionamento baseado num SynRM real. Desta forma permite não só verificar a robustez do método e as suas limitações face às particularidades eletromagnéticas do SynRM, mas também identificar eventuais ajustes necessários para uma futura integração explícita desta topologia nas normas internacionais de eficiência energética [1], [2].

Neste enquadramento, os motores síncronos de relutância (SynRM) surgem como uma tecnologia emergente e altamente competitiva face aos motores de indução e aos motores síncronos de ímãs permanentes [2]. Estes motores combinam elevada eficiência energética, baixo custo de manutenção e ausência de terras raras, o que os torna uma alternativa economicamente vantajosa e ecologicamente sustentável para múltiplas aplicações industriais. O seu princípio de funcionamento, baseado na relutância magnética, confere-lhes ainda boas características dinâmicas e construtivas, especialmente quando associados a conversores de frequência (VFD) com controlo vetorial.

O presente trabalho assume um carácter exploratório e contributivo, procurando avaliar a fiabilidade da metodologia normalizada quando aplicada a um acionamento elétrico baseado em SynRM, através da comparação entre os resultados teóricos previstos pela norma e os resultados experimentais obtidos em laboratório. Esta análise visa não só verificar a robustez do método normalizado, mas também identificar oportunidades de

otimização que contribuam para a redução das perdas, melhoria do desempenho e aumento da classe de eficiência energética (IES) de sistemas industriais.

Assim, a presente dissertação insere-se no esforço contínuo de melhoria do desempenho energético e de validação de metodologias normalizadas, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico no domínio dos acionamentos elétricos de velocidade variável e para o cumprimento das metas globais de eficiência energética e sustentabilidade ambiental.

## **1.1 Contextualização**

O setor industrial é um dos maiores responsáveis pelo consumo global de energia elétrica, representando cerca de 42 % dos consumos efetuados. Os acionamentos elétricos, compostos por motores e, em alguns casos, conversores de potência, representam cerca de 70 % do consumo de energia elétrica ao nível industrial [4]. Estes sistemas estão amplamente presentes em aplicações industriais como ventiladores, compressores e sistemas de movimentação de materiais, essenciais para operações contínuas na indústria. Contudo, muitos desses sistemas utilizam terras raras e dispendiosos, o que resulta em elevados custos e um grande impacto ambiental [5], [6]. A crescente pressão para melhorar a eficiência energética e garantir a sustentabilidade tem levado ao desenvolvimento de normas, como a IEC 61800-9-2:2023, que desempenham um papel fundamental na promoção de melhores práticas e na otimização do desempenho energético industrial [7].

A norma IEC 61800-9-2:2023 fornece uma abordagem integrada para avaliar o rendimento dos acionamentos elétricos, considerando não apenas o motor, mas também o conversor e o equipamento acionado, como um produto estendido [7]. Esta metodologia visa melhorar a eficiência energética de forma mais abrangente, ao focar na interação entre os diferentes componentes do sistema. Dentro deste contexto, os motores síncronos de relutância (SynRM) surgem como uma solução promissora, pois oferecem uma eficiência superior em comparação com os motores tradicionais de indução, além de apresentarem menores perdas térmicas e mecânicas [5]. Estes motores, quando combinados com conversores avançados, permitem a otimização do desempenho e a integração de funções de manutenção preditiva e controlo em tempo real. Estudos indicam que a substituição de motores convencionais por SynRM pode reduzir o consumo de energia até 30 %, em várias aplicações industriais [5], [6].

Para além da eficiência energética, os motores SynRM contribuem significativamente para a redução de emissões de carbono, uma vez que são compatíveis com as mais recentes tecnologias de controlo e monitorização. A aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 torna-se, portanto, um instrumento essencial para a adoção de tecnologias mais eficientes, alinhando as indústrias com as metas globais de redução de emissões e sustentabilidade [7].

Contudo, a adoção generalizada de soluções mais eficientes enfrenta obstáculos, como os custos iniciais elevados e a resistência à mudança, especialmente em setores mais conservadores. No entanto, a implementação de regulamentações e políticas públicas de incentivo, como a norma IEC 61800-9-2:2023, tem sido fundamental para superar essas barreiras. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a introdução de tecnologias de motores mais eficientes poderia reduzir o consumo global de eletricidade em até 10 %, evidenciando o potencial transformador dessas inovações para melhorar a eficiência energética a nível global [4], [6].

## **1.2 Consumo de energia elétrica no setor industrial, presente e tendências**

O setor industrial é um dos maiores consumidores de energia elétrica a nível global, representando uma parte significativa do consumo total de eletricidade. Em Portugal, a indústria transformadora foi responsável por cerca de 30 % do consumo total de energia elétrica, destacando-se como um dos principais setores consumidores [8]. À escala mundial, os sistemas de acionamento elétrico, constituídos por motores e conversores de frequência, representam cerca de 45 % do consumo total de eletricidade [10], [16].

Nos últimos anos, o consumo de energia elétrica no setor industrial tem registado variações. Em 2022, verificou-se em Portugal um aumento de 2,3% no consumo de energia final em relação a 2021, com crescimentos mais expressivos nos setores dos serviços (11,3%) e dos transportes (6,3%) [11]. No entanto, a longo prazo, observa-se uma tendência de redução do consumo energético no setor industrial, impulsionada por maiores níveis de eficiência energética e mudanças estruturais na economia, incluindo processos de desindustrialização em determinadas regiões [8], [11].

A transformação do setor elétrico tem sido impulsionada por três pilares fundamentais: digitalização, descentralização e descarbonização. Estes fatores são essenciais para garantir que a energia consumida seja mais sustentável e renovável, em conformidade com as diretrizes do Pacto Verde Europeu e os objetivos de neutralidade carbónica para 2050 [12]. A nível global, têm sido implementadas diversas regulamentações para reduzir o impacto ambiental da indústria, incluindo normas mais rigorosas para a eficiência energética de motores elétricos e variadores de velocidade [13].

Neste contexto, a implementação de normas técnicas e regulamentos de eficiência energética tem desempenhado um papel crucial na redução do consumo de eletricidade no setor industrial. A norma IEC 61800-9-2:2023 surge como uma ferramenta essencial para a otimização dos sistemas de acionamento elétrico, definindo metodologias para a avaliação e melhoria da eficiência energética [14]. A adoção desta norma pode contribuir para

reduções significativas no consumo energético e nas emissões de CO<sub>2</sub>, promovendo uma maior sustentabilidade nos processos industriais [14], [15].

O setor industrial português, à semelhança de outros países europeus, tem adotado estratégias de eficiência energética, impulsionadas pela Diretiva Europeia 2009/125/EC, que estabelece os requisitos mínimos de desempenho energético para produtos e sistemas industriais [13]. A implementação de regulamentações mais exigentes e incentivos à modernização de equipamentos menos eficientes tem possibilitado ganhos substanciais na eficiência energética. Há evidências de que melhorias no rendimento dos motores elétricos, aliadas à adoção de sistemas de controlo inteligente, podem levar a uma redução do consumo energético industrial entre 20% e 30 % [13], [16].

Uma das principais estratégias para melhorar o desempenho dos sistemas de acionamento elétrico passa pela substituição de motores antigos por modelos mais recentes, que apresentam níveis de rendimento superiores e maior eficiência energética. Outra medida fundamental é a introdução de funcionalidades de ajuste de velocidade, através da substituição de motores elétricos convencionais (sem capacidade de variação de velocidade) por acionamentos elétricos de velocidade variável. Estes acionamentos são, geralmente, constituídos por um conjunto “conversor eletrónico de potência + motor elétrico” e permitem adequar a velocidade de funcionamento à carga exigida, reduzindo o consumo energético. Para além destas medidas, podem ainda ser consideradas outras ações complementares, como a manutenção preventiva e a monitorização inteligente, que contribuem para uma operação mais eficiente e sustentável [10], [12], [16].

### **1.3 Contributo das máquinas elétricas rotativas para o consumo de energia elétrica ao nível industrial**

As máquinas elétricas rotativas são componentes fundamentais no setor industrial, não só pela sua abundância, como também pela diversidade de aplicações nas quais são empregues. As máquinas elétricas rotativas representam um elemento essencial nos sistemas industriais, tendo um impacto significativo no consumo energético.

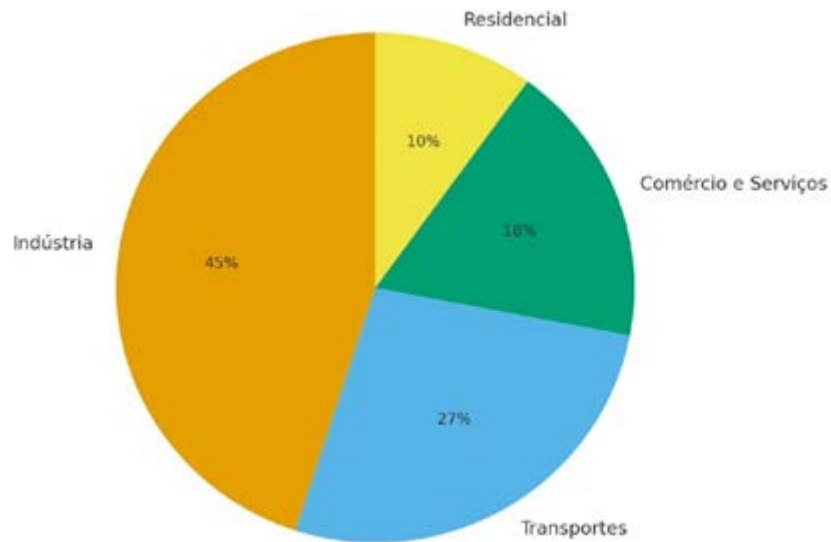


Figura 1.1 – Distribuição global do consumo de energia elétrica por setor de atividade (adaptado de IEA, 2023).

Como se observa na Figura 1.1, o setor industrial destaca-se como o principal consumidor de energia elétrica a nível mundial, representando cerca de 45 % do consumo total. Este facto demonstra a relevância de adotar políticas de eficiência energética direcionadas às atividades industriais, onde os motores elétricos assumem um papel central.

Como visto anteriormente, os motores elétricos representam uma grande percentagem do consumo mundial de eletricidade [17], [23]. Este valor inclui a operação de ventiladores, compressores, bombas e outros equipamentos críticos que dependem de motores rotativos para o seu funcionamento.

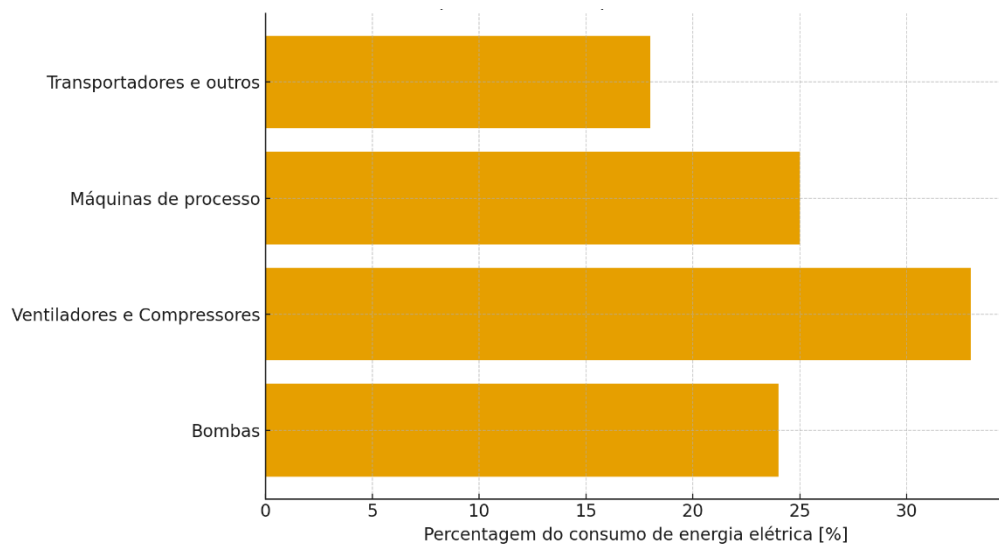


Figura 1.2 – Distribuição do consumo de energia elétrica na indústria por tipo de utilização (adaptado de European Commission, 2022).

A Figura 1.2 evidencia que a maior parte do consumo de eletricidade industrial está associada a equipamentos acionados por motores elétricos, sendo os sistemas de bombagem, ventilação e compressão os principais responsáveis. Esta predominância confirma que as máquinas elétricas rotativas são elementos críticos nas estratégias de eficiência energética e um ponto de intervenção prioritário na redução do consumo global.

Um exemplo prático desta realidade foi identificado numa unidade de produção de papel, onde mais de 60 % da energia consumida foi atribuída ao funcionamento de motores elétricos. A substituição por modelos de elevado rendimento (IE3 e IE4) resultou numa poupança de 18 % no consumo elétrico total da instalação [18].

A nível europeu, aproximadamente metade do consumo de eletricidade é imputável aos motores elétricos industriais, facto que impulsionou a criação de regulamentos específicos de eficiência energética, como o Regulamento (CE) 640/2009 e o Regulamento (UE) 2019/1781 [7]. Estas regulamentações incentivaram a adoção de motores de maior rendimento e abrangeram também os variadores de velocidade, promovendo uma utilização mais racional e otimizada da energia.

Além da escolha de motores eficientes, a manutenção e operação adequadas desempenham um papel determinante na redução das perdas energéticas. Anomalias mecânicas, como desalinhamentos nos acoplamentos de eixos e vibrações excessivas, podem provocar perdas adicionais até 6 % do consumo total do motor [19]. A manutenção preditiva, suportada por sensores e algoritmos de deteção precoce, tem-se revelado essencial para mitigar estes efeitos e garantir uma operação eficiente.

A introdução de variadores de frequência (VFDs) permite ajustar o funcionamento dos motores às condições reais de carga. Em aplicações com carga variável, como sistemas de

bombagem ou ventilação, esta tecnologia pode reduzir o consumo energético em até 30 % [7], [20]. A digitalização industrial e os sistemas de controlo inteligentes contribuem igualmente para a melhoria da eficiência energética. A integração dos motores com redes industriais e sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) possibilita a recolha de dados em tempo real e a aplicação de algoritmos de controlo adaptativo [21], o que representa um avanço significativo face à operação tradicional.

Os programas públicos de incentivo à substituição de motores antigos por modelos mais eficientes têm impulsionado a adoção de tecnologias IE3, IE4 e IE5 em diversos países europeus, incluindo Portugal [22]. Estas iniciativas reforçam o papel das máquinas elétricas rotativas na transição energética e na concretização dos objetivos europeus de eficiência e sustentabilidade. Este enquadramento evidencia ainda a necessidade de recorrer a normas técnicas e metodologias de avaliação harmonizadas, que permitam quantificar o desempenho energético dos sistemas de acionamento de forma comparável e padronizada, contexto no qual se insere a norma IEC 61800-9-2:2023, analisada nos subcapítulos seguintes.

## **1.4 Potencial de redução de consumo/custos**

O setor industrial apresenta um elevado potencial de redução do consumo de energia elétrica e dos custos associados, principalmente através da modernização dos sistemas de motores elétricos e da adoção de tecnologias mais eficientes. Os motores elétricos de baixo rendimento, ainda amplamente utilizados, oferecem uma oportunidade significativa para ganhos de rendimento e para a diminuição da fatura energética industrial [7], [17].

Estima-se que a substituição de motores antigos por motores de elevado rendimento (classes IE3, IE4 ou IE5) pode reduzir o consumo energético em cerca de 20 % a 30 %, dependendo da aplicação e do perfil de carga [7], [18]. Esta substituição é ainda mais eficaz quando combinada com a instalação de variadores de frequência, permitindo o ajuste dinâmico da velocidade e do binário às necessidades reais do processo [20]. Esta abordagem é especialmente vantajosa em sistemas de bombagem, ventilação e compressores, onde as cargas variam significativamente ao longo do tempo.

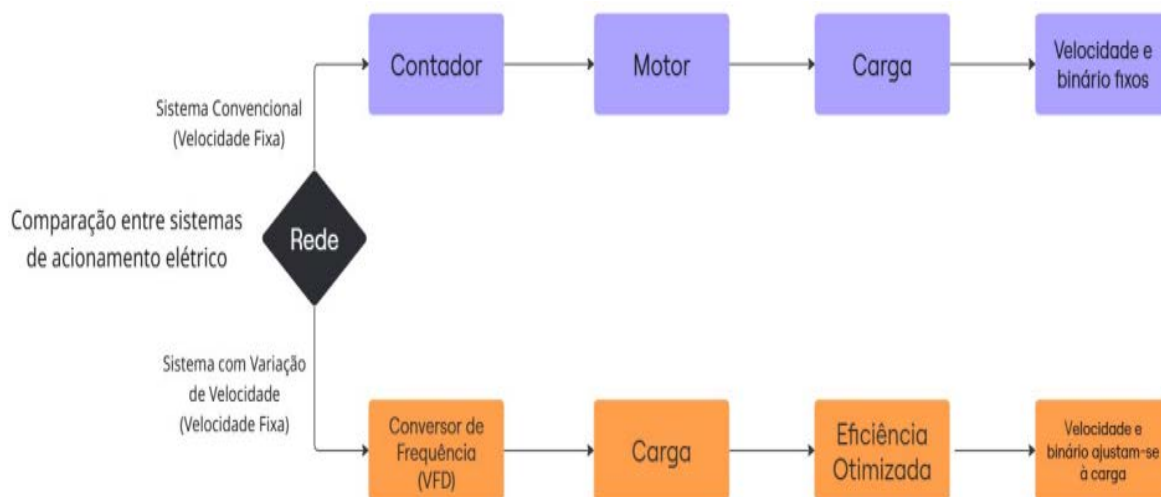


Figura 1.3 – Comparação entre um sistema de motor convencional (velocidade fixa) e um sistema com variação de velocidade (VFD).

