



UFPA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ISAIAS FERREIRA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MOTORES *PREMIUM* (IR3) E *SUPER PREMIUM* (IR4) SUBMETIDOS A TENSÕES DESEQUILIBRADAS

BELÉM – PA

2025

ISAIAS FERREIRA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MOTORES *PREMIUM* (IR3) E *SUPER PREMIUM* (IR4) SUBMETIDOS A TENSÕES DESEQUILIBRADAS

Dissertação submetida a Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Energias Renováveis. Dissertação número **DM 15/2025**

Orientadora: Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes

Coorientador: Prof. Dr. Jonathan Muñoz Tabora

UFPA / ITEC / PPGEE

BELÉM – PA

2025

Dissertação número **DM 15/2025**



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

“ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MOTORES PREMIUM (IR3) E SUPER PREMIUM (IR4) SUBMETIDOS A TENSÕES DESEQUILIBRADAS”

AUTOR: ISAÍAS FERREIRA

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida à Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, sendo julgada adequada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

APROVADA EM: 18/06/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Jonathan Muñoz Tábor
(Coorientador - UNAH)

Prof. Dr. Marcus Vinnícius Alves Nunes
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Thiago Mota Soares
(Avaliador Interno ao Programa – FEEB/UFPA)

Prof.ª Dr.ª Carminda Célia Moura de Moura Carvalho
(Avaliadora Interna ao Programa – FEEB/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

F383a Ferreira, Isaias.
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MOTORES
PREMIUM (IR3) E SUPER PREMIUM (IR4) SUBMETIDOS A
TENSÕES DESEQUILIBRADAS / Isaias Ferreira, . — 2025.
110 f. : il. color.

Orientador(a): Profª. Dra. Maria Emília Toste
Coorientação: Profª. Dra. Jonathan Muñoz Tabora
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

1. Motores Eletricos. 2. Motores de Imas permanentes. 3.
desequilíbrio de tensão. 4. Qualidade de Energia. 5. Eficiência
Energética. I. Título.

CDD 621.31098115

Dedico este trabalho a minha a minha mãe Francisca Ferreira, por todo o esforço, trabalho, dedicação e pelo bom exemplo de vida.

Aos meus irmãos Ivanilton Ferreira, Silvam Carvalho, Fabrícia Ferreira, Fabricio Ferreira, por todo apoio.

A minha esposa Josiane, por todos os momentos juntos, pelo carinho, amor e cumplicidade.

A meu melhor amigo e irmão, Carlos A. Pereira, por todos os anos de amizade e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

A minha a minha mãe Francisca Ferreira, por todo o esforço, trabalho, dedicação e pelo bom exemplo de vida.

Aos meus irmãos Ivanilton Ferreira, Silvam Carvalho, Fabrícia Ferreira, Fabrício Ferreira, por todo apoio.

A minha esposa Josiane, por todos os momentos juntos, pelo carinho, amor e cumplicidade.

A meu melhor amigo e irmão, Carlos A. Pereira, por todos os anos de amizade e companheirismo.

As Professoras Dra. Carminda e Dra. Maria Emília, pela confiança e por todo conhecimento, e orientações.

Ao meu Coorientador e amigo Jonathan, por todo o tempo, ideias e correções.

Ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), e a Universidade Federal do Pará, pelas instalações e investimentos.

“Ela era grande demais para ser chamada de espada. Era gigantesca, larga, pesada e muito grosseira. Parecia um maciço pedaço de ferro”

KENTARO MIURA

RESUMO

Esta dissertação de mestrado investiga a importância dos motores de indução trifásicos no contexto das políticas de eficiência energética, enfatizando sua contribuição substancial para a redução do consumo de energia no setor industrial. O estudo examina a evolução das regulamentações brasileiras, destacando medidas como a exigência da classe IR3 como padrão mínimo de fabricação no país, uma iniciativa que busca elevar a eficiência desses motores e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais. Por meio de uma revisão de literatura abrangente, foi possível mapear a produção científica relacionada a motores elétricos e identificar tendências emergentes na área. A análise bibliométrica realizada evidencia que países como Índia, Estados Unidos e Brasil lideram as publicações nesse campo, fornecendo uma perspectiva global sobre os avanços tecnológicos e as práticas voltadas à eficiência energética. Além disso, o trabalho aborda o desafio representado pelo desequilíbrio de tensão, um fenômeno que prejudica o desempenho dos motores. Os resultados obtidos a partir de testes empíricos realizados com motores premium (IR3) e super premium (IR4) sob condições de desequilíbrio de tensão são particularmente reveladores. Eles mostram que os motores de ímã permanente super premium tendem a apresentar maior consumo energético em situações de desequilíbrio, especialmente quando operam com cargas abaixo de sua capacidade nominal. Esses achados ressaltam a importância de considerar variáveis relacionadas ao desequilíbrio na seleção de motores para aplicações industriais, oferecendo subsídios valiosos para a escolha de tecnologias mais eficientes. Conclui-se que a adoção de motores mais eficientes é fundamental para promover a sustentabilidade energética em escala global. Nesse sentido, as regulamentações devem continuar evoluindo para incentivar a substituição de motores antigos por tecnologias mais avançadas, mitigando os impactos de distúrbios, como o desequilíbrio de tensão. Com uma abordagem detalhada e sólida, esta dissertação oferece contribuições relevantes para o campo da eficiência energética, estimulando pesquisadores e profissionais da área a adotarem práticas mais inovadoras e sustentáveis.

Palavras-chaves: motor de indução; desequilíbrio de tensão; classes de eficiência; motor de ímãs permanentes para partida direta; qualidade de energia; harmônicos.

ABSTRACT

This master's dissertation investigates the importance of three-phase induction motors in the context of energy efficiency policies, emphasizing their substantial contribution to reducing energy consumption in the industrial sector. The study examines the evolution of Brazilian regulations, highlighting measures such as the requirement for the IE3 class as the minimum manufacturing standard in the country, an initiative aimed at increasing the efficiency of these motors and consequently reducing operational costs. Through a comprehensive literature review, it was possible to map the scientific production related to electric motors and identify emerging trends in the field. The bibliometric analysis conducted shows that countries such as India, the United States, and Brazil lead publications in this area, providing a global perspective on technological advancements and practices focused on energy efficiency. Furthermore, the work addresses the challenge posed by voltage imbalance, a phenomenon that impairs motor performance. The results obtained from empirical tests conducted with premium (IE3) and super premium (IE4) motors under conditions of voltage imbalance are particularly revealing. They show that super premium permanent magnet motors tend to have higher energy consumption in imbalance situations, especially when operating with loads below their nominal capacity. These findings highlight the importance of considering variables related to imbalance when selecting motors for industrial applications, offering valuable insights for choosing more efficient technologies. It is concluded that the adoption of more efficient motors is essential to promote energy sustainability on a global scale. In this sense, regulations must continue to evolve to encourage the replacement of old motors with more advanced technologies, mitigating the impacts of disturbances such as voltage imbalance. With a detailed and solid approach, this dissertation provides relevant contributions to the field of energy efficiency, encouraging researchers and professionals in the area to adopt more innovative and sustainable practices.

Keywords: induction motor, voltage Unbalance, voltage Imbalance, efficiency classes, line start permanent magnet motor; power quality; harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Publicações relacionadas aos temas motores elétricos nos últimos 35 anos.	17
Figura 1.2: Distribuição de publicações relacionadas ao tema.....	17
Figura 1.3: Distribuição de estudos por área de conhecimento.....	18
Figura 1.4: Mapa temático de palavras-chave.....	19
Figura 2.1: Motor trifásico, visão interna e externa.	31
Figura 2.2: Impacto das possíveis áreas de melhoria para o desempenho do motor de indução.	36
Figura 2.3: Estrutura de um LSPMM.....	40
Figura 2.4: Países com MEPS para motores elétricos em 2025.....	42
Figura 4.1: Bancada utilizada nos testes.....	53
Figura 4.2: Fluxograma que resume a metodologia utilizada.	55
Figura 4.3: DHTI x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.....	56
Figura 4.4: DHTI x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	57
Figura 4.5: DHTI x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	57
Figura 4.6: DHTI x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	58
Figura 4.7: DHTI x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.....	59
Figura 4.8: DHTI x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	59
Figura 4.9: DHTI x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	60
Figura 4.10: DHTI x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	60
Figura 4.11: Corrente x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.....	61
Figura 4.12: Corrente x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	62
Figura 4.13: Corrente x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	62
Figura 4.14: Corrente x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	63
Figura 4.15: Potência Ativa x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.....	64
Figura 4.16: Potência Ativa x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	65
Figura 4.17: Potência Ativa x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	66
Figura 4.18: Potência Ativa x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	67
Figura 4.19: Potência Aparente x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.....	68
Figura 4.20: Potência Aparente x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	69
Figura 4.21: Potência Aparente x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	70
Figura 4.22: Potência Aparente x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	71
Figura 4.23: Potência Reativa x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.....	72
Figura 4.24: Potência Reativa x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	72
Figura 4.25: Potência Reativa x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	73
Figura 4.26: Potência Reativa x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	74
Figura 4.27: Fator de Potência x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.....	75
Figura 4.28: Fator de Potência x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	76
Figura 4.29: Fator de Potência x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	77
Figura 4.30: Fator de Potência x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	77
Figura 4.31: Corrente x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.....	79
Figura 4.32: Corrente x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	80
Figura 4.33: Corrente x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	80
Figura 4.34: Corrente x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	81
Figura 4.35: Potência Ativa x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.....	82

Figura 4.36: Potência Ativa x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	83
Figura 4.37: Potência Ativa x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	84
Figura 4.38: Potência Ativa x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	85
Figura 4.39: Potência Aparente x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.....	86
Figura 4.40: Potência Aparente x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão. ..	86
Figura 4.41: Potência Aparente x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão. ..	87
Figura 4.42: Potência Aparente x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão. ..	88
Figura 4.43: Potência Reativa x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.	90
Figura 4.44: Potência Reativa x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	90
Figura 4.45: Potência Reativa x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	91
Figura 4.46: Potência Reativa x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	92
Figura 4.47: Fator de Potência x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.	93
Figura 4.48: Fator de Potência x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.....	94
Figura 4.49: Fator de Potência x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.....	95
Figura 4.50: Fator de Potência x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.....	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Gerais	14
1.2	Regulamentação de Motores de Indução no Brasil.....	15
1.3	Metodologia para a Revisão de Literatura	16
1.4	Análise Bibliométrica	16
1.5	Revisão de Literatura	19
1.5.1	Estado da arte de Motores de Indução e desequilíbrio de tensão	19
1.6	Estado da arte de Motores de Imãs Permanentes para Partida Direta	22
1.7	Objetivos da Pesquisa	25
1.8	Estrutura da Dissertação	26
1.9	Considerações finais	26
2	MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....	28
2.1	Considerações Gerais	28
2.2	Estrutura e Princípios e Operação.....	29
2.3	Classes de Eficiência.....	33
2.4	Melhorias em Motores de Indução	35
2.4.1	Materiais Ativos	36
2.4.2	Perdas pela Ventilação e Atrito.....	37
2.5	Motor de ímã permanente com partida direta.....	38
2.6	Padrões Mínimos de Desempenho Energético	40
2.7	Considerações finais	42
3	DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES.....	43
3.1	Considerações Gerais	43
3.2	Definições de Desequilíbrio de Tensão.....	44
3.2.1	Taxa de Desequilíbrio de Tensão de Linha (LVUR).....	44
3.2.2	Razão de Desequilíbrio de Tensão de Fase (PVUR).....	45
3.2.3	Fator de desequilíbrio de Tensão (VUF).....	46

3.2.4	Fator de Desequilíbrio de Tensão Complexo	46
3.3	Causas do Desequilíbrio de Tensões	47
3.4	Impacto em Máquinas Elétricas.....	48
3.5	Impacto na Qualidade da Energia Elétrica.....	49
3.6	Considerações finais	51
4	COMPARAÇÃO DE MOTORES IR3 E IR4 SUBMETIDOS A TENSÕES DESEQUILIBRADAS.....	52
4.1	Metodologia.....	52
4.2	Resultados e discussão.....	56
4.2.1	Análise da Resposta da Qualidade de Energia Para o Motor IR3	56
4.2.2	Análise da Resposta da Qualidade de Energia Para o Motor IR4	58
4.3	Análise Técnica Para o Motor de Indução	61
4.3.1	Análise das Correntes motor IR3	61
4.3.2	Análise da Potência Ativa	63
4.3.3	Análise da Potência Aparente.....	67
4.3.4	Análise da Potência Reativa.....	71
4.3.5	Análise do Fator Potência	75
4.4	Análise Técnica Para o LSPMM	78
4.4.1	Análise da Corrente.....	79
4.4.2	Análise do Potência Ativa.....	81
4.4.3	Análise do Potência Aparente	85
4.4.4	Análise do Potência Reativa.....	89
4.4.5	Análise do Fator Potência	93
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE OS MOTORES IR3 E IR4.....	96
4.5.1	Potência Ativa Total.....	96
4.5.2	Potência Reativa Total	97
4.6	Considerações finais	98
5	CONCLUSÕES.....	100
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O Acordo de Paris, firmado em 2015, representou um marco significativo no combate às mudanças climáticas, impulsionando a implementação de políticas e regulamentações voltadas para a eficiência energética. Esse acordo desempenha um papel crucial na busca por metas ambientais e na promoção de práticas sustentáveis em escala global. Nesse cenário, os motores de indução destacam-se como uma categoria essencial para a economia de energia, sendo responsáveis por aproximadamente 53% do consumo final de energia elétrica mundial (IEA, 2018a).

No Brasil, conforme dados do Ministério de Minas e Energia apresentados no documento “Plano Nacional de Eficiência Energética”, o setor industrial consome 36% de toda a eletricidade do país, e os sistemas de acionamento em operação utilizam 68% dessa energia. Assim, estima-se que cerca de 35% do consumo total de eletricidade no Brasil seja atribuído aos motores elétricos (MME, 2023).

Os motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo foram os primeiros e únicos equipamentos a serem regulamentados por decreto presidencial no Brasil. A publicação do Decreto Presidencial nº 4.508, em 11 de dezembro de 2002, trouxe uma transformação significativa para o mercado de motores elétricos no país. Inicialmente, as regulamentações estabeleceram potências mínimas para as classes IR1 (motores padrões) e IR2 (motores de alta eficiência), proibindo a fabricação, comercialização ou importação de motores com potências inferiores às da classe IR1. Esse decreto foi respaldado pela Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que instituiu a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, conhecida como "Lei de Eficiência Energética", promulgada após a crise energética daquele período, popularmente chamada de "Apagão".

Posteriormente, o Decreto Interministerial nº 553, de 8 de dezembro de 2005, introduziu a classe IR3 como o novo padrão de eficiência, definindo também um prazo para a adaptação do mercado. A partir de 2010, a fabricação, importação e comercialização de motores de indução com rotor em gaiola de esquilo no Brasil passaram a obedecer aos requisitos mínimos de eficiência da classe IR2.

Em junho de 2017, com base no Estudo de Impacto da Regulamentação do Motor Premium, elaborado pela Eletrobras em 2015, foi publicado o Decreto Interministerial nº 1, de

29 de junho de 2017. Esse decreto estabeleceu que os motores de indução trifásicos (MIT) com rotor em gaiola de esquilo, fabricados ou importados, deveriam atender a uma eficiência igual ou superior à mínima exigida para a classe premium (IR3), com um prazo de dois anos para adaptação do mercado. Além de elevar a eficiência mínima de IR2 para IR3, o escopo da regulamentação foi ampliado, abrangendo motores com potência comercial de até 500 cv (IEC, 2014; MCTI, 2017).

1.2 Regulamentação de Motores de Indução no Brasil

Em agosto de 2019, entrou em vigor a nova Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos, que consolidou o nível mínimo de desempenho na classe IR3, conforme definido pelo Regulamento Interministerial nº 1 (MCTI, 2017). Com a adoção de motores de alta eficiência, projeta-se uma economia superior a 11 TWh de eletricidade entre 2019 e 2030, além de uma redução de custos estimada em \$4,7 milhões até 2020 e \$172 milhões até 2050 (IEA, 2018b). Apesar do avanço representado pela nova lei, os requisitos regulamentares não abrangem os motores elétricos já instalados. Estima-se que, no Brasil, existam cerca de 20,1 milhões de motores trifásicos em operação WEG (2019). Um estudo realizado na Suíça revelou que muitas indústrias utilizam motores que já superaram sua vida útil esperada Werle *et al.* (2015), frequentemente devido a reparos realizados mais de uma vez. Caso os procedimentos adequados não sejam seguidos, perdas de eficiência podem variar entre 3% e 7,5% a cada rebobinagem WEG (2019). Entretanto, quando o processo de rebobinagem é realizado corretamente, há evidências de que a eficiência dos motores pode ser recuperada ou até mesmo aumentada (Ferreira, 2023; Ferreira; de Almeida, 2012).

Para promover a eficiência energética e melhorar a produtividade no setor industrial, consumindo menos eletricidade, a Chamada Pública nº 002/2015 incentivou a substituição de motores elétricos antigos ou recondicionados por modelos mais modernos e eficientes. Esse programa ofereceu um sistema de bônus limitado para a troca de motores de indução trifásicos fabricados até 2009, com potências entre 0,75 kW e 250 kW, além de motores monofásicos com potência igual ou superior a 0,75 kW. O percentual do bônus foi definido pelas concessionárias, que submeteram os valores para aprovação pela Agência Nacional e Energia Elétrica (ANEEL, 2015).

É importante destacar que o custo inicial de um motor elétrico representa cerca de 5% do custo total de operação ao longo de sua vida útil. Melhorias na eficiência, embora resultem em um aumento no custo inicial, são compensadas por economias significativas no longo prazo.

Um exemplo disso é o motor de ímã permanente da classe IR4, que inicialmente apresentava um custo até duas vezes maior do que os motores de indução com gaiola de esquilo (ou em inglês *Squirrel Cage Induction Motor* — SCIM) da classe IR3 (Abusaada; Elshater, 2022). Contudo, ao longo dos anos, o preço desses motores diminuiu, atingindo valores cerca de 1,3 vezes superiores ao custo dos SCIM, tornando-se uma opção mais vantajosa para substituições no setor industrial (WEG, 2025).

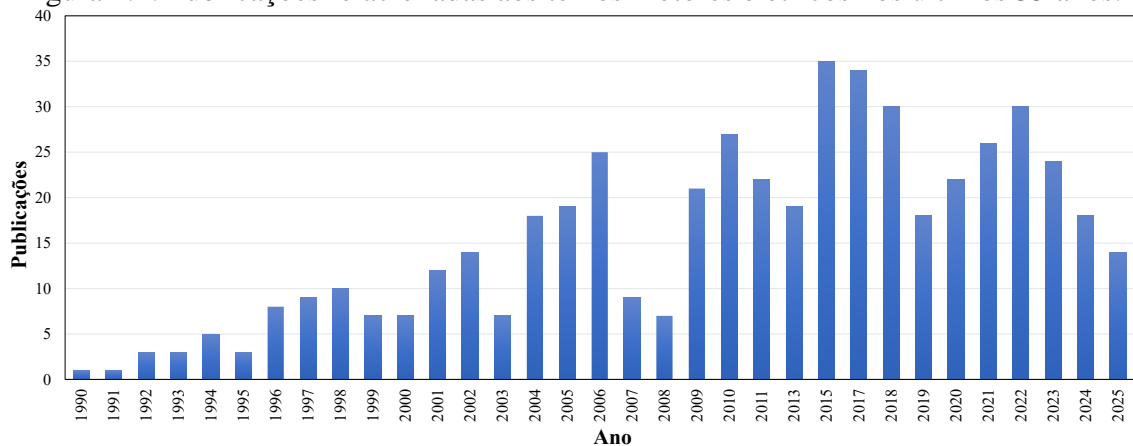
1.3 Metodologia para a Revisão de Literatura

Para o desenvolvimento deste estudo, foram definidas, com base no tema da dissertação, as palavras-chave mais relevantes, utilizadas como referência para a pesquisa: "*induction motor*", "*line start permanent magnet motor*", "*voltage imbalance*" e "*voltage unbalance*". As investigações foram realizadas por meio da plataforma acadêmica "*Scopus*", acessada através do portal de periódicos da CAPES. A pesquisa foi conduzida utilizando as palavras-chave mencionadas e os operadores lógicos disponibilizados pela plataforma. A busca por trabalhos acadêmicos foi estruturada com a seguinte expressão: "*induction motor*" AND ("*voltage unbalance*" OR "*voltage imbalance*") OR ("*induction motor*" AND "*line start permanent magnet motor*") AND NOT ("*electric vehicle*", "*wind energy*", "*generator*", "*synchronous motor*") OR ("*electric vehicles*", "*wind power*", "*generators*", "*synchronous motors*"). Após a coleta e análise dos dados obtidos, foi realizada uma avaliação sistemática, na qual os resultados foram organizados e agrupados conforme as abordagens metodológicas utilizadas. Por fim, técnicas de visualização foram aplicadas para sintetizar e apresentar graficamente os resultados do estudo previamente proposto.

1.4 Análise Bibliométrica

Foi realizada uma pesquisa de publicações relacionadas aos temas dessa dissertação nos últimos 35 anos, conforme mostrado na Figura 1.1. A figura mostra que o maior pico de publicações para a busca definida foi alcançado em 2015. No entanto, os números de publicações quase foram atingidos em 2016, 2017 e 2022.

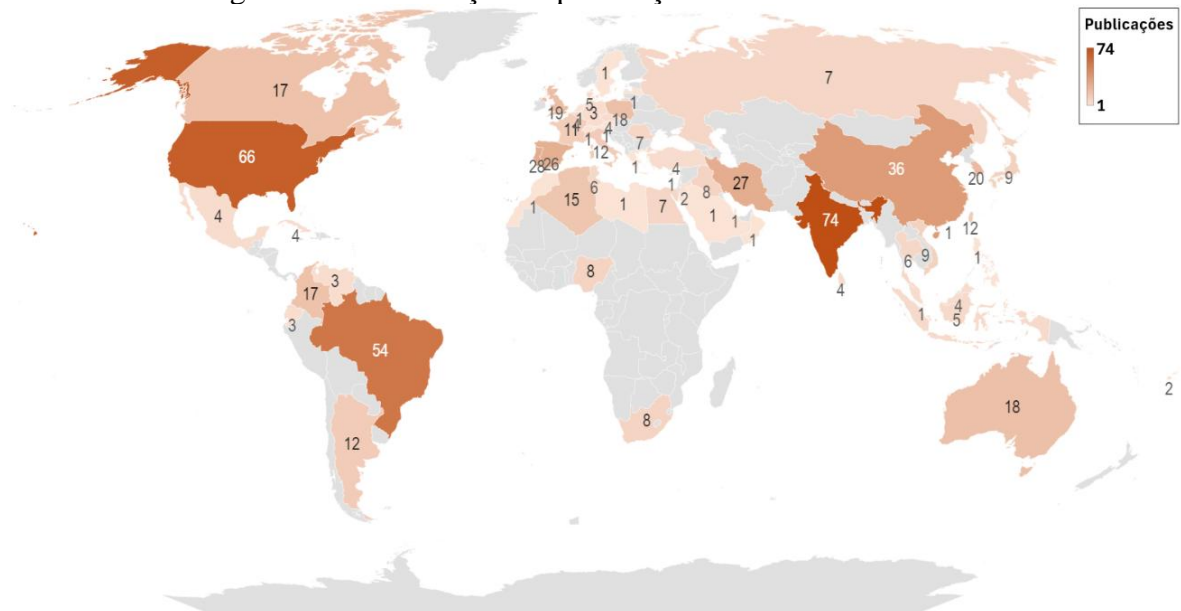
Figura 1.1: Publicações relacionadas aos temas motores elétricos nos últimos 35 anos.



Fonte: Autoria própria.

As pesquisas relacionadas os temas desta dissertação são lideradas pela Índia, Estados Unidos, Brasil e China, conforme mostrado na Figura 1.2. Portugal, Irã, Espanha, Coreia do Sul, Reino Unido e Austrália estão entre os 10 principais países com mais publicações sobre estes tópicos. Os 10 países com mais publicações concentram a maioria das publicações, de acordo com a pesquisa.

Figura 1.2: Distribuição de publicações relacionadas ao tema.

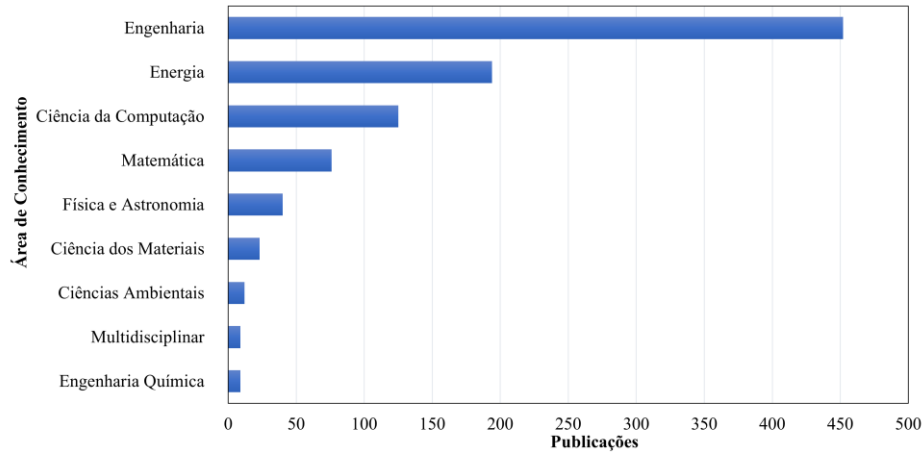


Fonte: Autoria própria.

A Figura 1.3 mostra as áreas do conhecimento relacionados aos motores elétricos e tensões desequilibradas. Pode-se ver que engenharia e energia são os campos dominantes, com uma proporção significativa da pesquisa realizada no campo da ciência da computação, mas

também incluindo outras categorias, como matemática, ciência dos materiais, física e astronomia, entre outras.

Figura 1.3: Distribuição de estudos por área de conhecimento.



Fonte: Autoria própria.

Uma análise importante baseada nas informações coletadas é a das palavras-chave relevantes dentro dos estudos analisados. Para esse propósito, o *software VOSViewer* foi utilizado para gerar um mapa temático das palavras-chave de acordo com o número de vezes que foram citadas nos estudos, bem como as conexões com outros estudos e palavras-chave, conforme mostrado na Figura 1.4.

Para definir e classificar o universo de palavras-chave, um processo de agrupamento foi realizado no *software*, o que resultou em seis áreas principais: Motores de Indução, Diagnóstico de Falhas, Motores Síncronos, Motores de Ímã Permanente, Qualidade de Energia e Eficiência Energética, todos os quais serão discutidos na revisão sistemática nas subseções seguintes.

de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ) cada uma com diferentes considerações e interpretações, principalmente porque o mesmo percentual de desequilíbrio pode ser obtido para diferentes magnitudes de tensão, com subtensão e sobretensão (CIGRE, 2004; NEMA, 2018; IEEE, 2019). Em Lee, (1999), uma análise completa do efeito do desequilíbrio de tensão é desenvolvida. Isso inclui subtensão e sobretensão. De acordo com os resultados experimentais, um desequilíbrio de subtensão geralmente causa o maior aumento de temperatura, e uma tensão de sequência positiva mais alta também leva a uma maior eficiência do motor e a um fator de potência mais baixo.

Com relação à temperatura, o desequilíbrio de tensão induz um aumento desigual na corrente, amplificando as perdas por efeito joule e, conseqüentemente, elevando as temperaturas de operação (Abu-Elhajja; Muetze, 2018; Ferreira *et al.*, 2016; Gnaciński, 2014; Kostic, 2012; NEMA, 2018; Neves *et al.*, 2016; Singh; Singh, 2013). Além disso, várias configurações de desequilíbrio de tensão podem coexistir dentro dos sistemas elétricos. Resultados experimentais em Bonnett, (1999) mostram que o desequilíbrio com subtensão resulta nos maiores aumentos de temperatura. Em geral, para cada aumento de 10°C na temperatura do enrolamento, a vida útil do motor é reduzida pela metade (Bonnett, 1999).

O artigo de Kersting, (2000) analisa as causas e os impactos de tensões desequilibradas em sistemas que atendem uma combinação de cargas monofásicas e motores de indução trifásicos. O Autor apresenta modelos de componentes do sistema, incluindo linhas de distribuição, conexões de transformadores e motores de indução, e avalia diferentes condições operacionais. O artigo conclui que a escolha adequada das conexões de transformadores e a capacidade dos mesmos são cruciais para minimizar tensões desequilibradas e seus impactos em motores de indução.

