



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Luiza de Souza Machado

**PROPOSTA DE UM FRAMEWORK PARA TOMADA DE DECISÃO EM
PROCESSOS DE EMPACOTAMENTO DE ESTADORES DE MOTORES
ELÉTRICOS**

Florianópolis
2024

Luiza de Souza Machado

**PROPOSTA DE UM FRAMEWORK PARA TOMADA DE DECISÃO EM
PROCESSOS DE EMPACOTAMENTO DE ESTADORES DE MOTORES
ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.
Eng.

Luiza de Souza Machado

**PROPOSTA DE UM FRAMEWORK PARA TOMADA DE DECISÃO EM
PROCESSOS DE EMPACOTAMENTO DE ESTADORES DE MOTORES
ELÉTRICOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharela e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2024.

Banca examinadora



Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng.
Orientador - UFSC



Prof. Steffan Macali Werner, Dr. Eng.
UFSC



Prof. Danilo Ribamar Sá Ribeiro, Dr. Eng.
UTFPR

Florianópolis, 2024

Ficha catalográfica

Machado, Luiza de Souza

Proposta de um framework para tomada de decisão em processos de empacotamento de estatores de motores elétricos / Luiza de Souza Machado ; orientador, Fernando Antônio Forcellini, 2024.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Motores elétricos. 3. Empacotamento de estatores. 4. Comparativo de processos. 5. Framework de tomada de decisão. I. Forcellini, Fernando Antônio. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Este trabalho é dedicado a Silvia e Antonio, às suas lembranças agora em nossos corações, lugar onde a saudade não nos deixará esquecer.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à cooperação de várias pessoas que, de diferentes maneiras, contribuíram para essa produção científica.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Carlos e Silvana, que foram meu principal apoio e incentivo nos estudos. Agradeço imensamente pelo sacrifício que vocês tiveram que fazer para que eu chegasse até aqui. Sempre acreditaram em mim e nunca saíram do meu lado apesar da distância.

À minha irmã arquiteta, Geovana, que foi meu exemplo a seguir nos estudos e de determinação. Agradeço pelas nossas conversas sobre a vida, carreira e sonhos.

À UFSC e aos meus professores, agradeço pela estrutura educacional, pelo conhecimento compartilhado e pelas oportunidades valiosas que me foram proporcionadas ao longo desses anos. Cada aula, cada desafio e cada experiência contribuíram significativamente para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Ao meu orientador, Prof. Forcellini, que conduziu várias, longas e frutíferas conversas, transmitindo o conhecimento necessário para planejar, conduzir e analisar os estudos de maneira correta e inteligente, por auxiliar na elaboração do estudo, na formulação do resultado e na correção desta dissertação.

Aos meus colegas de curso e meus exemplos, Gustavo e Luiza, pelas trocas, ajudas e desabafos durante a graduação e à nossa amizade. Vocês tornaram esses anos muito mais agradáveis.

Ao meu parceiro de vida, Félix, por sempre incentivar meus sonhos e estar do meu lado, independentemente do continente em que estivermos.

A todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização desta dissertação.

RESUMO

A eficiência energética de motores elétricos é um tema crucial em um contexto industrial cada vez mais competitivo e sustentável. Este trabalho aborda a influência dos processos de empacotamento de estatores na eficiência desses motores, destacando os desafios enfrentados pelas empresas para tomar decisões fundamentadas em relação aos processos mais adequados. Foi desenvolvido um *framework* para auxiliar a tomada de decisão em projetos de melhoria ou desenvolvimento, centralizando informações técnicas, operacionais e econômicas relacionadas aos processos de empacotamento, como processos de auto empacotamento, colagem, grampeamento, soldagem e rebitagem. O estudo avaliou as características, vantagens e desvantagens de cada processo, relacionando-as com parâmetros de escolha, como tamanho do motor, perdas elétricas, produtividade e investimento necessário. A aplicação prática do *framework* foi simulada em um cenário industrial fictício, demonstrando como a ferramenta pode facilitar a seleção do método mais apropriado, considerando as prioridades e restrições de cada contexto. Os resultados apontaram que o *framework* contribuiu significativamente para reduzir a subjetividade na tomada de decisão, promovendo escolhas mais eficientes e alinhadas às demandas do mercado. Este trabalho fornece uma abordagem simples e inovadora para a análise de processos de empacotamento de estatores, oferecendo uma base estruturada para estudos futuros e aplicações práticas na indústria de motores elétricos.

Palavras-chave: Empacotamento, Estatores, Eficiência Energética, *Framework*, Tomada de Decisão.

ABSTRACT

The energy efficiency of electric motors is a crucial topic in an increasingly competitive and sustainable industrial context. This work addresses the influence of stator packing processes on the efficiency of these motors, highlighting the challenges faced by companies in making informed decisions about the most suitable processes. A framework was developed to assist decision-making in improvement or development projects, centralizing technical, operational, and economic information related to packing processes, such as self-packing, bonding, stapling, welding, and riveting. The study evaluated the characteristics, advantages, and disadvantages of each process, relating them to selection parameters such as motor size, electrical losses, productivity, and required investment. The practical application of the framework was simulated in a fictitious industrial scenario, demonstrating how the tool can facilitate the selection of the most appropriate method, considering the priorities and constraints of each context. The results indicated that the framework significantly contributes to reducing subjectivity in decision-making, promoting more efficient choices aligned with market demands. This work provides a simple and innovative approach to the analysis of stator packing processes, offering a structured foundation for future studies and practical applications in the electric motor industry.

Keywords: Packing, Stators, Energy Efficiency, Framework, Decision-Making.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do motor elétrico de indução.....	19
Figura 2 - Desenho do a) estator bobinado e b) inserido na carcaça.....	19
Figura 3 - Contribuição de cada grupo para as perdas totais e os respectivos locais onde elas ocorrem (escala relativa).....	20
Figura 4 - Esquema de orientação do campo magnético (B(t)) e corrente (ie) no material laminado.....	21
Figura 5 - Exemplo de lâminas auto empacotadas.....	23
Figura 6 - Princípio de funcionamento do auto empacotamento.....	24
Figura 7 - Esquema do processo de colagem de lâminas de estatores.....	25
Figura 8 - a) Vista superior de um estator grampeado e b) indicação dos grampos (em vermelho) e das caudas de andorinha (em azul).....	26
Figura 9 - Esquema do processo de soldagem a laser.....	28
Figura 10 - Profundidade de penetração em vários processos de soldagem.....	29
Figura 11 - Aspectos visuais dos cordões de solda a) a laser; b) MIG e c) TIG.....	30
Figura 12 - Perfil transversal do cordão de solda ultrapassando o diâmetro externo do pacote... 31	
Figura 13 - Estatores bobinados soldados com MIG e lixados com disco flap.....	32
Figura 14 - Cordão de solda MIG com a adição de material não homogênea.....	32
Figura 15 - Pacote de estator rebitado.....	33
Figura 16 - Etapas do método desenvolvido, DSMMA.....	34
Figura 17 - Proposta de <i>framework</i> do autor.....	35
Figura 18 - Sequência da definição de peso dos critérios.....	35
Figura 19 - <i>Framework</i> proposto.....	39
Figura 20 - <i>Framework</i> contendo as entradas e saídas para execução de cada atividade.....	39
Figura 21 - Exemplo de definição de prioridade de critérios.....	45
Figura 22 - Interesses dos clientes internos e externos.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Framework</i> proposto pelos autores.....	36
Tabela 2 - Compilação de pesquisas julgadas pelos autores como notáveis na união de laminados de aço elétrico.....	36
Tabela 3 - Resumo das principais características de cada processo.....	40
Tabela 4 - Sugestão de parâmetros de escolha de processos.....	42
Tabela 5 - Valores qualitativos dos parâmetros de escolha.....	43
Tabela 6 - Exemplo de personalização de critérios.....	44
Tabela 7 - Relação de critérios de projeto e parâmetros de escolha.....	46
Tabela 8 - Tabela geral do <i>framework</i>	47
Tabela 9 - Exemplo de tabela geral do <i>framework</i> preenchida.....	48
Tabela 10 - Critérios de projeto e pesos.....	54
Tabela 11 - Priorização de critérios de projeto e parâmetros de escolha.....	55
Tabela 12 - Tabela geral do <i>framework</i> preenchida.....	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS	<i>American Welding Society</i>
DSMMA	<i>Decision Support Method for Multiple Alternatives</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 MOTORES DE INDUÇÃO.....	18
2.2 PERDAS NO MOTOR.....	20
2.3 PROCESSOS DE EMPACOTAMENTO DE ESTADORES.....	22
2.3.1 Auto Empacotamento.....	23
2.3.2 Colagem.....	24
2.3.3 Grampeamento.....	26
2.3.4 Soldagem.....	27
2.3.4.1 Soldagem à laser.....	27
2.3.4.2 Soldagem TIG.....	29
2.3.4.3 Soldagem MIG.....	30
2.3.5 Rebitagem.....	33
2.4 FRAMEWORK.....	34
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	38
3. PROPOSTA DE FRAMEWORK.....	39
3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	39
3.1.1 Etapa 1 – Identificação dos Dados.....	40
3.1.2 Etapa 2 – Parâmetros de escolha.....	41
3.1.3 Etapa 3 – Critérios de Projeto.....	44
3.1.4 Etapa 4 – Priorização dos Critérios.....	45
3.1.5 Etapa 5 – Escolha do Processo.....	46
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	49
4. APLICAÇÃO DO FRAMEWORK.....	50
4.1 CASE TEST.....	50
4.1.1 Perfil da empresa e contexto.....	50
4.1.2 Primeira etapa.....	51
4.1.3 Segunda etapa.....	52
4.1.4 Terceira etapa.....	53
4.1.5 Quarta etapa.....	54
4.1.6 Quinta etapa.....	55

5. CONCLUSÃO.....	59
5.1 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO.....	59
5.2 LIMITAÇÕES.....	60
5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
6. REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço contínuo da tecnologia e a crescente demanda por soluções mais eficientes e sustentáveis, os motores elétricos tornaram-se centrais para atender às necessidades industriais e ambientais. Esses equipamentos, essenciais em inúmeros setores, estão no cerne de debates sobre eficiência energética, custos operacionais e impacto ambiental (Makhetha et al., 2019). Em resposta a regulamentações mais rigorosas e a exigências do mercado, fabricantes têm investido no desenvolvimento de motores de alto desempenho, o que inclui aprimoramentos no design de componentes, uso de materiais avançados e otimização dos processos de manufatura (Khan et al., 2024).

Entre os componentes do motor de indução, o estator se destaca como elemento chave no desempenho energético, dado que é o principal responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica por meio do campo magnético (Cezário et al., 2005). Apesar da sua relevância, os processos de empacotamento das lâminas que compõem o estator permanecem desafiadores. A escolha de processos como auto empacotamento, colagem, grampeamento, soldagem ou rebitagem tem implicações significativas tanto na eficiência do motor quanto no custo de produção. Esses processos influenciam diretamente a geometria das lâminas, os requisitos das ferramentas de corte e a qualidade do empacotamento, sendo decisivos para minimizar perdas elétricas e garantir a robustez estrutural.

No entanto, a escolha do processo ideal não é trivial. Fatores como o porte da empresa, os investimentos necessários e as características do motor a ser produzido tornam a decisão complexa e multifacetada. Processos mais avançados, como a soldagem a laser, demandam altos investimentos iniciais, enquanto processos mais tradicionais podem limitar a eficiência energética ou a produtividade. Além disso, a tomada de decisão em muitas empresas é frequentemente baseada em experiências prévias ou em suposições, devido à falta de ferramentas analíticas que sistematizem e centralizem as informações necessárias.

Nesse contexto, este trabalho propõe um *framework* estruturado para apoiar a tomada de decisão na escolha de processos de empacotamento de estatores. Tal ferramenta busca integrar critérios técnicos, econômicos e operacionais, facilitando a seleção do método mais adequado às necessidades e limitações específicas de cada empresa.

1.1 JUSTIFICATIVA

A eficiência energética é um dos pilares fundamentais para a competitividade e sustentabilidade na indústria contemporânea. Motores elétricos, responsáveis por aproximadamente 65% do consumo de energia elétrica no setor industrial global, desempenham um papel central nesse cenário (Khan et al., 2024). No Brasil, onde o setor industrial representa cerca de 40% do consumo total de energia elétrica, otimizar a eficiência desses motores é não apenas uma prioridade econômica, mas também uma resposta estratégica às crescentes demandas por sustentabilidade e conformidade regulatória.

Apesar de avanços significativos na tecnologia de motores elétricos, a etapa de empacotamento das lâminas do estator continua sendo um desafio técnico e econômico. Esse processo impacta diretamente tanto a eficiência do motor quanto os custos associados à sua produção. Processos de empacotamento inadequados podem agravar perdas elétricas, aumentar os custos operacionais devido ao consumo energético elevado e comprometer a durabilidade do equipamento. No contexto da indústria brasileira, onde a pressão por competitividade internacional é alta e os recursos para inovação muitas vezes são limitados, a escolha acertada de processos de empacotamento se torna ainda mais crítica.

Além disso, a ausência de ferramentas estruturadas para análise comparativa dos processos de empacotamento faz com que decisões sejam frequentemente baseadas em experiências individuais ou suposições, o que pode levar a escolhas subótimas. Essa lacuna dificulta a implementação de processos que conciliem eficiência energética, custos reduzidos e sustentabilidade ambiental, comprometendo a capacidade das empresas de atenderem às exigências de mercados cada vez mais exigentes.

Nesse contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de fornecer às indústrias uma ferramenta prática e embasada para apoiar a tomada de decisão sobre os processos de empacotamento de estatores. Ao propor um *framework* estruturado, este estudo busca não apenas centralizar informações relevantes, mas também oferecer uma abordagem que seja acessível e adaptável às características do setor industrial brasileiro, contribuindo para a melhoria contínua da eficiência energética e da competitividade das empresas nacionais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Propor um *framework* estruturado para a tomada de decisão na escolha de processos de empacotamento de estatores de motores elétricos.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar as principais características, vantagens e limitações dos processos de empacotamento existentes, como auto empacotamento, colagem, grampeamento, soldagem e rebitagem;
2. Estabelecer a relação entre os processos de empacotamento e variáveis críticas, como perdas elétricas, produtividade, custo de investimento e tamanho do motor;
3. Testar o *framework* proposto por meio de um estudo de caso simulado, avaliando sua eficácia na organização de informações e na redução da subjetividade durante a tomada de decisão.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho tem como foco o desenvolvimento e a validação de um *framework* teórico para auxiliar na tomada de decisão sobre os processos de empacotamento de estatores de motores elétricos. As limitações do estudo estão relacionadas tanto à abrangência dos dados utilizados quanto ao escopo de sua aplicação.

Primeiramente, as análises realizadas foram baseadas em informações disponíveis na literatura, complementadas por observações de campo feitas pela autora. Não foram realizados testes experimentais práticos para avaliar o desempenho dos processos de empacotamento em ambientes reais de produção. Assim, os resultados apresentados devem ser interpretados como uma fundamentação inicial para aplicações futuras, cabendo estudos adicionais para validações mais aprofundadas.