A Figura 1.3 ilustra de forma comparativa a diferença entre um sistema convencional, de velocidade fixa, e um sistema equipado com variador de frequência (VFD). No primeiro caso, o motor é alimentado diretamente pela rede, operando a velocidade constante e com perdas significativas em regimes de carga parcial. No segundo, o VFD regula a tensão e a frequência aplicadas ao motor, permitindo ajustar a velocidade e o binário de acordo com as necessidades do processo. Esta flexibilidade traduz-se numa redução substancial do consumo energético e dos custos operacionais, além de um funcionamento mais estável e eficiente.

Adicionalmente, a implementação de programas de manutenção preditiva, suportados por tecnologias de monitorização em tempo real, permite reduzir perdas energéticas associadas a anomalias mecânicas e elétricas [19]. Por exemplo, desalinhamentos ou desequilíbrios podem aumentar o consumo de energia em motores em até 6 % [19]. A correção precoce destas anomalias contribui para a melhoria da eficiência energética e para o prolongamento da vida útil dos equipamentos.

Outro vetor de redução de consumo está relacionado com a digitalização dos processos industriais. Sistemas de controlo inteligentes, associados a plataformas SCADA e à Internet das Coisas (IoT), permitem a otimização dinâmica dos processos, reduzindo desperdícios energéticos e melhorando a gestão de cargas [21].

A integração da norma IEC 61800-9-2:2023 no desenvolvimento de novos sistemas de acionamento elétrico surge como um catalisador adicional para a redução do consumo e dos custos associados [7]. Esta norma promove a seleção de motores e conversores com melhor desempenho energético global, incentivando a substituição de soluções ineficientes.

Desta forma, a redução de consumo e custos no setor industrial depende da combinação de várias estratégias: substituição de motores, utilização de variadores, manutenção

preditiva, digitalização de processos e conformidade com normas de eficiência energética. O aproveitamento destas oportunidades contribuirá para tornar a indústria mais competitiva, reduzindo simultaneamente o impacto ambiental.

### **1.5 Impacto global dos sistemas de motores elétricos no consumo energético**

Os motores elétricos são responsáveis por uma parte significativa do consumo energético mundial, com impacto direto nas emissões de CO<sub>2</sub> [26]. Em Portugal, o setor industrial continua a depender fortemente deste tipo de equipamento, especialmente em setores como a produção de papel e a cerâmica.

Demonstrou-se que, numa instalação fabril portuguesa, os motores elétricos correspondiam a cerca de 70 % do consumo elétrico total, sendo que a substituição por equipamentos de elevado rendimento permitiu reduzir o consumo em mais de 20% [26]. Na indústria cerâmica, os sistemas motrizes chegam a representar até 85 % do consumo total de eletricidade [27].

Assim, os motores elétricos representam não apenas um elemento técnico, mas uma alavanca essencial para a transição energética e redução das emissões de CO<sub>2</sub>, sendo imperativo modernizar o parque instalado com base em critérios de eficiência energética.

### **1.6 Importância das políticas públicas e regulamentações**

A Diretiva Ecodesign 2009/125/CE, complementada pelo Regulamento (UE) 2019/1781, tem sido um instrumento central na promoção da eficiência energética de motores elétricos na União Europeia. Esta legislação estabelece requisitos mínimos de rendimento, incentivando a substituição de equipamentos ineficientes [28].

A aplicação da diretiva em Portugal tem promovido uma transição tecnológica nas empresas, particularmente nas PME, através de incentivos financeiros e programas de auditoria energética [28]. A regulamentação não apenas melhora o desempenho energético dos equipamentos, mas também introduz critérios ambientais que contribuem para a economia circular.

O Plano Nacional Energia e Clima 2030 também reforça estas políticas, estabelecendo metas concretas para a redução do consumo de energia primária no setor industrial português [28].

## 1.7 Normalização

A normalização técnica é um dos pilares fundamentais para garantir a qualidade, a comparabilidade e a eficiência energética dos sistemas de acionamento elétrico. Neste contexto, a norma IEC 61800-9-2:2023 estabelece uma metodologia normalizada para a avaliação do rendimento de sistemas que incluem motores, variadores de frequência e, quando aplicável, a carga acionada, promovendo uma visão integrada do desempenho global do sistema [29].

A norma integra a série IEC 61800-9, que veio substituir abordagens centradas exclusivamente nos motores elétricos (como a norma IEC 60034-30), ao introduzir o conceito de produto estendido (*Extended Product*), onde se avaliam conjuntamente o motor, o módulo do acionamento completo (CDM – *Complete Drive Module*) e, se necessário, a carga acionada [29].

Um dos objetivos centrais desta normalização é garantir a comparabilidade e repetibilidade dos ensaios de desempenho, definindo critérios rigorosos para a medição das perdas em condições padronizadas. Estas perdas são classificadas em três categorias principais: perdas no conversor, perdas no motor e perdas nos componentes auxiliares [29].

A norma estabelece também a utilização de classes de eficiência energética designadas por IES (*International Efficiency of Systems*), que se aplicam ao sistema de acionamento como um todo, em contraste com as classificações anteriores (IE), aplicadas apenas aos motores. Esta classificação, baseada em perfis de carga normalizados e representativos de aplicações industriais reais, permite uma melhor comparação entre tecnologias [29].

Tabela 1.1 – Classes de eficiência energética IE e IES segundo a norma IEC 61800-9-2:2023.

Classificação	Aplicação	Descrição	Referência normativa
IE1	Motor elétrico	Standard efficiency	IEC 60034-30-1
IE2	Motor elétrico	High efficiency	IEC 60034-30-1
IE3	Motor elétrico	Premium efficiency (obrigatório na UE desde 2021)	IEC 60034-30-1 / Regulamento (UE) 2019/1781
IE4	Motor elétrico	Super premium efficiency	IEC 60034-30-1
IE5	Motor elétrico	Ultra premium efficiency	IEC 60034-30-1 (informativo)
IES0	Sistema de acionamento (motor + conversor)	Standard efficiency of system	IEC 61800-9-2
IES1	Sistema de acionamento (motor + conversor)	High efficiency of system	IEC 61800-9-2
IES2	Sistema de acionamento (motor + conversor)	Premium efficiency of system	IEC 61800-9-2

A Tabela 1.1 apresenta as classes de eficiência energética definidas nas normas IEC 60034-30-1 (para motores elétricos) e IEC 61800-9-2 (para sistemas de acionamento). As classes IE abrangem o desempenho individual dos motores, enquanto as classes IES permitem avaliar o rendimento global do sistema, considerando as perdas combinadas do motor e do conversor de frequência.

Esta abordagem sistêmica proposta pela norma IEC 61800-9-2:2023 é essencial para uma avaliação realista da eficiência energética em ambientes industriais, uma vez que reflete o comportamento conjunto dos componentes sob condições de carga reais.

Adicionalmente, a IEC 61800-9-2 está harmonizada com outras normas internacionais, como a IEC 61800-9-1, que define os princípios gerais e terminologia, a IEC 60034-2-3, que trata dos ensaios de motores alimentados por conversores, e a ISO 50001, que estabelece requisitos para sistemas de gestão da energia [29].

A aplicação desta norma permite às empresas industriais selecionar, testar e comparar sistemas de acionamento com base em critérios técnicos uniformizados, promovendo a adoção de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, como os motores síncronos de relutância (SynRM), que se destacam pelo elevado rendimento, robustez e ausência de terras raras [7].

Estudos realizados em Portugal evidenciam que a norma IEC 61800-9-2 facilita a identificação e redução de perdas nos componentes dos sistemas de acionamentos, sendo um instrumento fundamental para o cumprimento das diretivas europeias de Ecodesign e para a melhoria da competitividade industrial [30].



## Capítulo 2

### O motor síncrono de relutância (SynRM)

#### 2.1 Características construtivas

Os motores síncronos de relutância (SynRM) distinguem-se fundamentalmente pela configuração do rotor, que não contém enrolamentos, barras condutoras ou ímãs permanentes. Esta característica permite eliminar perdas por efeito de Joule no rotor, reduzir a inércia mecânica e simplificar o processo de fabrico. O rotor é inteiramente composto por chapas ferromagnéticas laminadas, com canais (barreiras de fluxo) especialmente desenhados para criar anisotropia magnética entre os eixos direto ( $d$ ) e de quadratura ( $q$ ), permitindo a geração de binário eletromagnético através da variação da relutância magnética entre esses dois eixos [31], [32].

A topologia construtiva do SynRM é concebida para maximizar o rácio de saliência, definido como o quociente entre as indutâncias nos eixos  $d$  e  $q$ :  $\frac{L_d}{L_q}$ . Quanto maior for este rácio, maior será o binário gerado para uma corrente estatórica constante.

A utilização de rotor transversalmente laminado (TLA) tem-se mostrado a mais vantajosa em termos de compromisso entre desempenho e facilidade de fabrico [41]. Esta estrutura permite a introdução de múltiplas barreiras de fluxo, geralmente entre três e cinco, como se apresenta na Figura 2.1, otimizando a diferença de relutância entre os eixos  $d$  e  $q$ , conseqüentemente, o binário eletromagnético gerado.

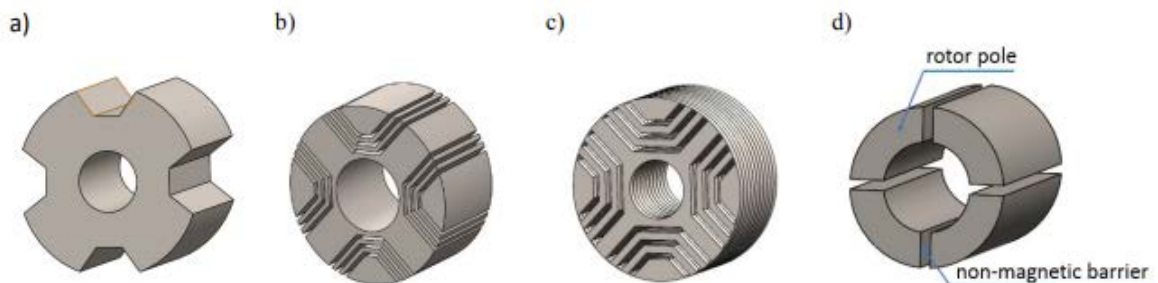


Figura 2.1 – Geometrias típicas de rotores de motores síncronos de relutância (SynRM): a) pólos salientes; b) anisotropia por laminação axial; c) anisotropia por laminação transversal; d) pólos magneticamente isolados

A Figura 2.2 apresenta a estrutura típica de um motor síncrono de relutância, onde se evidencia o estator trifásico convencional e o rotor laminado com barreiras de fluxo, responsáveis pela anisotropia magnética necessária à produção de binário.

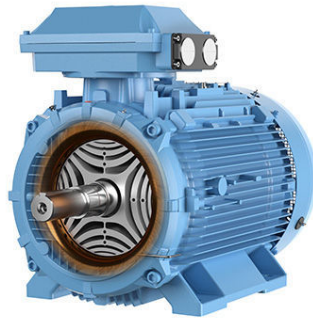


Figura 2.2 – Estrutura típica de um motor síncrono de relutância (SynRM), evidenciando o rotor com barreiras de fluxo e o estator trifásico.

A configuração do rotor influencia diretamente os parâmetros eletromagnéticos do motor. Por exemplo, a posição e largura das barreiras determinam a distribuição do fluxo magnético e a eficácia com que o campo estatórico interage com o rotor. O aumento do número de barreiras de fluxo no rotor contribui para uma melhoria significativa do rácio de saliência e do binário eletromagnético gerado, com impacto direto no desempenho global do motor [42].

O estator dos motores SynRM é, regra geral, idêntico ao dos motores de indução convencionais. Esta compatibilidade facilita a substituição em sistemas industriais já existentes, sem necessidade de reformulação profunda da estrutura mecânica ou do sistema de alimentação elétrica [36]. O enrolamento estatórico é do tipo trifásico distribuído, podendo ser adaptado a diversas aplicações conforme o número de pólos, largura das ranhuras e configuração de fase [42].

Por outro lado, a simplicidade do rotor traduz-se também numa maior robustez mecânica e numa redução dos custos de manutenção. A ausência de ímanes permanentes evita os problemas de desmagnetização em ambientes de temperatura elevada e elimina a dependência de materiais críticos como as terras raras, o que contribui para a sustentabilidade ambiental do produto [40].

O desenvolvimento de motores SynRM beneficia amplamente da utilização de ferramentas de modelação computacional baseadas na análise por elementos finitos (FEM), que permitem otimizar as geometrias rotóricas e prever com elevada exatidão os parâmetros magnéticos e o desempenho térmico e mecânico da máquina [37], [42].

## 2.2 Princípios de funcionamento

O funcionamento dos motores síncronos de relutância (SynRM) baseia-se na tendência natural do fluxo magnético em seguir o caminho de menor relutância. A estrutura do rotor, composta por barreiras de fluxo alternadas com segmentos de ferro, promove uma variação significativa da relutância magnética consoante a posição angular do rotor, permitindo a conversão de energia elétrica em binário de relutância [2].

Este binário é gerado sem a necessidade de ímanes permanentes nem corrente no rotor. A força magnetomotriz (FMM) criada pelo enrolamento estatórico gera um campo magnético rotativo que induz o movimento do rotor na direção da menor relutância. A amplitude do binário é diretamente proporcional à diferença entre as indutâncias nos eixos direto ( $L_d$ ) e de quadratura ( $L_q$ ), tal como expresso na equação clássica do binário de relutância [42].

$$T_e = \frac{3}{2} P^* (L_d - L_q) i_d^* i_q \quad (2.1)$$

O controlo vetorial, nomeadamente o controlo orientado por campo (FOC), é essencial para maximizar o desempenho do SynRM. Esta técnica permite desacoplar o controlo do binário do controlo do fluxo, através da transformação das correntes trifásicas em componentes  $d$ - $q$ , otimizando a produção de binário em tempo real [38]. A implementação prática requer um inversor de frequência e, preferencialmente, um sensor ou estimador de posição rotórica, embora técnicas *sensorless* estejam também em desenvolvimento [2].

Do ponto de vista energético, a ausência de ímanes ou corrente no rotor elimina perdas térmicas associadas ao rotor. Contudo, o fenómeno de acoplamento cruzado pode afetar o desempenho, sobretudo em rotações elevadas. Nestes casos, a componente de corrente segundo o eixo  $q$  influencia o fluxo no eixo  $d$ , podendo causar desmagnetização parcial e reduzir o binário efetivo [42].

Para avaliar estes efeitos e otimizar a geometria do rotor, são frequentemente utilizados modelos de elementos finitos e modelos analíticos adaptados, que permitem prever não apenas o binário médio, mas também as oscilações do binário, perdas no ferro e impacto da saturação magnética nos caminhos do fluxo [42].

## 2.3 Aplicabilidade prática

Os motores SynRM têm vindo a ganhar uma adoção crescente em setores industriais exigentes, como sistemas AVAC, compressores, ventiladores industriais, bombas centrífugas e equipamentos de transporte de materiais. Nestes casos, a exigência de eficiência energética, aliada à robustez e simplicidade de manutenção, torna o SynRM uma opção extremamente competitiva [36], [37].

Segundo dados da ABB e estudos acadêmicos, a substituição de motores de indução IE2 ou IE3 por motores SynRM pode resultar em poupanças de energia superiores a 20% a 30% em cargas parciais [5], [38], [39]. Esta melhoria resulta não apenas do maior rendimento estático do motor, mas também da superior gestão térmica e menores perdas totais do sistema.

A robustez mecânica do rotor, desprovido de componentes ativos, facilita o seu uso em ambientes agressivos, com elevada humidade, poeiras, vibração ou variações de temperatura. A ausência de ímanes permanentes reduz o risco de desmagnetização, sendo por isso recomendados para ambientes onde o controlo da temperatura é crítico ou imprevisível [40].

Adicionalmente, os SynRM são compatíveis com sistemas de manutenção preditiva e plataformas de monitorização remota. A sua integração em ambientes de Indústria 4.0 tem sido demonstrada em diversas instalações piloto, com recurso a sensores de vibração e temperatura e integração com sistemas SCADA [42].

A norma IEC 61800-9-2:2023 reconhece os motores SynRM como parte integrante de sistemas energeticamente eficientes, permitindo classificá-los dentro das classes IES mais elevadas, especialmente quando utilizados em conjunto com CDMs (*Complete Drive Modules*) otimizados [7], [14], [30].

## **2.4 Vantagem comparativamente a outras tecnologias de acionamentos elétricos**

Face aos motores de indução (IM), os motores SynRM apresentam perdas mais reduzidas no rotor, maior rendimento a cargas parciais, menor aquecimento e uma estrutura mais leve. A eliminação da corrente no rotor e das correspondentes perdas por efeito de Joule permite melhorar o desempenho térmico e aumentar a durabilidade, com menores exigências de ventilação forçada [2], [35], [37], [42].

Em comparação com os motores síncronos de ímanes permanentes (SPM), os SynRM evitam o uso de materiais críticos como o neodímio ou o disprósio, reduzindo significativamente o impacto ambiental e os custos de fabrico [40], [41]. Embora os SPM tenham geralmente maior densidade de potência, a sua produção e manutenção são mais dispendiosas e suscetíveis a falhas em ambientes severos.

Os motores PMA-SynRM (*Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motors*) representam uma solução híbrida, combinando um rotor de relutância com ímanes sobre injetados. Oferecem maior densidade de binário e melhor desempenho dinâmico, mas sacrificam a simplicidade e a sustentabilidade do SynRM puro [42]. Neste contexto, os SynRM posicionam-se como uma solução tecnicamente equilibrada, fiável e

ambientalmente favorável para aplicações generalistas e contínuas, como se resume na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Comparação entre tecnologias de acionamentos elétricos (Indução, SPM, PMa-SynRM e SynRM).