De acordo com Wang, (2001) além da magnitude das tensões, o ângulo do desequilíbrio também é necessário para analisar completamente os efeitos do desequilíbrio em motores elétricos. Estudos relacionados considerando o fator de desequilíbrio de tensão complexo são apresentados em (Abu-Elhajja; Muetze, 2018; Adekitan, 2020; Neves *et al.*, 2016; Wang, 2001).

O artigo de Al-Badri *et al.* (2016) apresenta uma técnica inovadora para estimar a eficiência de motores de indução trifásicos operando com tensões desequilibradas, utilizando um algoritmo baseado em Algoritmos Genéticos e dados de motores previamente testados. A técnica foi projetada para ser aplicada *in loco*, permitindo a avaliação da eficiência sem interrupções significativas no funcionamento do motor.

O trabalho de Gonzalez-Cordoba *et al.* (2018) realizou um monitoramento de perfis térmicos do estator sob diferentes níveis de sobrecarga e desequilíbrio de tensão. Os autores contruíram modelos matemáticos que correlacionam os impactos térmicos com os tempos de operação segura do motor. Eles também implementaram o modelo *online* para proteção em tempo real. Testes foram realizados em um motor de indução trifásico de 750 W, utilizando resistências para gerar sobrecargas mecânicas e autotransformadores para simular desequilíbrios de tensão. Os resultados confirmam que os modelos propostos garantem proteção térmica eficaz, desligando o motor antes que os limites de segurança sejam excedidos.

O artigo de El-Kharashi *et al.*, (2018b) apresenta uma análise comparativa do desempenho durante a operação desequilibrada entre um conjunto cascata de motores de indução e um único motor de indução de grande porte com a mesma potência nominal, e comprova que a operação de um conjunto cascata de motores de indução sob tensão de alimentação desequilibrada é mais eficiente do que a de um único motor de grande porte.

No trabalho de Adouni (2021) foi aplicado o Método de Elementos Finitos para simular o comportamento térmico e eletromagnético do motor sob diferentes condições de falha. Os autores apresentam três cenários (Motor saudável, Motor com tensão desequilibrada; Motor com curto-circuito entre espiras e tensão desequilibrada). A distribuição de temperatura mostrou-se uniforme no motor saudável, mas tornou-se altamente irregular em condições de falha. As temperaturas máximas medidas em diferentes partes do motor (núcleo, dente do estator, bobinas) aumentaram drasticamente com o aumento da severidade da falha. Os autores concluem que os desequilíbrios de tensão e curtos-circuitos entre espiras têm impactos térmicos severos, podendo levar à queima do motor antes que métodos de diagnóstico possam intervir. E que Motores de baixa potência são particularmente vulneráveis a esses cenários, mesmo em condições de carga moderada.

O artigo de Tabora *et al.*, (2023a) apresenta uma avaliação do impacto da variação de tensão em dois motores de indução de gaiola de esquilo de 0,75 kW classe IE2 e IE3. Os resultados mostram que a operação com subtensão pode representar correntes mais baixas e maior fator de potência, ao contrário da sobretensão normalmente usada em algumas indústrias de países.

O artigo de Tabora *et al.*, (2023b) propõe um indicador de degradação do motor quando submetido a condições prejudiciais na tensão de alimentação. Para esse propósito, campanhas experimentais de medição em um motor de indução de gaiola de esquilo foram realizadas em condições ideais de alimentação, bem como em condições de sobretensão. Os autores realizam uma avaliação baseada em técnicas de processamento de sinal do espectro de

frequência da forma de onda da corrente e, em seguida, a metodologia proposta é validada em condições reais com motores de 15 kW, alimentados com sobretensão. Os resultados revelam que o indicador proposto responde adequadamente à perturbação avaliada de tal forma que pode ser uma ferramenta preditiva quando validado com outras perturbações existentes em sistemas de energia.

1.6 Estado da arte de Motores de Imãs Permanentes para Partida Direta

A introdução de diferentes classes de eficiência surgiu como consequência de estudos e testes realizados por pesquisadores e fabricantes para identificar as perdas em motores de indução e as maneiras de reduzi-las. Uma análise dos benefícios técnicos e econômicos da substituição entre essas tecnologias foi apresentada em de Almeida *et al.* (2012), U. S. Department of Energy (2014), Kahrisangi *et al.* (2012), Isfahani e Vaez-Zadeh (2009), de Almeida *et al.* (2014), Ferreira *et al.* (2018), Gwoździwicz e Antal (2010), Debruyne *et al.* (2012), Aguiar *et al.* (2018).

Além disso, os estudos em Isfahani e Vaez-Zadeh (2009), Kahrisangi *et al.* (2012), Gwoździwicz e Antal (2010), Debruyne *et al.* (2012), Kim *et al.*, (2020), Debruyne (2014), Tarimer (2009), Miller (1984), Chama *et al.* (2016), Wu *et al.* (2018), Melfi *et al.* (2006), Takahashi *et al.* (2015), Jaszczolt (2017) incluem as principais características de *design*, fraquezas e forças relacionadas ao motor de ímã permanente de partida direta (do inglês *line start permanent magnet motor* — LSPMM). Então, do ponto de vista regulatório e de políticas, diferentes análises comparando os desafios e projeções relacionados a motores eficientes também foram apresentadas em (Ferreira; de Almeida 2012, Melfi *et al.*; 2006, Boteler; 2009, de Almeida *et al.*; 2017; de Almeida *et al.*, 2019).

Em Ferreira, (2023), é apresentado um exemplo de substituição em campo de um motor de indução de gaiola por um LSPMM. Um bom desempenho e menor consumo são obtidos com essas tecnologias; no entanto, as perdas harmônicas parecem ser maiores nos LSPMMs em condições de vazio.

Novos motores de maior eficiência são construídos de acordo com a norma IEC 60034-7 (IEC, 2020). Esta norma especifica os requisitos relativos à classificação de tipos de construção, arranjos de montagem e posição da caixa de terminais, que contribuem para a substituição entre tecnologias. Estudos têm mostrado que o maior custo inicial dos motores de maior eficiência pode ser amortizado em um curto período devido às economias de energia e programas de incentivo financeiro inicial; maior eficiência, fator de potência e comportamento

térmico também são alguns dos benefícios obtidos com essas tecnologias. No entanto, uma análise de custo-benefício, levando em conta o tipo de aplicação e condições de fornecimento, deve ser desenvolvida antes da substituição.

No estudo de Debruyne *et al.* (2014), foi avaliada a eficiência de um LSPMM trifásico de 4 kW, disponível comercialmente, em função da temperatura. Para isso, foram utilizadas tanto modelagem por elementos finitos quanto medições práticas. Os autores demonstraram que, diferentemente dos motores de indução, os LSPMM podem apresentar um aumento na eficiência com a elevação da temperatura operacional, devido à redução das perdas no ferro. Entretanto, para garantir o máximo desempenho, é crucial considerar os limites térmicos e as condições de carga.

Por sua vez, o artigo de Asogwa (2019) analisou as operações transitórias e em regime permanente de dois LSPMM com diferentes configurações de rotor: um com ímãs montados na superfície do rotor, caracterizado por sua fabricação mais simples, e outro com ímãs embutidos no rotor, que oferece maior robustez. Os cálculos indicaram que ambos os projetos podem alcançar uma eficiência superior à dos motores de indução convencionais. No entanto, o rotor com ímãs embutidos demonstrou melhor capacidade de carga durante a operação assíncrona. Além disso, esse *design* apresentou menor dispersão de fluxo e menores perdas de cobre na operação síncrona, sob as mesmas condições de carga.

O estudo de Tabora (2020) fornece uma análise detalhada e experimental sobre os impactos do desequilíbrio de tensão em motores de diferentes classes de eficiência. Ele destaca a necessidade de considerar não apenas a eficiência energética, mas também os impactos na qualidade de energia e na operação térmica dos motores. Os resultados obtidos mostram que o motor híbrido IR4 apresenta características não lineares, sendo observado que este motor demonstra menor dependência em relação à variação de tensão, principalmente em condições de desequilíbrio por subtensão. Os autores também desenvolveram uma análise de como esse fenômeno impacta as distorções harmônicas de corrente na operação dos motores de indução.

O trabalho de Knypiński *et al.* (2020) concluiu que a aplicação do algoritmo de otimização do lobo cinzento, juntamente com um *software* desenvolvido internamente, possibilitou o projeto de um motor LSPMSM altamente eficiente, com melhorias significativas em relação ao motor de indução convencional. O protótipo apresentou desempenho superior em termos de eficiência, fator de potência e consumo de corrente.

O artigo de Tabora *et al.*, (2020) mostra que, sob condições operacionais ideais, o motor de ímã permanente da classe IR4 apresenta melhor desempenho em termos de consumo

e temperatura, embora apresente características não lineares. Na presença de harmônicos de tensão, esse cenário muda completamente de acordo com o conteúdo harmônico.

O estudo de Tabora *et al.* (2021b) apresenta um estudo dos impactos do desequilíbrio de tensão com sub e sobretensão no desempenho de um LSPMM. Os resultados mostram que o desequilíbrio de tensão com subtensões resulta em melhorias em relação ao fator de potência, porém o desequilíbrio de tensão também resulta em aumentos na distorção harmônica de corrente, portanto, este parâmetro deve ser analisado em sistemas com percentuais de desequilíbrio maiores que 1%.

O trabalho Tabora *et al.* (2022a) apresenta um modelo baseado no Método de Elementos Finitos para avaliar o motor de ímã permanente de partida direta, com o objetivo de simular o comportamento do LSPMM em condições de alimentação com tensões distorcidas (conteúdo harmônico) e avaliar seu desempenho térmico e magnético.

O estudo de Tabora *et al.* (2022b) destaca a importância de considerar as variações de tensão regionais ao instalar ou substituir motores elétricos, especialmente em países que dependem de importação. A escolha da classe do motor (IR2, IR3 ou IR4) deve levar em conta os impactos econômicos e operacionais das variações de tensão. O estudo aborda as influências da variação de tensão no consumo, no fator de potência e na temperatura. Os autores observam uma redução no fator de potência e um aumento no consumo e na temperatura nas condições de sobretensão, enquanto, para a subtensão, foi identificado um aumento no fator de potência e variações no consumo e na temperatura, dependendo da classe do motor.

No artigo de Mendes *et al.* (2023) uma metodologia baseada em redes neurais artificiais é proposta para identificar a carga de saída do LSPMM na presença de variação de tensão com condições de subtensão e sobretensão. A metodologia proposta é constituída de duas etapas. A primeira inclui campanhas de medição para obter a resposta do motor de ímãs em condições de variação de tensão. Em seguida, a correlação de *Spearman* foi usada para selecionar as melhores variáveis para usar na predição, a fim de finalmente implementar a Rede Neural para identificar a carga de saída do LSPMM em cada condição de tensão. Os resultados validam a metodologia proposta e sua aplicação na indústria para motores operando nessas condições.

Esta dissertação contribui para o tema ao realizar uma análise comparativa entre um motor de indução convencional e um motor de ímãs permanentes, ambos submetidos a condições de tensões desequilibradas e diferentes níveis de carga. Os motores foram avaliados sob diversos aspectos, e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 4.

Um resumo da revisão da literatura relacionada ao desequilíbrio de tensão e motores elétricos, classificado de acordo com as abordagens analisadas neste trabalho, é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1.1: Revisão de literatura sobre motores de indução e desequilíbrio de tensão

Assunto Principal do Artigo	Trabalhos Relevantes
Comparação de motores de indução	De Almeida <i>et al.</i> (2012), de Almeida <i>et al.</i> (2014), de Almeida (2009), Bonnett (1999); Debruyne (2014), Debruyne <i>et al.</i> (2012), Ferreira <i>et al.</i> (2018), Ferreira <i>et al.</i> (2016); Tabora <i>et al.</i> , (2019b) e (2019a), Kahrisangi <i>et al.</i> (2012); <i>U. S. Department of Energy</i> (2014).
Impactos do desequilíbrio de tensão em motores de indução	Abu-Elhaija e Muetze (2018), Ferreira <i>et al.</i> (2016), Neves <i>et al.</i> (2016); Quispe (2012), Singh (2013); Zhang e Wu (2017), Ferreira <i>et al.</i> (2016), Singh e Singh (2013), Ferreira <i>et al.</i> (2020), Abu-Elhaija e Muetze (2018), Neves <i>et al.</i> (2016); NEMA, (2018), Kostic (2012), Gnaciński (2014).
Normas relacionadas ao desequilíbrio de tensão	IEEE Std (2019), NEMA (2018).
Motor de ímã permanente de partida direta (LSPMM)	Chama <i>et al.</i> (2016), Debruyne,(2014), Debruyne <i>et al.</i> (2012), Debruyne <i>et al.</i> (2013); Ferreira <i>et al.</i> (2009), Gwoździejewicz e Antal (2010), Isfahani e Vaez-Zadeh (2009); Kahrisangi <i>et al.</i> , (2012); Kalluf <i>et al.</i> (2010), Kim <i>et al.</i> (2020), Miller (1984), Mingji Liu <i>et al.</i> , (2013); Sorgdrager <i>et al.</i> (2017), Takahashi <i>et al.</i> (2015); Tarimer (2009), Vavra (2017), Vera (2015), Zawilak e Zawilak (2008); Zeng <i>et al.</i> , (2019)
Estudos de substituição econômica	Aguiar <i>et al.</i> (2018), de Almeida <i>et al.</i> (2012).

Fonte: Autoria própria.

1.7 Objetivos da Pesquisa

Com base em uma revisão de literatura, este estudo contribui consideravelmente para o campo ao analisar o impacto das perturbações na qualidade de energia em motores das classes IR3 e IR4. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é apresentar uma avaliação técnica, dos impactos do desequilíbrio de tensão no comportamento de motores de indução das classes de eficiência IR3 e IR4. À luz desse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram delineados.

- A partir da literatura e normas, definir as magnitudes de tensão a serem avaliadas em motores elétricos.
- Analisar o comportamento dos motores IR3 e IR4 em diferentes variáveis, como potência ativa, potência reativa e a distorção harmônica total da corrente, quando

submetidos a uma alimentação com tensões desequilibradas e diferentes condições de carga.

- Comparar qual motor, de indução ou de ímãs permanentes, apresenta maior resiliência aos estresses de carga e desequilíbrio de tensão.

-

1.8 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em capítulos conforme descrito a seguir:

Capítulo 1: Este capítulo introduz o contexto da pesquisa, apresentando uma revisão bibliométrica e abordando o estado da arte relacionado aos motores de indução submetidos a tensões desequilibradas, bem como aos motores de ímãs permanentes. Além disso, são definidos os objetivos gerais e específicos do estudo.

Capítulo 2: Neste capítulo, são analisados os motores de indução e os motores de ímãs permanentes, com ênfase em suas características construtivas, classes de eficiência e os efeitos decorrentes do desequilíbrio de tensão elétrica. Também são discutidas as regulamentações nacionais e internacionais que incentivam a eficiência energética.

Capítulo 3: Este capítulo detalha a abordagem experimental adotada na pesquisa. São descritos a configuração da bancada de testes, os níveis de carga aplicados e os diferentes graus de desequilíbrio de tensão avaliados (0%, 2%, 3% e 4%).

Capítulo 4: Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os motores IR3 e IR4, com uma análise comparativa de seu desempenho sob diferentes condições de carga e níveis variados de desequilíbrio de tensão. São explorados os impactos nas grandezas avaliadas, como distorções harmônicas, correntes elétricas, potências ativa e reativa, entre outros aspectos.

Capítulo 5: Este capítulo sintetiza os principais resultados da pesquisa, destacando as diferenças observadas entre os motores IR3 e IR4, bem como os efeitos do desequilíbrio de tensão no desempenho dos equipamentos.

Capítulo 6: Este capítulo reúne as referências bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação.

1.9 Considerações finais

Este capítulo destacou a importância dos motores de indução trifásicos no setor industrial, responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica em nível global. Enfatizou o desafio que o desequilíbrio de tensão representa para a eficiência e a durabilidade desses motores, além de definir os objetivos da pesquisa.

O próximo capítulo aborda os motores de indução e os motores de ímãs permanentes, destacando suas características construtivas e sua importância na indústria mundial.

2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Dentre as diversas tipologias de máquinas elétricas, os motores de indução destacam-se como os mais amplamente empregados. Conforme destacado por Sahdev (2017) e Neto (2023), mais de 90% da potência mecânica utilizada na indústria mundial é provida por motores de indução trifásicos. Esses motores, também denominados motores assíncronos, em virtude de não operarem em velocidade síncrona, podem ser classificados em monofásicos ou trifásicos. Os motores de indução trifásicos são amplamente adotados no ambiente industrial devido à sua construção simples e robusta, baixo custo de aquisição, elevada eficiência energética, fator de potência satisfatório, capacidade de partida direta e reduzidas exigências de manutenção.

2.1 Considerações Gerais

Historicamente, a popularização dos motores de indução trifásicos remonta ao final do século XIX, impulsionada pelas contribuições de cientistas como Nikola Tesla, Galileo Ferraris e Elihu Thomson. Esses avanços, aliados ao desenvolvimento dos sistemas trifásicos entre 1885 e 1893, estabeleceram as bases para a eficiência e confiabilidade que caracterizam esses motores até os dias de hoje (Pinheiro *et al.* 2021).

Na indústria moderna, os motores de indução trifásicos desempenham um papel crucial, sendo amplamente reconhecidos por sua eficiência, durabilidade e baixo custo operacional. Devido à sua confiabilidade e simplicidade construtiva, esses motores são os mais utilizados em diversos setores industriais. Entre suas principais vantagens em relação aos motores de corrente contínua, destacam-se a ausência de escovas e coletores, o que reduz significativamente a necessidade de manutenção frequente. Essas características tornam os motores de indução trifásicos ideais para operar em ambientes industriais adversos, incluindo aqueles com atmosferas potencialmente perigosas (Gonen; Mehrizi-Sani, 2024).

Conforme destacado por Magalhães (2018), os avanços tecnológicos possibilitaram a introdução de conversores eletrônicos, que permitem o controle de velocidade desses motores, ampliando ainda mais suas aplicações no setor industrial. Eles são amplamente empregados em sistemas que exigem operação contínua, como bombas, ventiladores, compressores, esteiras transportadoras e guindastes, sendo indispensáveis para a eficiência dos processos produtivos. Além disso, esses motores desempenham um papel significativo na economia global,

consumindo aproximadamente 46% da energia elétrica mundial, dos quais 69% do consumo industrial de energia elétrica é atribuído a motores elétricos.

A relevância dos motores de indução trifásicos na indústria moderna é continuamente reforçada pelas inovações tecnológicas e pela busca por maior sustentabilidade energética. Sua eficiência, robustez e versatilidade os tornam indispensáveis em uma ampla gama de aplicações, consolidando sua posição como um dos principais pilares da operação industrial contemporânea.

2.2 Estrutura e Princípios e Operação

Os motores de indução trifásicos são compostos por duas partes principais: o estator, que é a estrutura fixa responsável por gerar o campo magnético rotativo, e o rotor, a parte móvel que gira em resposta a esse campo. O estator é constituído por enrolamentos, geralmente feitos de fios de cobre ou alumínio isolados, que recebem a alimentação elétrica, e por um núcleo magnético que desempenha papel fundamental no funcionamento do motor (Chapman, 2005). O estator possui dois componentes principais:

- Núcleo do estator: Quando uma alimentação em corrente alternada (CA) é aplicada ao motor, um fluxo magnético alternado é gerado no núcleo do estator. Esse fluxo provoca perdas por histerese e correntes parasitas, que podem comprometer a eficiência do motor. Para minimizar essas perdas, o núcleo é fabricado com chapas de aço silício de alta qualidade, montadas sob pressão hidráulica e fixadas à estrutura. Cada chapa é isolada da outra por uma fina camada de verniz, e a espessura dessas chapas varia entre 0,3 e 0,5 mm. Os enrolamentos são inseridos em ranhuras localizadas na parte interna do núcleo (Sahdev, 2017).
- Enrolamento do estator: O núcleo abriga um enrolamento trifásico, normalmente alimentado por um sistema trifásico. Os terminais desse enrolamento estão conectados à caixa de terminais da máquina. A velocidade do motor é determinada pelo número de polos do estator; quanto maior o número de polos, menor será a velocidade de rotação.

Já o rotor, que constitui a parte móvel do motor, é projetado para girar em resposta ao campo magnético gerado pelo estator (Chapman, 2005; Fitzgerald; Umans, 2014). O tipo de

rotor mais comum em motores de indução é o rotor em gaiola de esquilo, amplamente utilizado na indústria devido à sua construção simples e robusta. Esse rotor é constituído por um núcleo cilíndrico laminado, com ranhuras semicirculares fechadas na periferia externa. Nessas ranhuras, são inseridas barras de cobre ou alumínio, que são curto-circuitadas em ambas as extremidades por anéis do mesmo material, conhecidos como anéis de curto-circuito. Além disso, as ranhuras do rotor são inclinadas em relação ao eixo, o que oferece diversas vantagens operacionais, como:

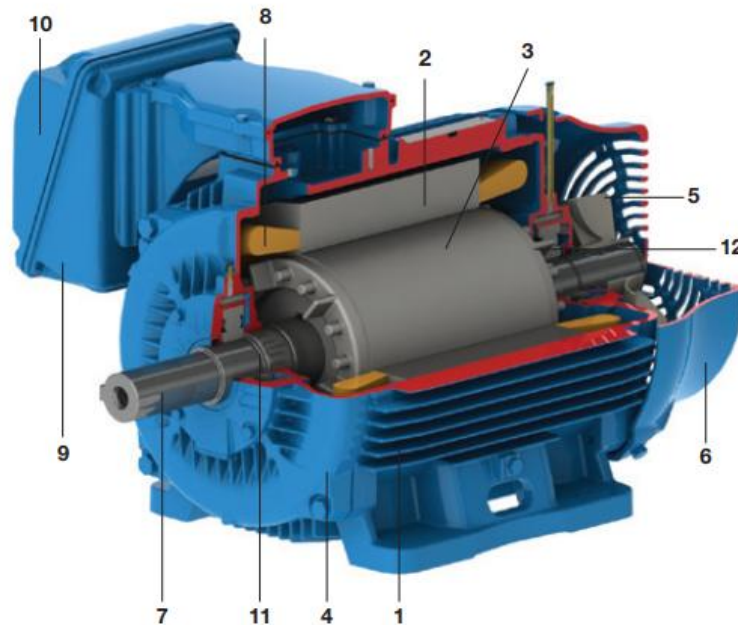
- Reduzir o ruído e garantir um funcionamento silencioso.
- Garantir um torque suave e suficiente em diferentes posições do rotor.
- Reduzir o travamento magnético entre o estator e o rotor.
- Aumentar a resistência do rotor devido ao maior comprimento dos condutores das barras.

A Figura 2.1 mostra um motor de indução trifásico onde é possível ver os detalhes do estator e do rotor:

- Carcaça (1) - é a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e normalmente com aletas.
- Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço magnético.
- Núcleo de chapas (3) - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.
- Tampa (4)
- Ventilador ou ventuínha (5)
- Tampa defletora (6)
- Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.
- Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.
- Caixa de ligação (9)
- Terminais (10)
- Rolamentos (11)

- Barras e anéis de curto-circuito (12) - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

Figura 2.1: Motor trifásico, visão interna e externa.



Fonte: WEG, (2019) .

O funcionamento do motor de indução trifásico fundamenta-se na interação entre o campo magnético girante do estator e as correntes induzidas no rotor. Quando o estator é alimentado por uma tensão trifásica equilibrada, ele gera um campo magnético rotativo cuja velocidade é determinada pela frequência da corrente elétrica e pelo número de polos do motor. Esse campo magnético induz correntes no rotor, que, por sua vez, produzem forças eletromagnéticas responsáveis por gerar o torque necessário para o movimento.

O rotor aumenta sua velocidade, tentando alcançar a velocidade síncrona, mas nunca consegue atingi-la. Isso ocorre porque, se o rotor atingir a velocidade síncrona, a velocidade relativa entre o campo girante do estator e o rotor será nula, o que significa que nenhuma força eletromotriz (fem) será induzida nos condutores do rotor. Sem fem, não haverá corrente no rotor e, conseqüentemente, nenhum torque será gerado.

Conforme Chapman (2005) e Fitzgerald; Umans (2014), o campo magnético girante é um elemento crucial no funcionamento do motor. Ele é gerado pela interação das correntes alternadas trifásicas nos enrolamentos do estator. Sua velocidade, denominada velocidade síncrona (n_s), é determinada pela equação 2.1.

$$n_s = \frac{(120 \times f)}{p} \quad 2.1$$

Onde:

f : Frequência da corrente elétrica (Hz).

p : Número de polos do motor.

Em motores de indução, a velocidade do rotor é sempre inferior à velocidade síncrona. Essa diferença entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade do rotor é conhecida como escorregamento. O escorregamento é um parâmetro fundamental, pois a discrepância entre essas velocidades determina a taxa na qual o fluxo magnético corta os condutores do rotor, influenciando diretamente a magnitude da força eletromotriz (fem) induzida.

De acordo com Gonen e Mehrizi-Sani (2024), o escorregamento é definido como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, representando o quanto o rotor "desliza" em relação à velocidade síncrona. Esse fenômeno pode ser expresso matematicamente pela equação 2.2, que quantifica o escorregamento e permite uma análise precisa do desempenho do motor.

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} \quad 2.2$$

onde:

s é o escorregamento

n_s : Velocidade síncrona do campo magnético.

n : Velocidade real do rotor

A tensão induzida (V_r) no rotor, depende do escorregamento e da frequência do campo magnético girante (V_s), expressa pela equação 2.3.

$$V_r = s \times V_s \quad 2.3$$

2.3 Classes de Eficiência

A potência de entrada no rotor que não é convertida em potência mecânica é dissipada nos diversos componentes mencionados anteriormente, manifestando-se na forma de calor devido ao efeito Joule no estator e no rotor, além de perdas por atrito, ventilação e perdas magnéticas no núcleo. Por esse motivo, é essencial que o motor apresente elevada eficiência. Nesse contexto, o escorregamento não deve ser excessivo, pois precisa ser equilibrado com o torque requerido, uma vez que a redução do escorregamento implica também na diminuição do torque de saída.

Normas internacionais, como a IEC 60034-30-1 da Europa e a NEMA dos Estados Unidos, estabelecem os níveis mínimos de eficiência para motores elétricos. No Brasil, a ABNT NBR17094-1 (NBR, 2018; NEMA, 2018; IEC, 2020) regulamenta as classes de rendimento para motores elétricos em diferentes regiões do país. A norma europeia IEC 60034-30, por sua vez, define as classes de eficiência para motores trifásicos com potências variando entre 0,75 kW e 375 kW, com 2, 4 ou 6 pólos. A Tabela 2.1 apresenta um resumo das normas mencionadas anteriormente.

Tabela 2.1: Resumo das principais normas utilizadas para definir a eficiência de motores de indução.

BRASIL		EUA		UNIÃO EUROPEIA					
Regulamento	Portaria nº 01/2017	DOE 10 CFR Part 431 - Subpart X - Small Electric Motors	DOE 10 CFR Part 431 - Subpart B - Electric Motors	Directive 2009-125-EC Regulation 640-2009	Regulation EU 1781/2019				
Norma	ABNT NBR 17094-1	IEEE Std 114-2010, IEEE Std 112-2004, CSA C390-10, CSA C747-09	IEEE Std 112-2004, CSA C390-10	IEC 60034-30-1					
Sistema fornecedor de energia	Trifásico	Monofásico ou Trifásico	Trifásico	Trifásico	Monofásico				
Nível mínimo de eficiência	IR3	Premium	NEMA Premium	IE4	IE3	IE2	IE4	IE2	IE2
Nível mínimo de eficiência quando apto a operar com inversor de frequência	IR3	Não aplicável	NEMA Premium	IE2	IE3	IE2	IE4	IE2	Não aplicável
Potência (kW)	0,12 até 370 kW (0,16 a 500 cv)	0,25 a 3 HP (0,18 até 2,2 kW) *	1 a 500 HP (0,75 até 375 kW)**	0,75 até 375 kW	0,75 até 1000 kW	0,12 a <0,75 kW	75 a 200 kW	0,12 até 1000 kW	
Polaridade	2, 4, 6 e 8	2, 4 e 6	2, 4, 6 e 8	2, 4 e 6	2, 4, 6 e 8	2, 4 e 6	2, 4, 6 e 8		
Tensão (V)	até 1000 V	Todas	até 600 V	até 1000 V					
Frequência (Hz)	60 Hz ou 60/50 Hz	60 Hz ou 50/60 Hz		50 Hz ou 50/60 Hz	50 Hz ou 60 Hz				

Fonte: Adaptado de (IEC, 2020; NBR, 2018; NEMA, 2018).