Além disso, o *framework* foi desenvolvido com foco em motores de indução e nos processos de empacotamento atualmente mais relevantes para a indústria. Sua aplicabilidade em outros tipos de motores ou em contextos distintos, como projetos voltados exclusivamente à redução de impacto ambiental, não foi explorada. Da mesma forma, o método não contempla a seleção direta entre alternativas específicas, mas sim oferece uma estrutura que auxilia na organização e análise de informações para suportar a decisão final.

Por fim, cabe ressaltar que os critérios e parâmetros sugeridos foram definidos com base em fontes secundárias e nas demandas mais comuns observadas na indústria brasileira de motores elétricos. A adaptação do *framework* a diferentes cenários pode exigir a incorporação de novos critérios, parâmetros ou ajustes específicos, que não foram contemplados no presente estudo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos.

Capítulo 1 - Introdução: Apresenta o contexto, a relevância e os objetivos do estudo, destacando as justificativas e as limitações que circunscrevem o escopo do trabalho.

Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: Reúne os conceitos teóricos e estudos prévios necessários para sustentar o *framework* proposto, abordando os motores de indução, os processos de empacotamento de estatores e os critérios relevantes para a avaliação de eficiência, custo e produtividade

Capítulo 3 - Proposta de *Framework*: Detalha o método proposto para a estruturação da tomada de decisão, apresentando as etapas e os critérios que compõem o *framework*, bem como a fundamentação que orientou sua elaboração.

Capítulo 4 - Aplicação do *Framework*: Descreve a aplicação prática do *framework* em um estudo de caso simulado, demonstrando sua funcionalidade e utilidade na escolha do processo de empacotamento mais adequado.

Capítulo 5 - Conclusão: Apresenta as principais conclusões obtidas ao longo do estudo, destacando as contribuições do trabalho, suas limitações e as recomendações para estudos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A busca por eficiência energética tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais avançadas em motores elétricos, que representam um componente essencial na indústria global e são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica. Nesse contexto, o aprimoramento dos processos de fabricação dos estatores é crítico, dada sua influência direta nas perdas elétricas e, conseqüentemente, no desempenho e custo operacional dos motores.

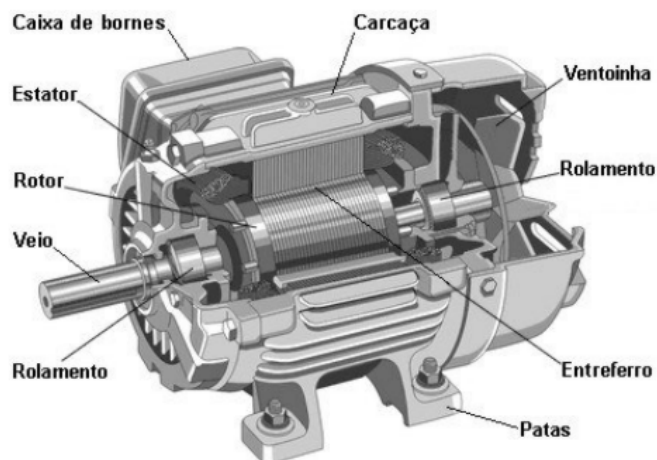
Este capítulo apresenta os conceitos teóricos e estudos prévios que fundamentam a análise e o desenvolvimento do *framework* proposto. São abordados aspectos essenciais para compreender os desafios associados à eficiência energética em motores de indução, com destaque para os processos de empacotamento de estatores. Além disso, são discutidos os critérios técnicos, operacionais e econômicos que orientam a escolha de processos, fornecendo subsídios teóricos para o desenvolvimento e a aplicação da metodologia proposta.

Com isso, o capítulo oferece uma base sólida para analisar os fatores que impactam a eficiência dos motores e os processos produtivos, reforçando a importância de ferramentas estruturadas que possam guiar decisões estratégicas em diferentes contextos industriais.

2.1 MOTORES DE INDUÇÃO

Segundo Khan et al. (2024), motores de indução trifásicos são a espinha dorsal da maioria das indústrias, pois são responsáveis por cerca de 65% do total de energia consumida nesse setor. Devido à importância desses motores, estudos de redução de perdas elétricas em seus componentes são primordiais. Os principais componentes dos motores elétricos são o par estator e rotor, eixo e carcaça, que estão exemplificados na Figura 1.

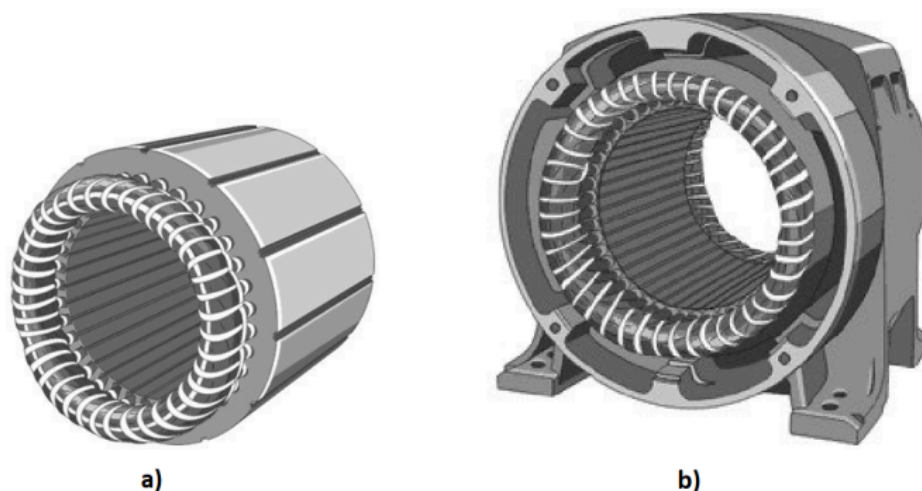
Figura 1 - Componentes do motor elétrico de indução.



Fonte: Francisco (2006).

O estator, parte fixa da máquina, é constituído por lâminas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si pelos seus espaçamentos. O processo de formação do núcleo do estator através do empilhamento compacto das lâminas é definido como o processo de empacotamento. As lâminas possuem ranhuras nas quais são inseridos os enrolamentos através do processo de bobinagem que são por sua vez alimentados pela rede monofásica ou trifásica. Na Figura 2 é possível observar o conjunto alojado no interior de uma carcaça que pode ser, por sua vez, em ferro fundido, aço ou alumínio.

Figura 2 - Desenho do a) estator bobinado e b) inserido na carcaça.



Fonte: Adaptada de Francisco (2006).

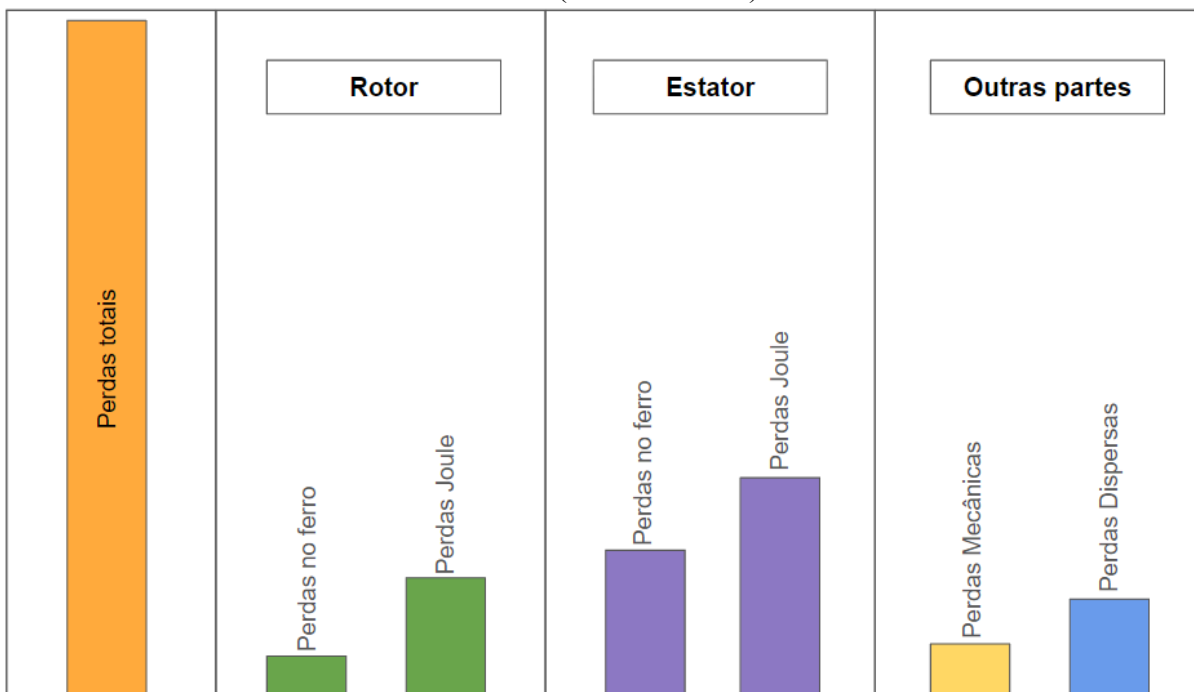
O rotor, parte móvel e girante da máquina, é constituído por um núcleo ferromagnético também laminado. Ele é apoiado no centro de rotação do motor, que possui rolamentos nos

extremos e que transmite a carga para energia mecânica produzida. Entre o rotor e o estator existe o entreferro, que deve ser o menor possível de forma a reduzir a relutância magnética total do circuito, aumentando assim a indução e conseqüentemente o fluxo, visto que o ar é muito menos permeável do que o ferro.

2.2 PERDAS NO MOTOR

Os motores de indução apresentam diferentes tipos de perdas elétricas, que influenciam diretamente no seu desempenho e eficiência. Essas perdas estão normalmente associadas à conversão de energia elétrica em energia térmica e pode ocorrer em diversos componentes do motor. De acordo com o estudo de Cezário et al. (2005), as principais perdas são classificadas em quatro grupos: perdas por efeito Joule, perdas no ferro, perdas dispersas e perdas mecânicas. O gráfico da distribuição dessas perdas nos motores de indução, Figura 3, evidencia os locais onde cada uma delas ocorre e sua contribuição relativa.

Figura 3 - Contribuição de cada grupo para as perdas totais e os respectivos locais onde elas ocorrem (escala relativa).



Fonte: Adaptada de Cezário et al. (2005).

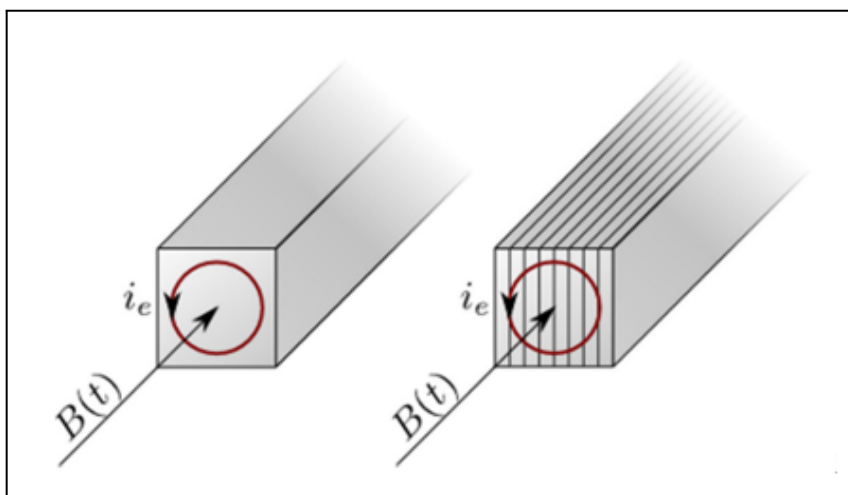
As perdas por efeito Joule correspondem à conversão de energia elétrica em térmica em um meio eletricamente condutor. As perdas por efeito Joule em motores elétricos de indução com rotor em gaiola de esquilo ocorrem no estator (bobinas de cobre) e na gaiola do

rotor (barras de alumínio). Esse tipo de perda está diretamente relacionado à resistência elétrica do condutor. Segundo Zhang et al. (2021), a otimização do design e o uso de materiais com maior condutividade elétrica dos enrolamentos são medidas eficazes para minimizar essas perdas.

As perdas no ferro ocorrem devido à conversão de energia elétrica em energia térmica no núcleo magnético dos motores, tanto no estator, quanto no rotor. Elas são divididas em perdas por histerese e por corrente de Foucault, também conhecidas como correntes parasitas. As perdas por histerese acontecem devido ao atrito dos dipolos magnéticos para inverter sua polaridade norte-sul em cada ciclo quando o material é submetido a um campo magnético alternado e é esse atrito constante que aquece o material do estator, gerando perdas por calor. Devido a esse funcionamento, quanto maior for a dureza do material, maior será o calor gerado (Prado, 2012).

Já as perdas por correntes parasitas são na verdade perdas Joule causadas por correntes induzidas no material ferromagnético (núcleo) devido à ação do campo magnético variável que atravessa o núcleo (Lei de Faraday) (Prado, 2012), Figura 4. Elas podem ser minimizadas quando o núcleo é laminado com lâminas de baixa espessura e com uma camada isolante dielétrica entre as laminações sucessivas, como por exemplo, o ar, de forma a aumentar a resistência às correntes parasitas. Outra estratégia para mitigar as perdas por correntes parasitas é utilizar materiais de alta resistência elétrica na composição do núcleo, como o silício.

Figura 4 - Esquema de orientação do campo magnético ($B(t)$) e corrente (i_e) no material laminado.



Fonte: Júnior (2018).

O estudo de Ueno et al. (2017) aborda o desenvolvimento de motores de alta performance, com lâminas de 0,08 milímetros de espessura, e visa justamente o objetivo de reduzir a espessura das lâminas ao máximo. Porém, segundo esse estudo, ao diminuir consideravelmente a espessura, as lâminas ficam mais suscetíveis a se comportar como um corpo único (bloco) e, conseqüentemente, sofrer perdas por histerese, sendo assim importante encontrar o compromisso entre esses dois fenômenos (perdas Joule e histerese) ao definir a espessura ideal das lâminas. Além disso, a estampagem da chapa torna-se mais complexa à medida que se reduz a espessura devido à propensão de ondulação e dobramento das lâminas originárias da tensão residual do processo de corte.

As perdas dispersas representam um grupo menor de perdas que ocorrem durante a operação do motor. Sua quantificação é complexa, pois inclui efeitos como o *skin effect* e perdas de alta frequência, que são muitas vezes difíceis de mensurar com precisão (Cezário et al. (2005)).

As perdas mecânicas estão associadas à conversão de energia mecânica em calor devido à fricção e às perdas viscosas. Elas incluem, principalmente, perdas nos rolamentos (interação entre as esferas e os anéis) e as perdas associadas ao ventilador de resfriamento do motor. Segundo Kim et al. (2014), as perdas do ventilador resultam da energia mecânica necessária para soprar o ar sobre a superfície do motor, incluindo a conversão da energia cinética do ar e a dissipação viscosa.

Como revelado nesta seção, as perdas elétricas ocorrem predominantemente no estator. Os pontos de contato entre as lâminas, seja através de rugosidades de geometria angular favorecida na própria lâmina, como no auto empacotamento, de incorporação de um componente externo, como arames ou até mesmo a microestrutura heterogênea, induzem a direção de corrente elétrica e dissipa o potencial do núcleo, o que reduz a capacidade magnética do componente. Tendo isso em vista, os processos de empacotamento dos estatores serão evidenciados na sequência.