	Indução	SPM	PMa-SynRM	SynRM
Necessidade de variador de frequência	Opcional	Sim	Sim	Sim
Classe de eficiência típica (IE)	IE2–IE3	IE4–IE5	IE4–IE5	IE4
Perdas no rotor	Elevadas	Reduzidas	Muito baixas	Nulas
Densidade de potência	Média	Muito elevada	Elevada	Média
Manutenção	Moderada	Complexa	Moderada	Reduzida
Materiais críticos (ímãs)	Não	Sim (Ne, Dy)	Parcial	Não
Custo de manutenção	Médio	Elevado	Médio	Baixo
Desempenho dinâmico	Médio	Muito bom	Bom	Bom
Sustentabilidade ambiental	Média	Baixa (terras raras)	Média	Elevada
Vantagens principais	Robustez, baixo custo	Elevado rendimento e densidade de potência	Compromisso entre densidade e controlo	Sustentabilidade, robustez, simplicidade
Desvantagens principais	Perdas elevadas no rotor	Custo elevado e dependência de ímãs	Complexidade construtiva	Binário específico inferior



# Capítulo 3

## Modelo matemático do acionamento elétrico

Dando continuidade à fundamentação teórica e normativa apresentada nos capítulos anteriores, o presente capítulo dedica-se à formulação do modelo matemático do acionamento elétrico baseado em motor síncrono de relutância (SynRM) alimentado por um variador de frequência. A construção destes modelos é essencial para a compreensão detalhada do comportamento dinâmico e energético do sistema, permitindo uma análise quantitativa das perdas associadas e a subsequente avaliação da eficiência global, conforme exigido pela norma IEC 61800-9-2:2023.

Segundo esta norma, a classificação de desempenho energético de um sistema de acionamento elétrico (PDS) exige a consideração dos seus diferentes componentes, nomeadamente o módulo de acionamento completo (CDM), que integra o variador de frequência e os sistemas de controlo, bem como o motor elétrico e, quando aplicável, o equipamento acionado [34]. Nesse contexto, a norma recomenda que sejam avaliadas separadamente as perdas no motor e no variador, bem como a potência útil entregue, de forma a determinar indicadores como o rendimento total e o nível IES (*International Efficiency of Systems*) associado ao sistema completo [34].

Assim, este capítulo apresenta primeiramente o modelo matemático da máquina SynRM, com base no enquadramento físico e construtivo já discutido no Capítulo 2, nomeadamente nas suas características anisotrópicas e no comportamento dependente das indutâncias segundo os eixos direto e de quadratura. Em seguida, é desenvolvido o modelo representativo do variador de frequência, incluindo as principais componentes responsáveis pelas perdas (conversor de potência, filtro de saída, etc.), de forma a permitir uma estimativa realista do seu impacto no rendimento do acionamento.

Por fim, são apresentadas metodologias para a estimativa teórica das perdas, quer no motor quer no variador, considerando as condições de funcionamento teóricas e os parâmetros de projeto do sistema. Estas estimativas serão cruciais para a posterior validação experimental e comparação com os requisitos da IEC 61800-9-2, já que esta norma pressupõe métodos de cálculo normalizados e a separação clara entre perdas na máquina e no conversor [14].

### 3.1 Modelo Matemático da máquina

O modelo matemático da máquina síncrona de relutância (SynRM) constitui a base para a previsão do seu comportamento dinâmico e energético, sendo essencial para a análise do rendimento do acionamento, conforme os critérios estabelecidos pela norma IEC 61800-9-2 [14]. A caracterização eletromagnética da máquina é frequentemente realizada através da transformação para um referencial síncrono (eixos  $d$ - $q$ ), o que permite simplificar a análise do sistema trifásico e facilitar a implementação de algoritmos de controlo vetorial.

A Figura 3.1 ilustra a transformação das grandezas trifásicas ( $abc$ ) para o referencial síncrono ( $d$ - $q$ ). Esta representação permite converter as três correntes estatóricas em apenas duas componentes ortogonais, associadas aos eixos direto ( $d$ ) e de quadratura ( $q$ ). Através desta transformação, torna-se possível desacoplar o controlo do fluxo e do binário, simplificando a modelação e a síntese de estratégias de controlo.

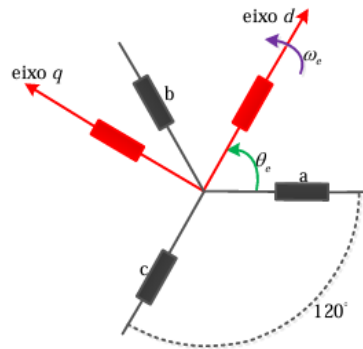


Figura 3.1 - Transformação das grandezas trifásicas ( $abc$ ) para o referencial síncrono em coordenadas  $d$ - $q$ .

Assumindo que a máquina opera em regime simétrico e que os efeitos de saturação, perdas magnéticas e correntes parasitas são inicialmente desprezados, o modelo elétrico nos eixos  $d$ - $q$  é descrito pelas equações diferenciais (3.1) e (3.2):

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q \quad (3.1)$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d \quad (3.2)$$

Se se assumir que não existem acoplamentos cruzados e que o comportamento magnético é linear, os fluxos magnéticos podem ser expressos pelas equações (3.3) e (3.4):

$$\lambda_d = L_d * i_d \quad (3.3)$$

$$\lambda_q = L_q * i_q \quad (3.4)$$

Substituindo (3.3) e (3.4) em (3.1) e (3.2), obtém-se o modelo completo da máquina no domínio d-q, expresso em (3.5) e (3.6):

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e * L_q * i_q \quad (3.5)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e * L_d * i_d \quad (3.6)$$

Estas equações descrevem o comportamento dinâmico da SynRM e constituem a base para os algoritmos de controlo vetorial utilizados em acionamentos modernos [2], [46].

A produção de binário numa máquina síncrona de relutância advém da anisotropia do circuito magnético do rotor, traduzida pela diferença entre as indutâncias nos eixos d e q.

O binário eletromagnético é dado por (3.7):

$$T_e = \frac{3}{2} * p * (L_d - L_q) * i_d i_q \quad (3.7)$$

onde p representa o número de pares de polos. A maximização do binário (3.7) é possível através de estratégias de controlo como o *Maximum Torque per Ampère* (MTPA), que procura o ponto ótimo de operação no plano d-q [42].

Este binário, conjugado com a velocidade mecânica do rotor  $\omega_m$ , permite determinar a potência eletromagnética desenvolvida, expressa em (3.8):

$$P_{em} = T_e * \omega_m \quad (3.8)$$

Finalmente, para efeitos de análise energética, é também relevante a expressão da potência elétrica instantânea de entrada, apresentada em (3.9):

$$P_{in}(t) = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.9)$$

A equação (3.9) é fundamental para a estimativa das perdas no estator. Experimentalmente, as perdas podem ser obtidas pela diferença entre a potência elétrica de entrada e a potência mecânica útil à saída do veio, de acordo com o método de perdas indiretas recomendado pela IEC 61800-9-2.

### 3.2 Modelo Matemático do Variador de Frequência

O variador de frequência constitui o elo fundamental entre a rede elétrica e a máquina síncrona de relutância (SynRM), permitindo ajustar as condições de alimentação às exigências de cada ponto de operação. A sua função principal é converter a tensão alternada da rede numa tensão contínua, através de um retificador, e posteriormente sintetizar uma tensão alternada trifásica com amplitude e frequência variáveis, capaz de controlar a velocidade e o binário do motor [7], [26].

Do ponto de vista estrutural, o variador é geralmente constituído por três blocos principais: o retificador AC/DC, o barramento de corrente contínua e o inversor DC/AC. O retificador é normalmente implementado sob a forma de ponte de diodos ou semicondutores controlados, sendo responsável pela conversão inicial da tensão alternada em contínua. Esta energia é armazenada no barramento DC, composto essencialmente por condensadores de filtragem, que asseguram a estabilidade da tensão contínua. Por fim, o inversor trifásico, geralmente constituído por transístores IGBT ou MOSFET, converte corrente contínua em corrente alternada, controlada por técnicas de modulação como PWM sinusoidal.

No domínio matemático, a tensão de saída do inversor pode ser representada num referencial dq. Considerando um modelo simplificado, em que as tensões de saída do conversor são proporcionais à tensão do barramento DC e ao índice de modulação aplicado, obtêm-se as expressões (3.10) e (3.11):

$$v_d = m_d * \frac{v_{dc}}{2} \quad (3.10)$$

$$v_q = m_q * \frac{v_{dc}}{2} \quad (3.11)$$

onde  $v_d$  e  $v_q$  são as tensões estatóricas nos eixos direto e em quadratura,  $m_d$  e  $m_q$  os índices de modulação correspondentes, e  $v_{dc}$  a tensão do barramento contínuo.

O comportamento dinâmico do barramento é descrito pela equação diferencial (3.12):

$$C_{dc} * \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc,in} - i_{dc,out} \quad (3.12)$$

As perdas que ocorrem no variador distribuem-se por diferentes elementos: condução e comutação dos semicondutores, perdas resistivas nos condutores e cabos, perdas nos filtros de saída e ainda perdas auxiliares ligadas ao sistema de controlo e de refrigeração.

De forma geral, a relação entre a potência de entrada e de saída do variador de frequência pode ser representada por (3.13):

$$P_{in,CDM} = P_{out,CDM} + P_{loss,CDM} \quad (3.13)$$

em que  $P_{in,CDM}$  corresponde à potência elétrica de entrada,  $P_{out,CDM}$  à potência entregue ao motor, e  $P_{loss,CDM}$  ao conjunto das perdas internas.

### 3.3 Estimativa de perdas na máquina

A caracterização das perdas na máquina síncrona de relutância é um passo crucial para a determinação do rendimento global do sistema de acionamento.

As perdas no cobre do estator, resultantes do efeito de Joule, podem ser expressas pela equação (3.14):

$$P_{Cu} = 3 * R_s * I_s^2 \quad (3.14)$$

As perdas no ferro são mais complexas, englobando as perdas por histerese e as devidas a correntes parasitas no núcleo magnético, e podem ser representadas de forma simplificada por (3.15):

$$P_{Fe} = k_h * f * B^2 + k_e * f^2 * B^2 \quad (3.15)$$

As perdas mecânicas estão associadas ao atrito nos rolamentos e à ventilação forçada, podendo ser descritas pela equação (3.16):

$$P_{mec} = B_m * \omega_m^2 + T_f * \omega_m \quad (3.16)$$

Por fim, as perdas adicionais, frequentemente designadas por *stray load losses*, são estimadas por (3.17):

$$P_{add} \approx 0,005 * P_{out} \quad (3.17)$$

O somatório destes contributos conduz às perdas totais da máquina, representadas em (3.18):

$$P_{loss,motor} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{add} \quad (3.18)$$

O rendimento elétrico da máquina pode então ser escrito como (3.19):

$$\eta_{motor} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss,motor}} \quad (3.19)$$

A norma IEC 61800-9-2 estabelece que estes valores devem ser determinados de forma normalizada, distinguindo entre perdas medidas e calculadas, e garantindo consistência entre resultados experimentais e modelos teóricos [7], [26]. Este cálculo segue o método indireto de determinação de perdas definido pela IEC 61800-9-2, que exige distinção entre perdas medidas e calculadas.

Nesta fase, as perdas são apresentadas em termos analíticos, a aguardar validação futura com resultados experimentais.

### 3.4 Estimativa de perdas no variador de frequência

Tal como no motor, também o variador de frequência apresenta diferentes fontes de perdas, cuja magnitude depende da topologia do conversor, da frequência de comutação, da corrente de saída e até das condições térmicas dos semicondutores [7].

As perdas de condução podem ser expressas genericamente pela equação (3.20):

$$P_{cond} = \sum_{k=1}^6 v_{CE}(sat) * I_{sw,k} \quad (3.20)$$

As perdas por comutação podem ser determinadas a partir da energia dissipada nos instantes de transição, conduzindo a (3.21):

$$P_{sw} = \frac{1}{2} * v_{dc} * I_{sw} * (t_{on} + t_{off}) * f_{sw} \quad (3.21)$$

As perdas adicionais incluem as que ocorrem no barramento de corrente contínua, que são descritas em (3.22):

$$P_{dc} = R_{dc} * I_{dc}^2 \quad (3.22)$$

e ainda as perdas resistivas nos filtros de saída, representadas por (3.23):

$$P_{filt} = R_{filt} * I_s^2 \quad (3.23)$$

Além destas, existem ainda as perdas auxiliares de controle e refrigeração, praticamente constantes, que a norma IEC 61800-9-2 recomenda considerar como parcela independente. O balanço global de perdas no conversor pode assim ser representado por (3.24):

$$P_{loss,CDM} = P_{cond} + P_{sw} + P_{dc} + P_{filt} + P_{aux} \quad (3.24)$$

O rendimento do módulo conversor resulta então da relação (3.25):

$$\eta_{CDM} = \frac{P_{out,CDM}}{P_{out,CDM} + P_{loss,CDM}} \quad (3.25)$$

Finalmente, o rendimento global do acionamento elétrico pode ser expresso pela equação (3.26):

$$\eta_{PDS} = \eta_{motor} * \eta_{CDM} \quad (3.26)$$

Este parâmetro é determinante para a determinação da classe de eficiência segundo a IEC 61800-9-2, já que permite atribuir ao conjunto motor-conversor uma classe IES (International Efficiency of Systems). A aplicação desta metodologia assegura uma avaliação consistente e comparável do rendimento de diferentes soluções tecnológicas, constituindo uma ferramenta essencial para fabricantes, projetistas e utilizadores finais [26].



## Capítulo 4

### Descrição da Norma IEC 61800-9-2:2023

#### 4.1 O que é? Para que serve? Qual a relevância?

A norma IEC 61800-9-2:2023 insere-se no conjunto normativo da série IEC 61800, dedicada aos sistemas de acionamento elétrico a velocidade variável, também designados Power Drive Systems (PDS). Esta norma surge como continuidade da anterior EN 50598, desenvolvida no contexto europeu, e estabelece uma abordagem comum para a determinação e classificação da eficiência energética de sistemas compostos por motor, variador de frequência e, quando aplicável, dispositivos de controlo associados. A norma introduz uma abordagem integrada, avaliando em conjunto o motor e o conversor de potência, conforme já referido nos capítulos anteriores.

A norma assegura uma avaliação objetiva e comparável do desempenho energético das diversas soluções tecnológicas. Esta uniformização é fundamental para que fabricantes e utilizadores disponham de uma referência transparente, reduzindo ambiguidades associadas a metodologias díspares. A IEC 61800-9-2 constitui, assim, uma referência técnica fundamental no enquadramento normativo de políticas energéticas internacionais, nomeadamente no contexto da Diretiva Ecodesign europeia, que estabelece requisitos mínimos obrigatórios de rendimento para equipamentos industriais [13], [14].

A relevância da norma manifesta-se tanto no domínio técnico como no enquadramento regulatório. Do ponto de vista técnico, fornece um quadro metodológico normalizado que permite avaliar as perdas específicas de cada componente e, subsequentemente, determinar o rendimento combinado do acionamento. Do ponto de vista regulatório, é utilizada como referência em processos de avaliação de conformidade e certificação, sendo adotada por organismos europeus de normalização e aplicada por fabricantes industriais de referência, como a ABB e a Siemens, no desenvolvimento e validação de soluções de acionamento de elevada eficiência [14], [47]. Esta normalização desempenha, portanto, um papel estratégico no setor industrial, assegurando ganhos de eficiência energética, competitividade económica e contributo direto para a mitigação das emissões de dióxido de carbono [14].

## 4.2 Sistemas de Classificação

Para uniformizar a avaliação do desempenho energético, a IEC 61800-9-2 define o sistema de classes International Efficiency of Systems (IES). Este sistema constitui a extensão natural das classes IE aplicadas a motores isolados, mas introduz uma perspectiva holística em que o motor e o variador são analisados em conjunto. O resultado é a obtenção de um índice de desempenho que reflete o comportamento real em serviço, fornecendo uma métrica transparente para fabricantes, integradores e utilizadores finais [14], [51].

As classes IES estabelecem diferentes patamares de eficiência, desde o nível mínimo IES0, correspondente a uma condição de referência, até níveis mais exigentes como IES1 e IES2, que caracterizam sistemas de elevado rendimento.

A expressão (4.1) permite determinar o rendimento global do sistema de acionamento elétrico, relacionando diretamente as potências de entrada e saída e os rendimentos parciais de cada componente.

$$\eta_{PDS} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \eta_{motor} * \eta_{CDM} \quad (4.1)$$

em que  $P_{out}$  é a potência mecânica no veio do motor,  $P_{in}$  a potência elétrica de entrada no variador,  $\eta_{motor}$  o rendimento do motor e  $\eta_{CDM}$  o rendimento do conversor.

A expressão (4.1) permite determinar o rendimento global do sistema de acionamento elétrico, relacionando diretamente as potências de entrada e saída e os rendimentos parciais de cada componente. Este enquadramento obriga à determinação separada dos rendimentos do motor e do conversor, mas exige que a classificação seja atribuída ao resultado combinado. A norma reforça ainda a necessidade de se realizarem ensaios em diferentes pontos de carga e velocidade, de modo a representar as condições reais de funcionamento de um PDS [14].

Ao introduzir este sistema de classificação, a IEC 61800-9-2 contribui para a criação de um mercado mais transparente e competitivo, em que os utilizadores podem selecionar soluções com base em critérios objetivos de desempenho. Para além disso, esta normalização tem um efeito positivo na inovação tecnológica, incentivando os fabricantes a desenvolver sistemas mais eficientes, capazes de atingir as classes mais elevadas, nomeadamente a IES2, frequentemente associadas a soluções SynRM integradas com conversores de última geração [25], [50].

## 4.3 Metodologia de teste

A determinação do rendimento de um sistema de acionamento pode ser realizada através de metodologias diretas ou indiretas, ambas previstas na IEC 61800-9-2. Nos métodos

diretos, procede-se à medição simultânea da potência elétrica fornecida ao conversor e da potência mecânica desenvolvida no veio do motor. O rendimento é obtido pela razão entre estas duas grandezas, conforme indicado na expressão (4.1).

Nos métodos indiretos, o rendimento é obtido a partir da diferença entre a potência de entrada e a soma das diversas perdas. Neste caso, a norma estabelece a seguinte decomposição, apresentada na expressão (4.2):

$$P_{loss,motor} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{add} + P_{loss,CDM} \quad (4.2)$$

em que  $P_{Cu}$  corresponde às perdas no cobre,  $P_{Fe}$  às perdas no ferro,  $P_{mec}$  às perdas mecânicas,  $P_{add}$  às perdas adicionais e  $P_{conv}$  às perdas no conversor.