A União Europeia exige desde de 1º de julho de 2023, que motores de indução com potência nominal entre 75 kW e 200 kW devem atender no mínimo aos requisitos da classe de eficiência IE4, equivalente a classe IR4, e que motores com potências entre 0,75 kW e 375 kW atendam, no mínimo, à classe IE3, equivalente a classe IR3 (IEA, 2023). Motores da classe IE2 da mesma faixa de potência só são permitidos se utilizados com inversores de frequência. No Brasil, desde 2019, motores de classe mínima IR3 são obrigatórios para fabricação, importação e comercialização, conforme a portaria interministerial N° 1/2017.

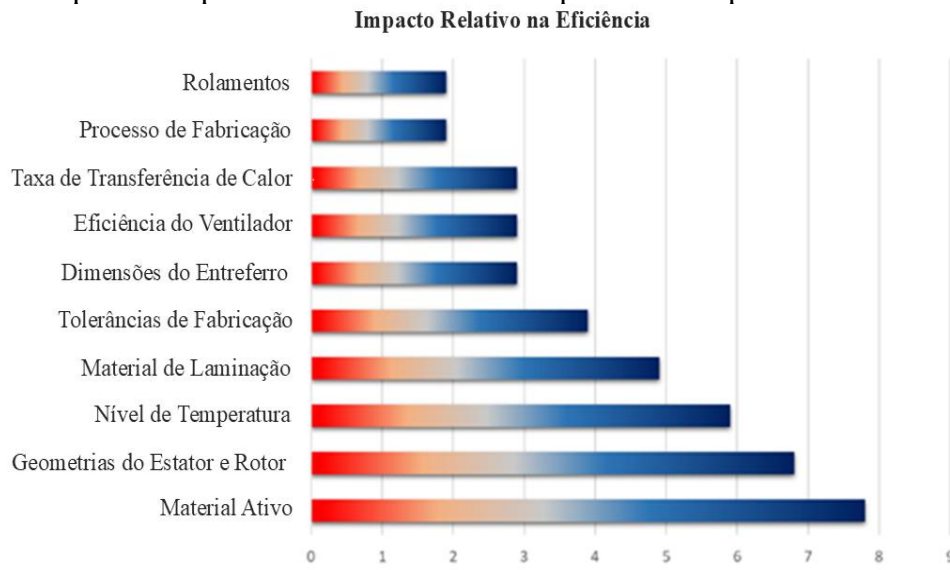
De acordo com Tabora *et al.* (2021a), mais de 70% dos motores instalados no mundo não atendem aos requisitos mínimos de eficiência energética, sendo, portanto, classificados nas classes IR0 e IR1. Esse cenário evidencia um grande potencial de melhoria na eficiência dos sistemas motrizes industriais. Atualmente, mais de 80 países já adotaram Padrões Mínimos de Desempenho Energético (MEPS – *Minimum Energy Performance Standards*, inglês), exigindo a comercialização de motores com maior eficiência.

Motores com baixa eficiência consomem mais energia e apresentam menores fatores de potência, o que resulta em maiores perdas econômicas e na redução da vida útil dos equipamentos. Diante disso, a substituição desses motores por modelos da classe IE3 ou superior pode proporcionar economias significativas tanto de energia quanto de custos operacionais. Esse movimento de transição para motores mais eficientes tem ganhado força em âmbito global, impulsionado principalmente pela regulamentação de padrões mínimos de eficiência energética. Países como os Estados Unidos, membros da União Europeia e o Brasil têm se destacado nesse processo, promovendo a modernização dos parques industriais e contribuindo para a redução do consumo energético Tabora *et al.* (2021b).

2.4 Melhorias em Motores de Indução

Devido às múltiplas fontes de perdas presentes nos motores de indução, diferentes classificações foram elaboradas com base em sua origem e impacto, culminando em um ranking que destaca os principais fatores responsáveis pela melhoria da eficiência. Esses fatores estão ilustrados na Figura 2.2, onde cada nível indica o grau de influência de uma determinada área na eficiência do motor. Na seção seguinte, serão analisados os avanços mais relevantes realizados nos motores de indução ao longo das últimas duas décadas, abrangendo as principais áreas apresentadas na Figura 2.2.

Figura 2.2: Impacto das possíveis áreas de melhoria para o desempenho do motor de indução.



Fonte: Fuchsloch *et al.* (2008).

2.4.1 Materiais Ativos

Os materiais empregados na conversão de energia elétrica são denominados materiais ativos e são utilizados no rotor e no conjunto do estator, que inclui os enrolamentos e o núcleo do estator. A melhoria desses materiais exerce o maior impacto na redução de perdas, contribuindo significativamente para o aumento da eficiência dos motores de indução. Por exemplo, ao intensificar o uso de material ativo (como o aumento da quantidade de fios de cobre no estator e maior preenchimento das ranhuras), é possível elevar a eficiência dos motores padrão em aproximadamente 8% para motores de 1 kW e em cerca de 1,5% para motores de 100 kW (Fuchsloch *et al.*, 2008).

Para mitigar as perdas nos enrolamentos do estator, o estudo de Parasiliti e Bertoldi (2012) substituiu o diagrama de enrolamento com bobinas concêntricas por um modelo com bobinas iguais e deslocadas, resultando em uma redução de quase 8% na resistência inicial. Além disso, avanços recentes focam na diminuição das perdas nos enrolamentos do rotor, com destaque para tecnologias emergentes, como os motores de ímã permanente de partida direta, conhecidos pelo termo em inglês *Line-Start Permanent Magnet Motor* (LSPMM), que utilizam rotores de cobre fundido, e os motores de relutância síncrona (*Synchronous Reluctance Motor*, *SynRM*). Essas tecnologias já estão comercialmente disponíveis em diversos países e apresentam eficiências significativamente superiores às dos motores de indução de eficiência premium (classe IR3).

Os motores com rotor de cobre, em particular, reduzem substancialmente as perdas no rotor devido à elevada condutividade volumétrica do cobre, que é cerca de 66% maior que a do alumínio (Olcott *et al.*, 2017). Esses motores são construídos com barras de cobre pré-fabricadas, inseridas nas ranhuras do rotor e soldadas aos anéis de sombreamento em ambas as extremidades. Essa configuração reduz as perdas ôhmicas, resultando em uma temperatura de operação mais baixa. Com temperaturas reduzidas, é possível utilizar ventiladores de resfriamento menores, o que diminui as perdas por atrito e ventilação (U. S. Department of Energy, 2014).

No que diz respeito à redução de perdas no núcleo, materiais magnéticos de alta qualidade são amplamente utilizados. Dentre os aços magnéticos comerciais mais comuns estão o M400-50A e o M800-50A (Debruyne, 2014). O primeiro número indica a perda específica de ferro em W/kg sob uma indução de pico de 1,5 T, enquanto o segundo número refere-se à espessura da laminação. Por exemplo, o M400-50A apresenta uma perda específica de ferro de 4 W/kg e espessura de 0,5 mm. Estudos de Peter *et al.* (2014) mostram que a utilização de chapas de aço eletromagnético M270-50, com perdas específicas de 2,7 W/kg, pode reduzir as perdas em até 70% e 35%, quando comparadas às perdas dos materiais M800-50A e M400-65, respectivamente, em motores de indução de 7,5 kW.

Além disso, os metais amorfos despontam como materiais promissores para o desenvolvimento de motores de alta eficiência. Quando empregados no núcleo de ferro, podem reduzir as perdas para até um décimo das perdas observadas em ferros convencionais (Hitach, 2018). No entanto, esses materiais apresentam desafios significativos, como sua dureza e fragilidade, o que dificulta o processamento e aumenta os custos de fabricação.

2.4.2 Perdas pela Ventilação e Atrito

As perdas por atrito e ventilação podem ser mitigadas por meio de um *design* adequado do ventilador e pela redução do atrito nos rolamentos e vedações. Em Dong-Jun *et al.* (2014), foram testados dois ventiladores de resfriamento de diferentes tamanhos em um motor de indução de 3,7 kW. Para minimizar as perdas mecânicas, é necessário reduzir o tamanho do ventilador de resfriamento. No entanto, embora essa redução resulte em maior eficiência, ela também pode ocasionar temperaturas de operação mais elevadas. Além disso, o uso de rolamentos com baixo coeficiente de atrito é uma estratégia eficaz para diminuir as perdas por atrito em motores de indução. Os autores Ferreira *et al.* (2018) realizaram uma comparação

entre seis rolamentos de cinco fabricantes distintos, demonstrando que é possível alcançar uma redução de 40% a 70% nas perdas por atrito. Essa redução é atribuída a diversas características de projeto, como a geometria interna das pistas, o tipo de graxa utilizada e o material polimérico da gaiola, que apresenta um coeficiente de atrito inferior ao das gaiolas de aço convencionais (Olcott; Lawrence; Moller, 2017).

Motores com maior eficiência também apresentam correntes de linha reduzidas, o que contribui para a diminuição da temperatura de operação. Testes experimentais realizados em um motor de quatro polos com potência de 7,5 kW revelaram que, em plena carga, um motor de indução gaiola de esquilo de classe IR3 e um motor de indução com gaiola de esquilo (ou em inglês *Squirrel Cage Induction Motor* — SCIM) de classe IR4 possuem temperaturas na tampa final, próximas à carcaça do eixo/rolamento, aproximadamente 10 °C e 15 °C mais baixas, respetivamente, em comparação a um SCIM de classe IR2.

Para fins de isolamento térmico, a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) estabelece limites aceitáveis de elevação de temperatura para motores em plena carga. Três classes de isolamento são comumente empregadas em motores de indução: Classe B (com temperatura máxima de 130 °C), Classe F, com temperatura máxima de 155 °C, e Classe H, com temperatura máxima de 180 °C (NEMA, 2018). A maioria dos fabricantes adota isolamentos das classes F ou H, uma vez que esses materiais oferecem vantagens significativas em termos de dissipação térmica e maior tolerância à elevação de temperatura (Ferreira, 2016).

2.5 Motor de ímã permanente com partida direta

Uma distinção evidente entre motores de ímã permanente e motores de indução reside na presença contínua do campo magnético nos motores de ímã, enquanto, nos motores de indução, o campo magnético é reduzido a um nível residual mínimo quando o motor não está energizado. Isso traz implicações para qualquer carga acoplada ao motor de ímã. Se o motor for desconectado da rede elétrica, ainda pode haver uma tensão significativa nos terminais do motor se tal carga provocar a rotação do motor. Dependendo da velocidade de rotação, é possível gerar um nível perigoso de voltagem em um motor, mesmo que esteja eletricamente desconectado.

O desempenho de um motor síncrono de ímã permanente com rotor de gaiola (LSPMM) é geralmente modelado por meio de equações de circuito equivalente. A análise pode ser simplificada ao derivar o modelo no referencial do rotor, desconsiderando a saturação magnética e as perdas no núcleo. As equações do modelo podem ser apresentadas em forma de unidade por unidade (*per unit* - PU), onde a tensão e a corrente nominais são escolhidas como

valores base. Assim, os valores base de potência, torque e impedância podem ser expressos, respectivamente, como mostrado em 2.4, 2.5 e 2.6 (Sarani; Vaez-Zadeh, 2017):

$$P_B = 3V_B I_B = \frac{P_{out}}{F_p \cdot \eta} \quad 2.4$$

$$T_B = \frac{P_B}{\left(\frac{2}{p} \cdot \omega_e\right)} \quad 2.5$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} \quad 2.6$$

Onde V_B e I_B são os valores base de tensão e corrente, enquanto Z_B é a impedancia base, F_p é o fator de potência, η é a eficiência e P_{out} é a potência de saída nominal. "p" representa o número de polos e ω_e é a velocidade angular elétrica.

As correntes de eixo direto (I_d) e em quadratura (I_q) no estado estacionário por unidade são obtidas como:

$$I_d = \frac{V_t \left(X_q \cos(\delta) - R_s \sin(\delta) \right) - E \cdot X_q}{X_d \cdot X_q + R_s^2}$$

$$I_q = \frac{V_t \left(R_s \cos(\delta) - X_d \sin(\delta) \right) - E \cdot R_s}{X_d \cdot X_q + R_s^2}$$

As grandezas X_d e X_q representam, respectivamente, as reatâncias de eixo direto e em quadratura, enquanto R_s corresponde à resistência do estator. Já "E" e V_t referem-se à força eletromotriz de retorno e à tensão nos terminais, respectivamente, sendo todas expressas em unidade por unidade. Além disso, o parâmetro δ é definido como o ângulo de carga. Nesse contexto, a tensão terminal é mantida fixada em um valor unitario (Sarani; Vaez-Zadeh, 2017).

O motor de ímã permanente com partida direta combina as vantagens das máquinas de indução e síncronas, utilizando um estator semelhante ao dos motores de indução e um rotor híbrido que integra uma gaiola de esquilo e pares de polos com ímãs permanentes. Graças aos condutores em formato de barra presentes no rotor, o motor de ímã permanente de partida direta (do inglês *line start permanent magnet motors* — LSPMMs) possuem capacidade de partida

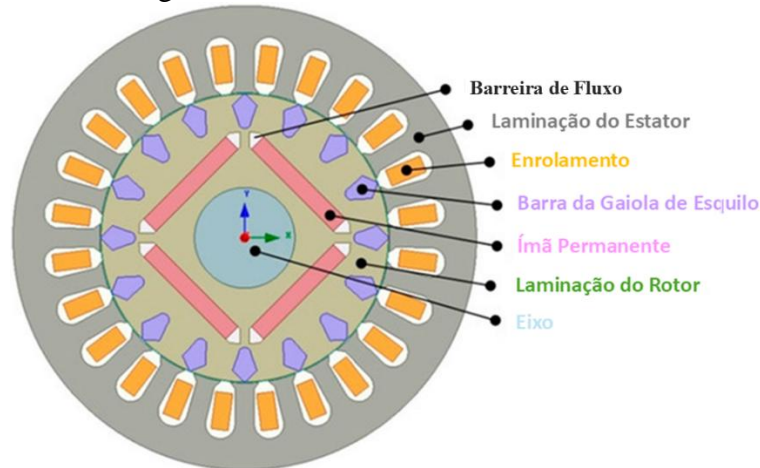
direta, eliminando a necessidade de dispositivos adicionais. No entanto, ainda enfrentam desafios relacionados ao elevado torque de partida (Lee *et al.*, 2016).

Os LSPMMs apresentam diversas vantagens em relação aos motores de indução com gaiola de esquilo, destacando-se pela maior eficiência energética, melhor fator de potência em diferentes níveis de carga, manutenção de uma velocidade síncrona constante e temperaturas de operação mais baixas. Além disso, no que diz respeito à potência reativa, devido ao campo magnético gerado pelos ímãs permanentes, os LSPMMs consomem significativamente menos potência reativa em comparação aos motores de indução com gaiola de esquilo (ou em inglês *Squirrel Cage Induction Motors* — SCIM) (Gwoździwicz; Antal, 2010).

Outra vantagem importante é que, assim como os motores de indução convencionais, os LSPMMs são fabricados em conformidade com a norma IEC 60034-7 (IEC, 2020), o que simplifica a substituição entre essas tecnologias, promovendo maior flexibilidade na aplicação prática.

A Figura 2.3 ilustra os principais componentes e a configuração de um LSPMM de quatro polos, destacando a integração de suas características exclusivas.

Figura 2.3: Estrutura de um LSPMM



Fonte: Rezazadeh Mehrjou *et al.* (2017).

2.6 Padrões Mínimos de Desempenho Energético

Motores de alta eficiência desempenham um papel essencial na redução dos custos de energia, que constituem uma parte significativa das despesas operacionais nas indústrias. Além disso, a adoção de motores mais eficientes contribui para a diminuição das emissões de gás carbônico (CO₂), alinhando-se às metas globais de sustentabilidade. Regulamentações, como a

CE 640/2009 da União Europeia (2009), incentivam o uso de tecnologias mais eficientes por meio da implementação de Padrões Mínimos de Desempenho Energético (*Minimum Energy Performance Standards* - MEPS), promovendo a economia de energia em escala global (Magalhães, 2018).

Os motores de indução trifásicos representam uma parcela expressiva do consumo mundial de energia elétrica. Estima-se que 53% do consumo global de energia elétrica seja atribuído a motores elétricos, sendo os motores de indução trifásicos os principais responsáveis por esse percentual. A eficiência desses motores tem impacto direto nos custos operacionais das indústrias, tornando-se um foco estratégico para iniciativas de sustentabilidade. A substituição de motores antigos por modelos mais eficientes pode gerar economias substanciais no consumo de energia elétrica, reforçando sua importância em contextos industriais.

Esses motores possuem um papel crucial na economia devido ao seu impacto significativo no consumo energético. Sua eficiência e confiabilidade os tornam indispensáveis para processos que demandam operação contínua e de longo prazo, consolidando-os como componentes essenciais para a indústria moderna. No Brasil, eles representam cerca de 25% do consumo total de energia elétrica, enquanto, em ambientes industriais, podem responder por até 70% do consumo energético, dada sua ampla utilização em processos contínuos. Em âmbito global, esses motores são responsáveis por aproximadamente 53% do consumo de energia elétrica, evidenciando sua relevância em diversas aplicações industriais.

Portanto, a adoção de motores de alta eficiência é fundamental para reduzir os custos de energia e atender às demandas de sustentabilidade, além de contribuir significativamente para a otimização dos processos industriais e para a economia de energia em escala global (Almeida, 2013; Magalhães, 2018; Tabora, 2024). A Figura 2.4 mostra o mapa de países que adotam MEPS até 2025. Recentemente Honduras na América Central passou a adotar eficiência mínima equivalente ao IR3, para motores importados.

3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES

De acordo com Lee *et al.* (1998), o desequilíbrio de tensão é uma condição em que as tensões de um sistema trifásico não possuem a mesma magnitude ou apresentam ângulos de fase diferentes. Embora os sistemas de energia trifásicos sejam projetados para fornecer tensões equilibradas, na prática, diversos fatores podem provocar desequilíbrios no ponto de utilização. Esse fenômeno ocorre quando as tensões de linha ou de fase não têm magnitudes iguais ou não estão igualmente espaçadas em ângulo (120°). Entre os principais fatores que podem gerar o desequilíbrio de tensão estão:

- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Cargas não equilibradas;
- Conexões abertas de transformadores em delta;
- Fusíveis queimados em bancos de capacitares trifásicos.

Os impactos do desequilíbrio de tensão são prejudiciais para o desempenho dos motores de indução polifásicos, podendo resultar em problemas como superaquecimento, redução do torque e aumento das perdas internas (Lee, 1999; Woll, 1975).

3.1 Considerações Gerais

O desequilíbrio de tensão é um fenômeno presente em todos os sistemas elétricos. De acordo com um relatório do Instituto Nacional Americano de Padrões (*American National Standards Institute* — ANSI), estima-se que apenas 66% dos sistemas de distribuição elétrica nos Estados Unidos apresentam um desequilíbrio de tensão inferior a 1% (ANSI, 2020). Esse desequilíbrio, frequentemente associado a variações de tensão, impacta diretamente a eficiência e o fator de potência, além de aumentar as perdas no sistema e, conseqüentemente, a temperatura dos motores elétricos. A operação prolongada nessas condições pode reduzir significativamente a vida útil dos motores (Sousa Santos *et al.*, 2013). Segundo a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), um desequilíbrio superior a 1% exige a desclassificação do motor.

Na indústria, o desequilíbrio de tensão pode ser causado pela distribuição e operação desigual de cargas monofásicas. Na distribuição elétrica, ele pode ocorrer devido à operação de

transformadores conectados em delta aberto e à distribuição assimétrica de fases ao longo do sistema elétrico. Nos sistemas de transmissão, o desequilíbrio pode ser resultado de uma transposição incompleta das linhas de transmissão (Al-Badri *et al.*, 2017; Quispe, 2012).

3.2 Definições de Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão em sistemas trifásicos é definido como uma condição em que as tensões não possuem a mesma magnitude ou quando os ângulos de deslocamento entre as três fases diferem de 120° . Esse fenômeno pode ser classificado em desequilíbrios de magnitude ou de magnitude e deslocamento angular. Para mensurar o desequilíbrio, são utilizados diferentes indicadores, como o percentual de desequilíbrio, a análise de componentes simétricas e indicadores como Taxa de Desequilíbrio de Tensão de Linha (ou em inglês *Line Voltage Unbalance Rate* — LVUR), Razão de Desequilíbrio de Tensão de Fase (também conhecida na expressão em inglês *Phase Voltage Unbalance Ratio* — PVUR) e Fator de desequilíbrio de Tensão (*Voltage Unbalance Factor* — VUF), sendo este último o mais abrangente. Esses métodos permitem quantificar os efeitos negativos do desequilíbrio, que incluem perdas aumentadas, aquecimento excessivo e redução da vida útil do motor. (Woll, 1975).

3.2.1 Taxa de Desequilíbrio de Tensão de Linha (LVUR)

Taxa de Desequilíbrio de Tensão de Linha (em inglês *Line Voltage Unbalance Rate* — LVUR) Definida pela ANSI e expressa pela equação 3.1.

A Taxa de Desequilíbrio de Tensão de Linha é um indicador definido pela NEMA e é expressa pela Equação 3.1:

$$LVUR (\%) = \frac{\Delta V_L^{Max}}{V_L^{Avg}} \times 100 \quad 3.1$$

Onde a tensão média V_L^{Avg} é calculada com a equação 3.2

$$V_{avg} = \frac{(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})}{3} \quad 3.2$$

E o maior valor da variação de tensão é dado pela Equação 3.3:

$$\Delta V_L^{\max} = \max \{ |V_{ab} - V_L^{\text{avg}}|, |V_{bc} - V_L^{\text{avg}}|, |V_{ca} - V_L^{\text{avg}}| \} \quad 3.3$$

Essa definição é amplamente utilizada tanto por indústrias quanto por concessionárias de energia, pois mede o desequilíbrio existente entre as tensões de linha, sendo uma ferramenta prática para diagnósticos e análises.

3.2.2 Razão de Desequilíbrio de Tensão de Fase (PVUR)

Outro indicador importante é a Razão de Desequilíbrio de Tensão de Fase (mais conhecido pela expressão em inglês *Phase Voltage Unbalance Ratio* - PVUR), definido pela norma IEEE Std 141. Esse indicador é calculado pelas Equações 3.4, 3.5 e 3.6:

$$\text{PVUR (\%)} = \frac{\Delta V_P^{\text{Max}}}{V_P^{\text{Avg}}} \times 100 \quad 3.4$$

Onde:

$$V_L^{\text{Avg}} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad 3.5$$

$$\Delta V_L^{\max} = \max \{ |V_{ab} - V_L^{\text{avg}}|, |V_{bc} - V_L^{\text{avg}}|, |V_{ca} - V_L^{\text{avg}}| \} \quad 3.6$$

De acordo com as recomendações da NEMA, para evitar superaquecimento, o motor trifásico deve ter sua potência reduzida dependendo do grau de desbalanceamento sob tais condições de operação. O valor pelo qual a potência deve ser reduzida é chamado de "fator de desclassificação de potência" (ou *power derating factor*).

O PVUR é amplamente reconhecido e adotado na indústria como uma métrica padrão para avaliar o desequilíbrio de tensão em sistemas trifásicos. Sua simplicidade e eficácia permitem uma análise prática e objetiva do grau de desequilíbrio, facilitando sua aplicação em diferentes contextos operacionais.

Além disso, a definição do PVUR pela NEMA é respaldada por um conjunto robusto de pesquisas e práticas industriais, o que garante que as medições e avaliações realizadas sejam consistentes e confiáveis. Ao adotar uma metodologia reconhecida internacionalmente, como a do padrão NEMA, este trabalho não apenas assegura a precisão das análises, mas também fornece uma base comparativa sólida para outros estudos e aplicações práticas. Por esses motivos ela foi considerada para este trabalho.

3.2.3 Fator de Desequilíbrio de Tensão (VUF)

Fornecer uma análise mais detalhada ao incluir as componentes de sequência positiva e negativa. É considerado o indicador mais útil para avaliar o impacto do desequilíbrio em motores de indução. E é calculado usando as Equações 3.7, 3.8 e 3.10 (NEMA, 2018). Lee (1999) destaca que, embora o LVUR seja o indicador mais adotado, ele não oferece informações suficientes para orientar ações corretivas detalhadas. Por outro lado, o VUF permite avaliar características importantes do sistema de energia, como a eficiência e o fator de potência do motor

$$VUF (\%) = k_v = \frac{|V_N|}{|V_P|} \times 100 \quad 3.7$$

Onde:

$$V_P = \frac{V_a + aV_b + a^2V_c}{3} \quad 3.9$$

$$V_N = \frac{V_a + a^2V_b + aV_c}{3} \quad 3.10$$

Onde:

$$a = 1\angle 120^\circ \quad \& \quad a^2 = 1\angle 240^\circ$$

3.2.4 Fator de Desequilíbrio de Tensão Complexo

O Fator de Desequilíbrio de Tensão Complexo (também conhecido pela expressão em inglês *Complex Voltage Unbalance Factor* - CVUF) é uma extensão do VUF, originalmente

proposto por Wang (2001) e é semelhante ao VUF; a diferença é que os ângulos são incluídos além das amplitudes de V1 e V2, conforme mostrado na equação 3.11:

$$PCVUF (\%) = k_v \angle \theta_v = \frac{|V_N| \angle \theta_n}{|V_P| \angle \theta_p} = VUF \angle (\theta_n - \theta_p) \times 100 \quad 3.11$$

Onde $|V_N| \angle \theta_n$ e $|V_P| \angle \theta_p$ são a magnitude e o ângulo da tensão de sequência positiva e negativa. Segundo (Wang, 2001) o uso de ambas magnitude e ângulo deve ser considerado para fornecer uma visão global do efeito do desequilíbrio de tensão na operação do motor. Outros estudos, incluindo Quispe (2012), Gnaciński, (2014), Faiz *et al.* (2004), Singh e Singh (2013) também consideraram o CVUF para analisar os efeitos do desequilíbrio de tensão em motores elétricos. O fator de desequilíbrio de corrente também pode ser calculado da mesma forma que o VUF, conforme mostrado nas Equações 3.12 e 3.13.

$$PCUF (\%) = k_c = \frac{|I_N|}{|I_P|} = \frac{V_N/Z_N}{V_P/Z_P} = \frac{Z_P}{Z_N} k_v \times 100 \quad 3.12$$

$$CCUF (\%) = k_c = k_c \angle \theta_c = \frac{I_N}{I_P} = \frac{Z_P}{Z_N} k_v \angle (\theta_v + \varphi_p - \varphi_n) \times 100 \quad 3.13$$

Onde $(\theta_v + \varphi_p - \varphi_n)$ é o ângulo do CCUF.

3.3 Causas do Desequilíbrio de Tensões

O desequilíbrio de tensões é um problema multifacetado que pode surgir tanto em sistemas de fornecimento de energia quanto em instalações internas de consumidores. Suas principais causas incluem a distribuição desigual de cargas monofásicas, que pode ocorrer tanto em áreas rurais quanto urbanas, cargas internas mal distribuídas em plantas industriais, diferenças de impedância nas linhas de transmissão e falhas operacionais. Esses fatores, isolados ou combinados, resultam em tensões desequilibradas que impactam negativamente o desempenho e a durabilidade de motores trifásicos e outros equipamentos. Identificar as causas específicas é essencial para implementar soluções eficazes (Von Jouanne e Banerjee, 2001).

Cargas monofásicas mal distribuídas são uma das causas mais comuns de desequilíbrio de tensão e consiste na aplicação não uniforme de cargas monofásicas entre as três fases do

sistema trifásico. Em áreas rurais, as cargas monofásicas, como iluminação e pequenos equipamentos, são distribuídas de forma desigual entre as fases, gerando desequilíbrios. Sistemas Urbanos: Em grandes centros urbanos, instalações como *shopping centers* e outras edificações com muitas cargas monofásica contribuem para o desequilíbrio. Essas cargas pesadas em uma ou duas fases criam uma diferença significativa nas tensões (Woll, 1975).