2.3 PROCESSOS DE EMPACOTAMENTO DE ESTADORES

O processo de empacotamento das lâminas que constituem o núcleo é um passo crucial na manufatura de motores de indução. Esse processo envolve o empilhamento de finas

lâminas de aço elétrico isoladas entre si e responsáveis pela geração do campo magnético. A escolha do melhor processo de empacotamento de estatores depende de diversos fatores como: tipo de motor fabricado, ambiente de aplicação, produtividade requerida do processo, requisitos de eficiência, custo, entre outros.

2.3.1 Auto Empacotamento

O processo de auto empacotamento é um processo que consiste em fabricar lâminas de forma que se encaixem naturalmente umas nas outras, exemplificado na Figura 5, sem necessidade de fixação adicional, como grampos, soldas, rebites ou adesivos.

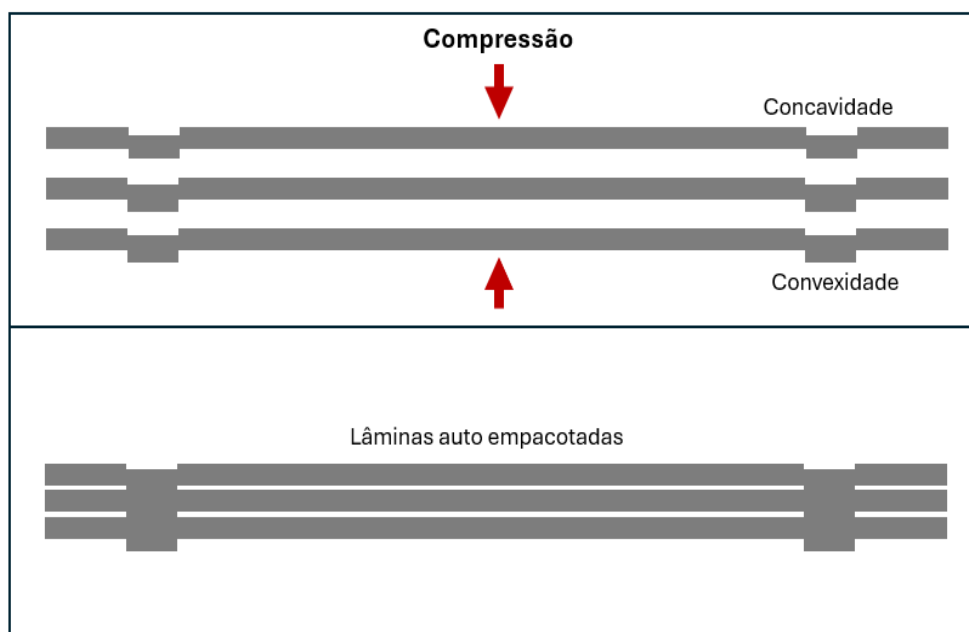
Figura 5 - Exemplo de lâminas auto empacotadas.



Fonte: Roças (2012).

Esse método explora o design geométrico das lâminas para serem projetadas com encaixes precisos, como saliências ou fendas, que permitem que se mantenham firmemente unidas através da própria estrutura após o processo de compressão das lâminas no estampo progressivo, conforme esquematizado na Figura 6. Para isso, é necessário um controle de precisão bastante rigoroso para garantir o dimensional das lâminas, que, por sua vez, devem ser fabricadas para garantir o encaixe perfeito.

Figura 6 - Princípio de funcionamento do auto empacotamento.



Fonte: Desenvolvido pela autora.

O nível de empacotamento proporcionado pelos vincos (engates) não é adequado para lâminas de motores de grande diâmetro devido às tensões mecânicas elevadas às quais estão submetidas e o impacto de defeitos de retilidade de lâminas finas, como pequenas ondulações ou curvaturas, que se agravam conforme se aumenta o diâmetro (Lamprecht, 2012). Esses fatores podem ocasionar o desalinhamento, folga e vibrações do pacote estator, o que tende a ser insuficiente para assegurar a rigidez estrutural necessária.

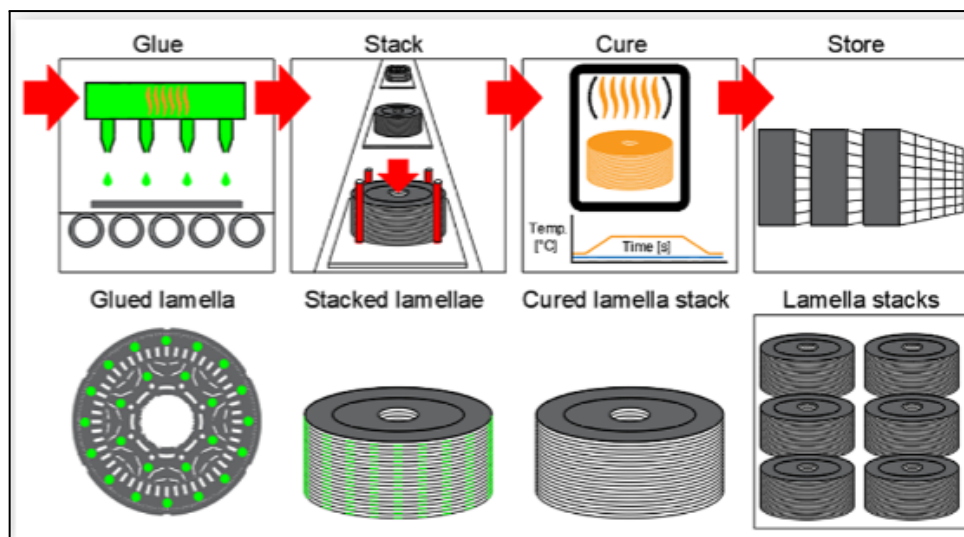
Foi observado por Machado (2022) em uma empresa fabricante de motores elétricos no sul do Brasil que esse processo oferece algumas vantagens como a redução de etapas de montagem do estator completo e um funcionamento mais silencioso, pois dispensa elementos de fixação mecânica, além de não gerar zonas termicamente afetadas. No entanto, a alta precisão na fabricação das lâminas pode gerar altos índices de refugo e problemas de qualidade, além do produto final, o estator auto empacotado, ser menos robusto para aplicações com demandas mecânicas elevadas, sendo normalmente destinados ao mercado de eletrodomésticos (Roças, 2012).

2.3.2 Colagem

Outro método popular de unir lâminas do estator é por meio do uso da tecnologia de pontos de cola. Esse processo, esquematizado na Figura 7, envolve a aplicação de pequenos

pontos de verniz adesivo na superfície das lâminas e a união ocorre quando a pressão é aplicada durante o processo de empilhamento.

Figura 7 - Esquema do processo de colagem de lâminas de estatores.



Fonte: Sluis et. al (2024).

Além disso, a colagem de estatores pode ser realizada através do uso de tecnologias autoaderentes, que envolvem o pré-revestimento das laminações de aço elétrico com um material de verniz de ligação que se liga a si mesmo quando a pressão é aplicada. Esse método é particularmente útil para geometrias complexas que exigem altos níveis de precisão em pontos de aplicação da cola, proporcionando um alinhamento instantâneo e uniforme sem etapas adicionais de aplicação de adesivo.

No estudo de Schoppa et al. (2003), as lâminas de aço elétrico foram revestidas com verniz adesivo e, em seguida, foram coladas umas às outras durante um processo termicamente ativado. Seus resultados experimentais mostraram que o aumento da perda específica do núcleo após a colagem foi muito baixo em comparação ao processo de soldagem usado, e foi concluído que a colagem era, do ponto de vista magnético, o melhor método de empacotamento. O método de união por cola também permitiu o isolamento elétrico homogêneo, reduziu a emissão acústica e apresentou alta condutividade térmica em serviço.

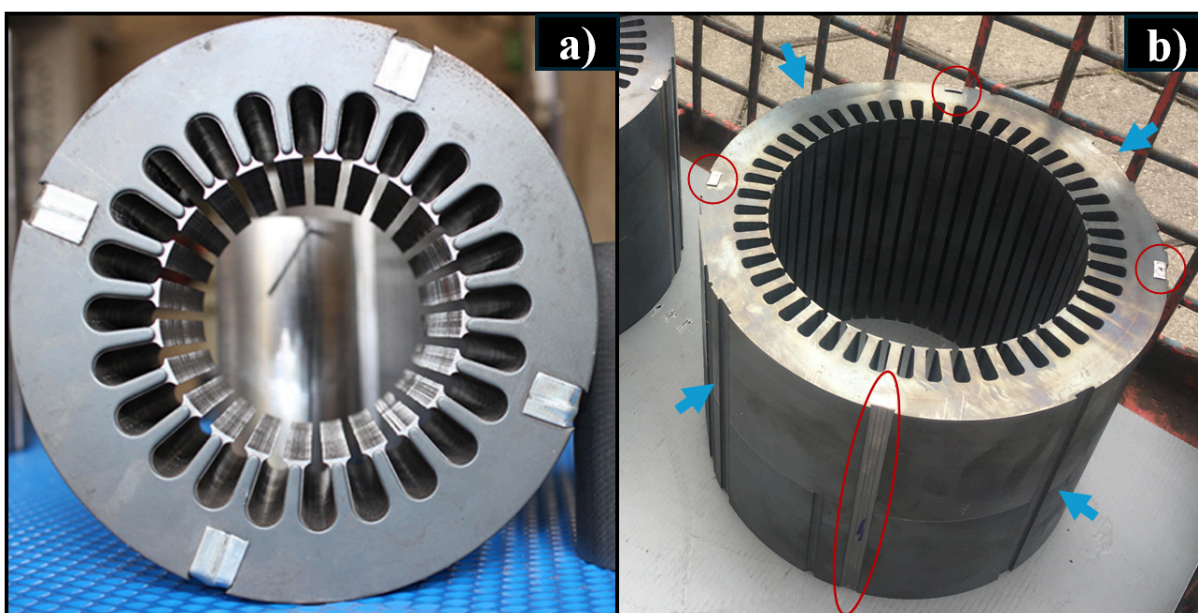
Segundo Xia et al. (2020), o maior desafio para o uso do processo de colagem é a suscetibilidade da adesão a falhas mecânicas quando exposta a cargas cíclicas sob temperaturas elevadas. Nessas condições, o adesivo é submetido a variações de estresse térmico e mecânico que, ao longo do tempo, comprometem sua integridade e homogeneidade na lâmina. Ademais, dependendo da qualidade do verniz, a exposição contínua ao calor pode causar degradação do adesivo, levando a trincas ou descolamento das lâminas, o que reduz a

durabilidade do empacotamento e compromete a confiabilidade do motor em condições rigorosas de operação.

2.3.3 Grampeamento

O grampeamento é um processo que envolve a inserção de arames, ou grampos, a fim de alinhar e fixar as lâminas no processo de empilhamento. Essas tiras de aço são aplicadas nas laterais do pacote, indicadas na Figura 8, e alojadas em cavidades previamente estampadas nas lâminas, chamadas de caudas de andorinha, o que proporciona resistência mecânica elevada e suficiente para o processo de prensagem do estator na carcaça (Roças, 2012).

Figura 8 - a) Vista superior de um estator grampeado e b) indicação dos grampos (em vermelho) e das caudas de andorinha (em azul).



Fonte: Adaptado de Wellstamp (2024) e Machado (2022).

Entre as principais vantagens do grampeamento estão sua alta produtividade e a resistência mecânica proporcionada ao estator. A capacidade de grampear múltiplos grampos simultaneamente é a principal característica que garante a elevada produtividade desse processo. Além disso, o processo dispensa o uso de fontes de calor e não gera zonas termicamente afetadas, preservando a propriedade magnética do material. Por outro lado, a necessidade de criar ranhuras para alojar os grampos nas lâminas gera descontinuidades na geometria e pode afetar a uniformidade do campo magnético.

Segundo Liang et al. (2015), além desses fatores, o material dos grampos conduz correntes parasitas de fuga, o que gera um campo magnético próprio nos grampos e contribui para a dispersão do campo e da intensidade da corrente do estator, gerando dissipação de energia na forma de calor. O estudo também evidencia que as perdas aumentam conforme o número de grampos. Esse fenômeno é especialmente relevante em motores de grande porte, onde a presença de múltiplos grampos pode intensificar as perdas no ferro e afetar a eficiência do motor. Portanto, a escolha do número ideal de grampos é crucial para balancear a fixação das lâminas com o impacto das perdas.

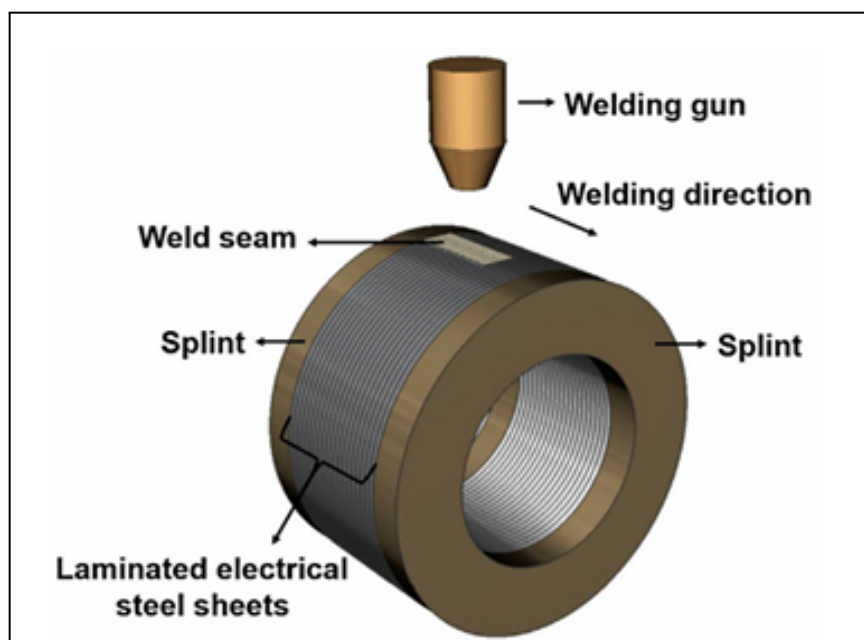
2.3.4 Soldagem

A soldagem é um processo de fabricação amplamente empregado na junção do pacote de estator. Diferente dos métodos apresentados anteriormente, a soldagem utiliza calor para fundir e fixar as bordas das lâminas. A seguir, serão exploradas diferentes técnicas de soldagem e suas aplicações na montagem de estatores, com foco nas vantagens e desafios de cada técnica.

2.3.4.1 Soldagem à laser

A soldagem a laser é um método de empacotamento que utiliza um feixe de laser para unir as lâminas do estator. Como método de soldagem por fusão de alta eficiência e qualidade, a soldagem a laser é considerada um método promissor para soldar lâminas de aço elétrico em motores de alto desempenho (Xia et al. (2020)). O feixe de energia em movimento funde a borda das lâminas continuamente, Figura 9, e a junção efetiva é formada nas interfaces.

Figura 9 - Esquema do processo de soldagem a laser.



Fonte: Xia et al. (2020).

Comparada a outros métodos, a soldagem a laser pode alcançar uma zona termicamente afetada reduzida, com maior velocidade de processo, induzir menor tensão residual e, assim, obter lâminas com melhores propriedades magnéticas.