A expressão (4.2) permite identificar e quantificar as contribuições de cada tipo de perda, sendo essencial para o cálculo preciso do rendimento global do sistema segundo a IEC 61800-9-2:2023.

A norma estabelece ainda requisitos rigorosos relativamente à instrumentação de ensaio. É obrigatório o recurso a analisadores de potência de classe de precisão 0,2 ou superior, a sensores calibrados de binário e de velocidade e a sistemas de aquisição de dados capazes de garantir sincronização entre grandezas elétricas e mecânicas. Estas exigências são justificadas pelo facto de pequenas imprecisões poderem conduzir a erros significativos no cálculo do rendimento global [14].

Estudos recentes realizados no âmbito da norma indicam que os métodos indiretos, apesar de mais complexos do ponto de vista experimental, tendem a apresentar maior robustez na identificação das diferentes fontes de perda, permitindo uma caracterização mais detalhada do impacto do conversor no rendimento global [52]. Por outro lado, os métodos diretos oferecem resultados mais rápidos, mas exigem condições laboratoriais controladas e são mais sensíveis a erros de medição [48].

Com este enquadramento, a IEC 61800-9-2 assegura que os resultados obtidos em diferentes laboratórios e fabricantes sejam comparáveis e replicáveis, promovendo a credibilidade dos ensaios e a confiança do mercado. A sua aplicação prática contribui, assim, para a transparência na classificação do rendimento dos sistemas de acionamento e para a harmonização internacional das práticas de ensaio [14], [51].

#### **4.4 Considerações sobre a diferença entre perdas calculadas e medidas, conforme a metodologia sugerida pela IEC 61800-9-2:2023**

A determinação das perdas em sistemas de acionamento elétrico pode ser efetuada através de diferentes abordagens, sendo a IEC 61800-9-2:2023 explícita quanto à necessidade de distinguir entre perdas medidas diretamente em ensaios experimentais e perdas obtidas por cálculo ou por modelos normalizados. Esta distinção é fundamental para

assegurar a comparabilidade dos resultados e a fiabilidade da classificação atribuída a um determinado PDS [14], [53].

As perdas medidas correspondem a grandezas que podem ser obtidas de forma experimental, com instrumentação adequada. Entre estas incluem-se, por exemplo, a potência de entrada do conversor, a potência mecânica no veio do motor e, em determinadas situações, as perdas por atrito e ventilação, desde que seja possível a sua separação. Já as perdas calculadas dizem respeito a parcelas cuja determinação direta é complexa ou impraticável, como acontece com as perdas adicionais, as perdas de comutação nos semicondutores de potência ou as perdas no ferro associadas a fenómenos de histerese e correntes parasitas. Nestes casos, a norma prescreve o uso de modelos analíticos ou semi-empíricos devidamente validados [7], [26], [53].

Um exemplo representativo encontra-se na determinação das perdas no ferro, que dependem fortemente da densidade de fluxo e da frequência elétrica. A IEC 61800-9-2 recomenda que estas perdas sejam calculadas a partir de curvas características do material magnético do estator, determinadas em ensaios normalizados segundo a IEC 60404, e posteriormente extrapoladas para as condições reais de funcionamento. De igual modo, as perdas adicionais no cobre, associadas a fenómenos de efeito pelicular e de proximidade em altas frequências, são tipicamente estimadas a partir de coeficientes empíricos. Estas parcelas, embora não sejam medidas diretamente, devem ser sempre incluídas para garantir a conformidade com a metodologia de ensaio [53].

Ao separar as perdas em componentes medidas e calculadas, a norma pretende evitar que cada fabricante adote critérios próprios, que poderiam conduzir a resultados incomparáveis. Esta abordagem promove consistência internacional e aumenta a credibilidade do processo de certificação energética. No entanto, reconhece-se que a incerteza associada às parcelas calculadas pode ser significativa, pelo que a norma estabelece margens de tolerância específicas e exige que as condições de ensaio sejam descritas de forma detalhada nos relatórios de conformidade [29].

#### **4.5 Discussão sobre as dificuldades práticas de medição de perdas e como a norma propõe lidar com estas**

Apesar do rigor normativo estabelecido, a medição prática de perdas em sistemas de acionamento apresenta diversas dificuldades técnicas. Uma das dificuldades mais relevantes reside na necessidade de medir potências elétricas em regimes de elevada distorção harmónica. Os conversores de frequência baseados em eletrónica de potência produzem formas de onda não sinusoidais, com elevado conteúdo harmónico, que exigem analisadores de potência de classe metrológica avançada. Qualquer imprecisão na medição

de corrente ou tensão, sobretudo em altas frequências, pode conduzir a erros significativos na determinação do rendimento global [29], [48].

Outra dificuldade relevante é a determinação das perdas térmicas associadas aos semicondutores de potência. Estas perdas variam de forma não linear com a corrente, a tensão de bloqueio e a temperatura de junção, tornando a sua medição direta impraticável em ensaios convencionais. Por essa razão, a IEC 61800-9-2 prevê que estas perdas sejam obtidas a partir de modelos de comutação validados pelo fabricante dos dispositivos, contribuindo para uma aproximação realista e reproduzível [53].

Também a medição de perdas adicionais no motor apresenta desafios práticos. Estas perdas resultam de fenómenos de dispersão magnética, correntes parasitas e assimetrias construtivas, e não podem ser isoladas experimentalmente de forma simples. A norma prescreve, por isso, a utilização de fatores de correção empíricos baseados em estatísticas de motores equivalentes, assegurando uma contabilização coerente a nível internacional [7], [53].

Para lidar com estas dificuldades, a norma estabelece um conjunto de recomendações que visam reduzir a incerteza global dos ensaios. Entre estas recomendações encontram-se a exigência de estabilidade térmica antes do início das medições, a utilização de instrumentação calibrada e a realização de medições em vários pontos de carga, de modo a caracterizar não apenas o ponto nominal, mas também o comportamento em condições parciais. O objetivo é garantir que os resultados obtidos sejam representativos do funcionamento real do sistema e que possam ser replicados em diferentes contextos laboratoriais [51], [53].

Desta forma, a IEC 61800-9-2 reconhece as limitações práticas da medição experimental, mas fornece soluções normalizadas que permitem a sua superação. Ao conjugar medições diretas com cálculos padronizados, a norma assegura que a classificação de eficiência dos sistemas de acionamento seja simultaneamente e tecnicamente rigorosa e aplicável em contexto industrial. Esta abordagem híbrida justifica a ampla adoção internacional da norma [14], [51], [53].



# Capítulo 5

## 5.1 Montagem experimental

A implementação dos ensaios experimentais obedeceu às diretrizes estabelecidas pela norma IEC 61800-9-2:2023, que define requisitos claros para a caracterização de sistemas de acionamento elétrico a velocidade variável. Os ensaios experimentais foram realizados de modo a permitir a reprodução fiel das condições de operação de um sistema motor-variador, assegurando simultaneamente a possibilidade de medir grandezas elétricas e mecânicas com a precisão exigida, como é apresentado na figura 5.1.

Ao longo deste trabalho, a designação “configuração Standard” refere-se à configuração de referência do sistema de acionamento, constituída pelo motor síncrono de relutância acoplado diretamente ao conversor de frequência, sem filtro de saída, sem redutor ou ventilador adicional e com ventilação nominal, de acordo com a metodologia definida na IEC 61800-9-2:2023.

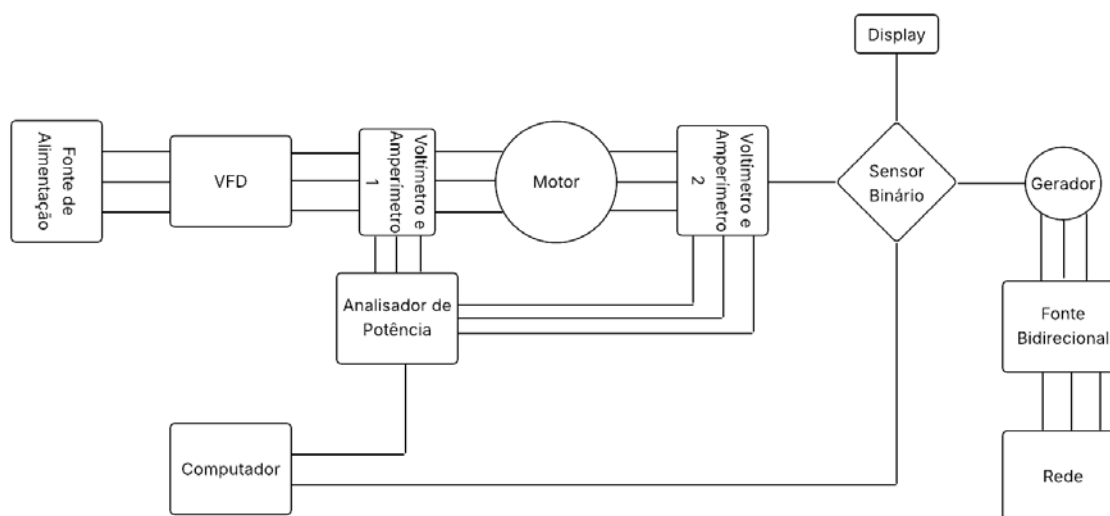


Figura 5.1 – Esquema da montagem experimental.

O elemento central da montagem foi um motor síncrono de relutância (SynRM), escolhido pela sua relevância industrial e pelas vantagens discutidas no Capítulo 2, nomeadamente o elevado rendimento e a ausência de ímanes permanentes [2], [42]. O motor em estudo foi ligado a um gerador, de modo a permitir a variação do binário resistente e a caracterização em diferentes pontos de funcionamento.

O motor foi alimentado por um variador de frequência trifásico do tipo inversor de tensão, baseado em semicondutores IGBT, capaz de fornecer tensão e frequência variáveis.

O controlo vetorial orientado pelo campo (FOC) permite regular separadamente as correntes de magnetização e de binário, explorando as características salientes da SynRM [14]. O equipamento utilizado apresenta ainda dispositivos de proteção e interfaces digitais de controlo, assegurando a conformidade com requisitos de compatibilidade eletromagnética definidos em normas internacionais, como a IEC 61000.

De forma a complementar a descrição da montagem, as Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as especificações técnicas do motor e do conversor utilizados no ensaio, de acordo com as respetivas placas de características.

Tabela 5.1 – Especificações técnicas do motor síncrono de relutância (SynRM Siemens)

Parâmetro	Valor
Fabricante	SIEMENS
Local de fabrico	D-90441 Nürnberg / Made in Czech Rep.
Modelo / código	1RV4132B 1FP10141CB221AK4-Z (UD 2309/9085252-001-001)
Norma de referência	IEC/EN 60034
Tamanho de carcaça	132M
Forma de montagem	IMB3
Grau de proteção	IP55
Classe térmica	180 (H)
Temperatura ambiente admissível	$-20\text{ °C} \leq T_{AMB} \leq 60\text{ °C}$
Massa	65 kg
Rolamentos	DE: 6208-ZC3 · NDE: 6208-ZC3
Observação de aplicação	CONVERTER DUTY ONLY – VPWM SINAMICS (motor destinado a alimentação por variador PWM)
Velocidade mecânica máx.	$N_{max} = 3200\text{ min}^{-1}$
Classe de eficiência (motor)	IE4 (IE-CL)

Tabela 5.2 – Pontos de operação do motor (segundo placa de características)

Tensão / ligação	f (Hz)	I (A)	P (kW)	cosφ	T (Nm)	n (min <sup>-1</sup> )	η (%)
380 V – Y	50	17.1	7.5	0.72	47.5	1500	92.6
440 V – Y	60	16.7	8.6	0.73	45.5	1800	92.4
430 V – Y	60	15.1	7.5	0.72	40.0	1800	92.4
380 V – Δ	87	30.5	13.1	0.70	47.5	2610	93.3

O acionamento foi assegurado por um variador de frequência Siemens SINAMICS G120, selecionado de modo a garantir total compatibilidade com o motor, assegurando controle vetorial de corrente e elevada precisão de regulação. As principais características do conversor são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Especificações técnicas do conversor de frequência Siemens SINAMICS G120

Parâmetro	Valor
Fabricante	SIEMENS
Série	SINAMICS G120 (Converter Duty)
Tensão de alimentação	3 × 400 V ±10 %
Frequência de entrada	50/60 Hz
Potência nominal	7.5 kW
Corrente nominal	16 A
Frequência de saída	0–650 Hz
Tensão de saída	0–400 V (PWM modulada)
Tipo de controle	V/f, vetorial e FOC (Field Oriented Control)
Grau de proteção	IP20
Interface de comunicação	PROFINET / USS / Modbus RTU (conforme módulo)
Refrigeração	Forçada por ventilador
Filtros EMC / Harmônicos	Incorporados (Classe A segundo EN 61800-3)
Compatibilidade normativa	IEC 61800-9-2 / IEC 61800-3 / IEC 60034-2-3

Foi utilizado um analisador de potência trifásico Yokogawa WT1800, adequado à medição de sinais com distorção harmônica significativa [29]. O sensor de binário e de velocidade Magtrol TMB 310 permitiu determinar, em tempo real, a potência mecânica desenvolvida. A sincronização entre medições elétricas e mecânicas foi garantida por um sistema de aquisição de dados com elevada taxa de amostragem, configurado para reduzir o erro associado ao desfasamento temporal entre os sinais.

Esta configuração assegurou o cumprimento dos requisitos de precisão impostos pela norma IEC 61800-9-2:2023, garantindo medições fiáveis para posterior cálculo da eficiência global do sistema PDS.

## **5.2 Metodologia proposta pela norma**

A execução dos ensaios foi estruturada em conformidade com a IEC 61800-9-2:2023, que define metodologias diretas e indiretas para a determinação do rendimento de sistemas de acionamento. Tal como discutido no Capítulo 4, o rendimento global é expresso pela relação entre a potência mecânica útil no veio do motor e a potência elétrica absorvida na entrada do conversor, sendo este o indicador que permite a atribuição da classe de eficiência IES [14].

Nos ensaios diretos, mede-se simultaneamente a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída, determinando-se o rendimento pela sua razão. Este método requer analisadores de potência de elevada precisão e condições de equilíbrio térmico [24], [53].

Nos ensaios indiretos, o rendimento é calculado a partir das perdas totais, cobre, ferro, mecânicas, adicionais e do conversor [7], [26], determinadas por medição direta ou por modelos analíticos validados. A norma prevê que algumas destas perdas sejam medidas diretamente, enquanto outras devam ser obtidas por modelos analíticos ou empíricos validados. Este procedimento híbrido garante que as dificuldades práticas da medição direta, como as perdas por comutação nos semicondutores ou as perdas adicionais no cobre, não prejudiquem a fiabilidade global do resultado [29], [53].

A IEC 61800-9-2 especifica que os ensaios devem abranger não apenas o ponto nominal, mas também diferentes condições de carga parcial. Tal requisito deve-se ao facto de muitos sistemas industriais, como bombas e ventiladores, operarem durante grande parte do tempo em regime inferior ao nominal. A caracterização em diferentes pontos permite obter uma curva de rendimento mais representativa, em vez de um valor único.

Além disso, a norma recomenda a realização de ensaios em regimes transitórios, assegurando que o comportamento dinâmico do sistema também seja contemplado [51], [53].

Outro aspeto central da metodologia é a consideração da incerteza associada à medição. A norma estabelece margens de tolerância e recomenda que cada ensaio seja documentado com a incerteza associada a cada grandeza medida. Estudos recentes mostram que pequenas variações na medição de correntes de alta frequência ou na determinação da velocidade podem introduzir desvios significativos no rendimento calculado, reforçando a importância de utilizar instrumentação calibrada e adequada [29], [47].

Assim, a metodologia experimental a aplicar neste trabalho será organizada em três fases principais:

- i) Caracterização do motor e do conversor em vazio, para registo das perdas básicas e calibração da instrumentação;
- ii) Ensaios experimentais em carga, realizados segundo duas abordagens complementares:
  - a) o procedimento estabelecido pela norma IEC 61800-9-2:2023, em que os pontos de funcionamento são adquiridos sequencialmente (um após o outro), significando que apenas o primeiro ponto se encontra termicamente estabilizado, enquanto os restantes são registados sob condições transitórias de aquecimento do conjunto motor–conversor;
  - b) o procedimento é baseado na estabilização térmica, em que o sistema é mantido em funcionamento até atingir o regime térmico estacionário em cada ponto de operação. Embora mais morosa, esta metodologia permite obter resultados mais fidedignos e representativos do comportamento real do sistema PDS, sendo por isso considerada a referência na análise comparativa de rendimento.
- iii) Comparação entre os resultados obtidos pelos métodos direto e indireto, de forma a cumprir integralmente os requisitos normativos e a proporcionar uma análise detalhada do rendimento global do sistema.

### **5.3 Estabilização térmica**

A estabilização térmica é essencial para a caracterização do desempenho energético de sistemas de acionamento, uma vez que a temperatura afeta as perdas internas e o comportamento magnético. Por este motivo, a norma IEC 60034-2-1 [32], [33] estabelece que os ensaios de perdas e de rendimento de máquinas rotativas devem ser realizados apenas em regime estacionário.

De forma complementar, a norma IEC 61800-9-2 [14] define os métodos de avaliação do rendimento em sistemas de acionamento elétrico (PDS), impondo igualmente que os indicadores de desempenho energético sejam determinados em condições de equilíbrio térmico, garantindo a comparabilidade entre diferentes laboratórios e instalações.

A necessidade de regime estacionário é também reforçada por outras normas internacionais, como a IEEE Std 112-2017 [29], que recomenda que todos os ensaios de rendimento em motores polifásicos sejam efetuados após a estabilização térmica.

A literatura técnica confirma a existência de uma relação direta entre a temperatura de funcionamento e as perdas internas das máquinas elétricas, demonstrando que estas não se

limitam às perdas no cobre do estator, mas incluem igualmente perdas no ferro e perdas adicionais, todas fortemente influenciadas pelo estado térmico do sistema [55].