O desequilíbrio de tensões tem um impacto direto e significativo no desempenho e na vida útil de máquinas elétricas, especialmente motores de indução trifásicos. Seus efeitos são graves, abrangendo desde a redução do desempenho das máquinas até a diminuição da eficiência e a degradação da qualidade de energia nos sistemas elétricos.

3.4 Impacto em Máquinas Elétricas

O desequilíbrio de tensão afeta negativamente o desempenho de motores de indução trifásicos, amplamente utilizados em sistemas industriais, comerciais e residenciais. Os impactos incluem redução da eficiência, aumento da temperatura, danos ao isolamento, desempenho instável, superaquecimento, redução do torque, aumento de vibrações e diminuição da vida útil do motor (Lee *et al.*, 1998; Refoufi *et al.* 2006; Woll, 1975).

Sob condições de tensão desequilibrada, a eficiência do motor é reduzida devido ao aumento das perdas internas. As perdas no rotor podem ser de 50% a 85% maiores em comparação com condições normais. Tal condição resulta em correntes de fase não uniformes, causando aumento de temperatura nos enrolamentos do motor. Esse superaquecimento degrada o isolamento dos enrolamentos, reduzindo a vida útil do motor e aumentando a probabilidade de falhas. A sobretensão causada pelo desequilíbrio pode danificar o isolamento dos enrolamentos do motor. A operação prolongada nessas condições reduz significativamente a vida útil do equipamento.

O desequilíbrio de tensões introduz uma tensão de sequência negativa, que gera torque pulsante no motor, aumentando vibrações e ruídos. Isso prejudica o desempenho geral da máquina, aumenta as correntes no estator e no rotor, acelera o envelhecimento térmico do isolamento e pode levar a falhas no motor (Lee *et al.*, 1998; Refoufi *et al.*, 2006). Algumas correntes de fase podem exceder os valores nominais, aumentando as perdas e diminuindo a eficiência do sistema. Pequenos desequilíbrios nas tensões de linha podem causar grandes desequilíbrios nas correntes de linha, resultando em esforços térmicos e mecânicos elevados (Siddique *et al.*, 2004).

O desequilíbrio de tensões resulta em um aumento significativo das perdas no rotor e no estator, levando ao superaquecimento da máquina. Esse aquecimento excessivo degrada o isolamento interno, reduz a vida útil do motor e aumenta a probabilidade de falhas nos rolamentos e no próprio motor. A tensão desequilibrada gera uma componente de sequência negativa que cria um torque indesejado, reduzindo o torque útil disponível para o motor (Siddique *et al.* 2004; Woll, 1975).

Os métodos e estratégias de mitigação do desequilíbrio de tensões incluem ações no nível do sistema e no nível local. Essas estratégias visam minimizar os efeitos adversos do desequilíbrio, como perdas, superaquecimento e redução da qualidade da energia elétrica, garantindo a operação eficiente e segura dos sistemas elétricos (Oliveira, 2011).

Uma das principais causas do desequilíbrio de tensões é a distribuição desigual de cargas monofásicas nas fases do sistema trifásico. Uma das estratégias mais simples e eficazes é balancear as cargas monofásicas conectadas ao sistema. Isso pode ser feito ajustando a alocação de cargas entre as fases de forma a minimizar o desequilíbrio (Pinto, 2006).

Redistribuir as cargas monofásicas de forma uniforme entre as três fases. Isso é especialmente importante em instalações residenciais ou comerciais, onde há maior predominância de cargas monofásicas.

De acordo com Pinto (2006) o planejamento inadequado da rede de distribuição é uma das principais causas de desequilíbrio. A transposição periódica das fases em linhas de transmissão de longa distância ajuda a equilibrar as impedâncias e, conseqüentemente, reduzir o desequilíbrio. Tem o benefício de prevenir desequilíbrios desde o início, reduzindo a necessidade de correções posteriores.

Reguladores de tensão trifásicos podem ser usados para corrigir desequilíbrios em tempo real. Instalar reguladores de tensão em pontos estratégicos da rede para corrigir as diferenças de tensão entre as fases, apresenta o benefício de melhora da qualidade da energia entregue aos consumidores e reduz os impactos do desequilíbrio em equipamentos conectados (Pinto, 2006).

3.5 Impacto na Qualidade da Energia Elétrica

Os harmônicos em sistemas elétricos foram registrados pela primeira vez na década de 1920, quando a instalação de conversores em refinarias de cobre nos Estados Unidos provocou interrupções nos sistemas telefônicos. Especialmente em instalações industriais, harmônicos são fenômenos contínuos, distintos de eventos de curta duração que ocorrem apenas por alguns

ciclos. A distorção harmônica representa uma forma específica de poluição elétrica, frequentemente associada ao aumento do uso de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos em plantas industriais, ou seja, relacionada a cargas não lineares. Essas perturbações no sistema podem ser, em geral, atenuadas com o uso de filtros de linha, também chamados de supressores de transitórios (Paulilo e Teixeira , 2013).

Um filtro de harmônicos é essencialmente composto por um capacitor para correção do fator de potência, combinado em série com um indutor. A presença de distorções harmônicas vai contra os objetivos de qualidade no fornecimento de energia elétrica promovidos pelas concessionárias, que devem oferecer aos consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a consumidores que provocam deformações no sistema prejudica não apenas o responsável pelo distúrbio, mas também outros usuários conectados à mesma rede elétrica (Paulilo e Teixeira , 2013).

A natureza e a intensidade das distorções harmônicas geradas por cargas não lineares dependem das características específicas de cada carga, mas duas generalizações podem ser feitas:

Os harmônicos que mais frequentemente causam problemas são os de ordem ímpar;
A magnitude da corrente harmônica tende a diminuir conforme a frequência aumenta.

Matematicamente, um sinal distorcido pode ser representado de forma adequada em termos de sua frequência fundamental e de suas componentes harmônicas. A frequência fundamental normalmente corresponde à frequência de fornecimento do sistema, enquanto seus múltiplos inteiros são denominados harmônicos. As componentes harmônicas são geralmente expressas como “distorções” e avaliadas por meio da métrica conhecida como Distorção Harmônica Total (DHT), que pode ser aplicada tanto às formas de onda de tensão quanto às de corrente e é calculada pelas Equações 3.14 e 3.15 (Paulilo e Teixeira , 2013).

$$DHT_V\% = \frac{\sqrt{\sum_{\{h=2\}}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad 3.14$$

$$DHT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{\{h=2\}^{hmax} I_h^2}}{V_1} \times 100 \quad 3.15$$

Em que:

DHT_V %: Distorção harmônica total de tensão em percentagem;

DHT_I %: Distorção harmônica total de corrente em percentagem;

h: Número de ordem harmônica;

V_h : Tensão harmônica de ordem h;

V_1 : Tensão fundamental;

I_h : Corrente harmônica de ordem h;

I_1 : Corrente fundamental;

3.6 Considerações finais

O desequilíbrio de tensões em sistemas trifásicos ocorre quando as magnitudes ou os ângulos de fase das tensões não são iguais, resultado de fatores como cargas desequilibradas, transposição incompleta de linhas e falhas em equipamentos. O desequilíbrio afeta diretamente o desempenho de motores de indução trifásicos, causando superaquecimento, redução do torque e aumento das perdas internas, o que compromete a eficiência e a vida útil dos equipamentos.

Para reduzir os efeitos adversos, é essencial adotar estratégias como redistribuição de cargas, planejamento adequado da rede elétrica e instalação de reguladores de tensão. Essas medidas previnem perdas adicionais, melhoram a qualidade da energia e garantem a operação segura e eficiente dos sistemas elétricos, evitando prejuízos financeiros e desgaste prematuro de equipamentos.

No próximo capítulo, será apresentada a metodologia adotada nesta dissertação para a coleta e o processamento dos dados utilizados no estudo.

4 COMPARAÇÃO DE MOTORES IR3 E IR4 SUBMETIDOS A TENSÕES DESEQUILIBRADAS

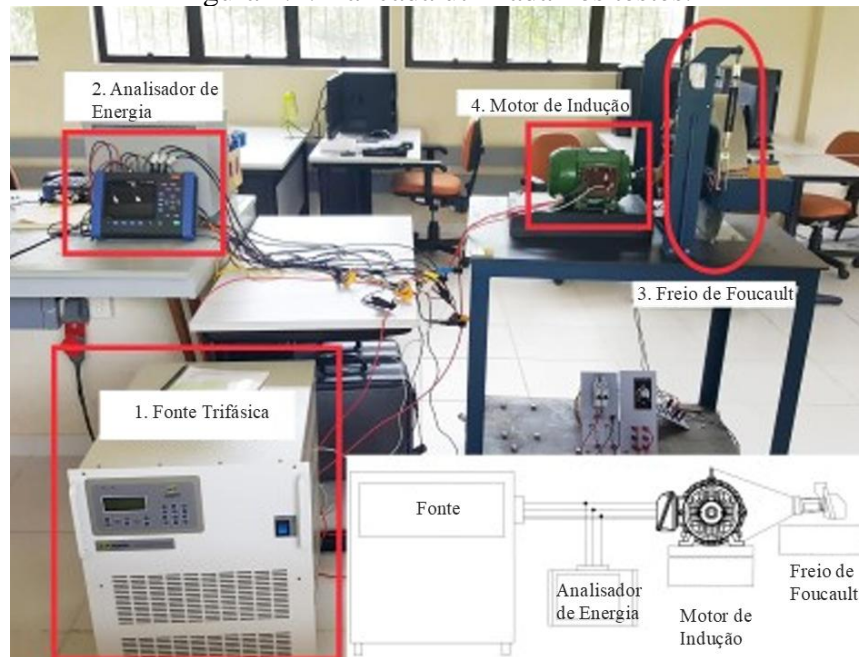
Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises do estudo que submeteu motores premium (IR3) e super premium (IR4) a diferentes níveis de desequilíbrio de tensão e diferentes níveis de carga.

São analisados os parâmetros, corrente elétrica, potência ativa, potência aparente, potência reativa e fator de potências nos dois motores

4.1 Metodologia

Para avaliar os Motores Premium e Super Premium em condições de desequilíbrio de tensão, utilizou-se uma bancada de ensaio mostrado na Figura 4.1. Os desequilíbrios de tensão foram gerados pela fonte programável em (1), e os parâmetros de entrada do motor foram capturados por um analisador de energia (2). A carga no motor foi regulada pelo freio de correntes parasitas apresentado em (3). Os dados do motor de indução com gaiola de esquilo (ou em inglês *Squirrel Cage Induction Motor* — SCIM) e do motor de ímã permanente de partida direta (do inglês *line start permanent magnet motor* — LSPMM) são exibidos na Tabela 4.1 e as magnitudes de tensão de linha para cada condição de desequilíbrio de tensão detalhadas na Tabela 4.2, as tensões ficam por volta de 220 V, devido à ligação do motor ser feita em delta.

Figura 4.1: Bancada utilizada nos testes.



Fonte: Adaptado de Tabora (2024).

Tabela 4.1: Tabela comparativa para os motores analisados.

Classe	Motor Premium	Motor Super Premium
Tecnologia	SCIM	LSPMM
Potência	0,75 kW	0,75 kW
Tensão	220 V	220 V
Rotação (rpm)	1725	1800
Corrente (A)	2,91	3,08
Eficiência (%)	82,6	87,4
Fator de Potência	0,82	0,73

Fonte: Autoria própria.

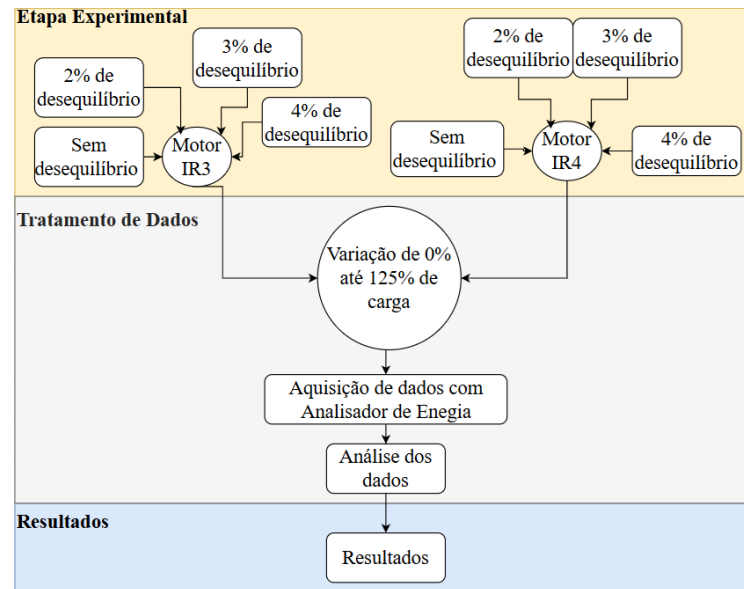
Tabela 4.2: Tensões às quais os motores foram submetidos durante os testes.

Tensão desequilibrada	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)
Motor Premium 0%	223,4	223,93	221,93
Motor Premium 2%	226,1	218,41	218,92
Motor Premium 3%	227,4	215,3	224,12
Motor Premium 4%	229,31	213,98	225,61
Motor Super premium 0%	223,48	223,85	221,97
Motor Super premium 2%	228,58	219,5	222,82
Motor Super premium 3%	228,68	216,09	222,94
Motor Super premium 4%	228,39	212,93	225,54

Fonte: Autoria própria.

Seguindo a metodologia ilustrada na Figura 4.2, três condições distintas de desequilíbrio de tensão — 2%, 3% e 4% — foram configuradas na fonte programável, além da condição de tensão nominal do motor (0% de desequilíbrio). Posteriormente, a carga do motor foi variada em incrementos de 10%, desde o funcionamento em vazio até 125% da carga nominal, enquanto os parâmetros eram registrados pelo analisador de qualidade de energia. Os dados foram obtidos com uma taxa de leitura de 15 segundos e uma duração de 2 minutos, e em seguida processados para gerar os resultados apresentados e discutidos neste capítulo. A temperatura da sala durante as leituras foi mantida em aproximadamente 21 °C, durante os testes em bancada.

Figura 4.2: Fluxograma que resume a metodologia utilizada.



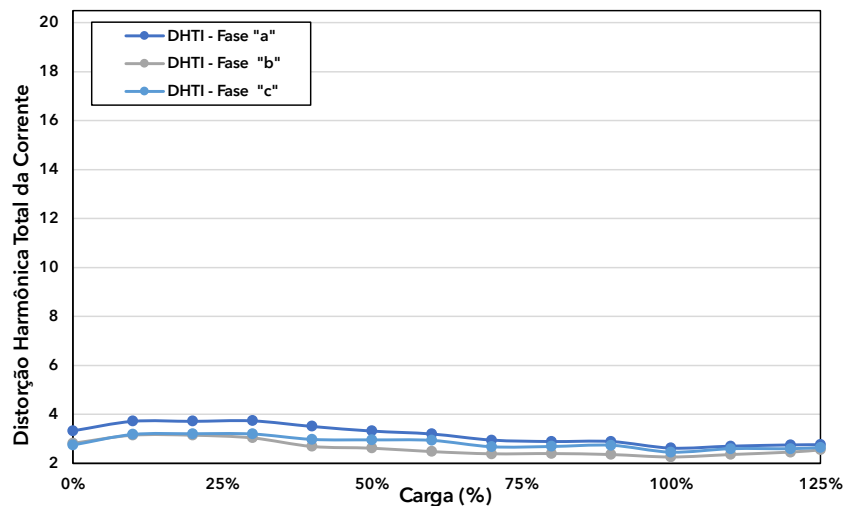
Fonte: Autoria própria.

4.2 Resultados e discussão

4.2.1 Análise da Resposta da Qualidade de Energia Para o Motor IR3

Na Figura 4.3, é possível observar o comportamento da Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI) para o motor de indução operando sem desequilíbrio de tensão. Nota-se que, para cargas inferiores a 50%, o conteúdo harmônico é mais elevado, enquanto, à medida que a carga aumenta e ultrapassa 50%, o DHTI torna-se praticamente constante.

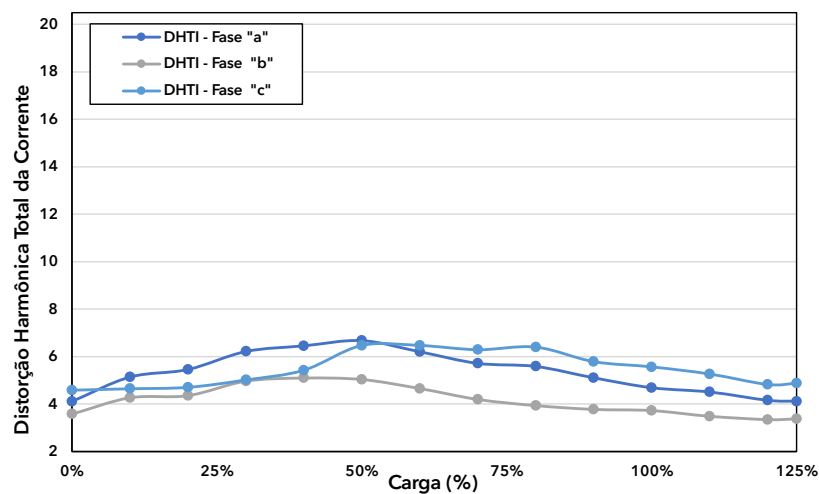
Figura 4.3: DHTI x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

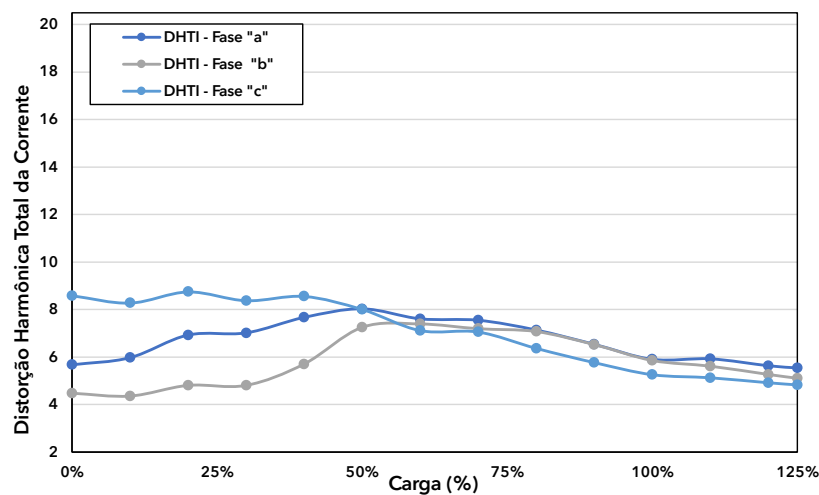
A análise das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 evidencia o comportamento da distorção harmônica total da corrente para níveis de desequilíbrio de tensão de 2%, 3% e 4%, respectivamente, em diferentes condições de carga aplicadas ao motor de indução IR3. Verifica-se que o motor de indução premium apresenta um alto nível de desequilíbrio no DHTI até atingir 50% de carga, seguida por uma redução perceptível do desequilíbrio conforme a carga aumenta, o que indica uma menor influência das correntes harmônicas na operação em plena carga, mesmo com desequilíbrio de tensão. Esse padrão de comportamento é característico de motores de gaiola de esquilo, que possuem uma forma de onda mais linear e apresentam menor sensibilidade às variações de carga.

Figura 4.4: DHTI x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.



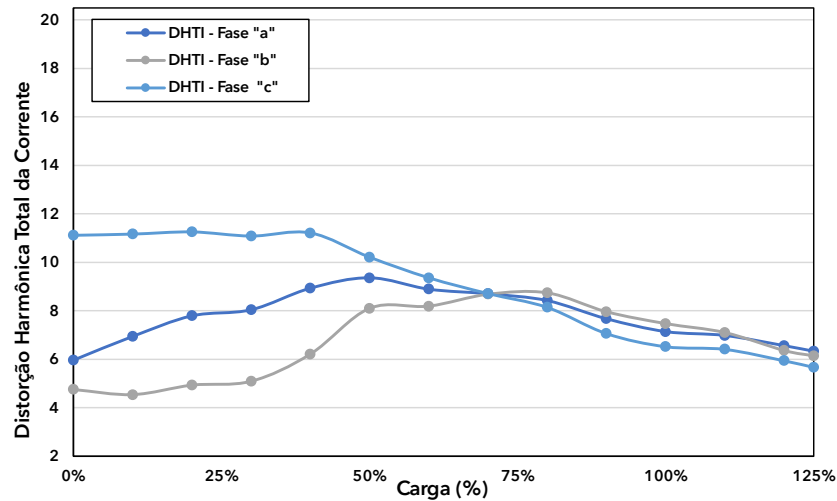
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.5: DHTI x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6: DHTI x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.

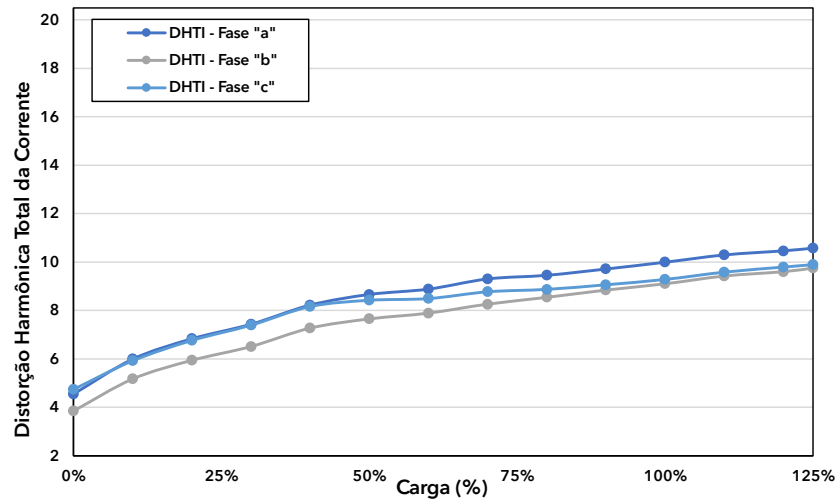


Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Análise da Resposta da Qualidade de Energia Para o Motor IR4

A presença de ímãs permanentes impacta significativamente a forma de onda do motor elétrico super premium, principalmente devido à interação dos campos magnéticos nas ranhuras da máquina (Tabora *et al.*, 2022a). Essa interação resulta em uma resposta não linear, caracterizada pelo aumento do conteúdo harmônico. Na Figura 4.7, observa-se que o DHTI cresce conforme a carga aumenta passando de pouco mais de 4% para pouco mais de 10%, comportamento que contrasta com o motor convencional de gaiola de esquilo, no qual a distorção harmônica total da corrente torna-se menos significativa pelo incremento de carga. No caso do motor super premium, a distorção harmônica exibe um comportamento mais complexo em comparação ao motor premium.

Figura 4.7: DHTI x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.

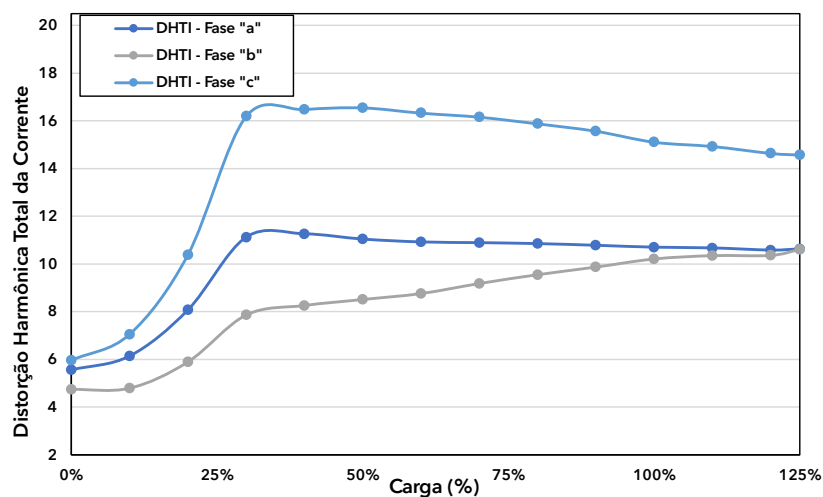


Fonte: Autoria própria.

O conteúdo harmônico, considerando diferentes níveis de carga, é detalhado nas Figuras 4.8, até 4.10, que apresentam a taxa de distorção harmônica total da corrente para o LSPMM sob condições de desequilíbrios de tensão de 2%, 3% e 4%, respectivamente.

Na Figura 4.8 na fase “c” o DHTI sobe rapidamente até 25% da carga chegando a superar 16%. Depois desse percentual o DHTI tende a cair chegando a pouco mais de 14%. A fase “a” segue o mesmo comportamento da fase “c” com valores mais baixos de DHTI. Na fase “b” o DHTI sobe de aproximadamente 5% chegando a passar de 10%.

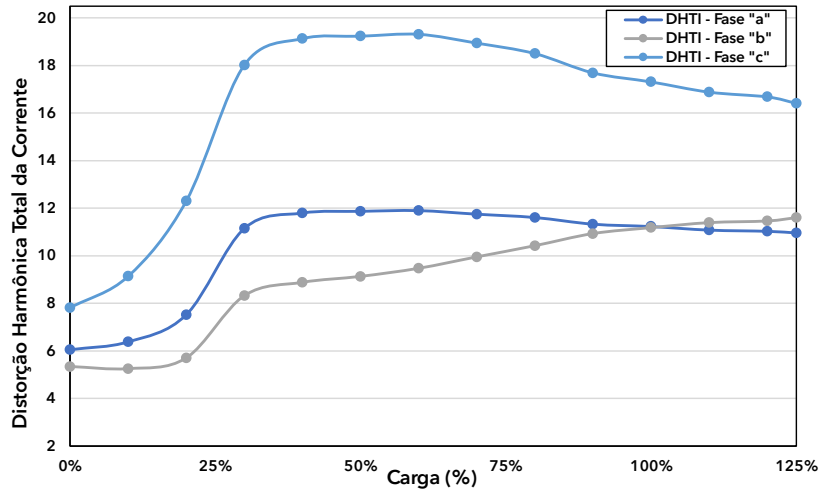
Figura 4.8: DHTI x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.9 apresenta um comportamento semelhante, entretanto os níveis de DHTI são maiores principalmente na fase “c” que chega a passar de 19%.

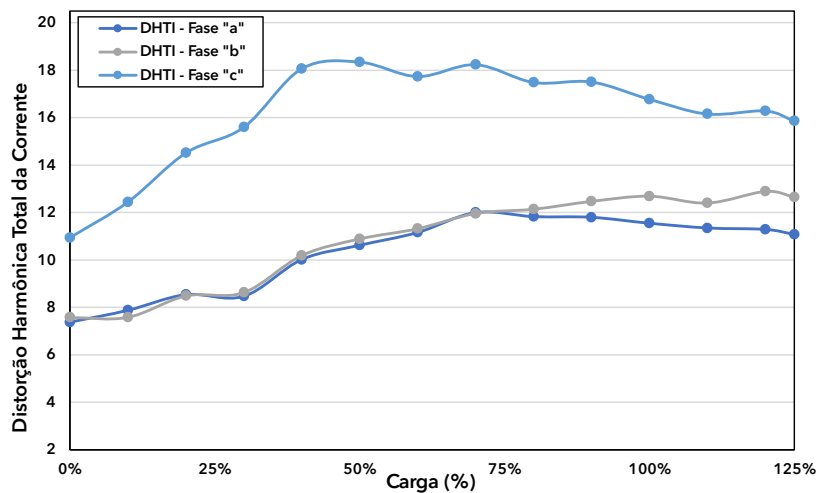
Figura 4.9: DHTI x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.10 é possível notar o comportamento diferente dos anteriores pois nas fases “a” e “b” sobem de 4% até 8% de DHTI enquanto na fase “c” sobe de 11% até pouco mais de 18% para 30% de carga e chega em 16 % em 125% de carga.

Figura 4.10: DHTI x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.