O estudo de Sundaria et al. (2020), que compara os processos de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) e a laser, conclui que em termos de velocidade e para um mesmo nível de robustez de pacote, a soldagem a laser se destaca, sendo até 3 a 10 vezes mais rápida que a TIG, o que a torna muito interessante para cenários de produção em larga escala, além de apresentar uma ZTA expressivamente inferior aos processos de soldagem convencionais. Schaede et al. (2014) complementa que o processo TIG além de ser limitado à uma velocidade de soldagem inferior a 1 m/min, a espessura mínima das lâminas de aço elétrico soldáveis deve ser de 0,35 mm e que o processo de soldagem a laser pode superar essas restrições.

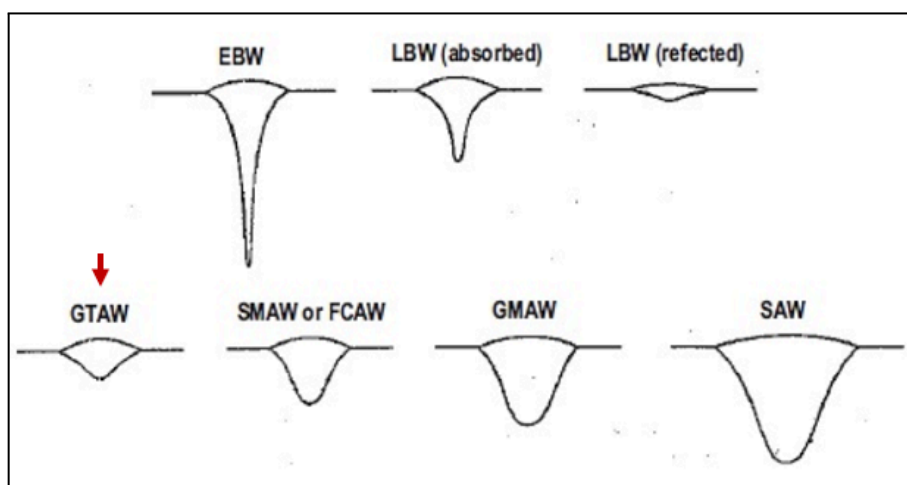
Por outro lado, o alto custo inicial do equipamento é uma das principais desvantagens, tornando-o menos acessível para empresas com menor capacidade de investimento. A soldagem a laser pode não ser a opção mais eficiente para motores pequenos ou para estruturas de estator com geometrias complexas, para os quais processos de empacotamento alternativos podem oferecer uma solução mais prática e econômica.

2.3.4.2 Soldagem TIG

A soldagem TIG, ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), é um processo em que as peças são unidas pelo calor gerado por um arco elétrico, criado entre um eletrodo de tungstênio não consumível e o material a ser soldado, na presença de um gás de proteção. Esse processo de soldagem é amplamente empregado na indústria por sua versatilidade e custo moderado, porém é comumente usado de forma manual, de maneira que a qualidade da solda depende diretamente da habilidade do soldador. A hesitação da automação desse processo por parte das empresas costuma estar relacionada à baixa velocidade de solda desse processo quando comparado a outros, o que impacta na produtividade e no *payback* do investimento em maquinário.

Ao contrário de alguns outros processos de soldagem, a penetração da solda do processo TIG não é impressionante. A comparação da penetração de diferentes tipos de soldagem com a soldagem TIG (seta vermelha) é mostrada esquematicamente na Figura 10.

Figura 10 - Profundidade de penetração em vários processos de soldagem.

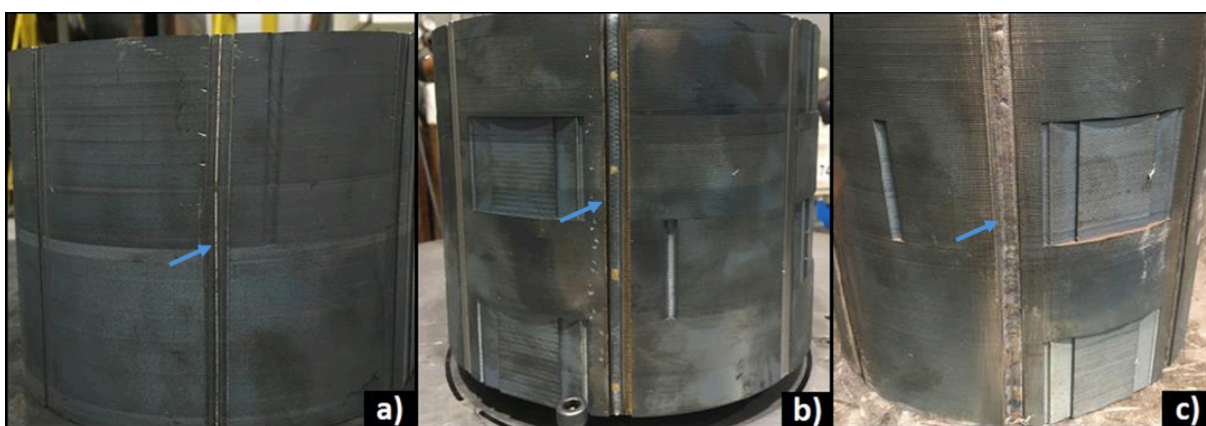


Fonte: Adaptada de Singh et al. (2017).

Em termos de profundidade, essa característica pode ser bastante interessante na soldagem de estatores pela capacidade de preservar a integridade do pacote ao não interferir gravemente no fluxo magnético. No entanto, é fundamental equilibrar esse ponto com a necessidade de resistência mecânica adequada, garantindo que o processo de soldagem ofereça tanto a integridade estrutural quanto a funcionalidade elétrica do estator. Além disso, por se tratar de lâminas, quando não há a adição de material, esse processo pode gerar um leve recuo do material da poça de fusão fazendo com que o material de base fundido (aço elétrico)

penetre¹ entre as lâminas do material sólido na direção do centro do pacote, fenômeno que não aconteceria na soldagem com adição de material, a qual pode garantir robustez mecânica mais elevada. Na Figura 11 é possível observar como os diferentes processos impactam no aspecto do cordão de solda ao comparar processo de soldagem a laser, a), soldagem MIG (*Metal Inert Gas*), b), ambos automatizados, com o processo de soldagem TIG, c), realizado de forma manual. No item c), o aspecto da solda revela certas discontinuidades devido à operação manual.

Figura 11 - Aspectos visuais dos cordões de solda a) a laser; b) MIG e c) TIG.



Fonte: Machado (2022).

Em comparação com a soldagem a laser, no estudo de Zhang et al. (2017), a soldagem TIG causou uma degradação mais significativa das propriedades de histerese, com uma redução de 47,2% na remanência, enquanto a soldagem a laser teve uma redução de 22,6%. Isso se deve ao maior estresse residual na soldagem TIG, que afeta negativamente a magnetização. Embora esse inconveniente quando comparado ao laser, segundo o estudo, a soldagem TIG ainda pode ser preferida em aplicações onde a resistência mecânica (resistência da solda medida pela força de cisalhamento) é mais crítica do que a preservação das propriedades magnéticas.

2.3.4.3 Soldagem MIG

A soldagem MIG é um processo de soldagem a arco voltaico que utiliza um gás de proteção inerte, ou ativo, MAG (*Metal Active Gas*), e um arame de adição fornecido de forma

¹ É possível fazer uma relação com o mecanismo de fixação de um processo de brasagem.

contínua. Ambos os processos são classificados pela AWS² como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) (Vieira, 2012).

Pouquíssimos estudos foram encontrados sobre esse processo em aplicações de empacotamento de estatores para motores elétricos, o que indica que pode não ser muito recorrente na indústria.

Por se tratar de um processo com adição de material, será necessária a criação de uma cavidade nas laterais do pacote, análogo ao grampeamento, estampada nas lâminas para o alojamento desse metal de adição, para não ultrapassar o dimensional do conjunto. Segundo o trabalho de Machado (2022), a soldagem MIG foi realizada para testes de comparação com o processo de grampeado na empresa e foi evidenciada a necessidade adicional de espaço para o alojamento do cordão de solda dessa técnica, como exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Perfil transversal do cordão de solda ultrapassando o diâmetro externo do pacote.



Fonte: Machado (2022).

Essa técnica confere alta resistência mecânica do pacote e, às vezes, mais do que o necessário, quando comparada com as demais técnicas, visto que a elevada resistência mecânica do pacote está associada à maior interferência das propriedades elétricas do núcleo ferromagnético.

Devido ao seu largo cordão de solda, uma cavidade mais pronunciada deveria ser visada, o que entra no compromisso de integridade do pacote visto anteriormente. Essa característica pode ser contornada com etapa de limagem, Figura 13, após a solidificação da

² American Welding Society.

poça de fusão para que o pacote de estator possa ser prensado na carcaça sem problemas dimensionais ou com o estudo de parâmetros de solda mais detalhados.

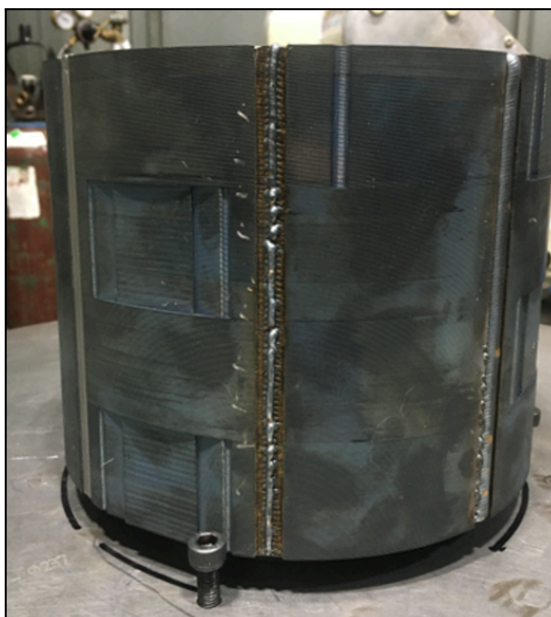
Figura 13 - Estatores bobinados soldados com MIG e lixados com disco flap.



Fonte: Machado (2022).

Por se tratar de um processo fusão com adição de material de forma contínua, alguns problemas de qualidade podem ser encontrados com maior facilidade nesse processo como porosidades resultando em bolhas no cordão de solda, respingos excessivos, Figura 14, e a falta de fusão, onde o metal de adição não se funde adequadamente com o metal base.

Figura 14 - Cordão de solda MIG com a adição de material não homogênea.



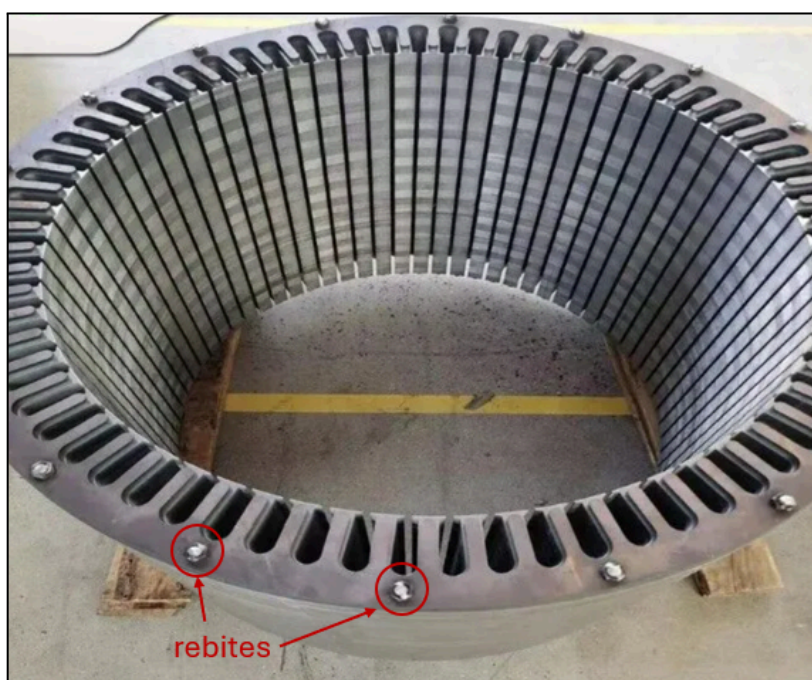
Fonte: Machado (2022).

A soldagem MIG possui alto potencial de automação quando em comparação com a soldagem TIG devido, principalmente, à estabilidade da poça de fusão e da alimentação automática do arame de solda, que permite a aplicação em altas velocidades, além de possibilitar maior tolerância à variação de posição e de geometria das peças (Neto, 2012).

2.3.5 Rebitagem

A rebitagem de lâminas de motores envolve o uso de rebites para fixar firmemente as lâminas umas às outras, conforme ilustrado na Figura 15. Esse processo é comumente utilizado em situações onde outros métodos de união podem ser menos eficazes, como em motores expostos a altas temperaturas ou vibrações.

Figura 15 - Pacote de estator rebitado.



Fonte: Adaptada de Lamnow (2024).

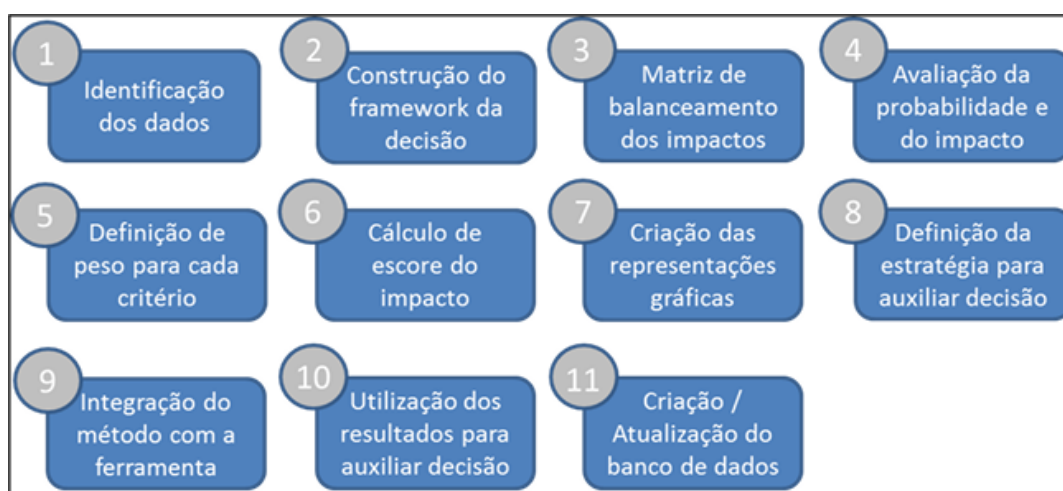
Além disso, a rebitagem pode ser uma solução econômica para produções em pequena escala, reparos e manutenções, sendo uma técnica versátil e eficaz para fixar as lâminas do estator e do rotor (Lamnow, 2024). No entanto, o maior inconveniente da rebitagem, que explica seu desuso em larga escala, é o impacto negativo no desempenho elétrico do motor.

2.4 FRAMEWORK

Segundo Bastchen (2018), um *framework* é uma estrutura que organiza e facilita a tomada de decisão, permitindo visualizar as relações entre objetivos, interesses dos *stakeholders*³ e alternativas disponíveis, com o intuito de escolher a melhor solução para um problema específico. Já Leshem e Trafford (2007) definiram o termo *framework* como um mecanismo para arranjar sistematicamente abstrações, proporcionando uma visão teórica do que se pretende investigar e dando ordem a um processo de pesquisa.