Nos ensaios realizados com o motor síncrono de relutância (SynRM), foi assegurado que o sistema atingia o regime estacionário antes da determinação das potências e dos rendimentos. Considerou-se que o regime estacionário era alcançado quando as grandezas elétricas medidas (corrente, tensão e potência) e a temperatura monitorizada apresentavam variações inferiores a um limiar previamente definido durante um intervalo de tempo suficientemente prolongado, garantindo assim estabilidade térmica e operacional.

De acordo com a metodologia prescrita pela norma IEC 61800-9-2, procedeu-se inicialmente à caracterização em vazio do sistema, com o objetivo de quantificar as perdas de base associadas ao conversor de frequência e ao motor. Estes ensaios foram realizados tanto a frio como a quente, permitindo avaliar a influência da temperatura no comportamento energético dos componentes. Foram ainda consideradas diferentes configurações de ensaio, nomeadamente a operação com e sem filtro de saída e em regime de ventilação reduzida, de forma a analisar o impacto destes fatores nas perdas totais do sistema.

Os valores apresentados correspondem a resultados médios obtidos após estabilização das condições de funcionamento, encontrando-se resumidos na Tabela 5.4. Nesta tabela são comparadas as potências medidas em cada componente do sistema e o respetivo rendimento do conversor, permitindo uma análise consistente e comparável do desempenho energético nas diferentes condições de ensaio.

Tabela 5.4 – Conjunto de cenários de ensaio para o funcionamento em vazio.

Condição	Tipo	Red/Vent	$f_{out}$ [Hz]	$P_{in}$ VFD [W]	$P_{out}$ VFD [W]	$\eta_{VFD}$ [%]
Frio	Com filtro	—	6	142,64	140,29	98,35
Frio	Com filtro	—	30	317,38	312,13	98,35
Frio	Com filtro	—	54	495,82	487,93	98,41
Frio	Com filtro	—	60	544,22	534,78	98,26
Quente	Com filtro	—	6	142,84	140,47	98,34
Quente	Com filtro	—	30	318,95	313,59	98,32
Quente	Com filtro	—	54	496,51	488,27	98,34

Da análise da Tabela 5.4, observa-se que o rendimento do conversor ( $\eta_{\text{VFD}}$ ) se mantém elevado em todos os cenários, com valores compreendidos entre 98,2 % e 98,5 %, confirmando a reduzida influência térmica sobre o desempenho do VFD.

A variação entre condições frias e quentes é mínima, validando a repetibilidade dos ensaios e demonstrando que o aquecimento do conversor e do motor não introduz desvios significativos nas medições elétricas. Em contrapartida, verifica-se que a introdução de filtro de saída e a operação em regime de ventilação reduzida (heat) provocam ligeiro acréscimo nas perdas do sistema, o que está em conformidade com a literatura [42], [55].

Após a caracterização em vazio, realizaram-se os ensaios em carga, que visaram avaliar o comportamento do sistema para diferentes combinações de binário e velocidade. Estes ensaios foram conduzidos em duas fases distintas:

- (i) uma fase de estabilização térmica, destinada a observar a evolução das perdas e da eficiência com o aumento gradual da temperatura, e
- (ii) uma fase de verificação da norma IEC 61800-9-2, na qual se determinaram as potências e rendimentos em pontos de funcionamento representativos (25 %, 50 % e 100 % de carga).



## Capítulo 6

O presente capítulo dedica-se à apresentação e análise dos resultados obtidos na avaliação do desempenho energético do sistema de acionamento em estudo, constituído por um motor síncrono de relutância (SynRM) alimentado por um conversor de frequência (VFD). Esta etapa representa a integração final entre a fundamentação teórica e normativa discutida nos capítulos anteriores e os ensaios experimentais realizados na bancada laboratorial, nos quais foi assegurado o regime estacionário e a estabilidade térmica do sistema.

Com base nos resultados experimentais do capítulo anterior, procede-se à aplicação prática da metodologia definida pela norma IEC 61800-9-2:2023, utilizando os dados obtidos nos ensaios em carga e de estabilização térmica para determinar o rendimento global do sistema de acionamento ( $\eta_{PDS}$ ). Nesta norma, o conceito de estabilidade térmica não se limita a distinguir condições “frias” e “quentes”, mas refere-se à ausência de variações relevantes de temperatura ao longo do tempo, condição necessária para garantir medições fiáveis e comparáveis entre diferentes laboratórios.

A análise apresentada neste capítulo tem como principal objetivo avaliar o rendimento do sistema segundo o procedimento normalizado, quantificando as perdas em cada componente (motor, conversor, filtro e ventilação) e atribuindo-lhe uma classe de eficiência IES. Adicionalmente, são discutidos os efeitos da estabilidade térmica no desempenho global, comparando-se os rendimentos teóricos previstos pela norma com os valores reais medidos experimentalmente em diferentes pontos de carga.

Por último, são discutidas as implicações práticas dos resultados obtidos, destacando-se estratégias de melhoria no sistema integrado, como a otimização do acoplamento motor–conversor, a seleção adequada de filtros de saída e o aperfeiçoamento da gestão térmica, que podem reduzir as perdas e aumentar o rendimento em funcionamento contínuo. Estas propostas são enquadradas na filosofia da norma, que incentiva a avaliação conjunta do motor e do conversor como uma unidade funcional, promovendo soluções tecnológicas capazes de atingir níveis superiores de eficiência, como os associados às classes IES1 e IES2 [25], [48].

### 6.1 Resultados obtidos pela norma IEC 61800-9-2:2023

A aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 ao sistema de acionamento síncrono de relutância (SynRM) permite determinar as perdas de cada componente, o rendimento

global e a respetiva classe de eficiência IES, em conformidade com a Diretiva Ecodesign [13], [14], [49].

Conforme apresentado no Capítulo 5, os ensaios experimentais foram realizados utilizando instrumentação de elevada precisão, incluindo um analisador de potência de precisão e sensores de binário e velocidade montados no veio do motor. Esta configuração assegura que as medições respeitam os critérios definidos pela norma, particularmente no que diz respeito à sincronização entre grandezas elétricas e mecânicas [24], [53].

A obtenção dos resultados em regime de equilíbrio térmico, condição expressamente prevista pela norma, foi garantida através da monitorização contínua da temperatura do motor e do conversor ao longo dos ensaios. A estabilização térmica foi avaliada com base na observação da estabilização das grandezas térmicas e elétricas medidas, conforme recomendado pela IEC 61800-9-2:2023. O regime estacionário térmico foi considerado atingido quando as variações de temperatura se tornaram desprezáveis ao longo do tempo, permitindo a realização de medições fiáveis e reproduzíveis.

De acordo com a metodologia estabelecida, o rendimento global do PDS é expresso pela razão entre a potência mecânica útil disponível no veio do motor e a potência elétrica na entrada do conversor, conforme apresentado na expressão (6.1):

$$\eta_{PDS} = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \quad (6.1)$$

em que  $P_{out}$  corresponde à potência mecânica no veio e  $P_{in}$  à potência elétrica absorvida pelo VFD. Para além disso, a norma impõe a determinação separada dos rendimentos do motor ( $\eta_{Motor}$ ) e do conversor ( $\eta_{VFD}$ ), o que requer a avaliação explícita das perdas associadas a cada componente. Assim, o rendimento do motor resulta da relação entre a potência mecânica no veio e a potência elétrica fornecida pelo conversor à máquina, enquanto o rendimento do conversor é dado pela razão entre a potência elétrica de saída e a potência elétrica de entrada no VFD [18], [14].

Nos ensaios realizados, foram recolhidos dados experimentais para diferentes frequências de saída do conversor (6, 30, 50, 54 e 60 Hz) e níveis de binário de carga (aproximadamente 9.9 Nm, 19.8 Nm e 39.8 Nm), de modo a abranger diferentes níveis de carga do sistema, desde regimes parciais até pontos próximos da operação nominal. Importa salientar que, de acordo com a norma IEC 61800-9-2:2023, o nível de carga não é determinado exclusivamente pela velocidade de rotação, mas resulta simultaneamente da combinação entre a velocidade e o binário aplicado, uma vez que ambos definem a potência mecânica do motor.

Adicionalmente, foram analisados cenários de operação com e sem filtro de saída, permitindo avaliar a influência desta configuração na qualidade da energia elétrica e no rendimento global do sistema.

As tabelas de resultados que se apresentam em seguida organizam as grandezas principais para cada ponto de ensaio, incluindo a potência elétrica de entrada, a potência mecânica de saída, as perdas no motor e no conversor e os rendimentos parciais e globais. Esta estrutura segue diretamente a recomendação da IEC 61800-9-2:2023 e assegura uma análise detalhada e transparente. A título exemplificativo, são evidenciadas as diferenças de comportamento entre os ensaios a baixa velocidade (6 Hz), caracterizados por uma forte penalização do rendimento devido ao peso relativo das perdas no conversor, e os ensaios próximos da frequência nominal (50–60 Hz), em que o sistema atinge os valores mais elevados de rendimento, aproximando-se das classes superiores de desempenho energético previstas pela norma [19], [48].

Os resultados obtidos permitem ainda inferir sobre a robustez do SynRM como solução de acionamento eficiente, demonstrando que, quando operado em conjunto com um VFD, pode atingir níveis de desempenho comparáveis ou superiores aos reportados para motores de indução equivalentes, especialmente em regimes de funcionamento contínuo.

Contudo, as discrepâncias observadas entre os diferentes pontos de operação e entre condições de estabilização térmica ou não estabilização ilustram a importância de uma caracterização detalhada, conforme previsto pela norma, para que se possam identificar as limitações do sistema e propor melhorias.

De acordo com a metodologia descrita anteriormente, procedeu-se à determinação das potências de entrada no conversor, de entrada no motor e da potência mecânica no veio, de forma a quantificar separadamente as perdas no VFD, no motor e no sistema integrado. Este procedimento segue as recomendações da norma IEC 61800-9-2:2023, permitindo obter uma caracterização normalizada do rendimento do sistema de acionamento em estudo [7].

Os resultados obtidos para condições de funcionamento em vazio encontram-se organizados em duas tabelas. A Tabela 6.1 apresenta os valores correspondentes às condições de funcionamento próximas da gama nominal (54 e 60 Hz), enquanto a Tabela 6.2 reúne os resultados para condições fora da velocidade nominal (6 Hz e 30 Hz). Os dados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2 correspondem ao funcionamento em vazio (binário = 0 N·m), conforme previsto pela norma IEC 61800-9-2:2023. O objetivo destes ensaios é desagregar as perdas nos diferentes componentes do sistema (motor, conversor e elementos mecânicos). Nesta Tabela 6.1, a designação “Standard” corresponde à configuração de referência do sistema, sem filtro de saída e com ventilação nominal. Importa referir que, em alguns ensaios, foram introduzidos elementos mecânicos auxiliares,

nomeadamente um redutor e um ventilador acoplados, com o objetivo de simular perdas adicionais de natureza mecânica. A interpretação do impacto destes elementos no rendimento do sistema é discutida mais adiante nesta secção.

Tabela 6.1 – Resultados experimentais na gama de velocidade nominal (54–60 Hz, regime frio e quente, com/sem filtro e redutor/ventilador).

$f_{out}$ [Hz]	Estado	Configuração	$P_{in}$ [kW]	$P_{out}$ [kW]	$P_{VFD}$ [kW]	$P_{Motor}$ [kW]	$\eta_{VFD}$ [%]	$\eta_{Motor}$ [%]	$\eta_{PDS}$ [%]
54	Frio	Standard	0,392	0,001	0,216	0,174	44,78	0,68	0,3
54	Frio	Sem filtro	0,374	0,001	0,208	0,165	44,41	0,72	0,32
54	Quente	Standard	0,359	0,001	0,201	0,157	43,98	0,77	0,34
54	Quente	Com redutor e ventilador acoplados	0,354	0,001	0,199	0,153	43,74	0,77	0,34
60	Frio	Standard	0,418	0,001	0,228	0,188	45,32	0,71	0,32
60	Frio	Sem filtro	0,4	0,001	0,22	0,178	44,89	0,78	0,35
60	Quente	Standard	0,382	0,001	0,212	0,168	44,45	0,85	0,38
60	Quente	Com redutor e ventilador acoplados	0,375	0,001	0,21	0,164	44,05	0,85	0,37

Valores residuais muito reduzidos de potência mecânica, da ordem dos 0,001 kW, resultam do limite de resolução do sistema de medição e de perdas mecânicas residuais, sendo considerados desprezáveis para efeitos de análise do rendimento global. Importa salientar que a presença de elementos mecânicos adicionais, como redutor e ventilador, não influencia o rendimento do VFD, afetando apenas o rendimento global do sistema de acionamento.

Tabela 6.2 – Resultados experimentais a velocidade reduzida (6 Hz e 30 Hz, regime frio e quente, com/sem filtro).

$f_{out}$ [Hz]	Estado	Configuração	$P_{in}$ [kW]	$P_{out}$ [kW]	Perdas VFD [kW]	Perdas Motor [kW]	$\eta_{VFD}$ [%]	$\eta_{Motor}$ [%]	$\eta_{PDS}$ [%]
6	Frio	Standard	0,377	0,001	0,256	0,121	32,24	0,95	0,3
6	Frio	Sem filtro	0,377	0,001	0,256	0,12	32,15	0,93	0,3
6	Quente	Standard	0,378	0,001	0,256	0,12	32,12	0,94	0,3
6	Quente	Com redutor e ventilador acoplados	0,381	0,001	0,259	0,121	32,07	0,96	0,31
30	Frio	Standard	0,285	0,001	0,172	0,112	39,74	1,03	0,41
30	Frio	Sem filtro	0,278	0,001	0,168	0,108	39,41	1,11	0,44
30	Quente	Standard	0,268	0,001	0,165	0,102	38,49	1,2	0,46
30	Quente	Com redutor e ventilador acoplados	0,268	0,001	0,165	0,102	38,42	1,22	0,47

Os resultados apresentados confirmam que, em todas as condições de ensaio, a potência elétrica de entrada no conversor foi da ordem das centenas de watts, enquanto a potência mecânica pode ser considerada desprezável. Este desfasamento explica os valores extremamente reduzidos de rendimento global, que se mantiveram sempre abaixo de 0,5%. O rendimento do conversor situou-se em torno dos 32 a 45%, dependendo da frequência de saída, enquanto o rendimento do motor raramente excedeu 1%. Estes valores, embora muito baixos em termos absolutos, são coerentes com o comportamento típico em ensaios em vazio, cujo objetivo principal é desagregar as perdas nos diferentes componentes como o cobre, ferro e eletrónica de potência, que se tornam dominantes face à potência útil, inexistente nesta condição [38], [45].

A comparação entre estados frio e quente evidencia que o aquecimento do motor e do conversor tem impacto reduzido sobre os rendimentos. As diferenças registadas situam-se em décimas ou centésimas de ponto percentual, o que mostra que, em condições de carga extremamente baixa, o aumento da resistência dos enrolamentos e das perdas adicionais por efeito de temperatura não chega a alterar de forma significativa o balanço energético. Este resultado está em linha com a literatura, que refere que os efeitos térmicos são mais relevantes em funcionamento próximo da carga nominal, quando a potência útil no veio é elevada [42].

Relativamente ao uso de filtro de saída, os resultados confirmam que a sua presença implica um ligeiro acréscimo nas perdas do conversor, mas sem repercussões significativas no valor global do rendimento do PDS. A principal vantagem do filtro não se reflete diretamente no rendimento, mas sim na redução de distorção harmónica e na proteção dos enrolamentos do motor, aspetos que também são contemplados pela IEC 61800-9-2 como critérios de avaliação complementares ao rendimento [7]. No caso da configuração com redutor e ventilador acoplados, importa esclarecer que estes componentes não representam uma carga útil, mas foram utilizados como elementos mecânicos auxiliares para simular perdas adicionais de natureza inercial e aerodinâmica. O redutor corresponde a um acoplamento com relação de transmissão fixa, que introduz perdas por atrito e resistência à rotação, enquanto o ventilador assegura a ventilação forçada do conjunto, acrescentando perdas por arrasto. Assim, as variações de rendimento observadas são essencialmente de origem mecânica e não decorrem de alterações no comportamento elétrico do sistema.

No que respeita às condições fora do nominal, a 6 Hz observou-se uma degradação acentuada do rendimento, com  $\eta_{VFD}$  em torno de 32 % e  $\eta_{Motor}$  abaixo de 1%, resultando num rendimento global de apenas 0,30%. Estes resultados ilustram a inadequação do funcionamento prolongado em baixas velocidades para motores síncronos de relutância, já apontada por outros autores [45]. Em contrapartida, a 30 Hz, correspondente a uma situação de carga parcial, os rendimentos melhoraram ligeiramente:  $\eta_{VFD}$  aproximou-se de 39%,  $\eta_{Motor}$  atingiu cerca de 1,2% e  $\eta_{PDS}$  subiu para valores entre 0,41% e 0,47%. Ainda que estes resultados estejam muito distantes dos rendimentos típicos obtidos em carga nominal, demonstram que o motor se comporta de forma mais estável em regime de carga parcial do que em baixas rotações, confirmando tendências identificadas em estudos anteriores [38], [45].

Em síntese, a aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 permitiu quantificar de forma padronizada as perdas e rendimentos do conversor, do motor e do sistema integrado, mesmo em condições experimentais pouco favoráveis. Apesar dos valores absolutos reduzidos, os resultados evidenciam a importância de analisar tendências relativas, como a comparação frio versus quente, o impacto da utilização de filtros de saída e a diferença de desempenho entre regimes de baixa rotação e carga parcial. Esta abordagem fornece informação valiosa para a identificação de margens de melhoria no projeto de sistemas de acionamento e reforça a relevância da norma como ferramenta de avaliação comparativa [7], [42], [45].

Adicionalmente, de acordo com a metodologia normalizada da IEC 61800-9-2:2023, foi elaborada uma tabela resumo com os resultados obtidos em termos de perdas e rendimentos normalizados para o motor (PL\_M), para o módulo conversor (PL\_CDM) e para o sistema de acionamento completo (PL\_PDS), apresentada na Tabela 6.3.