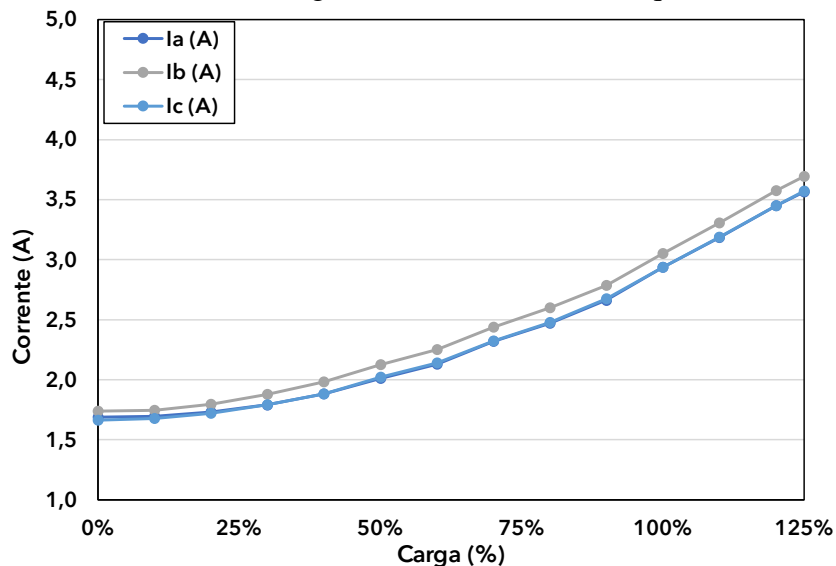
Fonte: Autoria própria.

4.3 Análise Técnica Para o Motor de Indução

4.3.1 Análise das Correntes motor IR3

Na Figura 4.11 são mostradas as correntes sem desequilíbrio de tensão, entretanto devido a pequenas variações na fonte a alimentação e ao processo de fabricação do motor é possível notar um leve desequilíbrio na fase “b”. Mesmo com esse desequilíbrio na corrente o desequilíbrio nas tensões é menor que 1%. O Comportamento da corrente é o mesmo subindo gradualmente na medida que a carga vai aumentando.

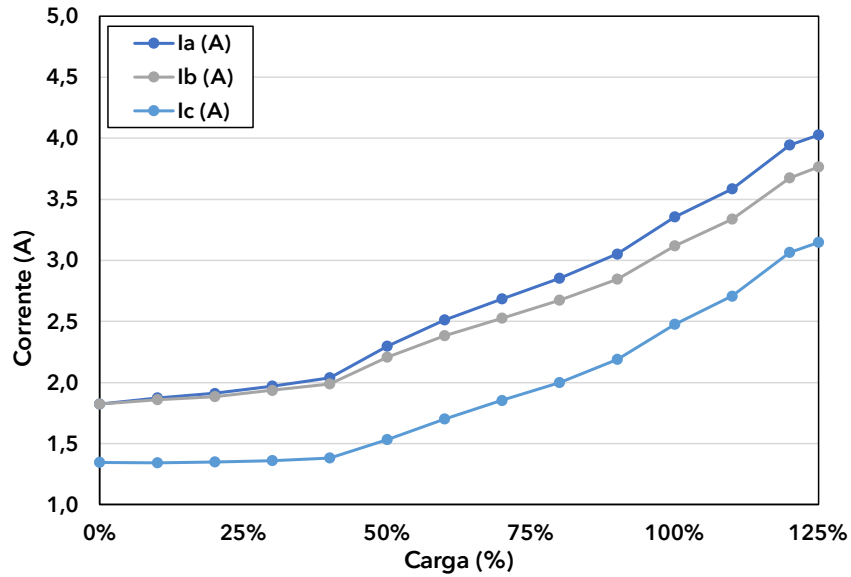
Figura 4.11: Corrente x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.12 são apresentadas as correntes do motor premium com 2% de desequilíbrio de tensão. É possível verificar as amplitudes das correntes crescendo em todas as fases, entretanto diferente da Figura 4.11 existe um desequilíbrio muito elevado que gera uma sobrecarga acentuada nas fases “a” e “b”, chegando a aproximadamente 4 A e 3,75 A, respectivamente. Na Figura 4.11 esses valores chegavam a pouco menos de 3,7 A.

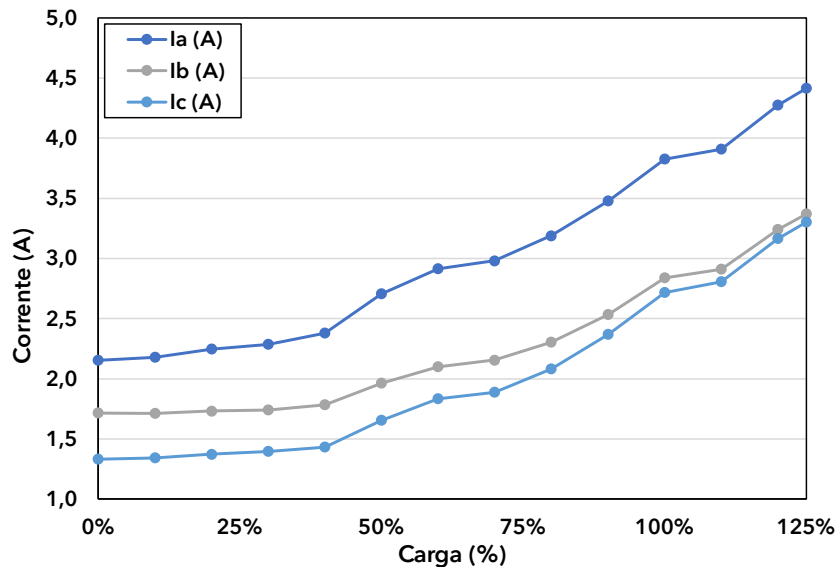
Figura 4.12: Corrente x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.13 são apresentadas as correntes do motor premium com 3% de desequilíbrio de tensão, respectivamente. É possível verificar as amplitudes das correntes crescendo em todas fases, e a presença de um desequilíbrio muito elevado que gera uma sobrecarga muito acentuada na fase “a”, chegando a aproximadamente 4,4 A, que resulta 18% de desequilíbrio na corrente

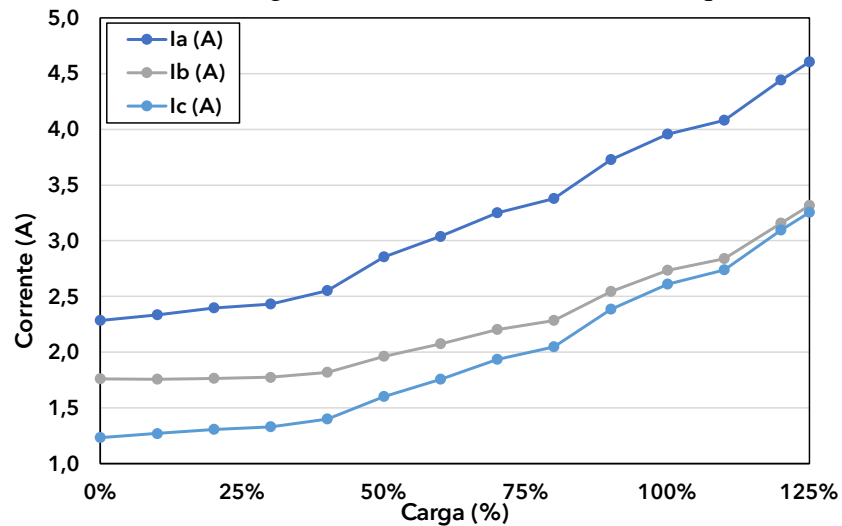
Figura 4.13: Corrente x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 são apresentadas as correntes do motor premium com 4% de desequilíbrio de tensão, respectivamente. É possível verificar as amplitudes das correntes crescendo em todas as fases, e a presença de um desequilíbrio muito elevado que gera uma sobrecarga muito acentuada na fase “a”, chegando a aproximadamente 4,5 A, que resulta 21% de desequilíbrio na corrente

Figura 4.14: Corrente x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.

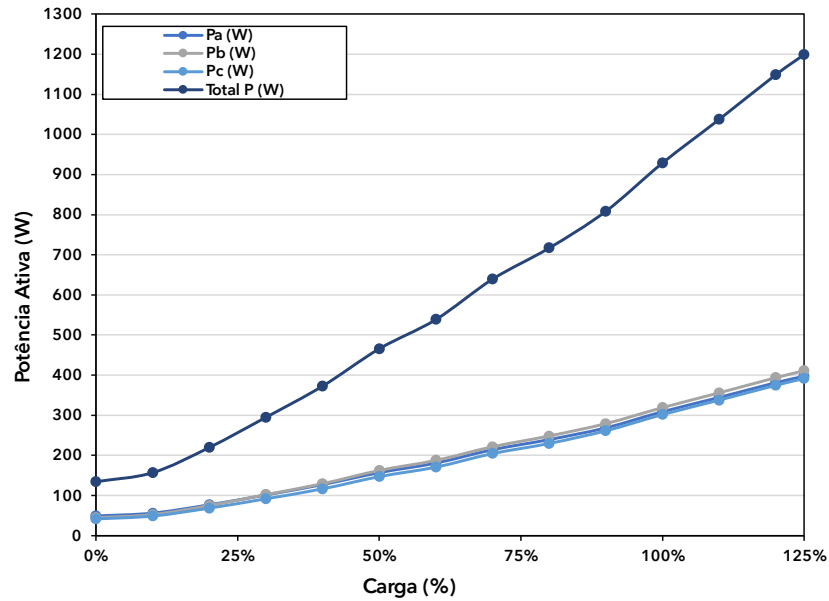


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Análise da Potência Ativa

Figura 4.15 é possível ver que a potência ativa total do motor IR3 sobe praticamente de forma linear na medida que a carga sobe, passando de aproximadamente 150 W para 1200 W. Também é notável o equilíbrio das potências monofásicas, que passam de 50 W até 400 W.

Figura 4.15: Potência Ativa x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.

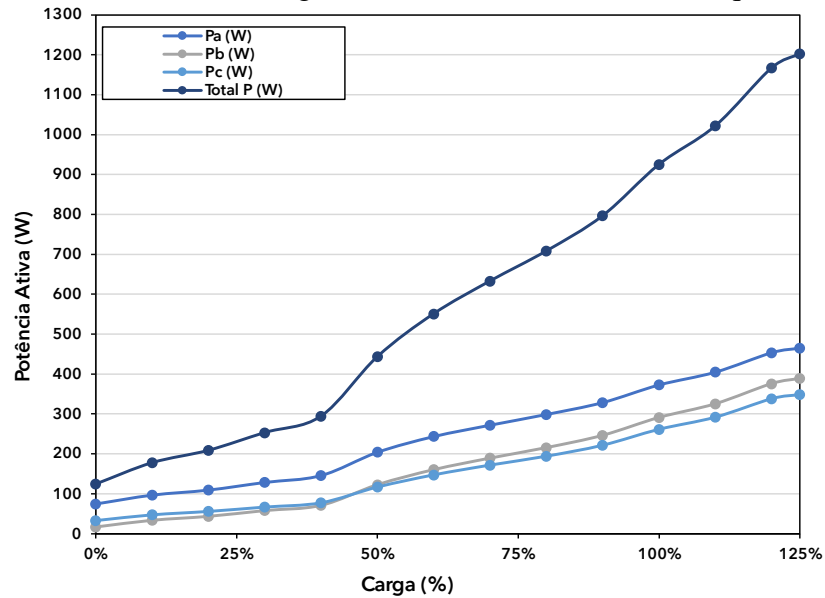


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.16, são apresentadas as potências ativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. Observa-se que o desequilíbrio nas potências também vai aumentando. Além

disso, existe uma sobrecarga na fase “a”. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 380 W, correspondendo a cerca de 20% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.16: Potência Ativa x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.

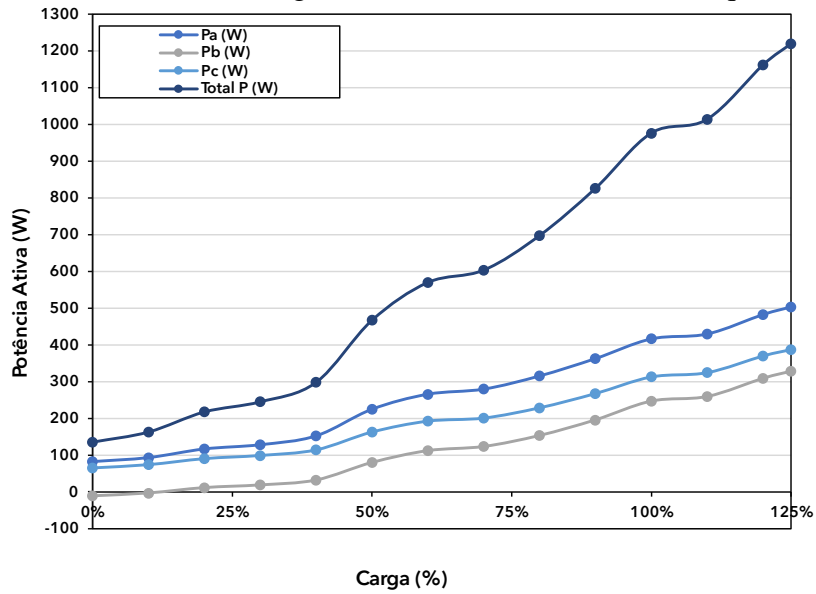


Fonte: Autoria propria

Na Figura 4.17, são apresentadas as potências ativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 3%. Observa-se que o desequilíbrio nas potências também vai aumentando. Além

disso, existe uma sobrecarga na fase “a”. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 500 W, correspondendo a cerca de 25% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.17: Potência Ativa x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.

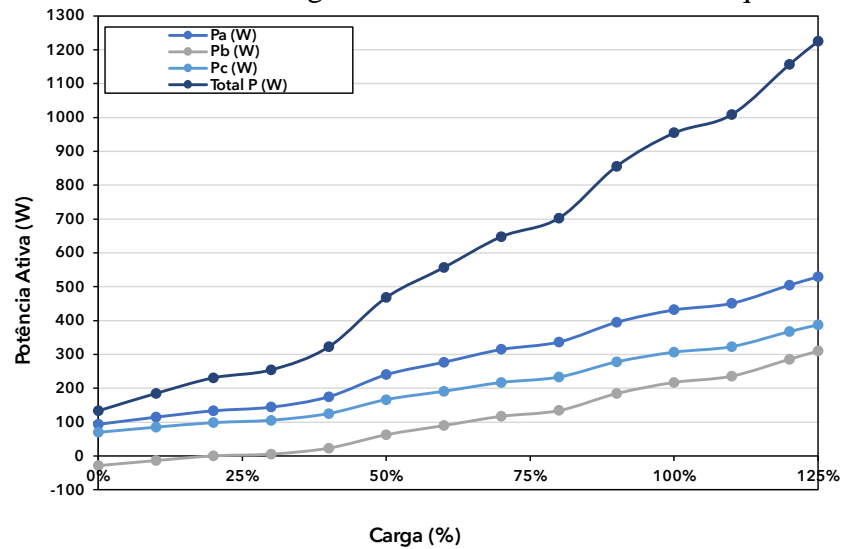


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.18, são apresentadas as potências ativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 4%. Observa-se que o desequilíbrio nas potências também vai aumentando. Além

disso, existe uma sobrecarga na fase “a”. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 530 W, correspondendo a cerca de 32% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.18: Potência Ativa x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.

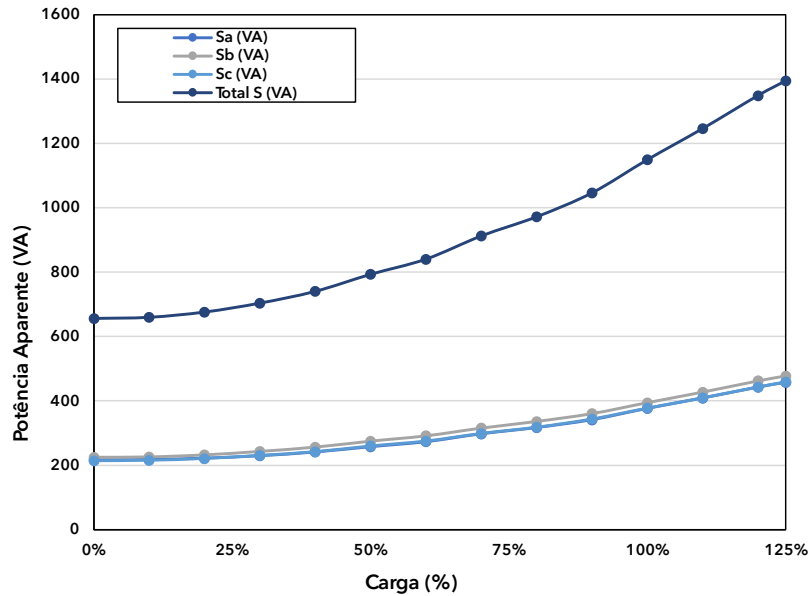


Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Análise da Potência Aparente

Analisando a Figura 4.19 é possível ver que a potência aparente total do motor IR3 sobe gradualmente na medida que a carga sobe, passando de aproximadamente 500 VA até 1400 VA. Também é notável o equilíbrio das potências monofásicas, que passam de 200 VA até pouco menos de 500 VA.

Figura 4.19: Potência Aparente x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.

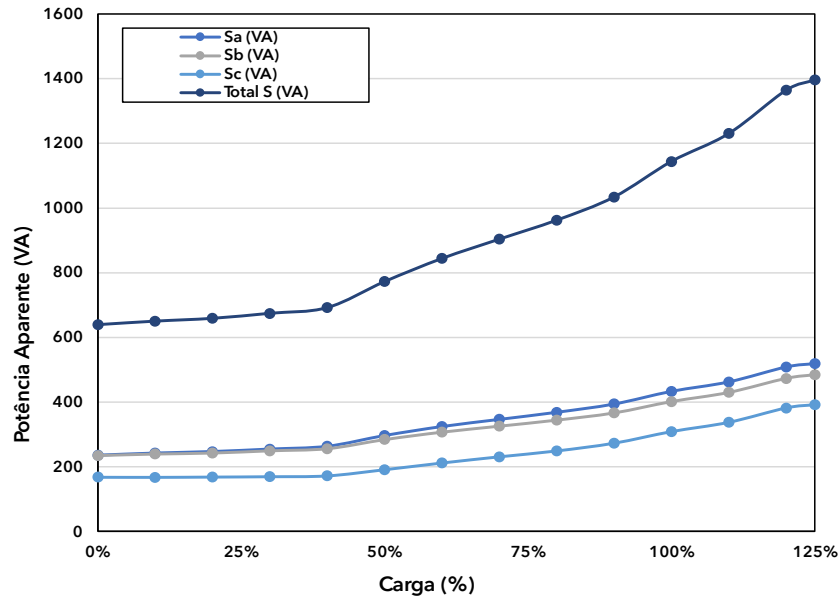


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.20, são apresentadas as potências aparentes com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. À medida que a carga aumenta, as potências aparentes também crescem. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a” que se acentua com o desequilíbrio. Essa

sobrecarga atinge aproximadamente 550 VA, correspondendo a cerca de 10% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.20: Potência Aparente x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.

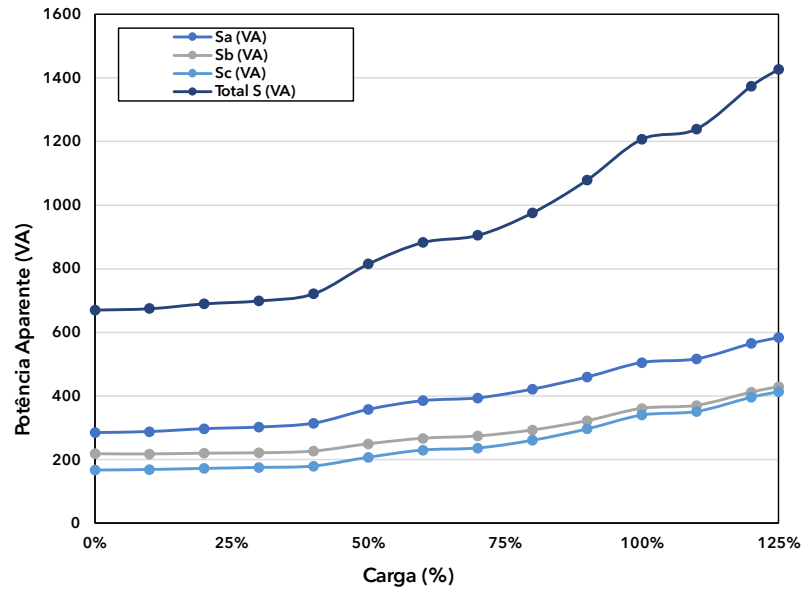


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.21, são apresentadas as potências aparentes com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. À medida que a carga aumenta, as potências aparentes também crescem. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a” que se acentua com o desequilíbrio. Essa

sobrecarga atinge aproximadamente 600 VA, correspondendo a cerca de 20% de sobrecarga na fase “a”.

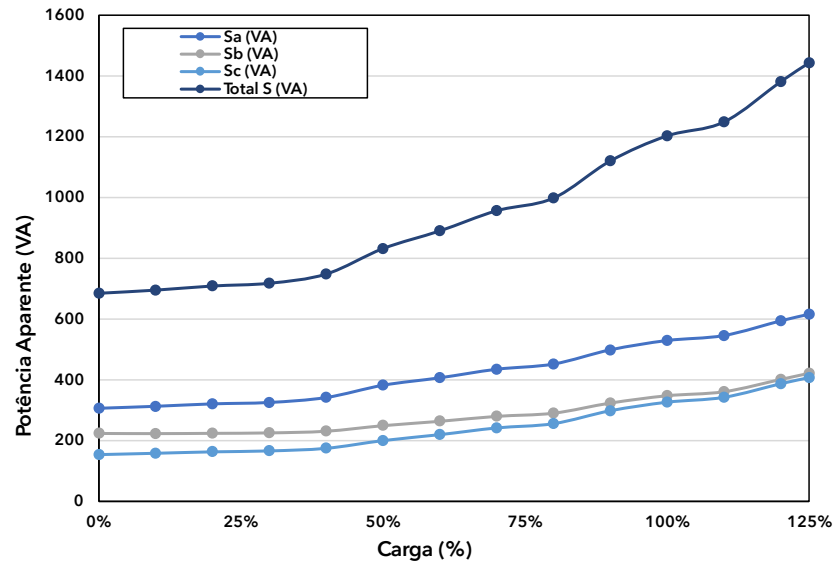
Figura 4.21: Potência Aparente x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.22, são apresentadas as potências aparentes com o nível de desequilíbrio de tensão de 4%. À medida que a carga aumenta, as potências aparentes também crescem. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a” que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga supera 600 VA, correspondendo a mais de 20% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.22: Potência Aparente x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.

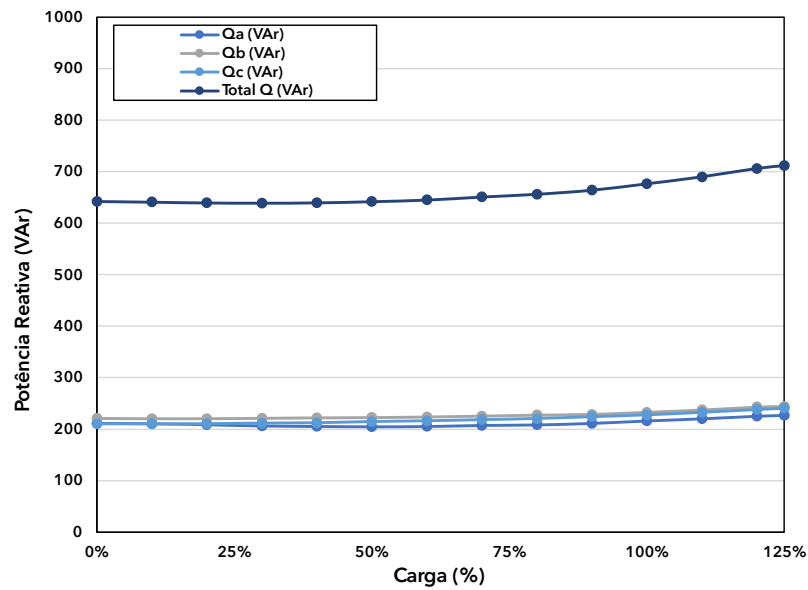


Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Análise da Potência Reativa

Analisando a Figura 4.23 é possível ver que a potência reativa total do motor IR3 sobe pouco à medida que a carga sobe, passando de aproximadamente 650 VAR até 700 VAR. Também é notável o equilíbrio das potências monofásicas, que passam de 200 VAR até pouco mais de 230 VAR.

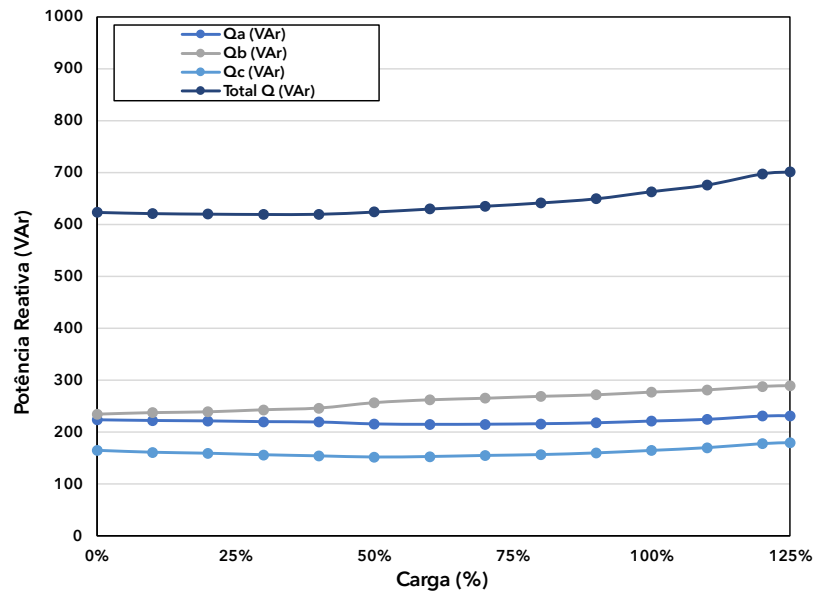
Figura 4.23: Potência Reativa x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.24 são apresentadas as potências reativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. A medida em que a carga vai subindo o desequilíbrio nas potências reativas também vai aumentando, além disso existe uma sobrecarga nas fases “a” e “c” que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 300 Var, correspondendo a aproximadamente 50% de sobrecarga na fase “c”.

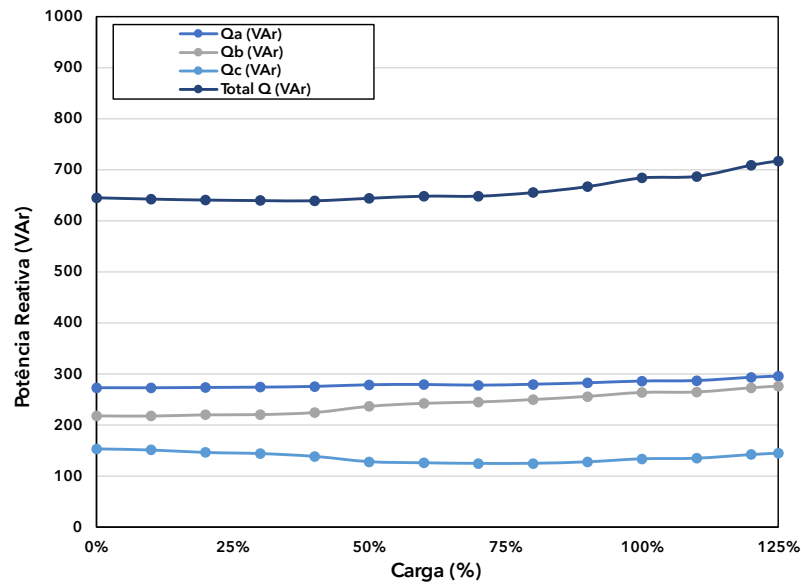
Figura 4.24: Potência Reativa x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.25 são apresentadas as potências reativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. A medida em que a carga vai subindo o desequilíbrio nas potências reativas também vai aumentando, além disso existe uma sobrecarga nas fases “a” e “c” que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 300 Var, correspondendo a aproximadamente 50% de sobrecarga na fase “a”.