Para ilustrar essa aplicação, na pesquisa de Bastchen (2018), foi desenvolvido um método de apoio para o processo de tomada de decisão multicritério em uma indústria automobilística, especificamente em relação à qualidade da suspensão de um veículo pesado, em um contexto de mudança de engenharia. As etapas são as indicadas na Figura 16.

Figura 16 - Etapas do método desenvolvido, DSMMA⁴.



Fonte: Bastchen (2018).

Na etapa de construção do *framework* de tomada de decisão, o autor mapeou os principais interesses dos *stakeholders* (critérios) (Figura 17) e categorizou seus sub-interesses possíveis, assim como possíveis propostas de solução para cada um.

³ Segundo o PMBOK, um *stakeholder* é qualquer pessoa ou grupo com interesse ou que possui impacto direto ou indireto em um projeto, organização ou decisão.

⁴ Método de Suporte à Decisão para Múltiplas Alternativas (*Decision Support Method for Multiple Alternatives*).

Figura 17 - Proposta de *framework* do autor.

OBJETIVO	Selecionar a solução técnica mais adequada para o problema de qualidade da suspensão do motor				
INTERESSES DOS STAKEHOLDERS	Técnico	Organizacional	Gerenciamento	Comercial	Externo
SUB-INTERESSES DOS STAKEHOLDERS	Confiabilidade / Segurança	Suportabilidade	Gerenciamento de projeto	Estabilidade do fornecedor	Concorrência
	Plataforma / Modularização	Disponibilidade de Pessoas	Recursos	Negociabilidade	
	Tempo de Montagem		Time-to-market	Custo peça	
	Custo de Manutenção			Investimento em ferramental	
ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO	Alternativa 1 -Sem mudanças;	Alternativa 2 -Novo suporte M18;	Alternativa 3 -Novo suporte M18; - Novo coxim;	Alternativa 4 -Novo suporte M18; - Novo coxim; - Novo parafuso;	Alternativa 5 -Solução Importada;

Fonte: Bastchen (2018).

Posteriormente, no passo cinco, o autor organizou e elencou esses critérios de acordo com pesos, definidos previamente, conforme as preocupações da empresa em relação a esse projeto, de maneira com que os interesses totalizassem cem por cento, esquematizado na Figura 18.

Figura 18 - Sequência da definição de peso dos critérios.

INTERESSE DOS STAKEHOLDERS	INTERESSE DOS STAKEHOLDERS	INTERESSE DOS STAKEHOLDERS	PESO
Técnico	Técnico	Técnico	50%
Organizacional	Comercial	Comercial	20%
Gerenciamento	Gerenciamento	Gerenciamento	15%
Comercial	Organizacional	Organizacional	10%
Externo	Externo	Externo	5%
		TOTAL	100%

Fonte: Bastchen (2018).

Como um outro exemplo, Shifat e Hur (2020) propuseram um *framework* informativo de diagnóstico para detectar falhas de curto-circuito no enrolamento de motores elétricos. Este *framework*, ilustrado na Tabela 1, combina diferentes técnicas de análise e diagnóstico de falhas em sistemas rotativos (motores elétricos) como o Fast Kurtogram, Autogram e MCSA⁵ para analisar sinais de corrente e vibração, permitindo a detecção precoce de falhas e a categorização de diferentes estados de falha.

⁵ Análise da Assinatura de Corrente do Motor (*Motor Current Signature Analysis*).

Tabela 1 - Framework proposto pelos autores.

<i>Método</i>	<i>Significância em termos de diagnóstico de falhas no enrolamento</i>
Fast Kurtogram	Não é uma abordagem confiável para estimar o estado saudável do motor. Foi capaz de diagnosticar e localizar com precisão as frequências de falha e a largura de banda de demodulação. Além disso, conseguiu distinguir entre os dois estados de falha usando o cálculo de SK. No entanto, os SES extraídos usando o FK têm uma característica fraca, o que pode ser ineficiente em casos com sinais ruidosos.
Autogram	Essa abordagem apresentou uma discrepância marginal entre os estados de falha iniciais e severos, tornando mais fácil categorizar diferentes falhas. Os SES extraídos usando o Autogram podem ser aplicados de forma eficaz a sinais afetados por ruídos. No entanto, como o Autogram é baseado na estimativa de curtose em diferentes nós, não é uma abordagem eficaz para uso em estado saudável.
MCSA	Contém informações significativas sobre o estado saudável. A análise da assinatura de corrente, bem como as séries temporais da corrente do motor, caracterizam o estado saudável do motor. A presença de harmônicos de terceira ordem forneceu informações suficientes para diagnosticar falhas no menor tempo possível.

Fonte: Traduzido de Shifat e Hur (2020).

A maneira como as informações foram dispostas de forma simples e não exaustiva pelos autores foi considerada muito interessante e pertinente na aplicação deste trabalho que visa descrever todos os processos de empacotamento, suas características, vantagens e desvantagens.

No contexto dos métodos de empacotamento de estatores, Xia et al. (2020) resumiram pesquisas atuais sobre a união de aços elétricos laminados com o objetivo de fornecer uma melhor compreensão do processo de união. No artigo não é especificado o uso do termo “*framework*” na descrição da tabela 1 (Tabela 2), porém o desenvolvimento desse tipo de apoio pedagógico pode ser muito útil nas primeiras etapas de um *framework* quando é necessário o levantamento de informações.

Tabela 2 - Compilação de pesquisas julgadas pelos autores como notáveis na união de laminados de aço elétrico.

<i>Processo de União</i>	<i>Conteúdo da Pesquisa</i>	<i>Referência</i>
Soldagem contínua a laser	Resistência: tanto a resistência quanto o comportamento à fadiga do material soldado não apresentaram diferença apreciável em relação ao material base; Microestrutura: completamente ferrítica tanto no material base quanto na região da solda; Defeito: poros observados na região da solda	Schade et al. (2014)
Soldagem contínua a laser	Modelo para resistência à torção: modelo matemático com função para estimar a resistência das laminações soldadas com base nos parâmetros de soldagem	Wang et al. (2015)

Soldagem contínua a laser	Resistência do estator em anel soldado: aumento com a entrada de calor; Microestrutura: ferrita na região da solda; Propriedade magnética: deterioração com a entrada de calor	Wang et al. (2016)
Soldagem contínua a laser	Simulação da distribuição de temperatura: distribuição de temperatura descontínua na zona afetada pelo calor devido ao bloqueio da interface	Wang et al. (2015)
Soldagem contínua TIG	Resistência, microestrutura, propriedade magnética: a junta soldada por TIG apresenta maior resistência, grãos mais grosseiros e pior propriedade magnética em comparação à junta soldada a laser	Zhang et al. (2017)
Soldagem contínua	Propriedade magnética: modelos matemáticos e de FEM foram desenvolvidos para estimar a perda por correntes parasitas	Wang et al. (2017)
União mecânica	Correntes parasitas interlaminares afetam principalmente a perda de ferro na zona local	Imamori et al. (2017)
Cola	Propriedade mecânica: valores críticos de ângulo de cisalhamento adesivo de cerca de 5° foram obtidos para todas as amostras de laminados, independentemente dos substratos de aço utilizados para criar os laminados	Pugstaller et al. (2018)
Soldagem por pontos pulsados adaptativa	A possibilidade de aplicação da soldagem por pontos pulsados adaptativa em aços elétricos laminados foi comprovada	Vegelj et al. (2014)
Distribuição estatística de pontos de solda únicos	A estratégia de distribuição de pontos de solda apresentou resultados promissores para reduzir a deterioração magnética, especialmente como abordagem para aplicações de frequência mais alta	Leuning et al. (2017)

Fonte: Adaptado e traduzido de Xia et al. (2020).

Tendo em vista os exemplos de *frameworks* supracitados e os objetivos deste estudo, a seção aborda a importância dessas ferramentas organizacionais para facilitar os processos tanto de P&D quanto de desenvolvimento de produtos, viabilizando diagnósticos rápidos e tomadas de decisão multicritério. Foram apresentados alguns exemplos de *frameworks* que serviram de inspiração para o modelo desenvolvido neste trabalho.

Por fim, a falta de informações completas e confiáveis pode levar a decisões menos otimizadas, reforçando a necessidade de *frameworks* que auxiliem na organização de dados e na priorização de critérios relevantes para cada contexto.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os elementos evocados neste capítulo ilustram como um *framework* de auxílio à tomada de decisão e que se concentra em fornecer a fundamentação teórica concisa sobre os processos de empacotamento de lâminas de estatores pode ser construído. Também, foi visto que um método de tomada de decisão para a aplicação deste trabalho ainda não está presente na literatura. Além disso, nas investigações de comparativo de processos, como em processos de união de laminados de aço elétrico, é fundamental considerar critérios (ou variáveis) que influenciam diretamente a qualidade, eficiência e viabilidade do método escolhido. Esses critérios foram citados ao longo das seções como tamanho do motor, geometria da lâmina e custo de processo.

Um aspecto relevante a ser considerado é a falta de estudos de alguns processos de empacotamentos, reconhecidos então como menos recorrentes na indústria para essa aplicação, como o processo de soldagem MIG e a rebitagem de lâminas de estatores, o que resulta em uma menor quantidade de dados técnicos disponíveis na literatura. Pode-se concluir que esse fato ocorre devido às aplicações mais limitadas na união de laminados de aço elétrico, considerando suas influências significativas no desempenho elétrico do motor.

Portanto, o capítulo consolidou os conceitos teóricos necessários para o melhor conhecimento dos processos, destacando também os desafios associados a cada processo de empacotamento. Esses conceitos reforçam a importância de um procedimento estruturado, que integre critérios técnicos de maneira a atender às demandas da indústria de motores elétricos de forma eficiente e fundamentada.

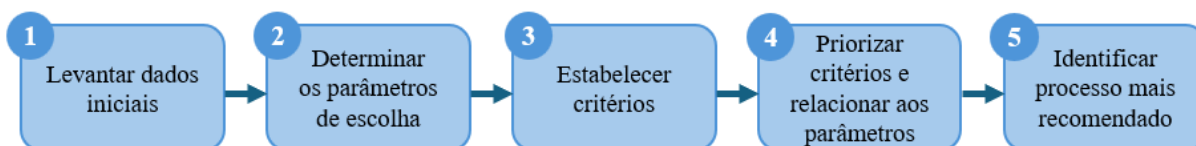
3. PROPOSTA DE FRAMEWORK

Neste capítulo será apresentado o método para apoiar a tomada de decisão em empresas fabricantes de motores elétricos. O objetivo é ajudar a avaliar se o processo de empacotamento de estatores atual é o mais adequado ou se é necessário implementar um novo processo que atenda às necessidades de cada organização.

3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

De forma a organizar esses elementos e conduzir a tomada de decisão, o *framework* foi definido em cinco etapas, esquematizadas na Figura 19.

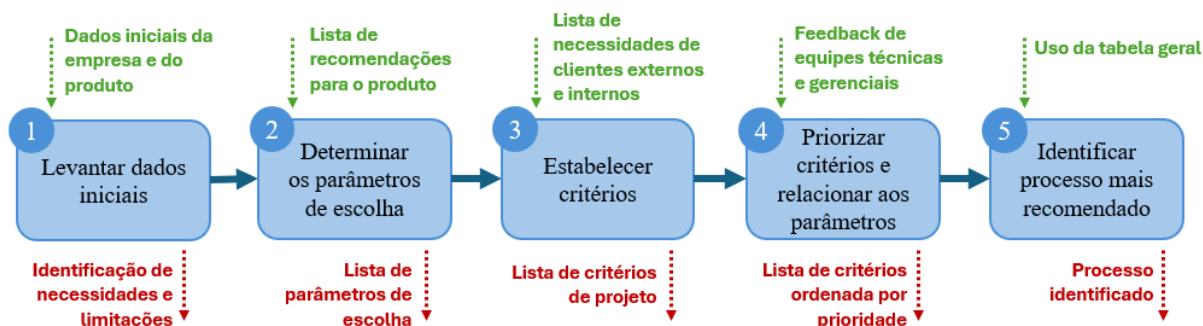
Figura 19 - Framework proposto.



Fonte: Desenvolvido pela autora.

Para cada uma das atividades do *framework*, existem entradas e saídas. As entradas representam as informações ou dados necessários para iniciar uma determinada atividade e alimentam o processo. Já as saídas são os resultados gerados após a execução de cada atividade. Esses elementos estão esquematizados na Figura 20.

Figura 20 - Framework contendo as entradas e saídas para execução de cada atividade.



Fonte: Desenvolvido pela autora.

Cada uma das atividades, ou etapas, é composta por tarefas. A seguir, são descritos cada um dos passos para execução, ao mesmo tempo em que se busca justificá-los.

3.1.1 Etapa 1 – Identificação dos Dados

A primeira etapa consiste em um levantamento detalhado das características da empresa e do produto. Essa etapa, é essencial para identificar como as especificidades de cada processo de empacotamento existente, como princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens, dialogam com a realidade da empresa e do projeto. Além disso, este é o momento de identificar a oportunidade de decisão e definir os principais envolvidos no processo, como os tomadores de decisão e os colaboradores que irão apoiar a análise. Também é essencial mapear as alternativas de solução disponíveis dentro dos recursos da empresa e compreender os interesses dos *stakeholders*, ou mais precisamente, clientes internos e externos, que incluem as partes ou domínios relevantes dentro do projeto, que servirão como critérios em etapas futuras.

Dentro da definição, os clientes internos e externos são tipos específicos de *stakeholder*. Os clientes internos são colaboradores ou departamentos dentro da própria empresa que dependem de outros setores para desempenhar suas funções e os clientes externos representam os consumidores finais, fornecedores ou empresas que adquirem os produtos oferecidos pela organização. A definição de *stakeholders* por sua vez engloba todas as partes interessadas no projeto.

Para assegurar ao leitor uma visão clara dos conteúdos apresentados no capítulo três, a Tabela 3 destaca as principais características de cada processo. Essa tabela foi elaborada com o objetivo de auxiliar a comparação entre os processos para os envolvidos na tomada de decisão, servindo como uma ferramenta de consulta rápida ou como uma base de dados objetiva. Sua disposição de conteúdo foi inspirada na apresentação de informações de Xia et al. (2020) e a argumentação inspirada no *framework* de Shifat e Hur (2020).

Tabela 3 - Resumo das principais características de cada processo.

<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Auto empacotamento	Fixação por encaixe de vincos estampados e compressão	Não necessita de etapas posteriores ao estampo progressivo	Menor robustez e possíveis problemas de qualidade das lâminas
Colagem	Fixação das lâminas através de um verniz adesivo	Menor interferência na integridade física das lâminas	Necessidade de etapa de cura e possível degradação do adesivo em fadiga e/ou em altas temperaturas

Grampeamento	Uso de arames fixadores nas laterais dos pacotes	Resistência mecânica elevada (menor vibração) e menor complexidade de processo	Aumento das perdas conforme o aumento do número de grampos e necessidade de cauda de andorinha para alojamento do grampo
Soldagem a laser	Soldagem com feixe de luz concentrado	Não necessita cauda de andorinha, baixa ZTA e perdas totais e produtividade elevada	Maior custo e consumo de energia além de necessitar altas potências de laser para grandes motores, o que afeta a integridade do pacote
Soldagem TIG	Soldagem com eletrodo de tungstênio	Não necessita cauda de andorinha	Maior ZTA e perdas totais consideráveis, processo usado muitas vezes manualmente
Soldagem MIG	Soldagem com arame e gás inerte	Alta robustez de pacote, resistência mecânica elevada e ZTA reduzida	Necessita de cauda de andorinha para alojamento do material de adição do cordão de solda e suscetível a problemas de qualidade de solda
Rebitagem	Fixação por rebites (pinos metálicos)	Alta robustez de pacote e resistência mecânica elevada	Maiores perdas totais e necessidade de geometria de lâmina pensada para alojamento dos rebites

Fonte: Desenvolvido pela autora.