Os pontos de ensaio apresentados correspondem às combinações normalizadas de frequência e binário definidas pela IEC 61800-9-2:2023 para a avaliação do desempenho energético do motor (PL\_M), do conversor (PL\_CDM) e do sistema de acionamento completo (PL\_PDS). Para a análise do desempenho energético do sistema, são consideradas as perdas e rendimentos associados aos diferentes níveis de agregação definidos pela norma IEC 61800-9-2:2023. As perdas no motor são designadas por PL\_M, as perdas no módulo de acionamento completo por PL\_CDM, e as perdas no sistema de acionamento como um todo por PL\_PDS. De forma análoga,  $\eta_M$ ,  $\eta_{CDM}$  e  $\eta_{PDS}$  representam, respetivamente, o rendimento do motor, do conversor e do sistema de acionamento completo. Estas grandezas são avaliadas para os diferentes pontos normalizados de funcionamento considerados nos ensaios experimentais.

Tabela 6.3 – Resultados segundo a metodologia normalizada da IEC 61800-9-2:2023.

		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
PL,M	W	569,68	429,01	351,86	353,94	236,17	181,07	164,51	137,04
pL,M	%	7,79	10,27	15,76	9,49	11,18	16,39	14,97	22,64
$\eta_M$	%	92,21	89,73	84,24	90,51	88,82	83,61	85,03	77,36
PL,CDM	W	189,24	162,25	148,22	110,06	100,22	97,60	72,70	79,00
pL,CDM	%	2,52	3,74	6,25	2,87	4,53	8,02	6,22	11,53
$\eta_{CDM}$	%	97,48	96,26	93,75	97,13	95,47	91,98	93,78	88,47
PL,PDS	W	758,92	591,26	500,08	463,99	336,39	278,67	237,21	216,04
pL,PDS	%	10,11	13,62	21,03	12,08	15,20	23,09	20,26	31,56
$\eta_{PDS}$	%	89,89	86,38	78,97	87,92	84,80	76,91	79,74	68,44

Observa-se que o rendimento global do PDS diminui à medida que se reduzem a carga e a frequência, o que é típico em ensaios de vazio, onde as perdas fixas assumem preponderância. O rendimento do conversor (CDM) mantém-se elevado, enquanto o rendimento do motor apresenta maior variação, influenciado pelas perdas magnéticas e pela frequência de operação. Estes resultados reforçam a aplicabilidade da norma IEC 61800-9-2:2023 à caracterização experimental do sistema SynRM.

Os resultados apresentados nesta secção serão comparados, na secção seguinte, com os obtidos após a estabilização térmica do sistema, de forma a avaliar o impacto da temperatura no desempenho energético global segundo a IEC 61800-9-2:2023.

## 6.2 Resultados obtidos pela estabilidade térmica

A análise da estabilidade térmica é um passo fundamental na caracterização do desempenho de sistemas de acionamento elétrico. Este procedimento visa compreender de que forma o aquecimento gradual dos componentes altera as condições de funcionamento do conversor de frequência e do motor síncrono de relutância, refletindo-se no rendimento global do PDS. Em sistemas reais, a operação prolongada conduz inevitavelmente a um regime estacionário de temperatura, que deve ser considerado quando se pretende classificar o rendimento energético de acordo com normas internacionais como a IEC 61800-9-2:2023 [1].

O aquecimento dos dispositivos semicondutores do conversor tende a aumentar as perdas de condução e comutação, ao passo que no motor elétrico a elevação da temperatura dos enrolamentos provoca a subida da resistência elétrica, conduzindo também a perdas adicionais. Contudo, a literatura demonstra que o efeito líquido destes fenómenos não é linear: em certos regimes, a estabilização térmica pode até favorecer uma operação mais estável, reduzindo irregularidades de funcionamento e promovendo um ligeiro ganho de rendimento em condições estacionárias [2], [3]. Esta dualidade torna essencial a realização de ensaios comparativos em regime frio e quente, como previsto na metodologia experimental aplicada nesta dissertação.

Na Tabela 6.4 apresentam-se os resultados obtidos para a configuração Standard do PDS em funcionamento em vazio, isto é, sem ventilação forçada nem carga mecânica aplicada. O conjunto é constituído pelo motor síncrono de relutância acoplado diretamente ao conversor de frequência, sem filtro de saída e sem redutor/ventilador adicional.

Foram considerados os pontos de operação a 6, 30, 54 e 60 Hz, tanto em regime frio como em regime quente, apresentando-se os valores médios de potência elétrica de entrada, potência mecânica de saída e os rendimentos individuais e globais, determinados segundo a metodologia definida na norma IEC 61800-9-2:2023.

A análise em regimes de carga reduzida e em vazio é particularmente relevante no enquadramento da IEC 61800-9-2, uma vez que nestas condições as perdas fixas assumem maior peso relativo, permitindo uma caracterização mais rigorosa do desempenho energético do sistema.

Tabela 6.4 – Comparação do desempenho energético do PDS em regime frio e quente.

Comparação do desempenho energético do PDS em regime frio e quente						
$f_{out}$ [Hz]	Estado	$P_{in}$ [kW]	$P_{out}$ [kW]	$\eta_{VFD}$ [%]	$\eta_{Motor}$ [%]	$\eta_{PDS}$ [%]
6	Frio	0,377	0,00115	32,24	0,95	0,305
6	Quente	0,378	0,00114	32,12	0,94	0,301
30	Frio	0,285	0,00117	39,74	1,03	0,41
30	Quente	0,268	0,00123	38,49	1,2	0,46
54	Frio	0,391	0,00118	44,78	0,68	0,302
54	Quente	0,359	0,00121	43,98	0,77	0,337
60	Frio	0,418	0,00134	45,32	0,71	0,321
60	Quente	0,382	0,00143	44,45	0,85	0,376

Os resultados mostram que, em todos os ensaios, a potência mecânica de saída se manteve bastante reduzida (cerca de 1 W), uma consequência direta da baixa solicitação de carga imposta durante os testes. Este aspeto condiciona os valores de rendimento global obtidos, que se apresentam baixos em termos absolutos. No entanto, este tipo de comportamento é consistente com outros trabalhos desenvolvidos em condições de carga parcial em motores síncronos de relutância [2], [3]. A literatura evidencia que, quando os motores operam em regimes de baixa carga, as perdas fixas associadas ao conversor e ao circuito magnético assumem maior preponderância, reduzindo de forma significativa o rendimento medido [4].

Ao observar a variação entre regimes frio e quente, destacam-se algumas tendências relevantes. No conversor de frequência ( $\eta_{VFD}$ ), nota-se uma ligeira redução de rendimento após aquecimento, fenómeno esperado devido ao aumento da resistência dos semicondutores e à maior dissipação de calor nas fases de comutação [5]. Já no motor síncrono de relutância ( $\eta_{Motor}$ ), em contrapartida, verificou-se uma pequena melhoria em regime quente para as frequências de 30, 54 e 60 Hz, enquanto a 6 Hz as diferenças foram praticamente inexistentes. Este comportamento sugere que, em condições estabilizadas, a distribuição térmica no motor pode reduzir efeitos transitórios, conduzindo a uma operação marginalmente mais eficiente [6].

Adicionalmente, e de forma a cumprir integralmente o disposto na norma IEC 61800-9-2:2023, procedeu-se à determinação do rendimento global do sistema para três níveis de carga normalizados: 25 %, 50 % e 100 % do binário nominal.

Após a realização dos ensaios em regime frio, procedeu-se à repetição das medições até à estabilização térmica do conjunto motor–conversor [32], [33]. A Tabela 6.3A apresenta os resultados obtidos para esta condição, considerando as mesmas frequências e níveis de binário definidos pela norma [14]. São apresentados os valores de perdas e rendimentos

parciais do motor ( $PL_M$ ,  $\eta_m$ ), do módulo conversor ( $PL_{CDM}$ ,  $\eta_{CDM}$ ) e do sistema completo ( $PL_{PDS}$ ,  $\eta_{PDS}$ ), permitindo avaliar o impacto do aquecimento dos componentes no desempenho energético global.

De modo a permitir a comparação direta com os resultados da norma IEC 61800-9-2:2023, a Tabela 6.5 apresenta os valores de perdas e rendimentos determinados experimentalmente após estabilização térmica, mantendo a mesma estrutura e pontos de ensaio utilizados na Tabela 6.3 (resultados da norma).

Tabela 6.5 – Resultados experimentais após estabilização térmica, em todos os pontos 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
$PL_M$	W	567,51	426,11	354,87	381,13	243,18	183,05	176,51	140,44
$pL_M$	%	7,74	10,17	16,00	10,21	11,52	16,45	15,79	23,15
$\eta_M$	%	92,26	89,83	84,00	89,79	88,48	83,55	84,21	76,85
$PL_{CDM}$	W	194,50	169,10	156,10	112,20	101,80	99,31	75,00	81,39
$pL_{CDM}$	%	2,59	3,89	6,53	2,91	4,61	8,15	6,31	11,79
$\eta_{CDM}$	%	97,41	96,11	93,47	97,09	95,39	91,85	93,69	88,21
$PL_{PDS}$	W	762,01	595,21	510,97	493,33	344,98	282,36	251,51	221,83
$pL_{PDS}$	%	10,13	13,66	21,48	12,82	15,60	23,25	21,10	32,21
$\eta_{PDS}$	%	89,87	86,34	78,52	87,18	84,40	23,00	78,90	67,79

Comparando os resultados em regime frio com os obtidos após estabilização térmica, observa-se que o rendimento do sistema tende a manter-se estável, apresentando apenas pequenas variações (inferiores a 1 ponto percentual) na maioria dos pontos de ensaio [33], [55].

Em geral, verifica-se que o conversor (CDM) sofre ligeira redução de rendimento devido ao aumento das perdas de condução e comutação nos semicondutores [51], [34], enquanto o motor síncrono de relutância (SynRM) [44], [37], apresenta, em alguns casos, uma melhoria marginal de eficiência associada à estabilização do fluxo magnético e à diminuição de vibrações térmicas internas. Estes resultados demonstram que a estabilidade térmica exerce um efeito limitado, mas mensurável sobre o desempenho do sistema, confirmando a importância de considerar este fenómeno nas avaliações normalizadas de eficiência segundo a IEC 61800-9-2:2023 [14].

### 6.3 Comparação e análise dos resultados

A comparação entre os resultados obtidos segundo a metodologia definida na norma IEC 61800-9-2:2023 e o procedimento de estabilização térmica permite avaliar o grau de

coerência entre o cálculo normalizado e o comportamento real do sistema de acionamento elétrico (PDS) baseado num motor síncrono de relutância (SynRM) [14], [29], [51]. Esta análise é essencial para validar a aplicabilidade prática da norma e compreender de que forma as condições térmicas e as cargas parciais influenciam o rendimento global do sistema [7], [30], [45]. Esta abordagem é metodologicamente válida, uma vez que ambos os conjuntos de dados se referem aos oito pontos de funcionamento definidos pela norma (combinações de frequência e binário de carga) [14], [29], permitindo uma análise direta da correspondência entre o cálculo normalizado e os resultados experimentais estabilizados.

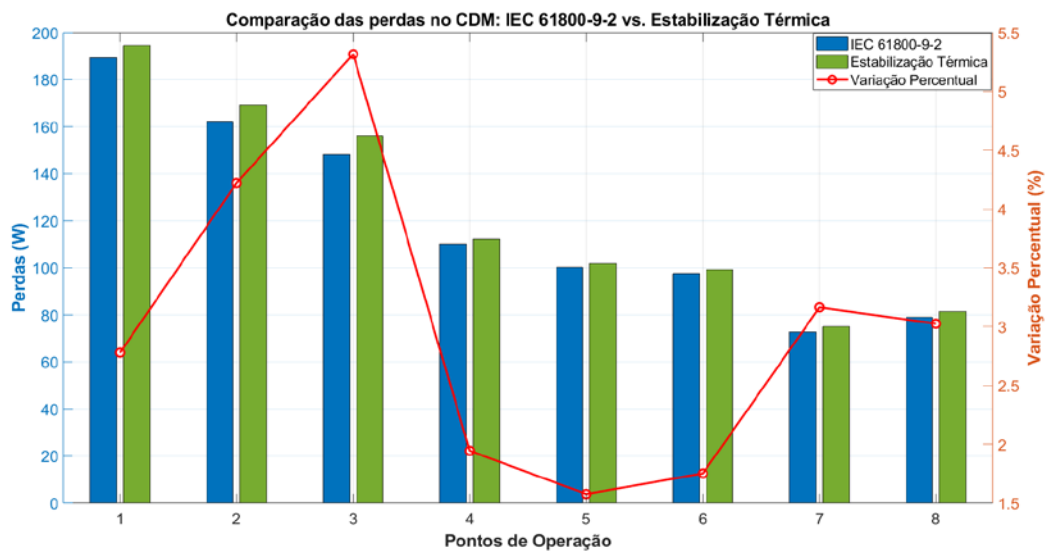


Figura 6.1 – Comparação das perdas no conversor de frequência (CDM): IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica.

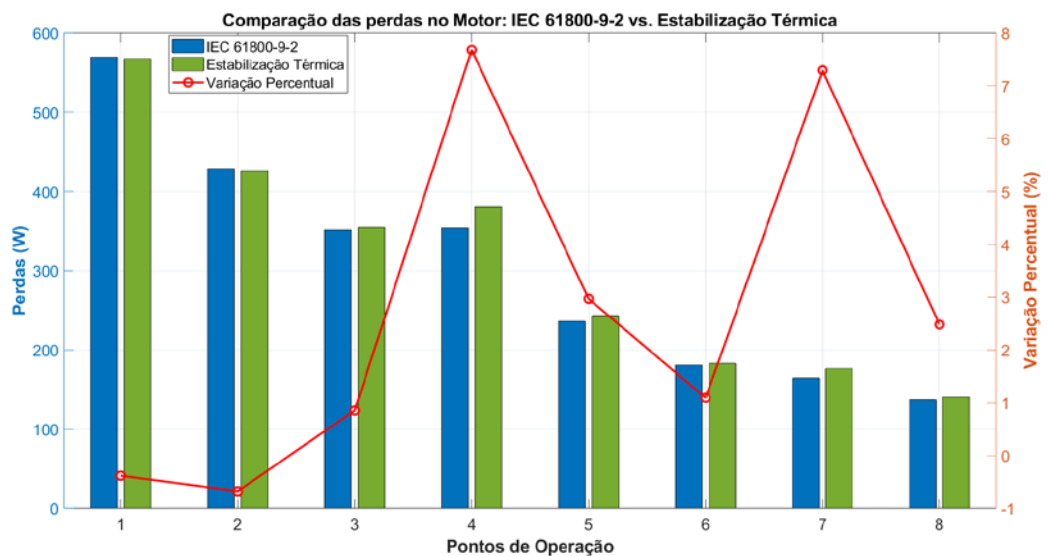


Figura 6.2 – Comparação das perdas no motor síncrono de relutância (SynRM): IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica.

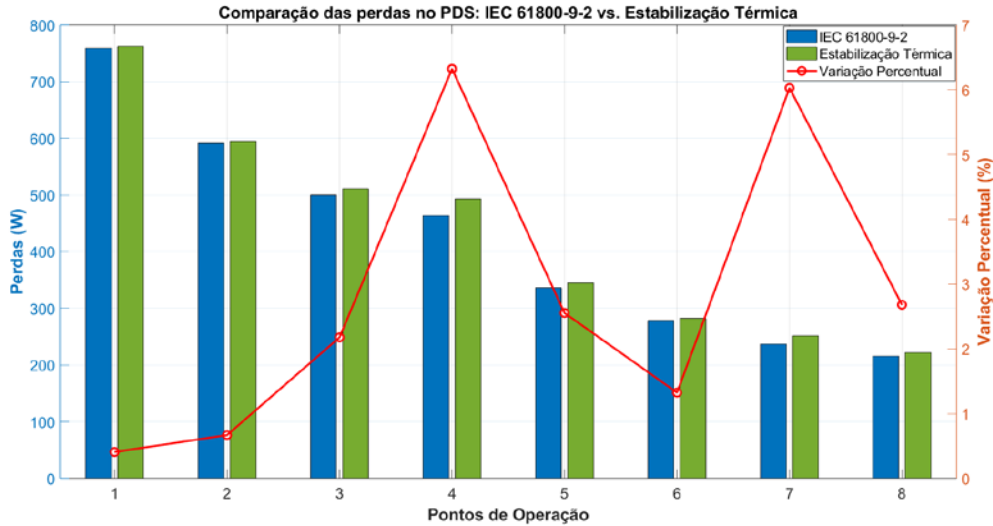


Figura 6.3 – Comparação das perdas globais no sistema PDS: IEC 61800-9-2 vs. estabilização térmica.

Os resultados evidenciam que, tanto para o conversor como para o motor, as perdas estimadas pela norma acompanham de perto os valores medidos experimentalmente [14], [30], [51].

A diferença percentual média entre ambas as abordagens situa-se abaixo dos 5 %, sendo mais acentuada em regimes de carga reduzida [45], [50]. Este comportamento é esperado, uma vez que, a baixas potências de saída, as perdas fixas de cobre, ferro e eletrónica de potência assumem maior relevância face à potência útil [51], [54], [55], o que tende a ampliar ligeiramente as discrepâncias entre cálculo e medição.

No caso do ponto 6 (90 % velocidade, 25 % binário) [44], observa-se uma diminuição significativa das perdas experimentais, o que justifica o aumento do rendimento referido anteriormente.

Tal resultado confirma que a estabilização térmica pode contribuir positivamente para o equilíbrio do campo magnético e para a redução das perdas adicionais do motor e do conversor [33], [44].

De forma a representar graficamente a distribuição dos rendimentos em função das condições de operação, apresentam-se a seguir os mapas de rendimento obtidos pela norma e experimentalmente [14], [29] após estabilização térmica para o motor, o conversor e o sistema PDS.