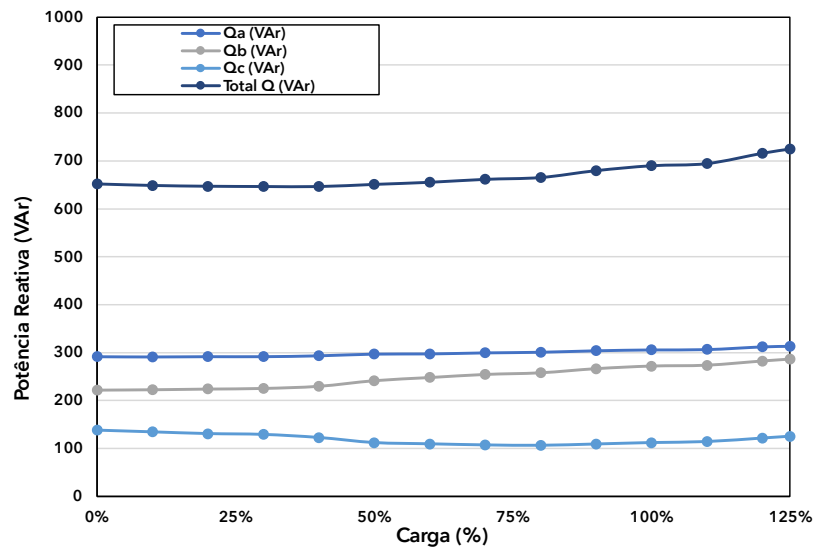
Figura 4.25: Potência Reativa x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.26, são apresentadas as potências reativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 4%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências reativas também se intensifica. Além disso, observa-se uma sobrecarga nas fases “a” e “b”, que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 300 Var, correspondendo a cerca de 50% de sobrecarga em ambas as fases.

Figura 4.26: Potência Reativa x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.

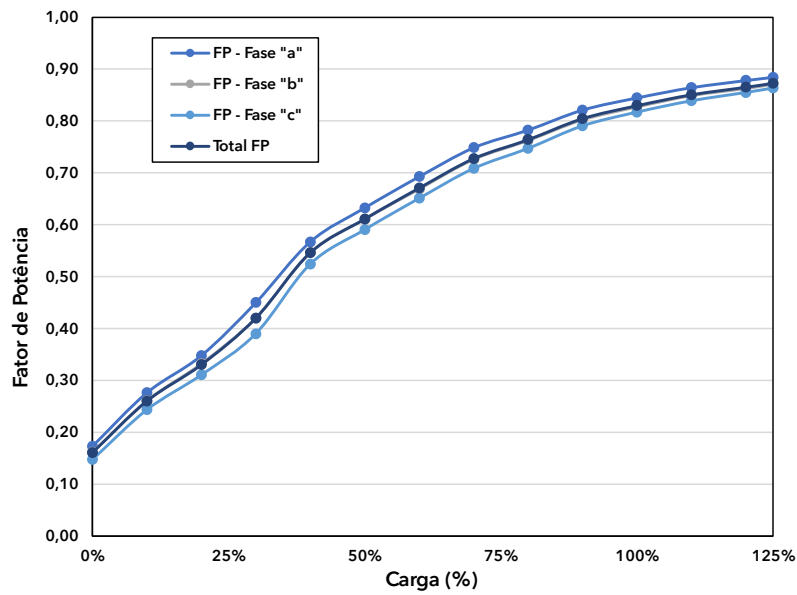


Fonte: Autoria própria.

4.3.5 Análise do Fator Potência

O comportamento do fator de potência, sem o desequilíbrio de tensão, é mostrado na Figura 4.27. Nela é possível ver que os valores de fator de potência monofásico e trifásico são basicamente iguais, indo de 0,2 até 0,87, com a carga variando de 0% até 125%.

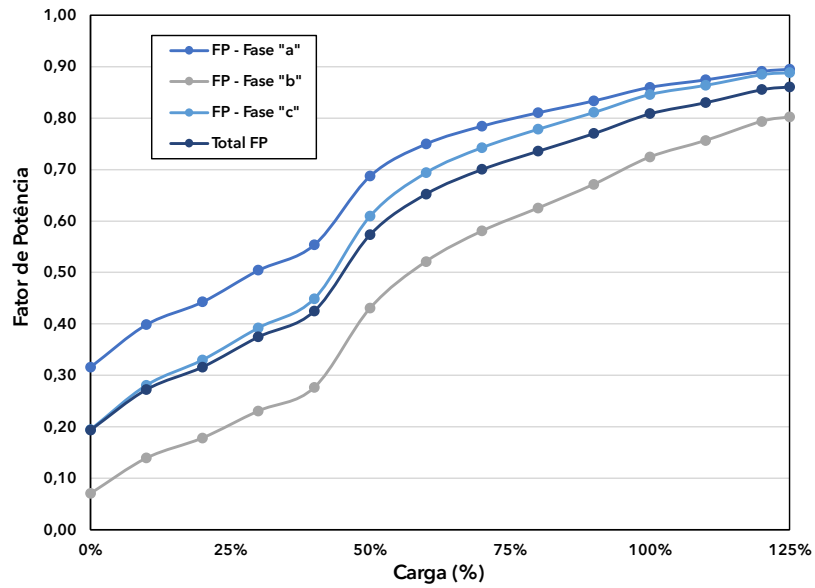
Figura 4.27: Fator de Potência x Carga do motor IR3 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

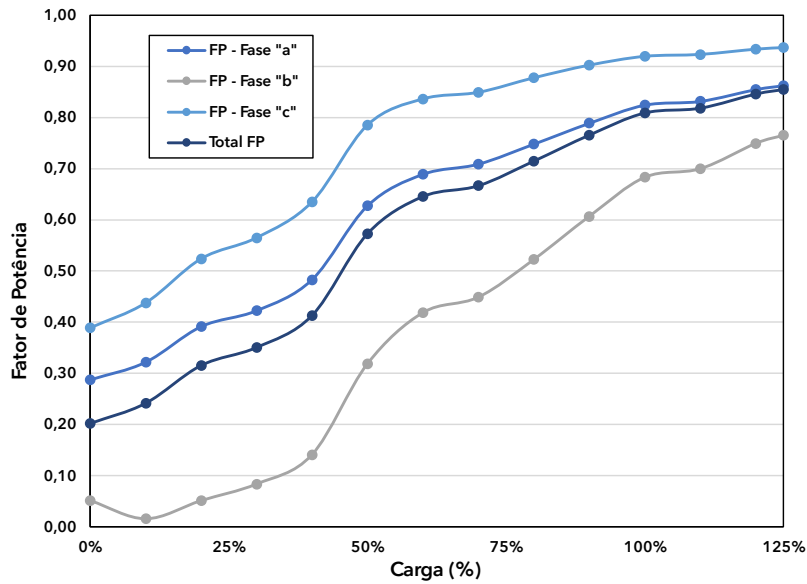
Nas Figuras 4.28 a 4.30, é possível observar como o comportamento do fator de potência se modifica, especialmente no sistema monofásico. Na Figura 4.30, o fator de potência da fase 'b' apresenta valores bem abaixo do nominal, enquanto na fase 'c' ele fica bem acima do nominal, sendo essa diferença mais evidente nas Figuras 4.29 e 4.30. Já na fase 'a', o comportamento é distinto: o fator de potência está acima do nominal com 2% de desequilíbrio, próximo do nominal com 3% e abaixo do nominal com 4% de desequilíbrio de tensão.

Figura 4.28: Fator de Potência x Carga do motor IR3 com 2% de desequilíbrio de tensão.



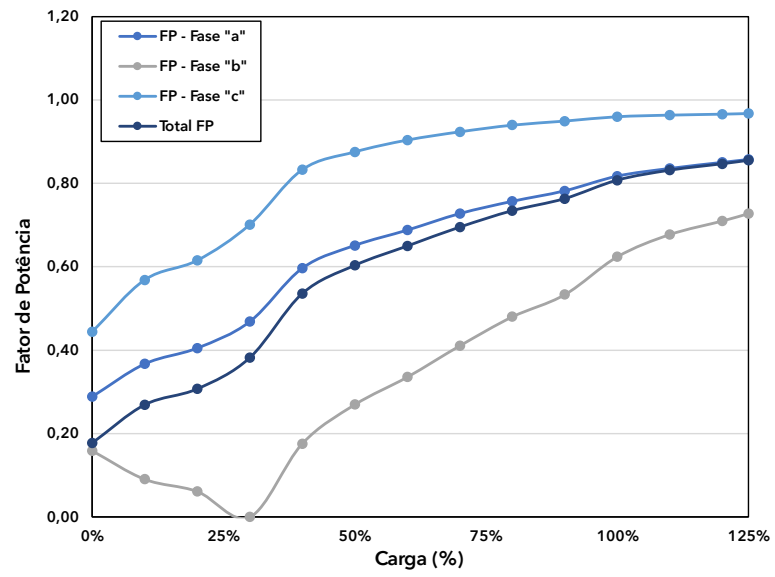
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.29: Fator de Potência x Carga do motor IR3 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.30: Fator de Potência x Carga do motor IR3 com 4% de desequilíbrio de tensão.



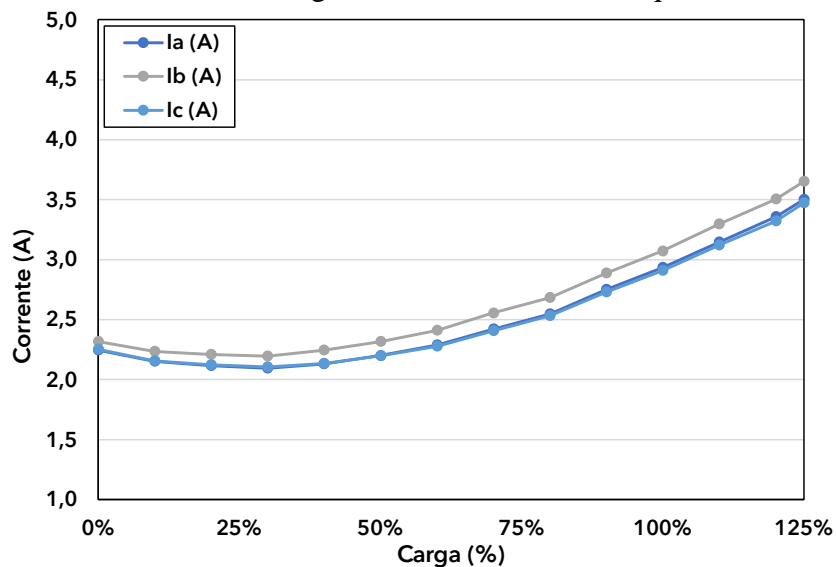
Fonte: Autoria própria.

4.4 Análise Técnica Para o LSPMM

4.4.1 Análise da Corrente

Figura 4.31 são mostradas as correntes sem desequilíbrio de tensão, entretanto devido processo de fabricação do motor e de pequenas variações na fonte é possível notar um leve desequilíbrio na fase “b”. Mesmo com esse desequilíbrio na corrente o desequilíbrio nas tensões é menor que 1%. O Comportamento da corrente é o mesmo nas três fases, com uma pequena redução de 0% até 20% da carga e subindo gradualmente na medida que a carga vai aumentando de 30% até 125% da carga, chegando em 3,5 A.

Figura 4.31: Corrente x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.

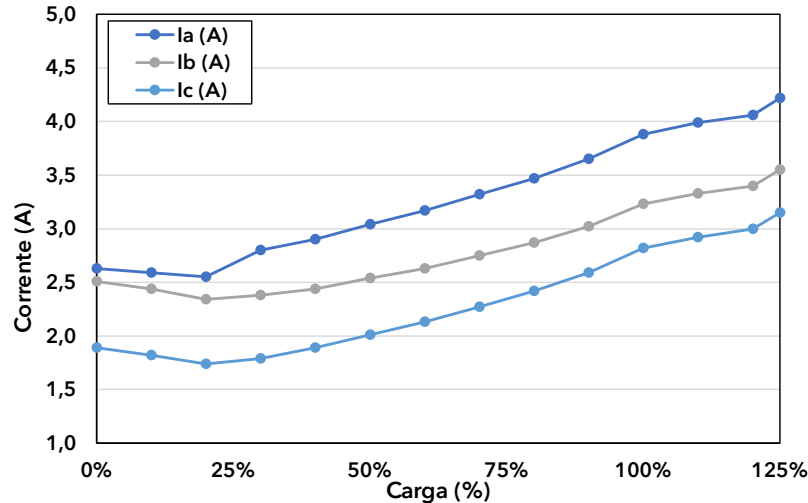


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.32 são apresentadas as correntes do motor super premium com 2% de desequilíbrio de tensão. É possível ver o desequilíbrio na corrente crescendo. Esse desequilíbrio

muito elevado gera uma sobrecarga muito acentuada na fase “a”, chegando a aproximadamente 4,3 A.

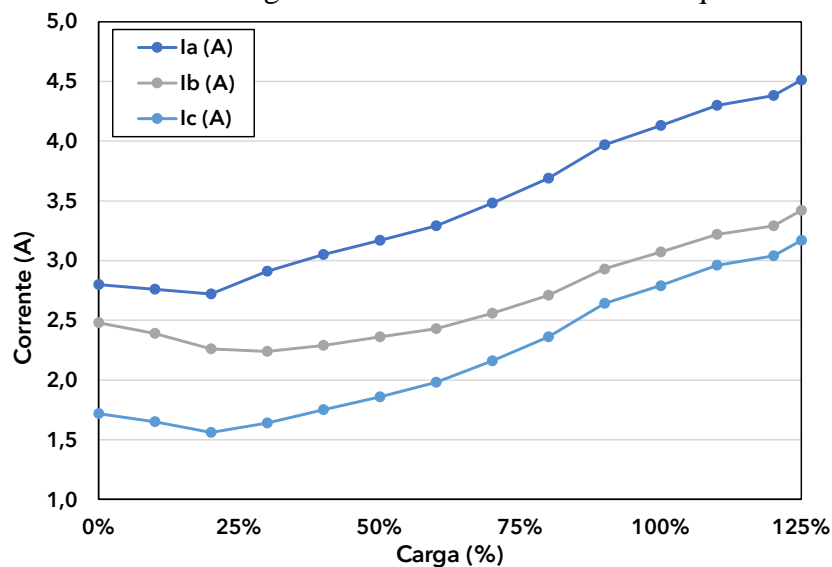
Figura 4.32: Corrente x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.33 são apresentadas as correntes do motor super premium com 3% de desequilíbrio de tensão. É possível ver o desequilíbrio na corrente crescendo. Esse desequilíbrio muito elevado gera uma sobrecarga muito acentuada na fase “a”, chegando a aproximadamente 4,5 A.

Figura 4.33: Corrente x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.

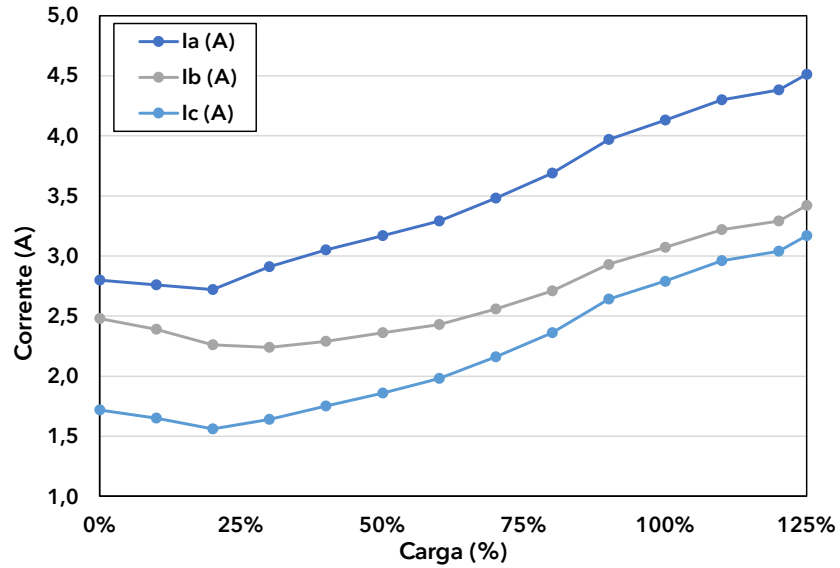


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.34, são apresentadas as correntes do motor super premium com 4% de desequilíbrio de tensão. Observa-se que o desequilíbrio na corrente aumenta significativamente.

Esse elevado desequilíbrio gera uma sobrecarga acentuada na fase “a”, atingindo aproximadamente 4,75 A, o que representa cerca de 36% de desequilíbrio na corrente.

Figura 4.34: Corrente x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.

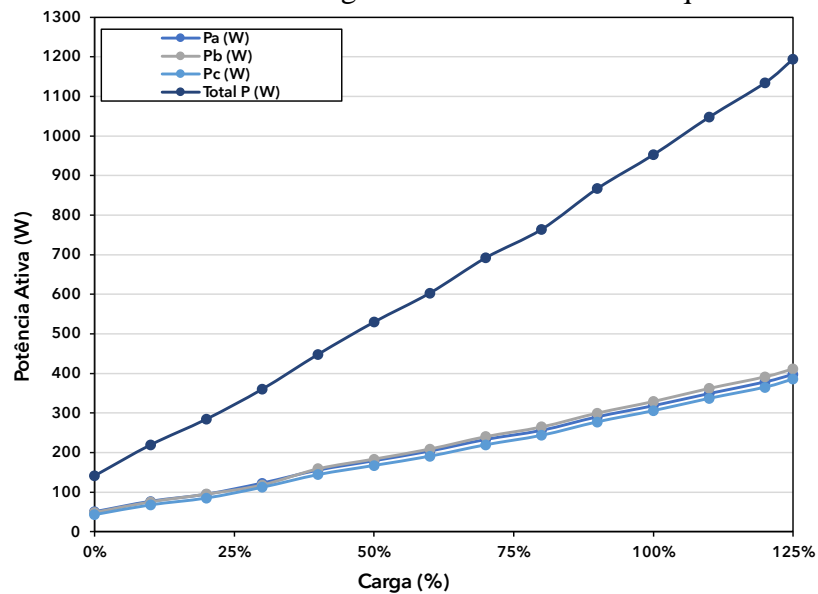


Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Análise do Potência Ativa

Analisando a Figura 4.35 é possível ver que a potência ativa total do motor IR4 sobe praticamente linearmente na medida que a carga sobe, passando de aproximadamente 150 W até 1200 W. Também é notável o equilíbrio das potências monofásicas, que passam de 50 W até 400 W.

Figura 4.35: Potência Ativa x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.

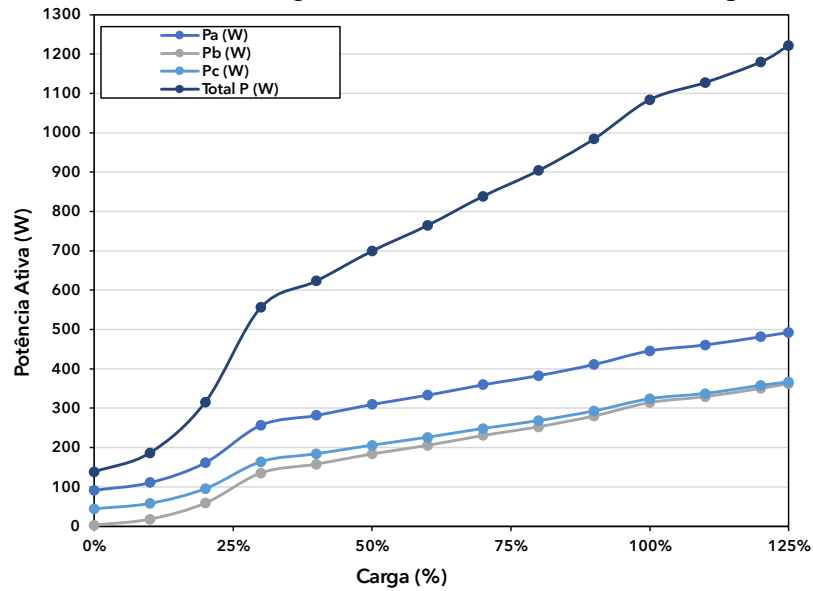


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.36 são apresentadas as potências ativas como o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. Na medida em que a carga vai subindo o desequilíbrio nas potências também vai aumentando, além disso existe uma sobrecarga na fase “a”. Essa sobrecarga atinge

aproximadamente 500 W, correspondendo a aproximadamente de 25% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.36: Potência Ativa x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.

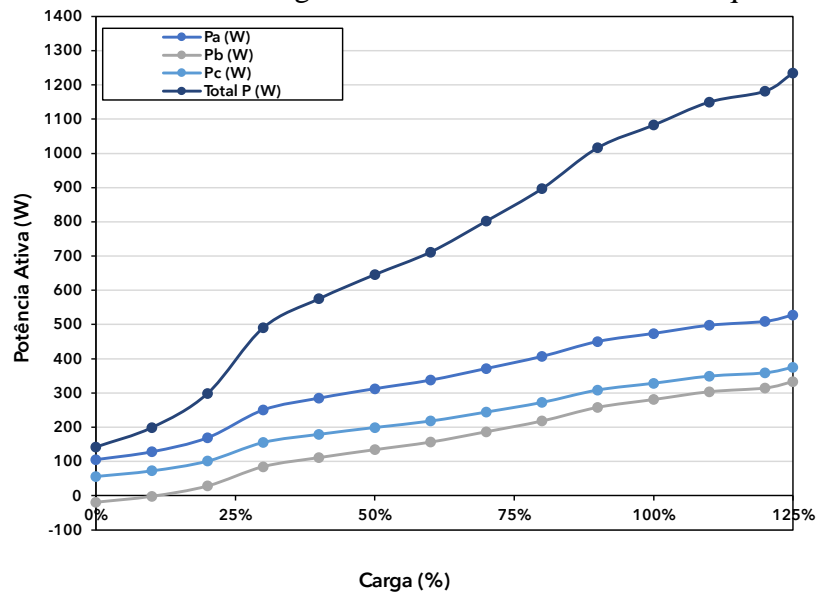


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.36 são apresentadas as potências ativas como o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. Na medida em que a carga vai subindo o desequilíbrio nas potências também vai aumentando, além disso existe uma sobrecarga na fase “a”. Essa sobrecarga atinge

aproximadamente 520 W, correspondendo a aproximadamente de 30% de sobrecarga na fase “a”.

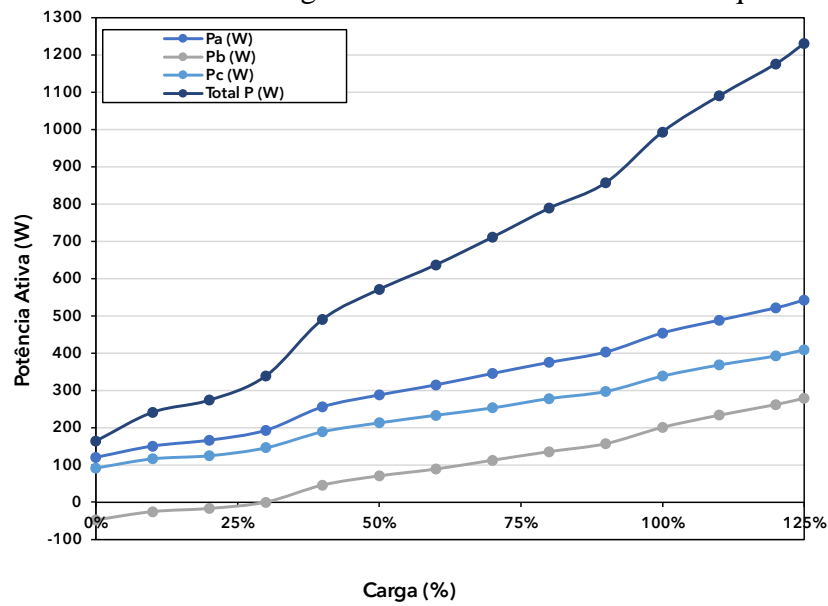
Figura 4.37: Potência Ativa x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.38, são apresentadas as potências ativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 4%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências também se intensifica. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a”, que atinge aproximadamente 550 W, correspondendo a cerca de 37% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.38: Potência Ativa x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

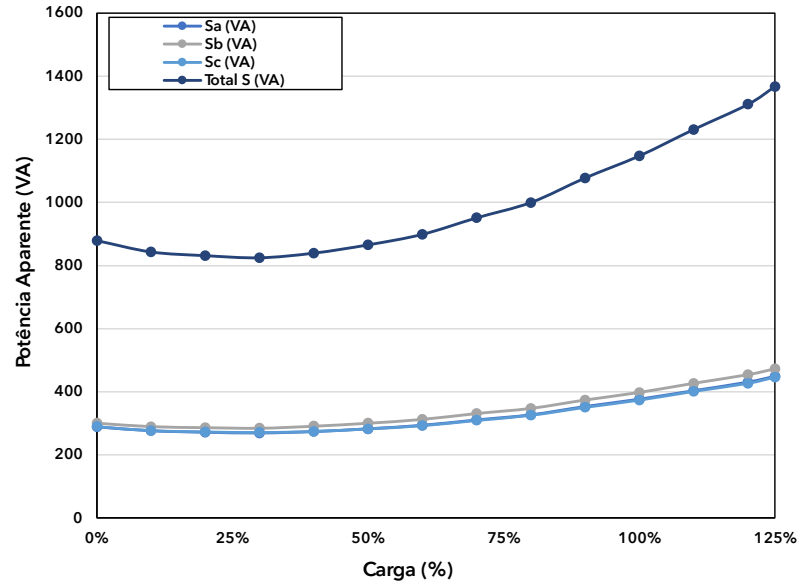
4.4.3 Análise do Potência Aparente

Analisando a

Figura 4.39 é possível ver que a potência aparente total do motor super premium sobe gradualmente na medida que a carga sobe de 30%, passando de aproximadamente 500 VA até

1400 VA. Também é notável o equilíbrio das potências monofásicas, que passam de 200 VA até pouco menos de 500 VA.

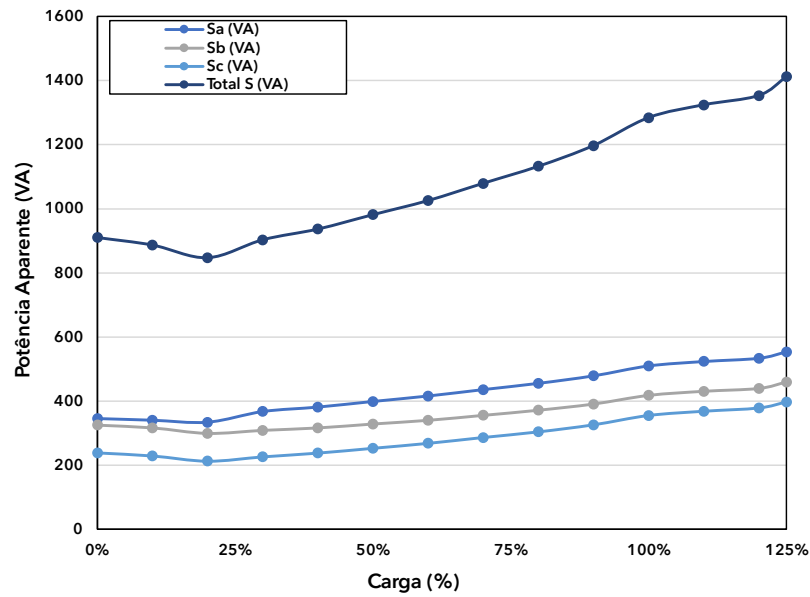
Figura 4.39: Potência Aparente x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.40, são apresentadas as potências aparentes com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências também se intensifica. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a”, que atinge aproximadamente 550 VA, correspondendo a cerca de 10% de sobrecarga na fase “a”.