O objetivo dessa etapa é construir uma base de conhecimento para fundamentar as análises posteriores. Essa compreensão inicial permite visualizar os benefícios e limitações de cada método, considerando aspectos técnicos, econômicos e de aplicabilidade prática. Também nessa etapa começarão a ser identificadas as recomendações para o produto, de modo a definir posteriormente os parâmetros que possibilitarão comparar os diferentes processos.

3.1.2 Etapa 2 – Parâmetros de escolha

Na segunda etapa, os parâmetros de escolha devem ser determinados, pois serão eles os principais aspectos que guiarão a análise. Os parâmetros de escolha nesse contexto são definidos como características estabelecidas para orientar a seleção de uma opção em um conjunto de alternativas disponíveis, funcionando como indicadores que ajudam a fazer essa avaliação com base em determinados objetivos, requisitos ou prioridades.

Portanto, os parâmetros de escolha serão definidos com base nas recomendações para o produto, identificadas na primeira etapa, após a coleta de informações da empresa e do produto. Essas orientações refletem as necessidades específicas do projeto, como, por exemplo, a produção de um motor de custo elevado e de excelente performance para atender

aos clientes com aplicações especiais de alta tecnologia, ou a adoção de um processo de produção sustentável com baixo impacto em emissões de CO₂, para clientes que exigem altos níveis de desempenho ambiental. A partir dessas recomendações, são estabelecidos os parâmetros de escolha, que auxiliarão na tomada de decisão na comparação entre os diferentes processos de empacotamento.

Como é possível ver na Tabela 4, quatro principais parâmetros são propostos neste trabalho, como o tamanho do motor mais representativo, o limite das perdas totais, o potencial de produtividade almejado com o projeto e o investimento disponível.

Tabela 4 - Sugestão de parâmetros de escolha de processos.

Parâmetros de escolha	Processos						
	Auto empacotamento	Colagem	Grampeamento	Soldagem a laser	Soldagem TIG	Soldagem MIG	Rebitagem
Tamanho do motor	Pequeno a médio	Pequeno a médio	Todos os tamanhos	Todos os tamanhos	Médio	Médio	Grande
Perdas totais	Baixa a média	Baixa a média	Baixa a média	Baixa	Média	Média	Alta
Potencial de produtividade	Alto	Médio	Alto	Médio a alto	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio
Investimento	Baixo a médio	Baixo a médio	Baixo a médio	Alto	Baixo a médio	Médio a alto	Baixo a médio

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Para este estudo, esses parâmetros foram identificados como os mais relevantes para a escolha de processos de empacotamento de estatores, segundo apresentado no capítulo anterior e na síntese elaborada na Tabela 2. Os limites de valores de parâmetros foram definidos qualitativamente neste trabalho com base em diferentes referências e elencados em três níveis.

Para o parâmetro “investimento”, os níveis foram atribuídos ao nível de tecnologia e automação envolvida no processo. Logo, considerou-se neste trabalho que um investimento:

- a) baixo: o processo é totalmente manual;
- b) médio: possui sistemas semi-automatizados;
- c) alto: define-se pelo uso de novas tecnologias e um nível elevado de automação.

No parâmetro “tamanho de motor”, os níveis foram considerados pelo porte ou dimensional do motor. Segundo Waide e Brunner (2011), o porte do motor pode ser estabelecido através de sua potência gerada. Portanto, um tamanho de motor é:

- a) pequeno: até 0,75 kW;
- b) médio: entre 0,75 kW e 375 kW;
- c) grande: a partir de 375 kW.

Já para o parâmetro “perdas totais”, os valores considerados foram definidos através das classes de eficiência de motor estipuladas pela norma IEC 60034-30-1 (2014), que por sua vez estabelece limites de perdas totais. Os níveis de perdas totais são determinados como:

- a) baixa: para motores da classe IE1;
- b) média: para motores da classe IE2 e IE3;
- c) alta: para motores da classe IE4.

Por fim, em relação ao parâmetro “produtividade”, os níveis foram estipulados de forma análoga ao parâmetro de investimento. Processos considerados como produtividade:

- a) baixa: são processos manuais;
- b) média: são processos semi-automatizados;
- c) alta: respectivos ao alto nível de automação.

A Tabela 5 resume os limites dos valores qualitativos estipulados neste trabalho.

Tabela 5 - Valores qualitativos dos parâmetros de escolha.

Parâmetro de escolha	Nível baixo ou pequeno	Nível médio	Nível alto ou grande
Investimento	Manual	Semi-automatizado	Elevada tecnologia e automação
Tamanho do motor	< 0,75 kW	0,75 kW - 375 kW	> 375 kW
Perdas totais	IE1	IE2 e IE3	IE4
Produtividade	Manual	Semi-automatizado	Elevada tecnologia e automação

Fonte: Desenvolvido pela autora.

É importante ressaltar que os valores e limites apresentados neste estudo são sugestões, que podem servir como base para o enquadramento do projeto do motor com os parâmetros estabelecidos. Além disso, esses valores podem ser redefinidos conforme a disponibilidade de dados que a empresa possui.

3.1.3 Etapa 3 – Critérios de Projeto

No contexto deste trabalho, os critérios de projeto são condições pré-definidas que permitem catalogar e organizar alternativas ou situações de acordo com objetivos específicos do projeto de motor. Após a identificação dos principais *stakeholders* envolvidos no projeto durante a Etapa 1, a motivação em relação ao produto deve ser mapeada com todas as partes envolvidas. Esse mapeamento pode ser organizado pela equipe que está coordenando o presente estudo em forma de trocas, como entrevistas ou dinâmicas de *brainstorm*, com as demais partes interessadas.

Como forma de otimizar essa etapa e fornecer orientação durante as trocas com os *stakeholders*, o procedimento sugere de antemão a reflexão da empresa dentro de três critérios de projeto, sendo eles: técnico, operacional e econômico. Esses critérios foram inspirados nos interesses dos *stakeholders* do trabalho de Bastchen (2018) e reduzidos a três elementos para simplificação.

É importante ressaltar que essa proposta de *framework* trata-se de sugestões para a empresa baseada na expertise de processos de empacotamento de estatores, porém não tem como objetivo fixar número máximo de critérios ou parâmetros, para que seja possível a personalização de cada projeto. A Tabela 6 exemplifica a lista de critérios de projeto contendo os critérios mínimos sugeridos para avaliação e também os critérios que podem ser incluídos para a análise de forma complementar, como o critério ambiental e de riscos, porém que não serão tratados neste trabalho.

Tabela 6 - Exemplo de personalização de critérios.

Critérios de projeto
Técnico
Econômico
Operacional
<i>Ambiental</i>
<i>Riscos</i>

Fonte: Desenvolvido pela autora, inspirado em Bastchen (2018).

3.1.4 Etapa 4 – Priorização dos Critérios

Em seguida, a empresa deve priorizar e ordenar os critérios que estão motivando o projeto de investigação. Recomenda-se que essa etapa seja feita pelos chefes do projeto, que terão uma melhor visão sistemática e capacidade de avaliar de forma imparcial, evitando a influência dos interesses específicos de cada cliente.

Por exemplo, para um projeto que visa redução de custo, provavelmente os critérios relacionados a custo possuirão um peso maior do que os demais critérios para essa tomada de decisão. Dessa forma, parâmetros de escolha tal como investimento em ferramental, deverá contribuir mais para a tomada de decisão do que aspectos de eficiência do motor e de tempo de montagem.

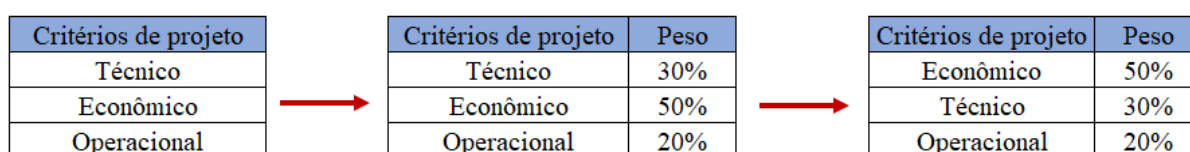
Bastchen (2018), em sua priorização de critérios, destaca:

Ainda, outro exemplo de definição de pesos pode ser relacionado com a garantia de lançamento do produto numa data estipulada, tal como o que acontece na linha automotiva, em que um produto deve ser lançado sem falta antes de uma feira nacional que envolve todos os concorrentes desse setor. Nesse caso, critérios como *time-to-market* têm um peso muito mais acentuado do que um critério de custo, pois a empresa irá preferir gastar um pouco mais em uma solução mais garantida do que economizar em uma solução mais barata e arriscar deixar de apresentar o seu produto nesse evento (p. 79).

Para executar essa etapa, adota-se a seguinte sequência de atividades: organizar a lista de interesses dos *stakeholders* em ordem decrescente de relevância para a decisão, posicionando os critérios mais importantes no topo e os menos significativos na base. Em seguida, distribui-se uma pontuação total de 100 pontos entre esses critérios, atribuindo pesos maiores aos mais relevantes e menores aos menos prioritários.

No exemplo apresentado neste capítulo, ilustrado na Figura 21, o critério econômico foi considerado o mais relevante, recebendo 50% dos pontos. Ao segundo critério em ordem de importância, o técnico, foi atribuído 30% do peso total. Essa distribuição deve ser realizada até que todos os critérios sejam ponderados, garantindo que a soma final seja exatamente 100%.

Figura 21 - Exemplo de definição de prioridade de critérios.



Fonte: Desenvolvido pela autora, inspirado em Bastchen (2018).

Conforme aumenta-se a lista de critérios, pode ser mais complexo e menos nítidas as prioridades para a empresa nesse momento, o que torna a atribuição de pesos muito interessante. Se a empresa tem como motivação outros temas não tratados neste trabalho, a priorização dos critérios em pesos também pode ser usada e adaptada conforme as demandas.

Em seguida, a empresa deve atribuir os parâmetros de escolha definidos previamente a cada um dos critérios de maneira a caracterizar esses parâmetros em grupos, conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação de critérios de projeto e parâmetros de escolha.

Critérios de projeto	Parâmetros
Econômico	Investimento
Técnico	Tamanho do motor
	Perdas totais
Operacional	Potencial de produtividade

Fonte: Desenvolvido pela autora.

A relação entre os critérios de projeto e os parâmetros de escolha deve-se à inclusão das variáveis do produto na tomada de decisão de forma sistemática. Ao traduzir as recomendações para o produto em indicadores através dos parâmetros de escolha, é possível identificar as características do produto que mais impactam no processo decisivo. Dessa forma, assim que feita a ligação dos critérios de projeto com essas variáveis, a escolha do processo de empacotamento pode ser ajustada de acordo com as necessidades dos *stakeholders* e priorização da equipe coordenadora. Essa flexibilidade permite que o processo de empacotamento seja escolhido com base em uma avaliação dinâmica e adaptável aos demais parâmetros e critérios não tratados neste trabalho.

Com os critérios priorizados, a última etapa avalia qual processo atende melhor às exigências e prioridades definidas.

3.1.5 Etapa 5 – Escolha do Processo

A Etapa 5 é a etapa de desfecho da tomada de decisão. Após definição dos elementos que estruturam esse *framework*, sendo eles a determinação dos parâmetros de escolha e o estabelecimento de critérios de projeto, se torna possível realizar a análise de forma sistemática. Além disso, as informações de cunho bibliográfico presentes neste trabalho,

aportam significativamente para a ponderação entre os processos ao conter argumentação de prós e contras bem embasadas.

A relação dos parâmetros de escolha identificados na Etapa 2 com a priorização de critérios de projeto na Etapa 4 fornece o caminho para a solução. A Etapa 5 visa então a seleção por exclusão de alternativas que não fazem sentido ou não são prioritárias em relação às variáveis evocadas anteriormente.

A recomendação deste procedimento é utilizar a Tabela 4, que contém os parâmetros de escolha e seus respectivos valores qualitativos para cada um dos diferentes processos de empacotamento analisados, e adicionar uma coluna extra para agrupar os critérios. Esta coluna adicional deve organizar os critérios em ordem de prioridade, contendo o critério de maior peso na primeira linha e o menos, na última, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela geral do *framework*.

Critérios de projeto	Parâmetros de escolha	Processos						
		Auto empacotamento	Colagem	Grampeamento	Soldagem a laser	Soldagem TIG	Soldagem MIG	Rebitagem
Econômico	Investimento	Baixo a médio	Baixo a médio	Baixo a médio	Alto	Baixo a médio	Médio a alto	Baixo a médio
Técnico	Tamanho do motor	Pequeno a médio	Pequeno a médio	Todos os tamanhos	Todos os tamanhos	Médio	Médio	Grande
Operacional	Perdas totais	Baixa a média	Baixa a média	Baixa a média	Baixa	Média	Média	Alta
	Potencial de produtividade	Alto	Médio	Alto	Médio a alto	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio

Fonte: Desenvolvido pela autora.

A tabela deve ser lida da esquerda para a direita, respeitando a ordem dos parâmetros conforme estabelecido pelos critérios. Assim, na linha de cada critério, as células que contêm os valores dos parâmetros considerados satisfatórios para o contexto da empresa devem ser destacadas com a cor verde, enquanto aquelas que não atendem aos requisitos devem ser desclassificadas e destacadas em vermelho. O resultado final será apresentado de forma semelhante à Tabela 9.

Tabela 9 - Exemplo de tabela geral do *framework* preenchida.

<i>Exemplo de aplicação para motores pequenos de altíssimo desempenho e de produção personalizada (pequeno lote)</i>								
Critérios de projeto	Parâmetros de escolha	Processos						
		Auto empacotamento	Colagem	Grampeamento	Soldagem a laser	Soldagem TIG	Soldagem MIG	Rebitagem
Econômico	Investimento	Baixo a médio	Baixo a médio	Baixo a médio	Alto	Baixo a médio	Médio a alto	Baixo a médio
Técnico	Tamanho do motor	Pequeno a médio	Pequeno a médio	Todos os tamanhos	Todos os tamanhos	Médio	Médio	Grande
Operacional	Perdas totais	Baixa a média	Baixa a média	Baixa a média	Baixa	Média	Média	Alta
	Potencial de produtividade	Alto	Médio	Alto	Médio a alto	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio



<i>Exemplo de aplicação para motores pequenos de altíssimo desempenho e de produção personalizada (pequeno lote)</i>								
Critérios de projeto	Parâmetros de escolha	Processos						
		Auto empacotamento	Colagem	Grampeamento	Soldagem a laser	Soldagem TIG	Soldagem MIG	Rebitagem
Econômico	Investimento	Baixo a médio	Baixo a médio	Baixo a médio	Alto	Baixo a médio	Médio a alto	Baixo a médio
Técnico	Tamanho do motor	Pequeno a médio	Pequeno a médio	Todos os tamanhos	Todos os tamanhos	Médio	Médio	Grande
Operacional	Perdas totais	Baixa a média	Baixa a média	Baixa a média	Baixa	Média	Média	Alta
	Potencial de produtividade	Alto	Médio	Alto	Médio a alto	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio

Fonte: Desenvolvido pela autora.