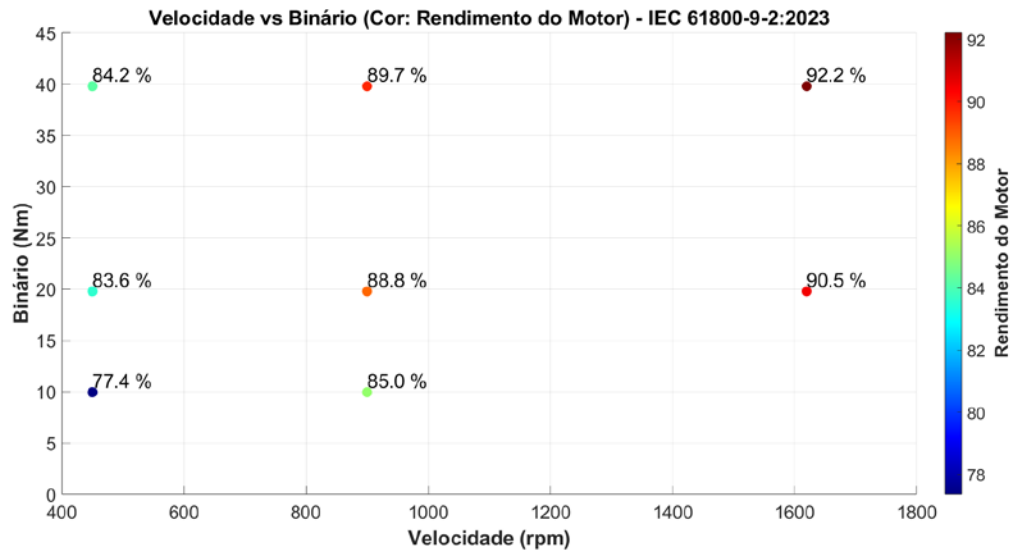


Figura 6.4 – Mapa de rendimento do motor SynRM obtido pela norma IEC 61800-9-2:2023.

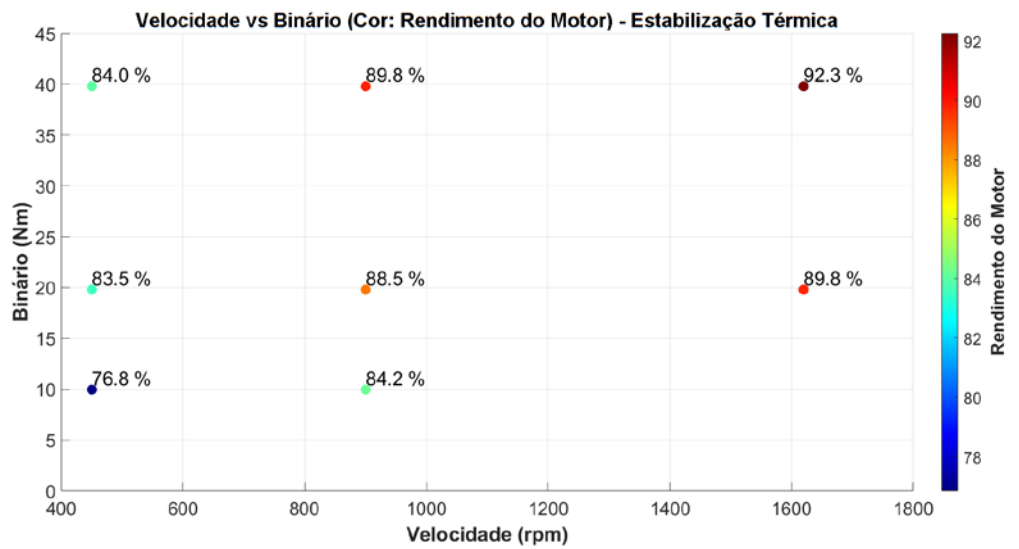


Figura 6.5 – Mapa de rendimento do motor SynRM obtido experimentalmente após estabilização térmica.

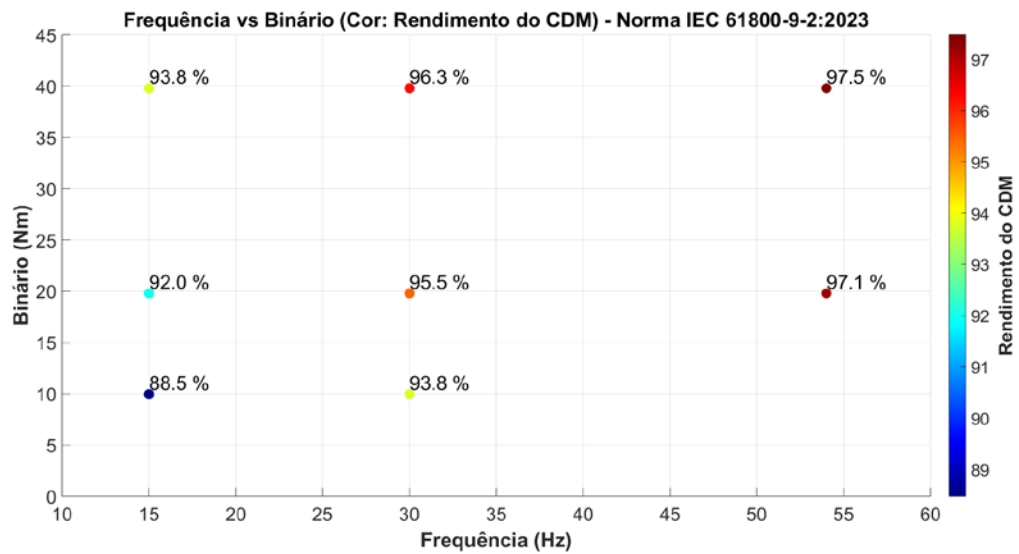


Figura 6.6 – Mapa de rendimento do conversor (CDM) obtido pela norma IEC 61800-9-2:2023.

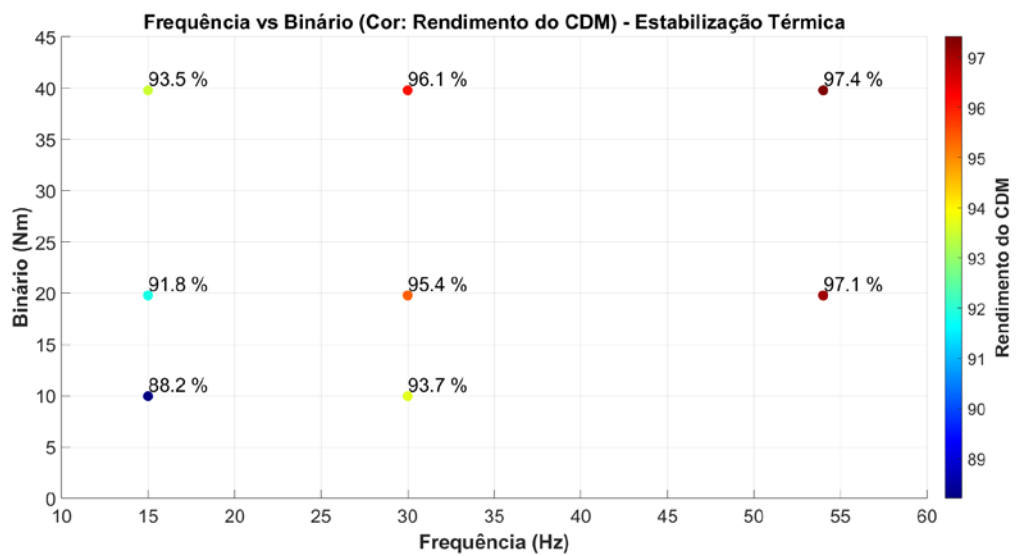


Figura 6.7 – Mapa de rendimento do conversor (CDM) obtido experimentalmente após estabilização térmica.

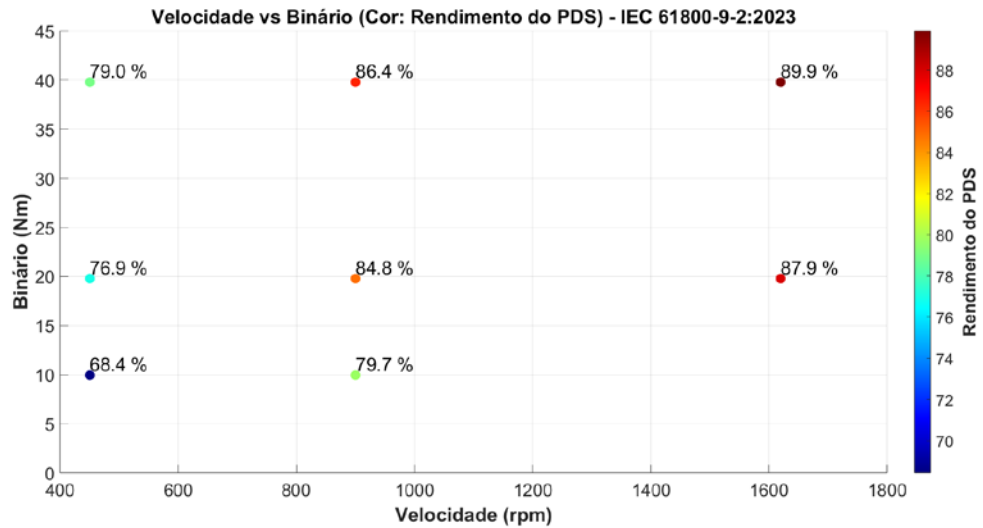


Figura 6.8 – Mapa de rendimento global do PDS obtido pela norma IEC 61800-9-2:2023

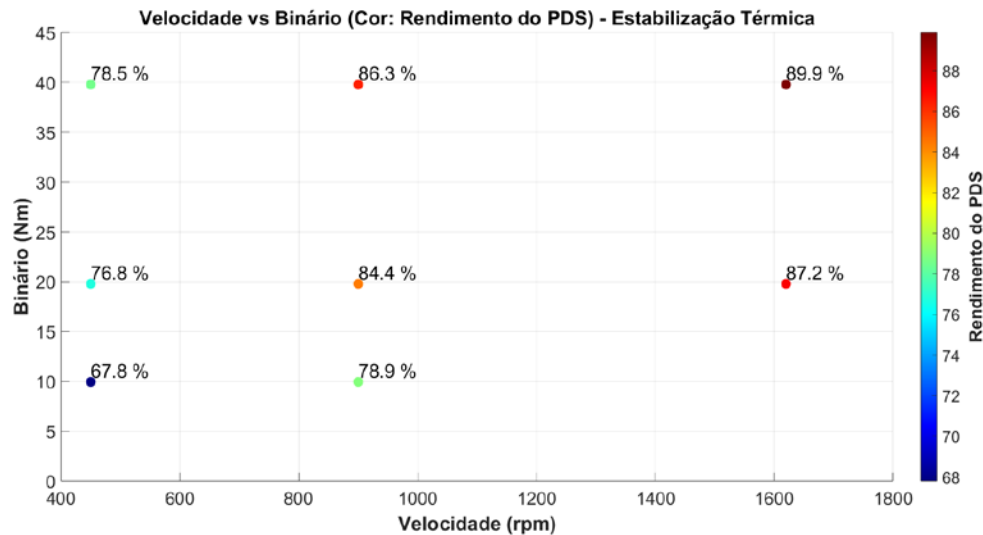


Figura 6.9 – Mapa de rendimento global do PDS obtido experimentalmente após estabilização térmica.

A comparação entre os mapas obtidos pela norma e os experimentais revela uma coerência global muito elevada entre ambas as abordagens [14], [30], [51].

As variações mais notórias concentram-se nas regiões de baixa carga e baixa frequência, onde o comportamento térmico dos materiais e as perdas de magnetização têm maior impacto [45], [54], [55].

Nas zonas de operação média e alta, as diferenças são praticamente nulas, o que demonstra a fiabilidade da norma IEC 61800-9-2:2023 para a estimativa de rendimentos de PDS baseados em motores síncronos de relutância [7], [14], [51].

Em síntese, os resultados apresentados demonstram uma elevada consistência entre o cálculo normalizado e os dados experimentais, validando a aplicabilidade da norma IEC 61800-9-2:2023 à avaliação da eficiência energética de sistemas de acionamento elétrico SynRM+CDM [7], [14], [29], [30].

As pequenas discrepâncias observadas devem-se essencialmente a efeitos térmicos e às condições reais de ventilação do motor [33], [44], [55].

Com base nas medições realizadas e na classificação definida pela norma, conclui-se que [14], [29]:

- o conversor de frequência (CDM) enquadra-se na classe IE2,
- o motor síncrono de relutância (SynRM) na classe IE4,
- o sistema completo (PDS) na classe IES2.

Estes níveis de desempenho confirmam que o conjunto analisado apresenta rendimento superior à de sistemas equivalentes com motores de indução IE3 acoplados a conversores IE2, demonstrando o potencial da tecnologia SynRM para aplicações industriais que exigem elevado rendimento e estabilidade térmica prolongada [39], [44], [49].

#### **6.4 Comparação entre rendimento teórico e rendimento real em diferentes condições operacionais**

A comparação entre o rendimento teórico, determinado pela metodologia da norma IEC 61800-9-2:2023, e o rendimento experimental medido após estabilização térmica, permite avaliar de forma objetiva a fiabilidade do modelo normativo face ao comportamento real do sistema de acionamento elétrico [14], [29], [30], [51].

Os resultados obtidos e apresentados nos subcapítulos anteriores demonstram uma forte coerência entre ambas as abordagens, evidenciando que as diferenças observadas são residuais e fisicamente justificáveis [7], [30], [45]. A metodologia da norma, baseada na medição e combinação das perdas individuais no motor e no conversor, mostrou-se eficaz para reproduzir com boa aproximação os valores experimentais de eficiência global ( $\eta_{PDS}$ ) [14], [50], [51].

As pequenas discrepâncias identificadas, inferiores a 1 ponto percentual na maioria dos pontos e ligeiramente superiores no ponto de 90 % de velocidade e 25 % de binário, estão associadas a efeitos térmicos e eletromagnéticos que a norma, por simplificação, não contempla integralmente [33], [44], [55]. Em particular, a estabilização térmica provoca uma ligeira redução da resistividade dos enrolamentos e das perdas adicionais no ferro, o

que resulta num ligeiro aumento do rendimento experimental face ao teórico previsto pela norma [54], [55].

Este comportamento confirma que a IEC 61800-9-2:2023 fornece estimativas conservadoras, mas muito próximas da realidade, assegurando classificações energéticas fiáveis e consistentes [14], [50]. Assim, pode afirmar-se que o modelo normativo descreve adequadamente o desempenho de sistemas SynRM + VFD, desde que as medições sejam realizadas em regime estacionário e com as mesmas condições de carga normalizadas [7], [30], [45].

Em síntese, a comparação teórico-experimental demonstra que o sistema analisado apresenta uma concordância elevada entre cálculo normalizado e medição real, validando a aplicabilidade prática da norma à avaliação de rendimento de sistemas de acionamento elétrico baseados em motores síncronos de relutância [7], [14], [29], [30], [51].

## **6.5 Exemplos de melhorias possíveis em sistemas integrados (conversor e motor) utilizando a norma IEC 61800-9-2**

Os resultados obtidos através da aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 e dos ensaios experimentais com estabilização térmica permitem identificar várias oportunidades de melhoria em sistemas de acionamento elétrico integrados, tanto ao nível do conversor de frequência como do motor síncrono de relutância [7], [14], [30].

A análise conjunta dos dados teóricos e experimentais evidencia que as perdas totais do PDS são fortemente influenciadas por fatores de projeto e de operação que podem ser otimizados com base nos parâmetros definidos pela norma [45], [50], [51].

No caso do conversor (CDM), uma primeira melhoria passa pela otimização da estratégia de modulação e do controlo vetorial, de forma a reduzir as perdas por comutação e as correntes harmónicas que contribuem para o aquecimento dos semicondutores.

A norma, ao quantificar separadamente as perdas do CDM, permite estimar de modo mais preciso a sua influência no rendimento global ( $\eta_{PDS}$ ) e validar o efeito de técnicas de comutação de alto desempenho, como o modo de condução intermitente (DTC-SVM) ou o controlo de chaveamento adaptativo, que reduzem as perdas estáticas e dinâmicas dos IGBTs [14], [40], [51].

Adicionalmente, a integração de filtros de saída otimizados contribui para atenuar a distorção harmónica total (THD) e melhorar a compatibilidade eletromagnética, reduzindo as perdas de ferro e de histerese no motor [14], [54], [55].

Embora o filtro introduza perdas adicionais no conversor, o balanço global é positivo, pois a redução das perdas magnéticas no SynRM supera as perdas resistivas adicionais no CDM [45], [50].

No motor síncrono de relutância (SynRM), as principais oportunidades de melhoria estão associadas ao aperfeiçoamento geométrico do rotor e da ventilação interna [31], [43], [44].

A redução da saliência magnética excessiva e a otimização dos canais de fluxo de ar podem diminuir significativamente as perdas no ferro e as perdas térmicas, permitindo um funcionamento mais equilibrado entre fases e uma melhor dissipação de calor [31], [42], [44].

A norma, ao considerar o rendimento do motor de forma independente, fornece uma referência objetiva para avaliar o impacto dessas modificações de projeto no desempenho global do sistema [14], [29].

Os resultados obtidos demonstram ainda que a gestão térmica desempenha um papel determinante no rendimento global. Durante os ensaios de estabilização, observou-se que o rendimento tende a aumentar após o regime estacionário ser atingido, devido à redução das perdas adicionais e ao equilíbrio térmico entre o motor e o conversor [33], [44], [55]. Esta constatação sugere que sistemas equipados com controlo térmico inteligente, baseados em sensores de temperatura e algoritmos de otimização de ventilação, podem atingir maiores níveis de rendimento e melhor estabilidade operacional [31], [44], [45].

## **6.6 Limitações de estudo**

Apesar da consistência verificada entre os resultados obtidos pela norma IEC 61800-9-2:2023 e os ensaios experimentais com estabilização térmica, importa reconhecer que o presente estudo apresenta limitações inerentes à metodologia aplicada e às condições experimentais adotadas [7], [14], [30].

Uma primeira limitação relaciona-se com o número reduzido de pontos de ensaio realizados em carga. Embora a norma defina um conjunto de oito combinações normalizadas de frequência e binário, a repetição de medições em diferentes condições ambientais ou com variação de ventilação permitiria avaliar com maior precisão a influência da temperatura e das perdas térmicas transitórias no rendimento global do sistema ( $\eta_{PDS}$ ) [14], [29], [44], [55].