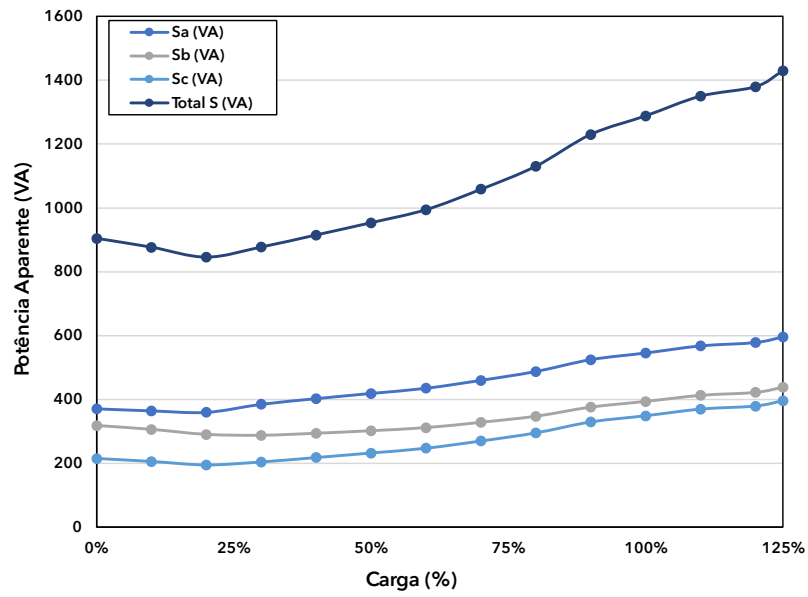
Figura 4.40: Potência Aparente x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.41, são apresentadas as potências aparentes com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências também se intensifica. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a”, que atinge aproximadamente 600 VA, correspondendo a cerca de 20% de sobrecarga na fase “a”.

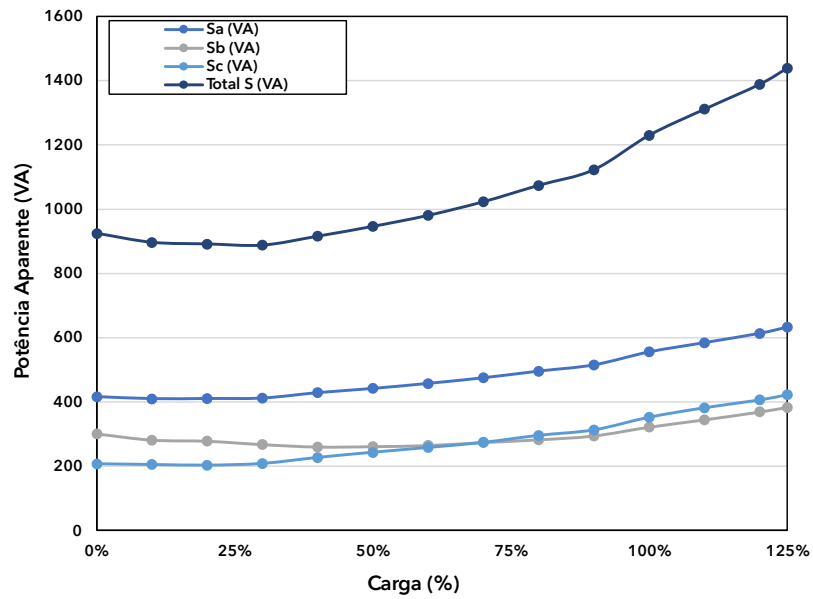
Figura 4.41: Potência Aparente x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.42, são apresentadas as potências aparentes com o nível de desequilíbrio de tensão de 4%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências também se intensifica. Além disso, observa-se uma sobrecarga na fase “a”, que atinge aproximadamente 620 VA, correspondendo a cerca de 24% de sobrecarga na fase “a”.

Figura 4.42: Potência Aparente x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.

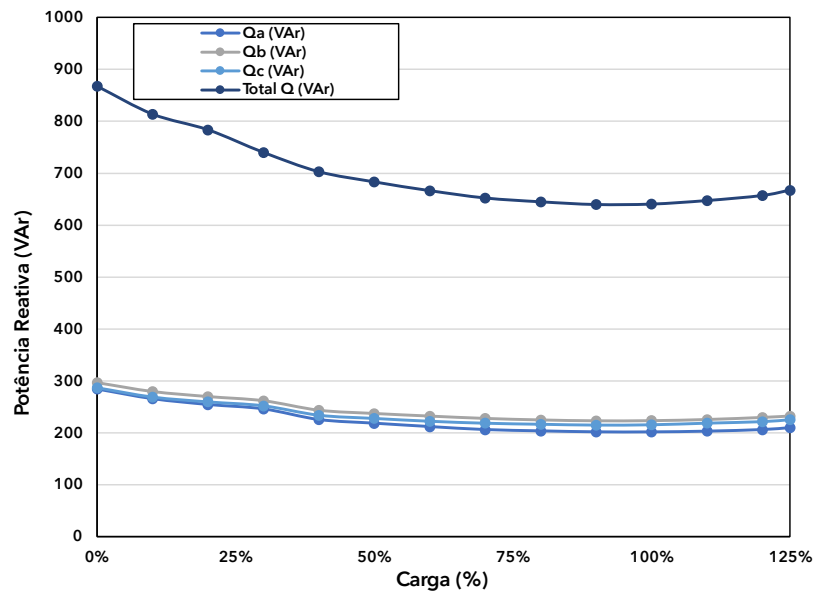


Fonte: Autoria própria.

4.4.4 Análise do Potência Reativa

Analisando a Figura 4.43 é possível ver que a potência reativa total do motor IR4 cai na medida que a carga sobe, passando de aproximadamente 880 VAR até 680 VAR. Também é notável o equilíbrio das potências monofásicas, que passam de pouco menos de 300 VAR até pouco mais de 220 VAR.

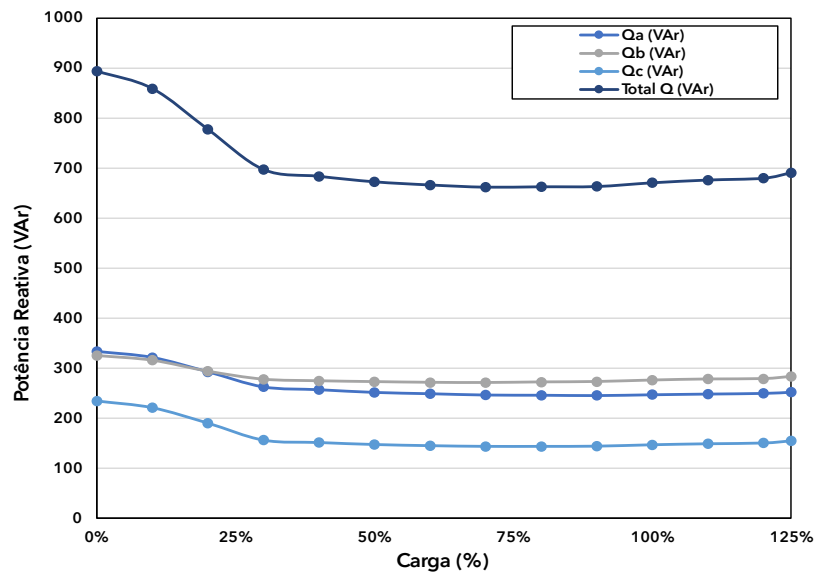
Figura 4.43: Potência Reativa x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.44, são apresentadas as potências reativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 2%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências reativas também se intensifica. Além disso, para até 30% cargas observa-se uma leve sobrecarga nas fases “a” e “b”, que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 320 Var, correspondendo a cerca de 6% em ambas as fases.

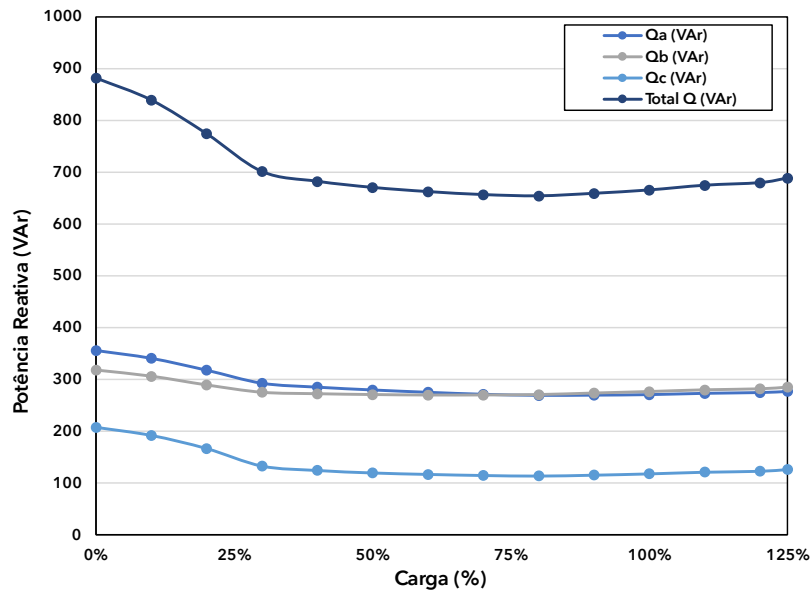
Figura 4.44: Potência Reativa x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.45, são apresentadas as potências reativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 3%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências reativas também se intensifica. Além disso, para até 30% cargas observa-se uma leve sobrecarga nas fases “a” e “b”, que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 350 Var, correspondendo a cerca de 16% na fase “a”.

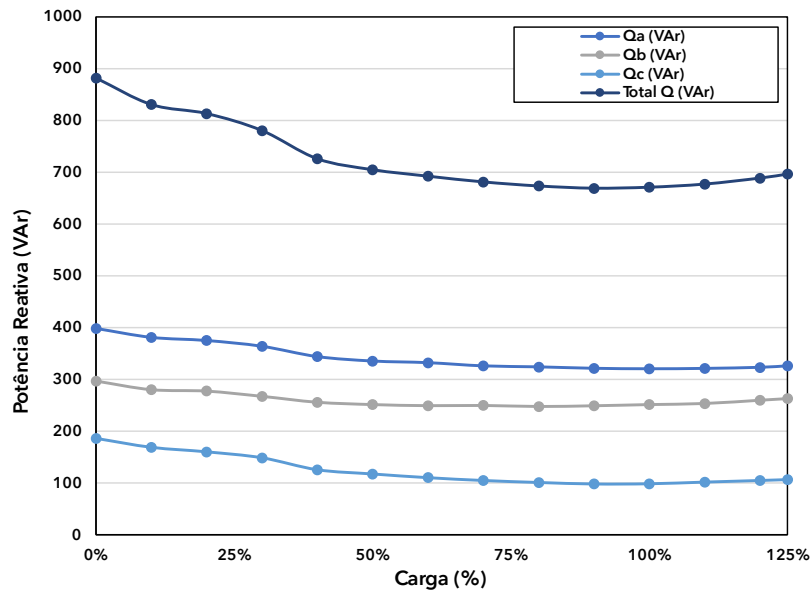
Figura 4.45: Potência Reativa x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.46, são apresentadas as potências reativas com o nível de desequilíbrio de tensão de 3%. À medida que a carga aumenta, o desequilíbrio nas potências reativas também se intensifica. Além disso, para até 30% cargas observa-se uma leve sobrecarga nas fases “a” e “b”, que se acentua com o desequilíbrio. Essa sobrecarga atinge aproximadamente 400 Var, correspondendo a cerca de 33% na fase “a”.

Figura 4.46: Potência Reativa x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.

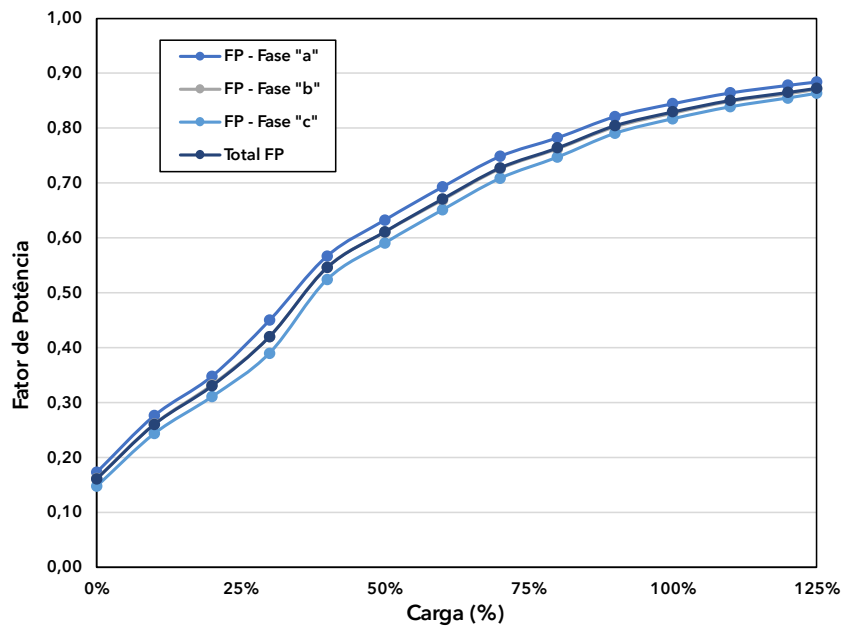


Fonte: Autoria própria.

4.4.5 Análise do Fator Potência

O fator de potência, sem o desequilíbrio de tensão é mostrado na Figura 4.47. Nela é possível ver que os fatores de potência monofásico e trifásico são basicamente iguais, indo de 0,2 até 0,87, valor bem superior ao indicado na placa do motor.

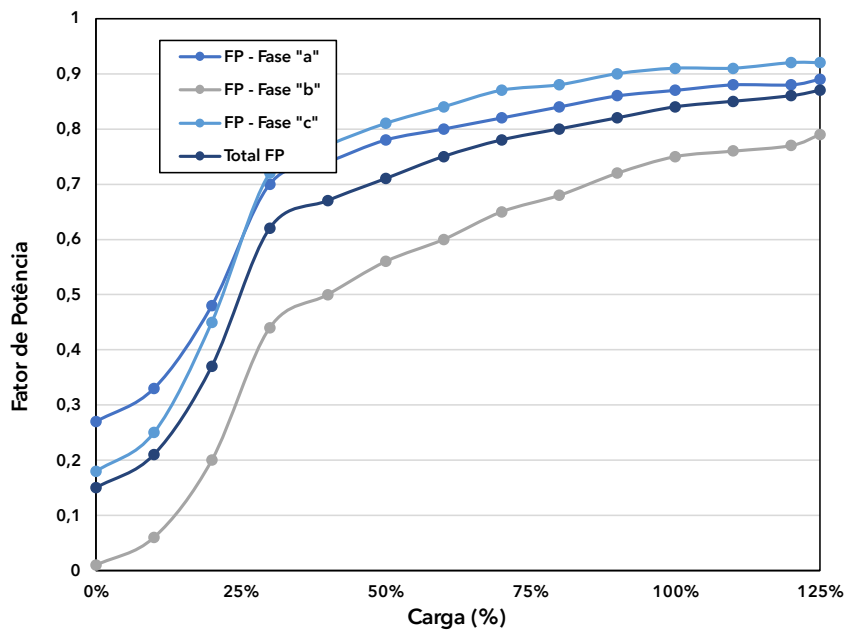
Figura 4.47: Fator de Potência x Carga do motor IR4 sem desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

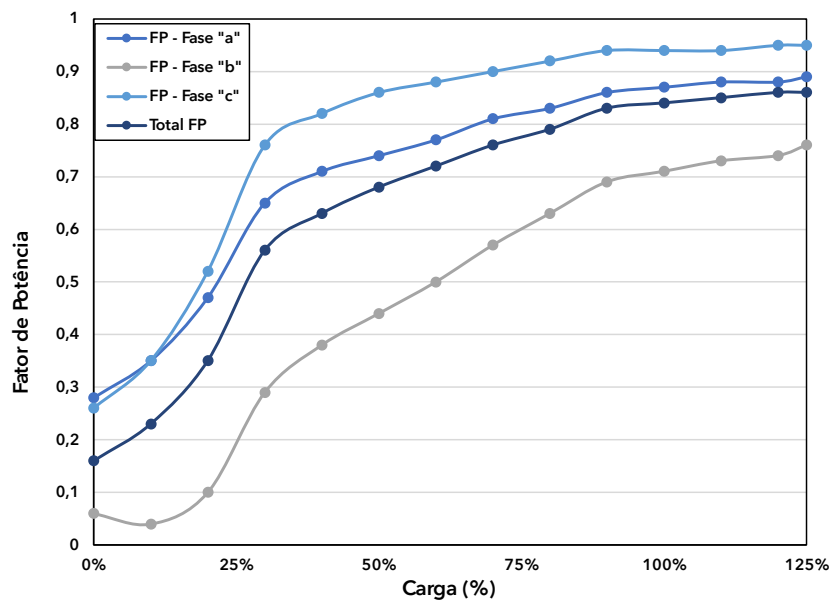
Nas Figuras de 4.48 até 4.50 é possível ver como se modifica o comportamento do fator de potência principalmente o monofásico. Ficando bem do abaixo do nominal para a fase “b” principalmente na Figura 4.50. e bem acima do nominal na fase “c” ficando mais evidente nas Figuras 4.49 e 4.50. Na fase “a” o comportamento é diferente, ficando acima do nominal com 2% e 3% de desequilíbrio de tensão e próximo do nominal com 4% de desequilíbrio de tensão.

Figura 4.48: Fator de Potência x Carga do motor IR4 com 2% de desequilíbrio de tensão.



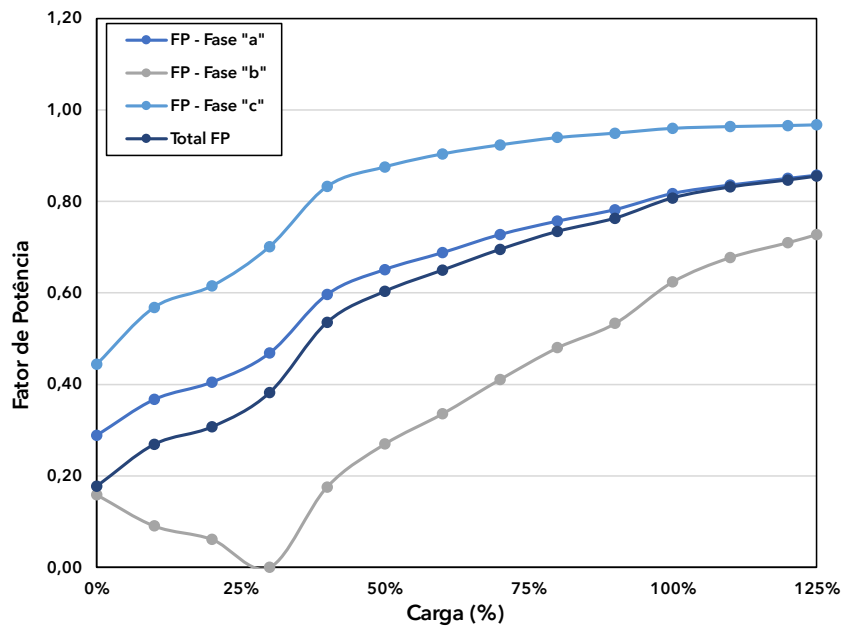
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.49: Fator de Potência x Carga do motor IR4 com 3% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.50: Fator de Potência x Carga do motor IR4 com 4% de desequilíbrio de tensão.



Fonte: Autoria própria.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS MOTORES IR3 E IR4

Nesta seção, será realizada uma análise comparativa entre os motores IR3 e IR4 em relação às potências ativas e reativas totais, considerando diferentes percentuais de desequilíbrio de tensão (0%, 2%, 3% e 4%). A comparação é baseada nos dados apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

4.5.1 Potência Ativa Total

A avaliação da potência ativa total revela que o motor IR3, em condições sem desequilíbrio de tensão, apresenta valores iniciais mais baixos em comparação ao motor IR4. Por exemplo, com 0% de carga, o IR3 registra uma potência ativa de 134,5 W, enquanto o IR4 apresenta 141,2 W. Essa diferença inicial tende a se reduzir à medida que a carga aumenta. Na carga máxima (125%), a potência ativa total do IR3 é de 1198,8 W, enquanto o IR4 apresenta 1193,7 W, evidenciando que, em termos de potência ativa total, ambos os motores apresentam um desempenho muito semelhante em condições de carga elevada.

Quando o desequilíbrio de tensão é introduzido, observa-se que a potência ativa total do IR3 começa a variar de forma mais significativa. Por exemplo, com 2% de desequilíbrio de tensão e 0% de carga, a potência ativa do IR3 cai para 123,9 W, enquanto o IR4 apresenta 138,7 W. Em contrapartida, com 4% de desequilíbrio de tensão e 125% de carga, o IR3 alcança 1225,6 W.

W, enquanto o IR4 registra 1230,6 W. Esses resultados indicam que ambos os motores analisados operam com grande estabilidade no consumo de potência ativa, mesmo em condições de desequilíbrio de tensão.

Tabela 4.3: valores de potência ativas para os 3 motores para todos os percentuais de desequilíbrio.

Carga (%)	IR3 P Total (W) - 0% TD	IR4 P Total (W) - 0% TD	IR3 P Total (W) - 2% TD	IR4 P Total (W) - 2% TD	IR3 P Total (W) - 3% TD	IR4 P Total P (W) - 3% TD	IR3 P Total (W) - 4% TD	IR4 P Total (W) - 4% TD
0%	134,5	141,2	123,9	138,7	135,6	141,8	133,1	164,4
10%	157,0	219,2	177,3	186,8	163,1	198,5	184,6	241,5
20%	219,8	284,3	208,4	316,0	217,7	298,1	230,8	274,0
30%	294,9	360,0	252,9	556,4	245,2	490,3	254,2	339,0
40%	372,7	448,0	294,1	623,7	298,0	575,1	322,0	490,5
50%	465,7	529,4	443,3	699,5	466,9	645,7	468,0	571,0
60%	538,6	602,8	550,9	764,7	569,8	711,7	556,6	637,0
70%	639,2	691,9	632,9	838,9	603,3	802,2	648,0	711,2
80%	716,8	763,7	708,3	904,3	697,4	897,1	702,8	788,9
90%	808,3	866,9	796,5	984,7	825,8	1016,7	855,9	857,3
100%	928,7	952,2	925,1	1084,2	976,1	1082,7	954,5	993,4
110%	1037,2	1047,3	1021,8	1127,8	1013,5	1150,2	1008,7	1090,1
120%	1148,6	1134,2	1167,2	1180,0	1161,5	1182,1	1156,9	1176,1
125%	1198,8	1193,7	1202,2	1221,9	1218,9	1235,3	1225,6	1230,6

Fonte: Autoria própria.

4.5.2 Potência Reativa Total

A análise da potência reativa total dos motores revela outra característica interessante. O motor IR4, classificado como super premium, apresenta inicialmente uma potência reativa mais alta em comparação ao IR3. No entanto, à medida que a carga do motor aumenta, a potência reativa do IR4 tende a diminuir gradativamente, evidenciando uma maior eficiência no uso da energia reativa em condições de carga elevada. Esse comportamento é especialmente notável em cargas acima de 50%, onde a potência reativa do IR4 começa a se estabilizar ou até mesmo a reduzir, enquanto a do IR3 continua a aumentar. Por exemplo, na condição de 80% de carga e sem desequilíbrio de tensão, o IR4 apresenta uma potência reativa de 644,8 VAr, um pouco menor que os 656,1 VAr do IR3. Essa tendência persiste em condições de carga ainda

mais elevadas, como 100% e 125%, onde o IR4 continua apresentando valores mais baixos de potência reativa em comparação ao IR3. Isso demonstra uma pequena superioridade do motor IR4 em cargas mais elevadas.

Tabela 4.4: valores de potência reativas para os 3 motores para todos os percentuais de desequilíbrio.

Carga (%)	IR3 Q Total (VAr) - 0% TD	IR4 Q Total (VAr) - 0% TD	IR3 Q Total (VAr) - 2% TD	IR4 Q Total (VAr) - 2% TD	IR3 Q Total (VAr) - 3% TD	IR4 Q Total (VAr) - 3% TD	IR3 Q Total (VAr) - 4% TD	IR4 Q Total (VAr) - 4% TD
0%	642,2	867,3	623,4	893,9	645,2	881,7	651,8	881,7
10%	640,8	813,7	621,1	859,1	642,6	839,1	648,6	830,6
20%	639,3	783,5	620,1	777,7	640,7	774,1	647,0	813,1
30%	638,9	740,0	619,5	697,5	639,7	701,1	646,4	780,3
40%	639,5	702,8	619,8	683,8	639,3	682,1	646,3	725,9
50%	641,8	683,2	624,1	672,8	644,1	670,3	650,8	704,7
60%	644,9	666,3	629,9	666,5	648,3	662,2	655,2	692,2
70%	650,8	652,2	635,3	662,1	648,3	656,4	661,4	681,1
80%	656,1	644,8	641,6	662,9	655,2	654,0	665,2	673,3
90%	663,9	639,6	649,6	663,4	666,9	658,9	679,6	669,0
100%	676,3	640,4	663,3	670,8	683,9	665,4	689,9	670,9
110%	689,8	647,2	676,1	676,3	686,9	674,5	694,4	676,9
120%	705,9	657,0	697,6	679,9	708,7	679,5	716,0	688,5
125%	711,3	667,3	701,4	690,7	717,0	688,4	724,9	696,3

4.6 Considerações finais

O desequilíbrio de tensão é claramente visível a partir das correntes, com o grau de desequilíbrio multiplicado. As Figuras 4.11 até 4.14 e

Figura 4.31 até 4.34 mostram as correntes do estator dos motores sob várias condições de desequilíbrio de tensão. O impacto deve ser avaliado em termos da "sobrecarga monofásica" produzida em uma das fases, resultando em aumento de perdas e temperaturas, redução do tempo entre manutenções, diminuição da vida útil ou até mesmo queima do motor em condições de sobrecarga real, como observado em cargas acima de 100%. O SCIM de alta eficiência apresenta valores de corrente ligeiramente menores quando comparado ao LSPMM.

A potência demandada pelos motores elétricos terá um efeito direto em seu consumo, uma vez que o desequilíbrio de tensão cria correntes e potências desequilibradas por fase. A potência total também variará com a presença do desequilíbrio de tensão, conforme

demonstrado nas Figuras 4.19 até 4.22 e de 4.39 até 4.42 para os motores premium e super premium. Geralmente, um impacto maior do desequilíbrio é observado no motor de ímã permanente super premium, principalmente para cargas abaixo das nominais; assim, espera-se que essa tecnologia tenha um consumo maior na presença de desequilíbrio quando comparada ao motor de indução de gaiola de esquilo premium.

As diferenças tecnológicas podem ser observadas a partir da resposta no consumo de potência reativa, onde o motor premium exibe um padrão de valores crescentes à medida que a carga aumenta, diferente do motor de ímã permanente super premium, que apresenta altas demandas reativas em vazio, que diminuem à medida que a carga nominal é atingida e, em seguida, voltam a subir, como mostrado nas Figuras 4.43 até 4.46. Embora o consumo de potência reativa seja significativo em baixas cargas, isso não se reflete no fator de potência do motor super premium, onde valores semelhantes aos de seu predecessor são observados para as diferentes cargas, como visto nas Figuras 4.47 até 4.50, embora com maiores flutuações e mais desequilíbrios, resultando em fatores de potência mais baixos.

Ímãs permanentes têm um efeito significativo na forma de onda de um motor elétrico, levando ao aumento do conteúdo harmônico.

A taxa de distorção harmônica total da corrente varia dependendo da variação de carga e da presença de desequilíbrio de tensão.

Espera-se que os motores de ímã permanente super premium tenham um consumo maior na presença de desequilíbrio de tensão em comparação com os motores de indução de gaiola de esquilo premium.

O consumo de potência reativa dos motores super premium é significativamente alto em baixas cargas, mas não parece afetar o fator de potência.

Mais de 40% dos motores operam com cargas abaixo de 40%. Portanto, a avaliação de diferentes distúrbios em motores elétricos sob diversas condições de carga é importante para os usuários finais. As principais conclusões serão apresentadas no próximo capítulo.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma análise detalhada do desempenho de motores de indução premium (IR3) e super premium (IR4) quando submetidos a condições de tensões desequilibradas, um fenômeno recorrente em sistemas elétricos industriais. O estudo demonstrou que o desequilíbrio de tensão impacta significativamente diversas variáveis operacionais dos motores, como a corrente elétrica, potência ativa, potência reativa e o fator de potência. Esses efeitos não apenas comprometem a eficiência energética, mas também reduzem a vida útil dos motores e elevam os custos relacionados à manutenção e operação.

Os resultados obtidos evidenciaram que os motores IR3 apresentam maior estabilidade diante de tensões desequilibradas, especialmente em situações de carga inferior à nominal. Em contrapartida, os motores IR4, embora sejam mais eficientes em condições ideais, mostraram-se mais suscetíveis a distorções harmônicas e ao aumento do consumo de potência reativa em cargas leves. Essa diferença de comportamento é atribuída às características construtivas de cada tipo de motor, como o uso de ímãs permanentes nos motores IR4. Embora esses componentes contribuam para uma maior eficiência energética, eles também tornam os motores mais sensíveis às variações de tensão. Assim, a escolha do tipo de motor deve levar em conta não apenas os ganhos em eficiência energética, mas também as condições de fornecimento de energia e o perfil de carga da aplicação.