No exemplo citado brevemente na tabela, o objetivo foi ilustrar de antemão como será apresentado o resultado final. No exemplo, a soldagem a laser cumpriu com todos os parâmetros dessa situação hipotética. A coluna pode ter todos os parâmetros de escolha classificados como adequados perante um processo de empacotamento ou, alternativamente, o processo que atender ao maior número de parâmetros em comparação aos demais será o recomendado. Em situações de empate de três parâmetros, a decisão poderá ser baseada na adequação aos critérios de projeto de maior peso.

Além disso, em momentos em que houver empate de dois ou mais processos, significa que haverá processos igualmente interessantes a nível de recomendações definidas para o

produto e objetivos de projeto. Nesse caso, o nível de detalhamento das recomendações para o produto não foi suficiente para maximizar o potencial de utilização da ferramenta desenvolvida, ou seja, que a quantidade de parâmetros de escolha definidos foi insuficiente para a problemática, apresentando uma limitação deste trabalho. Quando o empate se dá sobre dois processos igualmente interessantes, a análise crítica em equipe ainda pode ser efetuada para aproveitar as indicações de melhor processo propostas pelo método. Seja para verificar se existe a necessidade de um novo parâmetro de escolha ou para analisar se com essas duas respostas é possível prosseguir com a tomada de decisão.

Tendo isso em vista, no capítulo 4, será apresentado um exemplo prático dessa aplicação, demonstrando como esse método facilita, simplificando a seleção dos processos mais adequados.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

No caso do empacotamento de estatores, o uso desse *framework* permite avaliar de forma objetiva não apenas o impacto técnico dos métodos disponíveis, mas também aspectos econômicos e produtivos, garantindo a escolha assertiva de um processo.

A metodologia utilizada neste trabalho foi inspirada em abordagens existentes na literatura, mas sua aplicação ao contexto de motores elétricos e processos de empacotamento é inovadora, pois não há registros anteriores dessa adaptação. A grande novidade está na forma como os processos foram organizados e parametrizados por variáveis, especialmente na Tabela 3, que resume de maneira clara e objetiva as principais características de cada processo, incluindo sua descrição e a argumentação de suas vantagens e desvantagens. Essa síntese, de fácil entendimento e aplicabilidade, não existia em estudos anteriores e oferece tanto uma base de dados valiosa, quanto um procedimento simplificado para auxiliar na tomada de decisões e nas futuras pesquisas sobre processos de empacotamento de lâminas de estatores.

Em conclusão, o *framework* proposto fornece uma abordagem informativa para a seleção de processos, promovendo uma tomada de decisão mais fundamentada.

4. APLICAÇÃO DO FRAMEWORK

Neste capítulo, será apresentada a aplicação prática do *framework* de tomada de decisão como parte da análise de um caso específico (*case test*), oferecendo suporte na avaliação de múltiplas variáveis e critérios. O objetivo principal é demonstrar como a estrutura proposta pelo procedimento pode auxiliar na identificação da melhor alternativa para um problema real. Para isso, foi utilizado o cenário de uma empresa fabricante de motores de indução que visa avaliar se o processo atual é o mais vantajoso e, se não for, qual seria o melhor processo.

4.1 CASE TEST

4.1.1 Perfil da empresa e contexto

O perfil da empresa caracteriza-se por ser uma organização de médio a grande porte, por volta de mil empregados, e seu principal cliente são empresas que fabricam equipamentos industriais (máquinas como bombas, compressores, etc.). A empresa desenvolveu seu próprio sistema de grampeamento para o empacotamento dos estatores. Esse processo, anteriormente inquestionado devido à sua elevada produtividade, passou a ser reavaliado após a empresa observar que sua empresa concorrente estava fabricando motores semelhantes utilizando a tecnologia de soldagem a laser. Essa mudança no panorama competitivo trouxe à tona a necessidade de analisar alternativas tecnológicas que poderiam oferecer vantagens em termos de eficiência ou custo-benefício.

Devido às restrições orçamentárias enfrentadas pela empresa, esta não pôde contratar uma consultoria especializada para auxiliar nesta reavaliação, nem realizar testes internos com diferentes processos ou enviar seu time de engenheiros a feiras de tecnologia. Assim a empresa optou por dedicar recursos apenas com pesquisas na literatura.

Nesse momento, surgiram alguns desafios. O trabalho era laborioso e as informações escassas devido à ausência de compartilhamento de dados, agravada pelo sigilo de trabalhos desenvolvidos por demais empresas e pela publicação descentralizada de artigos e estudos. Assim, as equipes de engenharia frequentemente enfrentavam frustrações relacionadas à dificuldade de se dedicar plenamente às pesquisas necessárias, o que resultava em decisões que, muitas vezes, careciam de um embasamento mais sólido.

4.1.2 Primeira etapa

Nesse contexto, a empresa fez o uso do *framework* proposto neste trabalho. Primeiro, informações foram levantadas como forma de buscar um entendimento sobre as necessidades e limitações dos possíveis processos de empacotamento de estatores na empresa além do processo atual.

A empresa constatou que, em alinhamento com seu modelo de negócio, a prioridade não está na maximização da eficiência dos motores, como ocorre em motores de alta performance, mas sim na redução do custo de produção, como é definido estrategicamente. Essa estratégia reflete as demandas do seu principal cliente, fabricante de equipamentos, que valoriza mais a acessibilidade econômica do produto do que características avançadas de desempenho. Dessa forma, para este cliente, a empresa pretende oferecer motores de classe de eficiência IE1 que atendam aos requisitos funcionais essenciais, mas que se destaquem pelo custo competitivo, viabilizando sua inserção em um mercado altamente sensível ao preço.

O motor de maior representatividade fabricado é um modelo de motor de indução trifásico de 30 kW (aproximadamente 40 cv), considerado um motor de médio porte, que representa aproximadamente 45% de toda a produção da empresa. O estator do motor mede 170 milímetros de altura e 250 milímetros de diâmetro de lâmina. Motores da mesma família podem variar polaridade de dois a oito polos e a altura do pacote, de 140 a 180 milímetros, restando ainda nessa faixa de valores, todos estampados com caudas de andorinha para o alojamento do grampo.

Após a estampagem, os pacotes de estatores, ainda com as lâminas soltas, são transportados ao processo de grampeamento onde serão acomodados, alinhados com pinos endireitadores e grampeados. A máquina de grampeamento possui capacidade de grampear todos os grampos de uma vez em uma velocidade de 3 segundos. Nessa operação, o gargalo do processo é o tempo de transporte e a atividade do operador.

No levantamento de informações sobre possíveis processos de empacotamento alternativos, foi identificado que a infraestrutura da fábrica inclui uma máquina de soldagem TIG capaz de operar em corrente alternada e contínua, com uma potência máxima de 300 amperes. Atualmente, esse equipamento é utilizado em processos de retoques ou na manutenção de componentes diversos que não incluem estatores. Além disso, trata-se de uma máquina manual e existe apenas um soldador treinado para usá-la.

Portanto, os processos já existentes na empresa são o grampeamento e a soldagem TIG. Para a implementação dos demais processos, seriam necessários investimentos que visem a integração dessas novas tecnologias na produção.

Na empresa, o processo decisório sobre uma mudança de engenharia começa com a identificação da necessidade de alteração no projeto e/ou processos, seja por questões de custo, qualidade ou inovação (como é neste caso). Essa demanda é levada para o chefe de seção ou de departamento, onde serão realizadas as discussões iniciais com engenheiros de produto e de industrialização para avaliar as possíveis modificações, riscos e impactos. Após esse momento, na elaboração da proposta para a alta direção, a decisão será tomada, pois é nesse momento que a viabilidade técnica da mudança de engenharia será definida.

Então, a proposta é levada à alta direção, que considera os objetivos estratégicos da empresa e as necessidades do mercado, como a atribuição de investimentos, o lançamento de um novo produto e o balanço do diferencial competitivo.

4.1.3 Segunda etapa

Nessa etapa, é realizada a reflexão das recomendações, ou diretrizes, que definirão como deve ser o produto, neste caso, quais devem ser as características do motor mais representativo da empresa. A partir dessas informações será possível estabelecer as variáveis-chave que serão usadas em seguida como parâmetros ou indicadores da escolha do processo de empacotamento.

Tendo em vista o contexto apresentado na Etapa 1, algumas das recomendações para o produto deste motor podem ser:

- a) Custo de fabricação: devido ao seu modelo de negócio, o custo de fabricação deve ser mínimo para reduzir também o custo de venda e alcançar preços altamente competitivos em relação aos seus concorrentes;
- b) Atendimento às normas que delimitam a eficiência mínima a respeitar: embora o foco não esteja na produção de motores de alta eficiência, é imprescindível que o produto atenda aos padrões regulamentares, visto que seu não cumprimento pode levar à inviabilização comercial, multas ou sanções;
- c) Dimensional do produto: irá determinar os requisitos das ferramentas de corte das lâminas (matrizes e estampas) e direcionar o processo de industrialização.

Nesse caso, para um pacote de estator de $\varnothing 250 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$;

- d) Reprodutibilidade: diz respeito à consistência do produto no mercado, para que mantenha o mesmo padrão de desempenho e atenda às expectativas dos clientes, bem como possibilitar produção em larga escala e minimizar custos com retrabalho.

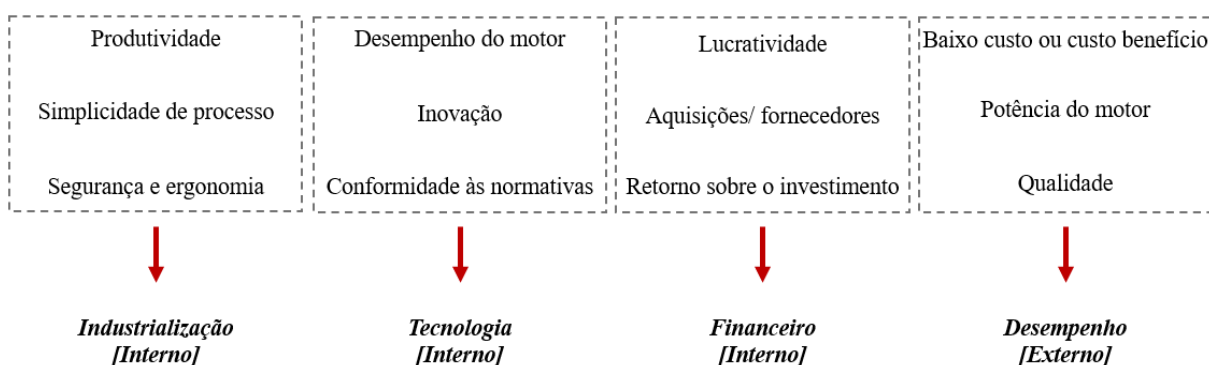
A partir dessas diretrizes é possível definir os principais parâmetros que vão guiar a escolha e listá-los de maneira não exaustiva. Como já sugerido na descrição do passo a passo do *framework* no capítulo 3, os parâmetros abaixo traduzem essas especificações:

- I. Tamanho do motor (c));
- II. Perdas totais (b));
- III. Investimento (a));
- IV. Potencial de produtividade (d)).

4.1.4 Terceira etapa

Na terceira etapa, os interesses dos stakeholders são mapeados. A motivação global da investigação de processos de empacotamento veio da competitividade comercial da empresa. Tendo isso em vista, um *brainstorm* com diferentes áreas da empresa foi realizado e as três principais motivações dos clientes internos foram mapeadas na Figura 22 como também as características do perfil do cliente externo que já são conhecidas na empresa.

Figura 22 - Interesses dos clientes internos e externos.



Fonte: Desenvolvido pela autora.

A partir desse mapeamento, foi possível identificar três critérios envolvidos diretamente no projeto, que são usados para o desenvolvimento do produto em diferentes âmbitos (vistos acima), sendo eles:

- a) Critério operacional;
- b) Critério técnico;
- c) Critério econômico.

4.1.5 Quarta etapa

Após o mapeamento dos critérios na etapa anterior, as equipes envolvidas no projeto avaliaram a relevância de cada critério identificado. Essa discussão deve priorizar critérios que têm maior impacto nos objetivos do projeto. Por exemplo, alguns critérios podem impactar diretamente a aquisição de novas tecnologias por limitações orçamentárias, enquanto outros afetam a integridade do motor e nível de qualidade.

Dessa forma, a empresa elencou os critérios através de pesos, como pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 - Critérios de projeto e pesos.

Critérios de projeto	Peso
Econômico	50%
Operacional	30%
Técnico	20%

Fonte: Desenvolvido pela autora.

A priorização do critério econômico com um peso de 50% reflete a principal demanda do cliente externo, que valoriza o baixo custo do produto final, e do cliente interno, que valoriza a lucratividade. Nesse contexto, será fundamental reduzir ao máximo os custos de produção para atender a um mercado sensível ao preço, onde a competitividade está diretamente ligada à oferta de produtos mais acessíveis.

O critério operacional com um peso de 30% revela uma ligeira priorização em relação ao critério técnico, pois, embora a qualidade técnica seja importante, a operação eficiente do processo tem um impacto mais direto na produtividade e no atendimento das necessidades do cliente. A prioridade operacional reflete a busca da empresa por soluções que garantam um desempenho estável, fácil de implementar e com menor complexidade de operação. Em contraste, o critério técnico, com 20%, ainda é relevante, mas não é visto como decisivo quando comparado aos aspectos econômicos e operacionais.

Em seguida, os parâmetros de escolha definidos na Etapa 2 foram relacionados aos critérios de projeto, conforme mostrado na Tabela 11. Isso permitiu entender quais as características do produto final desejado (motor de indução) podem servir como variável quando deparadas à uma situação de mudança de engenharia, nesse caso, à análise dos diferentes processos de empacotamento.

Tabela 11 - Priorização de critérios de projeto e parâmetros de escolha.

Peso	Crítérios de projeto	Parâmetros
50%	Econômico	Investimento
30%	Operacional	Potencial de produtividade
20%	Técnico	Tamanho do motor
		Perdas totais

Fonte: Desenvolvido pela autora.

Ao aplicar essa etapa do *framework*, ficou evidente que o critério mais importante na priorização foi o investimento baixo, posicionado no topo da hierarquização. Essa escolha reflete a necessidade de minimizar custos de implementação de novos processos. Essa priorização demonstra que, embora as perdas sejam relevantes, sua influência no resultado final foi menor em comparação a fatores como investimento e produtividade, apontando que o foco permanece em soluções mais econômicas e produtivas.

4.1.6 Quinta etapa

Com a Tabela 11 é possível identificar a ordem de importância dos parâmetros de escolha para os processos de empacotamento. O investimento é o critério mais importante, ocupando a primeira posição na tabela, o que indica que o custo do processo deve ser mantido o mais baixo possível. Em seguida, o potencial de produtividade, que tem a segunda maior importância, deve ser considerado médio a alto, garantindo que o processo escolhido não só seja econômico, mas também eficiente em termos de produção. Por último, parâmetros como o tamanho do motor e as perdas totais têm um peso menor, representando apenas 20% da decisão final. Isso sugere que, embora importantes, esses fatores não serão determinantes na escolha do processo.