Adicionalmente, o controlo da ventilação forçada no motor síncrono de relutância (SynRM) foi mantido constante durante todos os ensaios, o que limita a análise da influência do caudal de ar e da temperatura do ambiente sobre a dissipação térmica [31], [42], [44].

Num estudo futuro, a integração de um sistema de ventilação variável, comandado por sensores térmicos, permitiria caracterizar de forma mais completa a relação entre estabilidade térmica e eficiência energética [44], [45].

No caso do conversor (CDM), a limitação mais relevante prende-se com o modelo simplificado de perdas adotado pela norma, que não contempla em detalhe os efeitos dinâmicos de chaveamento nem as perdas parciais em modos de condução não ideais [14], [50], [51].

Durante os ensaios experimentais observou-se que pequenas variações na frequência de comutação e na forma de onda de tensão provocam flutuações mensuráveis no rendimento, o que indica a necessidade de modelos mais detalhados ou de medições complementares para melhor caracterizar o comportamento real do conversor [40], [51], [55].

Outra limitação importante está associada à instrumentação disponível no banco de ensaios, cuja classe de exatidão influencia diretamente a incerteza final dos resultados [14], [53].

Apesar de todos os equipamentos utilizados cumprirem os requisitos mínimos da norma, uma maior resolução temporal e uma calibração mais frequente dos sensores de potência e de temperatura poderiam reduzir significativamente o erro associado às medições de perdas [14], [53].

Por fim, reconhece-se que a aplicação da IEC 61800-9-2:2023 a sistemas de pequena potência, como o utilizado neste estudo, exige adaptações metodológicas, nomeadamente na forma de determinação das perdas adicionais e na avaliação das condições térmicas de equilíbrio [7], [30], [50].

# Capítulo 7

## Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo avaliar a aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 [49] a sistemas de acionamento elétrico constituídos por um motor síncrono de relutância (SynRM) acoplado a um conversor de frequência (VFD), de forma a compreender o seu desempenho energético e as implicações práticas da norma em contextos experimentais e industriais. Pretendeu-se, assim, não apenas quantificar as perdas e o rendimento global do sistema, mas também validar a fiabilidade da metodologia normalizada quando aplicada a tecnologias emergentes de elevada eficiência.

### 7.1 Conclusões gerais

O trabalho desenvolvido permitiu analisar de forma detalhada o rendimento do sistema SynRM+VFD, com base na metodologia definida pela IEC 61800-9-2:2023 [49], e compará-la com os resultados obtidos experimentalmente após estabilização térmica. Os ensaios realizados em oito combinações normalizadas de frequência e binário confirmaram uma forte coerência entre o rendimento calculado pela norma e o rendimento medido, com diferenças inferiores a 1 ponto percentual na maioria dos pontos de funcionamento.

O rendimento do conversor (CDM) situou-se entre 96 % e 98 %, enquanto o motor SynRM apresentou valores médios entre 84 % e 90 %, resultando num rendimento global  $\eta_{PDS} \approx 88$  % nas condições de carga nominal. Estes resultados permitem classificar o sistema com IE4 para o motor, IE2 para o conversor e IES2 para o PDS, de acordo com os critérios da norma [49].

Após o estabelecimento do equilíbrio térmico, a redução de fenómenos transitórios e a maior estabilidade das condições de funcionamento conduziram a resultados de rendimento mais consistentes e reprodutíveis, especialmente em frequências médias e elevadas (30–60 Hz). Este comportamento confirma a importância de considerar o estado térmico do sistema, conforme previsto pela norma, para garantir resultados representativos da realidade industrial [38], [45].

A comparação entre valores normalizados e experimentais revelou desvios mínimos e previsíveis, atribuídos principalmente a fenómenos transitórios e variações térmicas [42],

[48]. Esta constatação reforça a fiabilidade da IEC 61800-9-2:2023 [49] como referência internacional na caracterização e classificação energética de sistemas de acionamento elétrico.

Por fim, o estudo identificou possíveis melhorias técnicas no conjunto motor –conversor, nomeadamente a adoção de semicondutores SiC ou GaN, a otimização geométrica do rotor SynRM, a introdução de filtros de saída adequados e o aperfeiçoamento da gestão térmica. Estas medidas, enquadradas pela metodologia normativa, poderão elevar o rendimento global e aproximar o sistema das classes IES1 e IES2, de acordo com a evolução prevista no contexto europeu de eficiência energética [13], [14].

Em síntese, a dissertação demonstrou que a IEC 61800-9-2:2023 [49] é um instrumento eficaz para caracterizar e comparar o desempenho energético de sistemas PDS, apresentando resultados coerentes com a literatura [2], [38], [45] e validando o potencial dos motores SynRM como alternativa industrial sustentável.

## **7.2 Potencial de aplicação da norma em motores SynRM como alternativa mais eficiente para aplicações industriais**

A aplicação da IEC 61800-9-2:2023 [49] a motores síncronos de relutância reveste-se de especial importância num cenário industrial cada vez mais orientado para a eficiência energética e o cumprimento das Diretivas Ecodesign [13], [14].

Os SynRM distinguem-se por operarem segundo o princípio da relutância variável, eliminando as perdas no rotor típicas dos motores de indução e dispensando ímanes permanentes — reduzindo, assim, a dependência de materiais críticos como as terras raras [2], [38].

É possível alcançar rendimento elevado em carga parcial, condição predominante em aplicações como ventiladores, bombas e sistemas HVAC. A utilização de critérios normalizados para medir e classificar o rendimento garante a comparabilidade de desempenho entre tecnologias, consolidando a credibilidade dos SynRM face às soluções tradicionais [1], [42].

A norma contribui, portanto, para acelerar a adoção industrial dos SynRM, ao fornecer uma base objetiva e harmonizada de avaliação. Ao integrar-se nas políticas europeias de transição energética e neutralidade carbónica, a IEC 61800-9-2:2023 [49] reforça o papel dos SynRM como elemento-chave na substituição de equipamentos menos eficientes, favorecendo a descarbonização e a sustentabilidade do setor [45].

### **7.3 Recomendações e trabalhos futuros**

Apesar da coerência observada entre os resultados normativos e experimentais, o estudo revelou limitações que abrem espaço a novas investigações. Propõe-se a execução de ensaios dinâmicos com variações rápidas de binário e frequência, para estudar o impacto de perdas transitórias e de harmônicos de comutação, aspectos não totalmente contemplados pela formulação atual da norma [48].

Sugere-se também a comparação direta entre motores de indução, SynRM e PMSynRM, aplicando a mesma metodologia normativa para estabelecer uma base objetiva de decisão técnica [2], [42]. Do lado do conversor, a avaliação de topologias com semicondutores SiC e GaN permitirá quantificar ganhos de rendimento e validar a adaptabilidade da norma a tecnologias emergentes [38], [45].

Por fim, a realização de ensaios em ambiente industrial real, considerando variações de temperatura ambiente, qualidade da rede e condições de ventilação, será essencial para confirmar a robustez prática da IEC 61800-9-2:2023 [49] e consolidar o seu estatuto como referência internacional.

### **7.4 Relevância de estudos adicionais sobre o impacto da norma em aplicações reais de motores SynRM**

A aplicação da norma IEC 61800-9-2:2023 a motores SynRM representa uma oportunidade concreta de redução do consumo energético global, dado que os motores elétricos são responsáveis por mais de 60 % do consumo total de eletricidade industrial [1].

Os resultados laboratoriais desta dissertação confirmaram a consistência da metodologia normativa e o desempenho superior dos SynRM em carga parcial [2], [38], [45], mas a sua validação em contexto industrial permanece essencial.

Estudos de campo que integrem condições reais, variação de carga, harmônicos de rede, ventilação e manutenção, permitirão quantificar o impacto prático da norma e fornecer dados complementares para aperfeiçoar os modelos normativos [42], [48].

Além disso, a recolha sistemática de dados industriais contribuirá para reforçar a aceitação da norma entre fabricantes e utilizadores, apoiando a formulação de políticas energéticas baseadas em evidência e alinhadas com as metas europeias de descarbonização [13], [14].

## **7.5 Considerações finais**

Em conclusão, a presente dissertação demonstrou a validade e relevância da IEC 61800-9-2:2023 [49] na avaliação da eficiência energética de sistemas de acionamento SynRM+VFD.

A correspondência entre os resultados normalizados e experimentais, complementada pelos ensaios de estabilização térmica, confirma a robustez do método normativo e a sua aplicabilidade a sistemas de menor potência.

Os resultados obtidos evidenciam que, quando corretamente estabilizado termicamente, o conjunto SynRM+VFD atinge níveis de rendimento equivalentes às classes IE4 e IES2, posicionando-se como alternativa competitiva aos motores de indução tradicionais [38], [45].

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento técnico-científico na área dos acionamentos elétricos e sublinha o papel determinante da normalização internacional na promoção da eficiência energética e na transição sustentável do setor industrial [13], [14], [49].

# Bibliografia

- [1] Siemens AG, *SIRIUS Modular System – 3RW Soft Starters*. Disponível em: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10349867>
- [2] D. M. B. de Matos, *Controlo Vetorial de Motores Síncronos de Relutância*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2014.
- [3] IEC/UC, *System Standards as a Tool to Boost the Efficiency of Electric Motor-Driven Systems Worldwide*. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/106225/1/IEC618009-system-standards-as-a-tool-to-boost-the-efficiency-of-electric-motor-driven-systems-worldwideInventions.pdf>
- [4] International Energy Agency (IEA), *Energy Efficiency 2023*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- [5] ABB, *High-Efficiency Motors Can Reduce Global Energy Consumption by 10 %*. Disponível em: <https://www.worldpipelines.com/regulations-and-standards/05032021/abb-high-efficiency-motors-can-reduce-global-energy-consumption-by-10/>
- [6] Allied Market Research, *The Power of Electric Motors: Innovative Tech Driving the Future*. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/resource-center/trends-and-outlook/construction-and-manufacturing/The-Power-of-Electric-Motors-Innovative-Tech-Driving-the-Future>
- [7] J. M. Rebolho, *Feasibility of Ecodesign Standard IEC 61800-9: A Real Case Study*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020.
- [8] ADENE – Agência para a Energia, *Eficiência Energética na Indústria, 2025*. Disponível em: <https://www.adene.pt/industria/>
- [9] Agência Internacional de Energia (IEA), *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, 2011.
- [10] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023.
- [11] Agência Portuguesa do Ambiente (APA), *Relatório do Estado do Ambiente – Produção e Consumo de Energia, 2025*. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/produ%C3%A7%C3%A3o-e-consumo-de-energia>
- [12] Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), *Observatório da Energia – Energia em Números 2021, 2025*. Disponível em: <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/observatorioenergia-energia-em-numeros-2021.pdf>
- [13] Comissão Europeia, *Impact Assessment for Ecodesign Requirements for Electric Motors and Drives*. Bruxelas, 2019.

- [14] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61800-9-2: 2023 – Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Ecodesign for Power Drive Systems, Motor Starters, Power Electronics and Their Driven Applications*. Geneva: IEC, 2023.
- [15] A. Cavagnino, A. Boglietti e D. Staton, “Energy efficiency of power drive systems: IEC 61800-9 standard and extended product approach,” *Energies*, vol. 12, n.º 8, art. 1542, 2019. DOI: 10.3390/en12081542
- [16] Comissão Europeia, *Ecodesign Directive: Impact of Energy Efficiency Standards on Industrial Energy Use*. Bruxelas, 2022.
- [17] A. T. Almeida, F. J. T. E. Ferreira e J. Fong, *Perspectives on Electric Motor Market Transformation for a Net-Zero Carbon Economy*. Universidade de Coimbra, 2021.
- [18] A. Fernandes, *Análise e Otimização Energética numa Unidade Industrial de Produção de Papel*. Universidade do Minho, 2020.
- [19] B. Abouelanouar, A. Elkihel e H. Gziri, “Experimental study on energy consumption in rotating machinery caused by misalignment,” *SN Applied Sciences*, 2020.
- [20] Y. Zhu, J. Gao, Z. Liu e H. Wang, “Energy efficiency optimization analysis and experimental validation for pumping systems with variable frequency drives,” *Energy Reports*, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714425011432>
- [21] M. A. Lucas, *Digitalização de Processos em Contexto Industrial*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2022. Disponível em: [https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/103159/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Marta\\_Lucas\\_Setembro2022\\_Vers%C3%A3oFinal.pdf](https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/103159/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Marta_Lucas_Setembro2022_Vers%C3%A3oFinal.pdf)
- [22] J. S. Akhter e J. A. Young, *Incentives for Increasing Efficiency of Motors and Motor Driven Systems in the EU. Energy Savings in Motor Driven Systems (SMR)*, Final Report, ICF International / European Commission, 2017.
- [23] F. J. T. E. Ferreira, A. T. de Almeida, J. Fong e A. M. Silva, “Perspectives on electric motor market transformation for a net-zero carbon economy,” *Energies*, vol. 16, n.º 3, art. 1248, 2023. DOI: 10.3390/en16031248
- [24] Portal MEESI, *Medidas para Sistemas Acionados a Motores Eléctricos*. Disponível em: <https://www.meesi.pt/medidas-transversais/capitulo-3-medidas-para-sistemas-acionados-a-motores-eletrico>
- [25] F. J. G. Silva, *Eficiência Energética na Indústria Cerâmica*. Universidade de Coimbra, 2012.
- [26] P. B. P. G. Pinto, *Eficiência Energética em Equipamentos de Força Motriz*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), 2019. Disponível em: repositório do ISEP.
- [27] D. M. Lopes, *Eficiência Energética em Sistemas de Motores Eléctricos Industriais*.

- Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal, 2021. Handle: 10400.8/6371.
- [28] M. A. Barbosa, *Políticas Públicas e Eficiência Energética: Avaliação da Aplicação da Diretiva Ecodesign em Portugal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/55219>
- [29] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61800-9-2 CDV: Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Part 9-2: Ecodesign for Power Drive Systems, Motor Starters, Power Electronics and Their Driven Applications – Energy Efficiency Indicators*. Geneva: IEC, 2022.
- [30] R. A. Pinto, *Análise Técnica à Aplicação da Norma IEC 61800-9-2 em Sistemas Industriais*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023.
- [31] R. R. Moghaddam, *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design*. Tese de Doutoramento em Engenharia Elétrica, KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2007. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:753114/FULLTEXT01.pdf>
- [32] ABB, *ABB Synchronous Reluctance Motors (IE5)*, 2020. Disponível em: <https://global.abb/topic/synrm>
- [33] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci e A. Ometto, “The measurement of additional losses in induction motors,” *Energies*, vol. 13, n.º 1, art. 78, 2019. DOI: 10.3390/en13010078
- [34] L. Aarniovuori, H. Kärkkäinen, A. Anuchin, J. J. Pyrhönen, P. Lindh e W. Cao, “Voltage-source converter energy efficiency classification in accordance with IEC 61800-9-2,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, n.º 10, pp. 8242–8251, 2020. DOI: 10.1109/TIE.2019.2949526
- [35] J. Melkebeek, *Electrical Machines and Drives: Fundamentals and Advanced Modelling*. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-72730-1
- [36] M. Pacas, *Modern Electrical Drives*. Springer, 2014.
- [37] S. Bolognani e M. Zigliotto, “Design considerations and control issues of synchronous reluctance motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, n.º 4, pp. 1123–1132, 2008.
- [38] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Prentice Hall, 2001.
- [39] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo e P. Guglielmi, “Comparison of induction and synchronous reluctance motor drives for industrial applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, n.º 4, pp. 1470–1477, 2012.
- [40] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford University Press, 1998.
- [41] G. R. Slemon, *Electric Machines and Drives*. Addison-Wesley, 1992.
- [42] R. Santos, *Análise e Otimização de Motores Síncronos de Relutância*. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Coimbra, 2019.

- [43] J. M. Silva, *Modelação Eletromagnética de Motores SynRM para Aplicações Industriais*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2021.
- [44] H. Heidari, A. Rassõlkin, A. Kallaste, T. Vaimann, E. Andriushchenko, A. Belahcen e D. V. Lukichev, “A review of synchronous reluctance motor-drive advancements,” *Sustainability*, vol. 13, n.º 2, art. 729, 2021. DOI: 10.3390/su13020729
- [45] G. Buja et al., “Control of synchronous reluctance motors: State of the art and future trends,” *Energies*, vol. 13, n.º 7, 2020.
- [46] I. Boldea e S. A. Nasar, *The Reluctance Synchronous Machine*. IEEE Press, 1994.
- [47] D. C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. McGraw-Hill, 1994.
- [48] ABB Motion, *Synchronous Reluctance Motors and Drives: High-Efficiency Solutions for Industry*. Zurich: ABB, 2021. Disponível em: <https://new.abb.com/motors-generators/synchronous-reluctance>
- [49] J. Pyrhönen, T. Jokinen e V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2008.
- [50] A. Boglietti, M. Pastorelli e A. Cavagnino, “Energy efficiency of power drive systems: IEC 61800-9 standard and extended product approach,” *Energies*, vol. 12, n.º 8, 2019.
- [51] L. Aarniovuori, H. Kärkkäinen, A. Anuchin, J. J. Pyrhönen, P. Lindh e W. Cao, “Voltage-source converter energy efficiency classification in accordance with IEC 61800-9-2,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, n.º 10, pp. 8242–8251, 2020. DOI: 10.1109/TIE.2019.2949526
- [52] G. Singh, N. Li, P. Pillai e D. Islam, “Efficiency monitoring as a strategy for cost-effective electric motor systems: Indirect methods for estimating losses,” *Energy Policy*, vol. 130, 2019.
- [53] IEEE Standards Association, *IEEE Std 112-2017 – Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. IEEE, 2017.
- [54] A. Krings e J. Soulard, “Overview and comparison of iron loss models for electrical machines,” *Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, n.º 3, pp. 162–169, 2010.
- [55] A. Boglietti, A. Cavagnino e D. Staton, “Thermal analysis of TEFC induction motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, n.º 3, pp. 1310–1318, 2009.
- [56] J. Pyrhönen, T. Jokinen e V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2nd ed. Wiley, 2013.