Outro ponto relevante abordado na análise foi o impacto do desequilíbrio de tensão na geração de sobrecargas localizadas em uma ou mais fases do motor. Esse fenômeno resulta no aumento das perdas internas e na elevação da temperatura operacional, o que pode comprometer seriamente a integridade do equipamento. Esse efeito é particularmente crítico nos motores super premium, que, devido à sua maior complexidade estrutural, podem sofrer degradação acelerada em ambientes com tensões instáveis.

Além disso, foi observado que o consumo de potência reativa nos motores IR4 é significativamente elevado em baixas cargas, embora isso não afete diretamente o fator de potência, que se mantém em níveis similares aos dos motores IR3. No entanto, os motores IR4 apresentam maiores flutuações e desequilíbrios, resultando em fatores de potência ligeiramente inferiores.

O estudo também destacou a influência dos ímãs permanentes na forma de onda dos motores elétricos, o que contribui para o aumento do conteúdo harmônico. A taxa de distorção harmônica total da corrente mostrou-se dependente tanto da variação de carga quanto da presença de desequilíbrios de tensão, sendo mais pronunciada nos motores super premium.

Espera-se, portanto, que esses motores apresentem um consumo maior em condições de tensões desequilibradas, quando comparados aos motores de indução premium.

Considerando que mais de 40% dos motores operam com cargas abaixo de 40%, torna-se essencial avaliar os diferentes distúrbios que afetam os motores elétricos sob diversas condições de carga. Essa avaliação é especialmente importante para os usuários finais, que buscam maximizar a eficiência e a confiabilidade dos equipamentos.

Por fim, a pesquisa reforça a necessidade de adotar estratégias de mitigação, como o balanceamento de cargas e o uso de reguladores de tensão, para reduzir os impactos adversos do desequilíbrio de tensão. Essas medidas são fundamentais para garantir a operação eficiente, segura e duradoura dos motores, especialmente em aplicações industriais onde a estabilidade do sistema elétrico é um fator crítico.

Em estudos futuros, poderão ser investigadas as elevações de temperatura nos motores de ímãs permanentes e nos motores de indução convencionais, considerando diferentes níveis de carga e condições de desequilíbrio de tensão. Além disso, análises mais detalhadas podem ser realizadas, decompondo os harmônicos gerados durante a operação sob as mesmas condições abordadas neste trabalho. Outra possibilidade é a comparação entre os motores em situações de tensão contaminada por harmônicos, abrangendo diversas grandezas elétricas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-ELHAIJA, Wejdan; MUETZE, Annette. A voltage unbalance factor coding technique for three-phase induction motors. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. e2554, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etep.2554>. Acesso em: 15 nov. 2019.

ABUSAADA, Hisham; ELSHATER, Abeer. Notes on Developing Research Review in Urban Planning and Urban Design Based on PRISMA Statement. **Social Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 391, 2022.

ADEKITAN, Aderibigbe Israel. A New Definition of Voltage Unbalance Using Supply Phase Shift. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 718–725, 2020.

ADOUNI, Amel; J. MARQUES CARDOSO, Antonio. Thermal Analysis of Low-Power Three-Phase Induction Motors Operating under Voltage Unbalance and Inter-Turn Short Circuit Faults. **Machines**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 2, 2021.

AGUIAR, Victor P. B.; PONTES, Ricardo S. T.; FERREIRA, Fernando J. T. E. Technical and Economic Evaluation of Efficiency Improvement after Rewinding in Low-Power Induction Motors: A Brazilian Case. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 1701, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1701>. Acesso em: 27 maio 2020.

AL-BADRI, Maher; PILLAY, Pragasen; ANGERS, Pierre. A Novel In Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-Phase Induction Motors Operating With Distorted Unbalanced Voltages. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 53, n. 6, p. 5338–5347, 2017.

AL-BADRI, Maher; PILLAY, Pragasen; ANGERS, Pierre. A Novel Technique for In Situ Efficiency Estimation of Three-Phase IM Operating With Unbalanced Voltages. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 2843–2855, 2016.

ALMEIDA, Maria Leonor Silva de. Avaliação da temperatura do motor de indução trifásico submetido a desequilíbrio de tensão. [s. l.], 2013. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/937115>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ALMEIDA, A. T. de; FERREIRA, F. J. T. E.; BAOMING, G. Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 2103–2114, 2014.

ALMEIDA, A. T. de; FERREIRA, F. J. T. E.; FONG, J. A. C. Standards for Super-Premium Efficiency class for electric motors. *In: , 2009. Conference Record 2009 IEEE Industrial Commercial Power Systems Technical Conference*. [S. l.: s. n.], 2009. p. 1–8.

ALMEIDA, A. T. De; FERREIRA, F. J. T. E.; QUINTINO, A. Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors. *In: , 2012. 48th IEEE Industrial Commercial Power Systems Conference*. [S. l.: s. n.], 2012. p. 1–13.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS AND EQUIPMENT— VOLTAGE RATINGS (60 HERTZ). [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/ansi-c84-1-2020-contents-and-scope8cb6b1da-0402-4cde-a8ad-83177d02ae0f.pdf?sfvrsn=cb66d1e6_3. Acesso em: 28 abr. 2025.

ANEEL. **Aneel aprova chamada de projeto de incentivo à eficiência energética.** [S. l.], 2015. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/aneel-aprova-chamada-de-projeto-de-incentivo-a-eficiencia-energetica?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fantigo.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Ftodas-as-noticias%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1%26_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_cur%3D61%26_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_keywords%3D%26_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_advancedSearch%3Dfalse%26_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_delta%3D30%26p_r_p_564233524_resetCur%3Dfalse%26_101_INSTANCE_pdAS9IcdBICN_andOperator%3Dtrue. Acesso em: 27 abr. 2025.

ANSI/NEMA MG 1-2016 (REVISION 1, 2018). [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/mg-1-part-0-watermark.pdf?sfvrsn=e52f62df_1. Acesso em: 31 maio 2025.

ASOGWA, J. C.; OBE, E. S. Investigation of the transient and steady state operations of two Line Start Permanent Magnet Motors (LSPMMS) with different rotor configurations. **Nigerian Journal of Technology**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 185–192, 2019.

BONNETT, A.H. The impact that voltage and frequency variations have on AC induction motor performance and life in accordance with NEMA MG-1 standards. *In:* , 1999, Seattle, WA, USA. **Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.99CH36338)**. Seattle, WA, USA: IEEE, 1999. p. 16–26. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/779341/>. Acesso em: 1 fev. 2020.

CHAMA, Abdoukadri; SORGDRAGER, Albert; WANG, Rong-Jie. Analytical synchronization analysis of line-start permanent magnet synchronous motors. **Progress In Electromagnetics Research M**, [s. l.], v. 48, p. 183–193, 2016.

CHAPMAN, Stephen. **Electric Machinery Fundamentals**. [S. l.]: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2005.

CIGRE. **Power quality indices and objectives**. [S. l.], 2004. Disponível em: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/261-power-quality-indices-and-objectives.html>. Acesso em: 27 abr. 2025.

DE ALMEIDA, Anibal T. *et al.* **New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems - A major opportunity for energy and carbon savings**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v115y2019ics1364032119305921.html>. Acesso em: 27 abr. 2025.

DE ALMEIDA, Anibal T. *et al.* Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 74, p. 1275–1286, 2017.

DE ALMEIDA, Anibal T.; FERREIRA, Fernando J. T. E.; QUINTINO, André. Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors. *In:* 48TH IEEE INDUSTRIAL & COMMERCIAL POWER SYSTEMS CONFERENCE, 2012. **48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference**. [S. l.: s. n.], 2012. p. 1–13. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6229618>. Acesso em: 27 abr. 2025.

DEBRUYNE, Colin *et al.* Comparative study of the influence of harmonic voltage distortion on the efficiency of induction machines versus line start permanent magnet machines. *In:* , 2012, Hong Kong, China. **2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Hong Kong, China: IEEE, 2012. p. 342–349. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6381217/>. Acesso em: 15 ago. 2019.

DEBRUYNE, Colin *et al.* Evaluation of the Efficiency of Line-Start Permanent-Magnet Machines as a Function of the Operating Temperature. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s. l.], v. 61, n. 8, p. 4443–4454, 2014.

DEBRUYNE, Colin. **Impact of voltage distortion on energy efficiency of induction machines and line start permanent magnet machines**. 2014. dissertation - Ghent University, [s. l.], 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1854/LU-4383637>. Acesso em: 15 ago. 2019.

DEBRUYNE, Colin; VANDEVELDE, Lieven; DESMET, Jan. Harmonic effects on Induction and Line Start Permanent Magnet Machines. *In:* , 2013, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. **International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS 2013)**. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: [s. n.], 2013.

DONG-JUN, Kim *et al.* **The Study of the Stray Load Loss and Mechanical Loss of Three Phase Induction Motor considering Experimental Results -Journal of Electrical Engineering and Technology | Korea Science**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO201401671902952.page>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ED85_FASCICULO_QUALIDADE_CAP2.PDF. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed85_fasciculo_qualidade_cap2.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.

EL-KHARASHI, Eyhab *et al.* The use of the current complex factor to determine the precise output energy of the induction motor. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 154, p. 23–36, 2018.

FAIZ, J.; EBRAHIMPOUR, H.; PILLAY, P. Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 657–662, 2004.

FERREIRA, Fernando J. T. E. Optimized Rewinding of Oversized Induction Motors. *In:* 2023 IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC), 2023. **2023 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–7. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10238885>. Acesso em: 27 abr. 2025.

FERREIRA, F. J. T. E. *et al.* Overview of Retrofitting Options in Induction Motors to Improve Their Efficiency and Reliability. *In:* , 2018. **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 1–12.

FERREIRA, Fernando J. T. E.; ALBERTO, José; DE ALMEIDA, Aníbal T. Voltage Unbalance Impact on Coil-Side Temperature Rise in a Delta-Connected, Dual-Winding Induction Motor. *In:* , 2020. **2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**. [S. l.: s. n.], 2020. p. 925–930.

FERREIRA, F. J. T. E.; BAOMING, G.; ALMEIDA, A. T. de. Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 52, n. 6, p. 4628–4637, 2016.

FERREIRA, Fernando; CISTELECAN, M.V.; DE ALMEIDA, Aníbal. Voltage Unbalance Impact on the Performance of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors. *In:* , 2009, Nantes, France. **Anais [...]**. Nantes, France: [s. n.], 2009.

FERREIRA, Fernando J.T.E.; DE ALMEIDA, Aníbal T. Induction motor downsizing as a low-cost strategy to save energy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 24, p. 117–131, 2012.

FERREIRA, F. J. T. E.; LEPRETTRE, B.; ALMEIDA, A. T. de. Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 3603–3610, 2016.

FITZGERALD, A. E.; UMANS, Stephen D. **Máquinas Eléctricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed.** [S. l.]: AMGH Editora, 2014.

FUCHSLOCH, Juergen F.; FINLEY, William R.; WALTER, Reinhard W. **The Next Generation Motor**. [S. l.], 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4432943>. Acesso em: 28 abr. 2025.

GNACIŃSKI, Piotr. Gnacinski P. Thermal loss of life and load-carrying capacity of marine induction motors. *Energy Conversion and Management*, vol. 78: 574-583, Febr. 2014. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 78, p. 574–583, 2014.

GONEN, Turan; MEHRIZI-SANI, Ali. **Electrical Machines and Their Applications**. [S. l.]: CRC Press, 2024.

GONZALEZ-CORDOBA, Jose L. *et al.* Thermal-Impact-Based Protection of Induction Motors Under Voltage Unbalance Conditions. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 1748–1756, 2018.

GUIA DE ESPECIFICAÇÃO MOTORES ELÉTRICOS. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

GWOŹDZIEWICZ, Maciej; ANTAL, Ludwik. **INVESTIGATION OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR AND INDUCTION MOTOR PROPERTIES**, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechniki Wrocławskiej*. [S. l.]: Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechniki Wrocławskiej., 2010. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/e9ce/18be7c97cf70342b3135d9cd8364e14538bb.pdf>.

HASSANPOUR ISFAHANI, Arash; VAEZ-ZADEH, Sadegh. Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. **Energy**, [s. l.], v. 34, n. 11, p. 1755–1763, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209001303>. Acesso em: 21 ago. 2019.

HITACHI, i. **Development of Motor with Amorphous Metal : Research & Development : Hitachi**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.hitachi.com/rd/sc/story/amorphous/index.html>. Acesso em: 28 abr. 2025.

IEA. Energy Efficiency 2018. *In: 4E ENERGY EFFICIENT END-USE EQUIPMENT*. 2018a. Disponível em: <https://www.iea-4e.org/publications/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

IEA. IE4 motors are required in the EU. *In: 4E ENERGY EFFICIENT END-USE EQUIPMENT*. 2023. Disponível em: <https://www.iea-4e.org/ems/news/ie4-motors-are-required-in-the-eu/>. Acesso em: 18 maio 2025.

IEA. Market Report Series: Energy Efficiency 2018 - Analysis and outlooks to 2040. [s. l.], 2018b.

IEC. **IEC 60034-7:2020**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64225>. Acesso em: 27 abr. 2025.

IEC. **IEC 60034-30-1:2014**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/136>. Acesso em: 27 abr. 2025.

IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY. **IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)**, [s. l.], p. 1–98, 2019.

ISFAHANI, Arash Hassanpour; VAEZ-ZADEH, Sadegh. Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. **Energy**, [s. l.], v. 34, n. 11, p. 1755–1763, 2009.

JASZCZOLT, Christopher. **Understanding permanent magnet motors**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.controleng.com/understanding-permanent-magnet-motors/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

JONATHAN, Muñoz T. *et al.* Fifth & Seventh Harmonic Effects on the Performance of IE2, IE3 & IE4 Induction Motor Classes. *In:* , 2019a, Santiago, Chile. **Proceedings of the 13th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2019**. Santiago, Chile: [s. n.], 2019. p. 6. Disponível em: <http://www.clagtee2019.pucv.cl/2019/book.html>.

JONATHAN, Muñoz T. *et al.* Impactos do 5o Harmônico na Temperatura de Motores Elétricos Classes IE2, IE3 e IE4. *In:* , 2019b, São Paulo, Brazil. **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE)**. São Paulo, Brazil: [s. n.], 2019. p. 6. Disponível em: <http://sbqee.org.br/cbqee/>.

KAHRISANGI, Majid Ghasemi *et al.* Line-start permanent magnet synchronous motors versus induction motors: A comparative study. **Frontiers of Electrical and Electronic Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 459–466, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11460-012-0217-8>. Acesso em: 15 ago. 2019.

KALLUF, Flavio *et al.* Braking torque analysis of the single phase line-start permanent magnet synchronous motor. **The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010**, [s. l.], 2010.

KERSTING, W.H. Causes and effects of unbalanced voltages serving an induction motor. *In:* 2000 RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE. PAPERS PRESENTED AT THE 44TH ANNUAL CONFERENCE (CAT. NO.00CH37071), 2000. **2000 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 44th Annual Conference (Cat. No.00CH37071)**. [S. l.: s. n.], 2000. p. B3/1-B3/8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/848042>. Acesso em: 28 maio 2025.

KIM, Hyunwoo *et al.* Study on Line-Start Permanent Magnet Assistance Synchronous Reluctance Motor for Improving Efficiency and Power Factor. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 384, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/384>. Acesso em: 27 maio 2020.

KNYPIŃSKI, Łukasz; PAWEŁOSZEK, Karol; LE MENACH, Yvonnick. Optimization of Low-Power Line-Start PM Motor Using Gray Wolf Metaheuristic Algorithm. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1186, 2020.

KOSTIC, Miloje. Effects of Voltage Quality on Induction Motors' Efficient Energy Usage. **Induction Motors - Modelling and Control**, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/induction-motors-modelling-and-control/effects-of-voltage-quality-on-induction-motors-efficient-energy-usage>. Acesso em: 15 nov. 2019.

KUMAR, Arvind; SRIVASTAVA, Ajay. Performance Comparison of Two Different Rotor Topologies of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors. **Engineering Technology**, [s. l.], v. 5, p. 8,

LEE, Jeong-Jong *et al.* Design of high efficiency line start permanent magnet motor for submersible pumps. *In:* 2016 IEEE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING (EEEIC), 2016. **2016 IEEE 16th International Conference on**

Environment and Electrical Engineering (EEEIC). [S. l.: s. n.], 2016. p. 1–4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7555600>. Acesso em: 28 abr. 2025.

LEE, Ching-Yin. Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 202–208, 1999.

LEE, Ching-Yin *et al.* Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 153–163, 1998.

MAGALHÃES, Joana Filipa Ribeiro. **Guia Interativo na Seleção e Cálculo de Motores de Indução Trifásicos**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/81956d060ec767ec6cd593bb22e37a2c/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=gscholar>. Acesso em: 28 abr. 2025.

MCTI. **Portaria Interministerial MME/MCTIC/MDIC nº 1, de 29.08.2017**. [S. l.], 2017. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias_interministeriais/Portaria_Interministerial_MME_MCTIC_MDIC_n_1_de_29082017.html. Acesso em: 27 abr. 2025.

MELFI, Michael J. *et al.* Permanent Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications. *In: 2006 RECORD OF CONFERENCE PAPERS - IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY 53RD ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE, 2006*. **2006 Record of Conference Papers - IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**. [S. l.: s. n.], 2006. p. 1–8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4199055>. Acesso em: 28 abr. 2025.

MENDES, Nuno *et al.* ANN for Motor Loading Diagnosis under Voltage Variation Conditions. *In: 2023 IEEE KANSAS POWER AND ENERGY CONFERENCE (KPEC), 2023*. **2023 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)**. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10215414>. Acesso em: 28 maio 2025.

MEPS GUIDE 2009. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2009/01/meps_guide_feb2009.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

MILLER, T. J. E. Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet AC Motors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [s. l.], v. PAS-103, n. 7, p. 1822–1828, 1984.

MINGJI LIU *et al.* Optimization of permanent magnet motor air-gap flux density based on the non-uniform air gap. *In: , 2013*. **Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)**. [S. l.: s. n.], 2013. p. 3422–3426.

MME. **Plano Nacional Eficiência Energética**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica/documentos>. Acesso em: 27 maio 2025.

NBR. **NBR 17094 1 de 04.2018 - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1 Motores de Indução Trifásicos - Requisitos**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/745227236/NBR-17094-1-de-04-2018-Maquinas-Eletricas-Girantes-Parte-1-Motores-de-Inducao-Trifasicos-Requisitos>. Acesso em: 19 maio 2025.

NEMA MG1-2016. **Motors and Generators**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.nema.org/Standards/Pages/Motors-and-Generators.aspx>. Acesso em: 15 ago. 2019.

NETO, Caroline Soares Rodrigues. **Motores de indução trifásicos para operações industriais**. [S. l.], 2023. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/37622273_Motores_de_inducao_trifasicos_para_operacoes_industriais. Acesso em: 20 maio 2025.

NEVES, Ana Bárbara Fernandes *et al.* Effects of voltage unbalance and harmonic distortion on the torque and efficiency of a Three-Phase Induction Motor. *In:* , 2016. **2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 943–948.

OLCOTT, Rick; LAWRENCE, Jeff; MOLLER, John. **Mineral Producer Installing 150 Copper-Rotor Motors Rising Energy Costs Drive Upgrades, Rapid Payback Expected**. [S. l.], 2017. Disponível em: https://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/case-studies/nyc_a6118.html. Acesso em: 28 abr. 2025.

OLIVEIRA, José Eduardo Alves de [UNESP. Modelagem de um motor de indução trifásico operando com tensões desequilibradas por meio de redes neurais artificiais. [s. l.], 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87193>. Acesso em: 28 abr. 2025.

PARASILITI, Francesco; BERTOLDI, Paolo. **Energy Efficiency in Motor Driven Systems**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

PETER, Ioan; SCUTARU, Gheorghe; NISTOR, Ciprian Gheorghe. Manufacturing of asynchronous motors with squirrel cage rotor, included in the premium efficiency category IE3, at S.C. Electroprecizia Electrical-Motors S.R.L. Săcele. *In: 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (OPTIM)*, 2014. **2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 421–425. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6850971>. Acesso em: 28 abr. 2025.

PINHEIRO, Vinícius Marcos; OLIVEIRA, Cássio Alves de; GOMES, Luciano Coutinho. Contribuição à análise do gerador de indução trifásico com rotor bobinado: estudos experimentais e teóricos em condições normais de operação e diante de desequilíbrios de tensão. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 16, p. e93101623490–e93101623490, 2021.

PINTO, Marcos Garcia da Silva. Uma contribuição para o estudo do desequilíbrio de tensão nos sistemas elétricos de potência. [s. l.], 2006. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/1616>. Acesso em: 28 abr. 2025.

POWER QUALITY INDICES AND OBJECTIVES. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://ecigre.org/publication/261-power-quality-indices-and-objectives>. Acesso em: 4 abr. 2020.

PREMIUM EFFICIENCY MOTOR SELECTION AND APPLICATION GUIDE. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf. Acesso em: 27 abr. 2025.

QUISPE, Enrique. **Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico. Énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal**. 2012. [s. l.], 2012.

QUISPE, Enrique C. **Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico. Énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal**. [S. l.], 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286095681_Efectos_del_desequilibrio_de_tensiones_sobre_la_operacion_del_motor_de_induccion_trifasico_Enfasis_en_la_caracterizacion_del_desequilibrio_de_tensiones_y_el_efecto_sobre_la_potencia_nominal. Acesso em: 27 abr. 2025.

REFOUFI, L.; BENTARZI, H.; DEKHANDJI, F. Z. Voltage unbalance effects on induction motor performance. *In:* , 2006. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Voltage-unbalance-effects-on-induction-motor-Refoufi-Bentarzi/62ccc38586eb3b07bb62f7247a2bf9378949df67>. Acesso em: 28 abr. 2025.

REGULAMENTO N° 640 2009 - CONCEPÇÃO ECOLÓGICA DOS MOTORES ELECTRICOS. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/661273344/Regulamento-n%C2%BA-640-2009-Concecao-ecologica-dos-motores-electricos>. Acesso em: 19 maio 2025.

REZAZADEH MEHRJOU, Mohammad *et al.* Broken Rotor Bar Detection in LS-PMSM Based on Startup Current Analysis Using Wavelet Entropy Features. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. 845, 2017.

SAHDEV, S. K. **Electrical Machines**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2017.

SARANI, Esmail; VAEZ-ZADEH, Sadegh. Design Procedure and Optimal Guidelines for Overall Enhancement of Steady-State and Transient Performances of Line Start Permanent Magnet Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 885–894, 2017.

SIDDIQUE, A.; YADAVA, G.S.; SINGH, B. Effects of voltage unbalance on induction motors. *In: CONFERENCE RECORD OF THE 2004 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. [S. l.: s. n.], 2004. p. 26–29. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1380430>. Acesso em: 28 abr. 2025.

SINGH, Shashi Bhushan; SINGH, Asheesh Kumar. Precise Assessment of Performance of Induction Motor under Supply Imbalance Through Impedance Unbalance Factor. **Journal of Electrical Engineering**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 31–37, 2013.

SINGH, Shashi; SINGH, Asheesh. Steady-state Performance Assessment of Induction Motor under Unbalanced Voltage Condition. **Electric Power Components and Systems**, [s. l.], v. 41, 2013.

SORGDARGER, Albert; WANG, Rong-Jie; GROBLER, A.J. Transient performance optimisation of line-start permanent magnet synchronous motors using Taguchi regression rate method. *In:* , 2017. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2017.

SOUSA SANTOS, Vladimir; VIEGO FELIPE, Percy; GÓMEZ SARDUY, Julio. Bacterial foraging algorithm application for induction motor field efficiency estimation under unbalanced voltages. **Measurement**, [s. l.], v. 46, n. 7, p. 2232–2237, 2013.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* Assessing Voltage Unbalance Conditions in IE2, IE3 and IE4 Classes Induction Motors. **IEEE Access**, [s. l.], v. 8, p. 186725–186739, 2020.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* Efficient Electric Motors Performance Under Voltage Variation Conditions. *In: 2023 IEEE KANSAS POWER AND ENERGY CONFERENCE (KPEC), 2023a. 2023 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10215475>. Acesso em: 28 maio 2025.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* Electric Motor Degradation Indicator in Non-Ideal Supply Conditions. *In: 2023 IEEE WORKSHOP ON POWER ELECTRONICS AND POWER QUALITY APPLICATIONS (PEPQA), 2023b. 2023 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10325777>. Acesso em: 27 abr. 2025.

TABORA, Jonathan Muñoz. Experimental evaluation, diagnosis, and prediction of the impacts of power quality disturbances in IE2, IE3, and IE4 class efficiency motors. **Disponível na internet via**

correio eletrônico: bibliotecaitec@ufpa.br, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16610>. Acesso em: 28 abr. 2025.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* Induction Motors Assessment: A Substitution Case Analysis. *In: 2021 14TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON)*, 2021a. **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 783–789. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9529738>. Acesso em: 28 abr. 2025.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* **Virtual Modeling and Experimental Validation of the Line-Start Permanent Magnet Motor in the Presence of Harmonics**. [S. l.], 2022a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8603>. Acesso em: 27 abr. 2025.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* Voltage Unbalance & Variations Impacts on IE4 Class LSPMM. *In: 2021 14TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON)*, 2021b. **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 940–946. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9529505>. Acesso em: 27 abr. 2025.

TABORA, Jonathan M. *et al.* Voltage Unbalance Effect on the Behavior of IE2, IE3 And IE4 Induction Motor Classes. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2345. Acesso em: 28 maio 2025.

TABORA, Jonathan Muñoz *et al.* Voltage Variations Impacts on Electrical Motors: A Central America Study Case. *In: (PDF) VOLTAGE VARIATIONS IMPACTS ON ELECTRICAL MOTORS*, 2022b. **ResearchGate**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360858183_Voltage_Variations_Impacts_on_Electrical_Motors_A_Central_America_Study_Case. Acesso em: 27 abr. 2025.

TAKAHASHI, A. *et al.* Asynchronous Torque of Line-Starting Permanent-Magnet Synchronous Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 498–506, 2015.

TARIMER, İlhan. Investigation of the Effects of Rotor Pole Geometry and Permanent. **Elektronika ir Elektrotechnika**, [s. l.], v. 90, n. 2, p. 67–72, 2009. Disponível em: <http://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/10512>. Acesso em: 22 ago. 2019.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. **Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide – A Handbook for Industry**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/premium-efficiency-motor-selection-and-application-guide-handbook-industry>. Acesso em: 15 ago. 2019.

USO EFICIENTE DA ENERGIA. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7c/h92/WEG-gestao-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 31 maio 2025.

VAVRA, Chris. **Understanding permanent magnet motors**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/>. Acesso em: 17 maio 2020.

VERA, Elistratova. Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency. Electric power. Ecole Centrale de Lille, 2015. English. NNT: 2015ECLI0022. tel-01308575. *In:* , 2015. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2015.

VON JOUANNE, A.; BANERJEE, B. Assessment of voltage unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 782–790, 2001.

WANG, Yaw-Juen. Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 270–275, 2001.

WEG, See Plus. **See Plus**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/seeplus/calculator>. Acesso em: 27 abr. 2025.

WERLE, Rita; BRUNNER, Conrad U; TIEBEN, Rolf. Swiss motor efficiency program EASY: results 2010 - 2014. [s. l.], 2015.

WOLL, R. F. Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. IA-11, n. 1, p. 38–42, 1975.

WU, Wenye *et al.* Design and Analysis of a Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Considering Magnetic Saliency and PM Usage. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 1–6, 2018.

YAW-JUEN WANG. Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 270–275, 2001.

ZAWILAK, Tomasz; ZAWILAK, Jan. MINIMIZATION OF HIGHER HARMONICS IN LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR. **Przeład Elektrotechniczny**, [s. l.], v. 84, 2008.

ZENG, Xianxian *et al.* Investigation of an Asymmetrical Rotor Hybrid Permanent Magnet Motor for Approaching Maximum Output Torque. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 1–4, 2019.

ZHANG, Dongdong; AN, Ruichi; WU, Thomas. Effect of Voltage Unbalance and Distortion on the Loss Characteristics of Three Phase Cage Induction Motor. **IET Electric Power Applications**, [s. l.], v. 12, 2017.