Em síntese, será buscado um processo que atenda os seguintes parâmetros:

- a) Investimento: baixo;
- b) Perdas totais: média ou alta, segundo a classe de eficiência mínima IE1;
- c) Potencial de produtividade: alto;
- d) Tamanho do motor: médio.

O passo final consiste em preencher a tabela geral para analisar quais processos atendem aos parâmetros estabelecidos, garantindo que a escolha final seja a mais adequada. O resultado será indicado pela quantidade predominante de células verdes, que atendem aos parâmetros, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Tabela geral do *framework* preenchida.

Critérios de projeto	Parâmetros de escolha	Processos						
		Auto empacotamento	Colagem	Grampeamento	Soldagem a laser	Soldagem TIG	Soldagem MIG	Rebitagem
Econômico	Investimento	Baixo a médio	Baixo a médio	Baixo a médio	Alto	Baixo a médio	Médio a alto	Baixo a médio
Operacional	Perdas totais	Baixa a média	Baixa a média	Baixa a média	Baixa	Média	Média	Alta
	Potencial de produtividade	Alto	Médio	Alto	Médio a alto	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio
Técnico	Tamanho do motor	Pequeno a médio	Pequeno a médio	Todos os tamanhos	Todos os tamanhos	Médio	Médio	Grande



Critérios de projeto	Parâmetros de escolha	Processos						
		Auto empacotamento	Colagem	Grampeamento	Soldagem a laser	Soldagem TIG	Soldagem MIG	Rebitagem
Econômico	Investimento	Baixo a médio	Baixo a médio	Baixo a médio	Alto	Baixo a médio	Médio a alto	Baixo a médio
Operacional	Perdas totais	Baixa a média	Baixa a média	Baixa a média	Baixa	Média	Média	Alta
	Potencial de produtividade	Alto	Médio	Alto	Médio a alto	Baixo a médio	Baixo a médio	Médio
Técnico	Tamanho do motor	Pequeno a médio	Pequeno a médio	Todos os tamanhos	Todos os tamanhos	Médio	Médio	Grande

Fonte: Desenvolvido pela autora.

O parâmetro de escolha com maior prioridade, representando 50%, foi o investimento. Com base nesse critério, os processos de soldagem a laser e soldagem MIG foram descartados devido ao alto custo de implementação.

Os parâmetros de limite de perdas totais permitidas e potencial de produtividade do processo, tiveram uma prioridade de 30%. De maneira a justificar o investimento da tecnologia, todos os processos, com exceção da soldagem a laser, atendem ao limite de perdas totais estabelecido. A soldagem a laser é capaz de fornecer alta eficiência ao motor devido a minimização dessas perdas, porém a um custo de investimento de processo elevado, o que não condiz com o parâmetro anterior.

Em seguida, ao comparar as produtividades de processos, aqueles que apresentaram uma produtividade alta foram selecionados. Nesse momento, os processos: colagem, soldagem TIG e rebitagem foram desclassificados.

O último requisito analisado foi o tamanho dos motores que cada processo poderia atender. Nesse critério, todos os processos, com exceção da rebitagem, que é adequada apenas para motores de grande porte, cumpriram com esse parâmetro.

Uma vez que todas as linhas de parâmetros foram preenchidas com o código de cores verde e vermelho, foi possível identificar dois processos que satisfazem as recomendações para o produto e os critérios priorizados do projeto, o processo de grampeamento e o auto empacotamento.

Como visto anteriormente no capítulo 3, casos de empates podem ser tratados de diferentes formas, ou realizando a escolha a partir do critério de maior peso e/ou motivando uma análise crítica da equipe. Na situação deste *case test*, foi definido como a maior parte da motivação com o projeto (peso de 50%) o baixo custo necessário de produção. Para a implementação do processo de auto empacotamento apesar de possuir custo de produção baixo a médio, a análise de retorno sobre o investimento do processo deve ser meticulosamente estudada além deste trabalho, que não fornece a estrutura para esse tipo de foco, uma vez que ele está empatado com o processo de grampeamento.

O critério econômico impacta significativamente na busca por novas tecnologias e processos, visto que a empresa segue buscando a alternativa de maior lucratividade, porém que indica que permanecer utilizando o processo atual de grampeamento seria a escolha mais segura e econômica. A partir dessa análise, para um motor da empresa concorrente que compete com o motor tratado neste *case test*, é possível que a empresa concorrente esteja tentando alcançar novos mercados fabricando motores mais eficientes e mais caros, não

atendendo mais então o cliente final que busca o melhor compromisso entre custo reduzido e desempenho satisfatório.

Com base na análise de todos os critérios, conclui-se que o grampeamento, processo já utilizado pela empresa, era de fato a melhor opção. A aplicação do *framework* validou a escolha inicial, comprovando sua adequação às prioridades e exigências estabelecidas, de maneira fundamentada.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu e testou um *framework* estruturado para apoiar a tomada de decisão em processos de empacotamento de estatores de motores elétricos. O estudo abordou os principais processos utilizados pela indústria, destacando suas características, vantagens e limitações, e sistematizou critérios técnicos, operacionais e econômicos para orientar escolhas mais assertivas.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

Os resultados obtidos demonstraram que o *framework* proposto oferece uma ferramenta prática e eficaz para reduzir a subjetividade na escolha de processos de empacotamento. Ele integra informações técnicas e parâmetros críticos, como perdas elétricas, produtividade e custos, permitindo uma análise mais objetiva e fundamentada. A aplicação do *framework* em um estudo de caso simulado evidenciou sua capacidade de adaptar-se a um cenário industrial, centralizando informações relevantes e fornecendo suporte à decisão.

Esses resultados têm o potencial de impactar significativamente a indústria de motores elétricos, promovendo uma tomada de decisão mais qualificada e estratégica. Ao fornecer uma ferramenta que reduz incertezas e otimiza escolhas, o *framework* proposto colabora diretamente para a competitividade das empresas no mercado. Além disso, sua aplicação favorece o avanço tecnológico no setor, alinhando-se às demandas por sustentabilidade e inovação, e promove o desenvolvimento de conhecimento técnico que pode beneficiar não apenas a indústria, mas a sociedade como um todo.

Também, este trabalho contribui para a literatura ao propor uma abordagem inovadora que organiza e sistematiza dados de processos de empacotamento de estatores. A simplicidade e flexibilidade da metodologia a tornam acessível para empresas de diferentes portes, especialmente no contexto brasileiro, onde os recursos para inovação podem ser limitados.

5.2 LIMITAÇÕES

Apesar das contribuições, o estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. A avaliação do *framework* foi realizada com base em dados disponíveis na literatura e em um estudo de caso simulado, não contemplando a aplicação em cenários reais de produção. Além disso, a análise concentrou-se em motores de indução, limitando sua aplicabilidade a outros tipos de motores ou processos industriais.

Outra limitação está relacionada à falta de testes experimentais para validar as recomendações do *framework*, o que restringe a generalização dos resultados. Estudos adicionais são necessários para expandir a abrangência e validar a eficácia do método em diferentes contextos.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações identificadas, recomenda-se:

1. A aplicação do *framework* em cenários reais, avaliando seu desempenho em diferentes indústrias e tipos de motores;
2. O desenvolvimento de estudos experimentais para validar quantitativamente as recomendações propostas;
3. A inclusão de critérios adicionais, como impacto ambiental e análise de risco, para ampliar a abrangência da metodologia;
4. A utilização de ferramentas computacionais para automatizar a aplicação do *framework*, facilitando sua adoção em ambientes industriais dinâmicos.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *framework* desenvolvido neste trabalho representa um passo importante para melhorar a eficiência e a assertividade na escolha de processos de empacotamento de estatores. Ao fornecer uma abordagem sistemática e adaptável, ele contribui para aumentar a competitividade das empresas brasileiras e promover a eficiência energética na indústria. A continuidade deste estudo, por meio de aplicações práticas e validações experimentais, poderá consolidar ainda mais sua relevância e impacto no setor industrial.

6. REFERÊNCIAS

BASTCHEN, G. **Método de apoio à tomada de decisão dentre múltiplas alternativas considerando fatores de risco no contexto de uma mudança de engenharia.** *Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 2018.

CEZÁRIO, C. A.; VERARDI, M.; BORGES, S. S.; SILVA, J. C.; OLIVEIRA, A. A. M. **Transient Thermal Analysis Of An Induction Electric Motor.** In: *18th International Congress of Mechanical Engineering*. Ouro Preto, MG, 2005.

FRANCISCO, A. M. S. **Motores de Indução Trifásicos.** V0, p. 11, 2006.

IEC 60034-30-1:2014. **Eficiência energética de motores elétricos - Parte 30-1: Requisitos de desempenho para motores de indução de baixa tensão.** *International Electrotechnical Commission (IEC)*, 2014.

IMAMORI, S.; STEENTJES, S.; HAMEYER, K. **Influence of interlocking on magnetic properties of electrical steel laminations.** *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 53, p. 1–4, 2017.

JÚNIOR, J. C. M. V. **ELETRICIDADE II - AULA 10.** *Universidade de São Paulo*, 2018.

KHAN, R.; MOHD YOUSOF, M. F.; ABD-RAHMAN, R.; AZIS, N. **Sweep frequency response analysis of three-phase induction motors using high frequency circuit model.** *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, v. 10, 2024

KIM, D.; CHOI, J.; CHUN, Y.; KOO, D.; HAN, P. **The study of the stray load loss and mechanical loss of three-phase induction motor considering experimental results.** *Journal of Electrical Engineering and Technology*, v. 9, n. 1, p. 121-126, 2014.

LAMPRECHT, E.; HOMME, M.; ALBRECHT, T. **Investigations of Eddy Current Losses in Laminated Cores Due to the Impact of Various Stacking Processes.** *2nd International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, Germany*, 2012.

LAMNOW. **Several methods of motor core lamination stacking.** Disponível em: <https://lamnow.com/several-methods-of-motor-core-lamination-stacking/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

LESHEM, S.; TRAFFORD, V. **Overlooking the conceptual framework.** *Innovations in Education and Teaching International*, v. 44, n. 1, p. 93-105, 2007.

LEUNING, N.; STEENTJES, S.; HAMEYER, K.; GERHARDS, B.; REISGEN, U. **Analysis of a novel laser welding strategy for electrical steel laminations.** *7th International Electric Drives Production Conference (EDPC) Wurzburg, Germany*, 2017.

LIANG, Y.; YU, H.; BIAN, X. **Finite-Element Calculation of 3-D Transient Electromagnetic Field in End Region and Eddy-Current Loss Decrease in Stator End Clamping Plate of Large Hydrogenerator.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, 2015.

MACHADO, L. D. S. **Estudo comparativo da influência dos processos de empacotamento de estatores sendo eles: grampeamento, soldagem a laser, soldagem TIG e MIG; na eficiência do motor.** *Relatório interno de CEO - WEG Motores, Jaraguá do Sul, SC*, 2022.

MAKHETHA, E.; MUTEBA, M.; NICOLAE, D. V. **Effect of Rotor Bar Shape and Stator Slot Opening on the Performance of Three Phase Squirrel Cage Induction Motors with Broken Rotor Bars.** *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2019.

NETO, C. H. M. **SOLDAGEM: automatização do processo MIG/MAG.** *TCC de Engenharia Mecânica, Repositório UNIS/MG*, 2012.

PRADO, D. C. S. **Método de determinação de perdas por histerese nos materiais magnéticos submetidos a formas de onda de indução magnética com harmônicas.** *Repositório UFSC*, 2012.

PUGSTALLER, R.; WALLNER, G. M.; STRAUß, B.; FLUCH, R. **Advanced characterization of laminated electrical steel structures under shear loading.** *Journal of Adhesion*, v. 95, p. 834–848, 2018.

ROÇAS, A. A. C. **Análise de qualidade e processos de bobinagem de motores de indução de baixa tensão.** *Repositório Aberto da Universidade de Porto*, 2012.

SCHADE, T.; RAMSAYER, R. M.; BERGMANN, J. P. **Laser Welding of Electrical Steel Stacks: Investigation of the Weldability.** *Corporate Sector Research and Advance Engineering, Robert Bosch GmbH*, 2014.

SCHOPPA, A.; SCHNEIDER, J.; WUPPERMANN, C.-D.; BAKON, T. **Influence of welding and sticking of laminations on the magnetic properties of non-oriented electrical steels.** *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 254–255, p. 367-369, 2003.

SHIFAT, T. A.; HUR, J. W. **An effective stator fault diagnosis framework of BLDC motor based on vibration and current signals.** *IEEE Access*, v. 8, p. 106968-106981, 2020.

SINGH, A. K.; DEY, V.; RAI, R. N. **Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review).** *5th International Conference of Materials Processing and Characterization*, 2017.

SUNDARIA, R.; DAEM, A.; OSEMWINYEN, O.; LEHIKONEN, A.; SERGEANT, P.; ARKKIO, A.; BELAHCEN, A. **Effects of stator core welding on an induction machine – Measurements and modeling.** *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020.

UENO, S. **Vector magnetic characteristics of ultra-thin electrical steel sheet for development of high-efficiency high-speed motor.** *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 53, n. 11, p. 1-4, 2017.

SLUIS, V. D. F.; SEITZINGER, B.; DE VET, S.; ALEXANDROV, O.; KRUIJSWIJK, E.; HERZBERGER, A. **Optimization of Laminated Stack Solutions for Electric Motors in Electrified Vehicles.** *SAE Technical Paper*, 2024.

VEGELJ, D.; ZAJEC, B.; KANITZ, A.; MOŽINA, J. **Adaptive pulsed-laser welding of electrical laminations.** *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, v. 60, 2014.

VIEIRA, F. D. **Desenvolvimento de tocha e de procedimento para a soldagem MIG/MAG em chanfro estreito de peças espessas em aço ao carbono.** *Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina*, 2012.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. **Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems.** *International Energy Agency*, 2011.

WANG, H.; ZHANG, Y.; LAI, X. **A model for the torsion strength of a laser-welded stator.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 223, p. 319–327, 2015.

WANG, H.; ZHANG, Y.; LAI, X. **Effects of interfaces on heat transfer in laser welding of electrical steel laminations.** *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 90, p. 665–677, 2015.

WANG, H.; ZHANG, Y.; LI, S. **Laser welding of laminated electrical steels.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 230, p. 99–108, 2016.

WANG, H.; ZHANG, Y. **Modeling of eddy-current losses of welded laminated electrical steels.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 64, p. 2992–3000, 2017.

WELLSTAMP. **Motor transformer laminations.** *Disponível em: <https://www.wellstampindia.com/motor-transformer-laminations.html>*. Acesso em: 6 nov. 2024.

XIA, C.; WANG, H.; YI, W.; WANG, H. **Joining of the laminated electrical steels in motor manufacturing: a review.** *State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, School of Materials Science & Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China*, 2020.

ZHANG, Y.; WANG, H.; CHEN, K.; LI, S. **Comparison of laser and TIG welding of laminated electrical steels.** *Journal of Materials Processing Tech.*, 2017.

ZHANG, H.; WANG, Y.; LI, J. **Analysis of Joule losses in stator windings of induction motors.** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 36, n. 4, p. 1021-1030, 2021.